

Keyifli Okumalar Dileriz

Binlerce kategoride milyonlarca PDF e-kitap, ders kitapları, dergiler ve romanlara platformumuz üzerinden ücretsiz ulaşabilirsiniz.

RESMİ WEB SİTEMİZ

<https://rantey.org>

Yedek ve Duyuru Kanallarımız

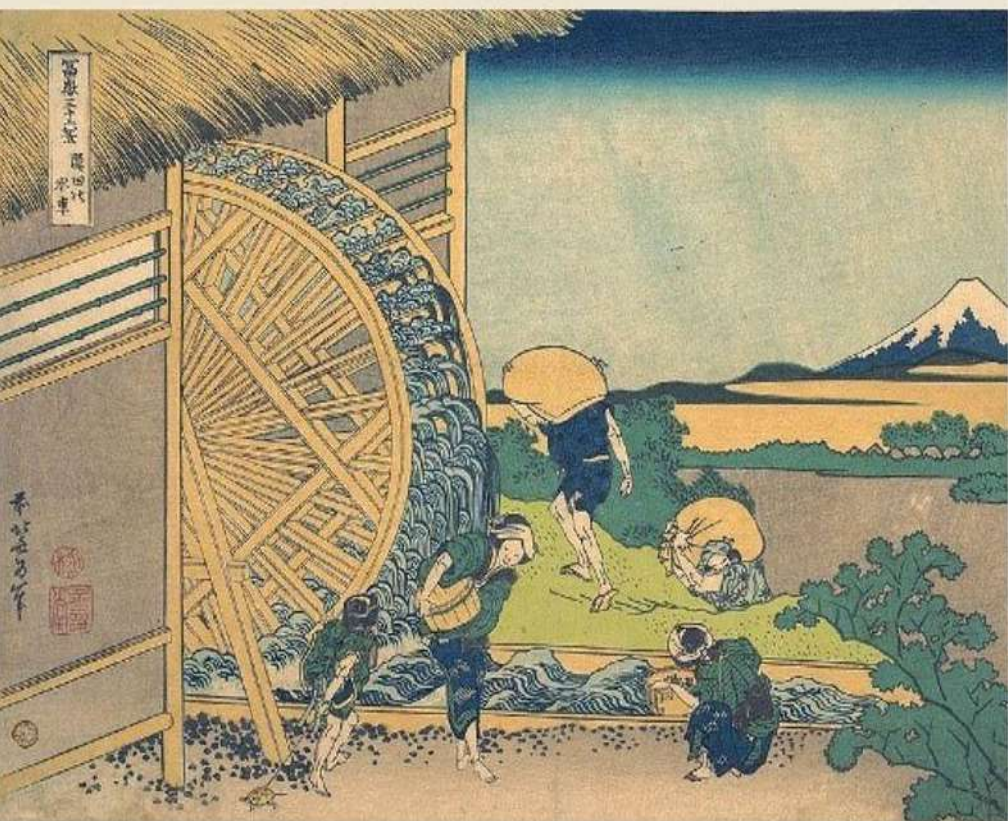
Sitemize erişim engeli gelmesi veya adres değişikliği durumunda aşağıdaki kanallardan güncel giriş adresine erişebilirsiniz:

- Telegram: <https://t.me/birkitapbir>
- WhatsApp Kanalımız : <https://whatsapp.com/channel/0029VbDHv8uE50Us4lvMoc0Y>

VACLAV SMIL

ENERJİ VE MEDENİYET

BİR TARİHÇE



VACLAV SMIL

Çek asıllı Kanadalı bilim insanı Vaclav Smil, İkinci Dünya Savaşı sırasında, o dönemde Bohemya ve Moravya Protektorası'na bağlı olan, bugün ise Çekya topraklarındaki Pilsen'de doğdu (1943). Prag Karl Üniversitesi'nde fen bilimleri öğreniminden sonra coğrafya alanında doktorasını ABD'de Pennsylvania Eyalet Üniversitesi'nde tamamladı. Çekoslovakya'nın 1968'de Sovyetler Birliği tarafından işgaliyle önce 1969'da ABD'ye, ardından 1972'de Kanada'ya göç etti. Uzun yıllar Kanada'da Manitoba Üniversitesi'nde görev yapan ve buradan emekli olan Smil'in enerji, çevre, gıda, nüfus ve kamu yararına politikalar üzerine geniş bir yelpazede disiplinlerarası çalışmaları bulunuyor. Bu alanlarda kaleme aldığı makaleleri ve kitapları çeşitli dillere çevrildi. Dünyanın pek çok yerinde yüzlerce konferans vermiş olan Smil, Kanada Bilimler Akademisi üyesidir. Kamuoyunun bilim ve teknolojiyi daha iyi kavramasını sağlayan çalışmalarıyla Amerikan Bilimsel İlerleme Topluluğu (American Association for the Advancement of Science) Ödülü'nü 2000 yılında alan Smil, ABD dışından bu ödüle layık görülen ilk kişi olmuştur.



İSTANBUL BİLGİ ÜNİVERSİTESİ YAYINLARI

VACLAV SMİL
ENERJİ VE MEDENİYET
BİR TARİHÇE
ÇEVİREN EBRU KILIÇ

İSTANBUL BİLGİ ÜNİVERSİTESİ YAYINLARI 708
BİLGİ VE TOPLUM 19

ENERGY AND CIVILIZATION
A HISTORY

Copyright © 2017 Massachusetts Institute of Technology (The MIT Press).
Bu kitabın telif hakları Kayı Ajans aracılığıyla alınmıştır.

ISBN 978-605-399-452-7

1. BASKI İSTANBUL, ŞUBAT 2023

KAPAK RESMİ ONDEN'DE SU DEĞİRMENİ (HOKUSAI, 36 FUJI DAĞI MANZARASI).

© İSTANBUL BİLGİ ÜNİVERSİTESİ İKTİSADİ İŞLETMESİ
YAZIŞMA ADRESİ: HACIAHMET MAHALLESİ, PİR HÜSAMETTİN SOKAK, NO:20, 34440, BEYOĞLU / İSTANBUL
TELEFON: 0212 311 64 63 - 311 61 34 / FAKS: 0212 216 24 15 • SERTİFİKA NO: 51672

www.bilgiyay.com
E-POSTA yayin@bilgiyay.com
DAĞITIM dagitim@bilgiyay.com

YAYINA HAZIRLAYAN SİLA ARLI - CEM TÜZÜN
TASARIM MEHMET ULUSEL
DİZGİ VE UYGULAMA GÖRKEM DİDEM ÖZTUNCER
DÜZELTİ SEMİH ÖNCEL
DİZİN ERVA AKÇA

BASKI VE CİLT VİZYON BASİMEVİ KAĞITÇILIK MATBAACILIK VE YAYINCILIK SAN. TİC. LTD. ŞTİ.
BEYLİKDÜZÜ O.S.B. MAH. ORKİDE CAD. NO:1/Z BEYLİKDÜZÜ İSTANBUL
TELEFON: 0212 671 61 51 / FAKS: 0212 671 61 50 • SERTİFİKA NO: 52098

İSTANBUL BİLGİ UNIVERSITY LIBRARY CATALOGING-IN-PUBLICATION DATA
İSTANBUL BİLGİ ÜNİVERSİTESİ KÜTÜPHANESİ KATALOGLAMA BÖLÜMÜ TARAFINDAN KATALOGLANMIŞTIR.

Names: Smil, Vaclav, author. | Kılıç, Ebru, translator.
Title: Enerji ve medeniyet : bir tarihçe / Vaclav Smil ; çeviren Ebru Kılıç.
Description: İstanbul : İstanbul Bilgi Üniversitesi Yayınları, 2023. | Includes bibliographical references and index.
Series: İstanbul Bilgi Üniversitesi Yayınları; 708. Bilgi ve Toplum; 19.
Identifiers: ISBN: 9786053994527 (paperback)
Subjects: LCSH: Power resources --History. | Power resources --Social aspects. | Technology and civilization. | Energy consumption --Social aspects.
Classification: LCC: TJ163.5 .S62319 2023

VACLAV SMIL

**ENERJİ VE MEDENİYET
BİR TARİHÇE**

ÇEVİREN
EBRU KILIÇ

İçindekiler

ix Önsöz ve Teşekkür

1 BİRİNCİ BÖLÜM Enerji ve Toplum

5 Akışlar, Birikimler ve Kontroller

8 Kavramlar ve Ölçüler

16 Karmaşıklıklar ve Engeller

21 İKİNCİ BÖLÜM Tarih Öncesinde Enerji

28 Toplayıcı Topluluklar

42 Tarımın Kökenleri

49 ÜÇÜNCÜ BÖLÜM Geleneksel Tarım

53 Ortak ve Özgün Yönler

53 Tarla İşleri

58 Tahılların Hâkimiyeti

64 Ekim Döngüleri

66 Yoğunlaşmaya Giden Yollar

67 Yüklü Hayvanlar

76 Sulama

83 Gübreleme

87 Ekinlerin Çeşitliliği

88 Israrla Varlığını Sürdürmek ve Yenilik

89 Antik Mısır

92 Çin

99 Mezoamerika Kültürleri

102 Avrupa

109 Kuzey Amerika

114 Geleneksel Tarımın Sınırları

115 Kazanımlar

121 Beslenme

124 Sınırlar

133 DÖRDÜNCÜ BÖLÜM Sanayi Öncesi Dönemde Asli İtici Güçler ve Yakıtlar

- 137** Asli İtici Güçler
 - 138** Hayvan gücü
 - 152** Su Gücü
 - 163** Rüzgâr Gücü
- 168** Biyokütle Yakıtları
 - 169** Odun ve Odun Kömürü
 - 174** Ekin Artıkları ve Tezek
- 176** Hane İhtiyaçları
 - 177** Yiyeceklerin Hazırlanması
 - 180** Isı ve ışık
- 183** Ulaştırma ve İnşaat
 - 184** Karada Hareket Etmek
 - 194** Kürekli Gemiler ile Yelkenli Gemiler
 - 203** Binalar ve Yapılar
- 212** Metalurji
 - 214** Demir Dışı Metaller
 - 218** Demir ve Çelik
- 224** Savaşlar
 - 225** Hayvansal Enerjiler
 - 230** Patlayıcılar ve Tüfekler

233 BEŞİNCİ BÖLÜM Fosil Yakıtlar, Asli Elektrik ve Yenilenebilir Enerjiler

- 236** Büyük Dönüşüm
 - 238** Kömür Çıkarmanın Başlangıcı ve Yaygınlık Kazanması
 - 242** Odun Kömüründen Kok Kömürüne
 - 244** Buhar Makineleri
 - 254** Petrol ve İçten Yanmalı Motorlar
 - 264** Elektrik

- 275** Teknik Yenilikler
- 279** Kömürler
- 284** Hidrokarbonlar
- 290** Elektrik
- 294** Yenilenebilir Enerjiler
- 299** Ulaştırma Aslı İtici Güçler

305 ALTINCI BÖLÜM Fosil Yakıtlara Bağlı Medeniyet

- 307** Görülmemiş Güç ve Kullanım Biçimleri
- 315** Tarımda Enerji
- 322** Sanayileşme
- 334** Ulaştırma
- 344** Enformasyon ve İletişim
- 352** Ekonomik Büyüme
- 359** Sonuçlar ve Kaygılar
- 360** Kentleşme
- 364** Hayat Kalitesi
- 372** Siyasal Etkiler
- 377** Silahlar ve Savaşlar
- 390** Çevresel Değişiklikler

395 YEDİNCİ BÖLÜM Dünya Tarihinde Enerji

- 396** Büyük Enerji Kullanım Örüntüleri
- 398** Enerji Çağları ve Geçiş Dönemleri
- 408** Uzun Vadeli Eğilimler ve Maliyetlerin Düşmesi
- 417** Değişmeyen Ne Olmuştur?
- 427** Belirlenimcilik ve Seçim Arasında
- 429** Enerji İhtiyaçları ve Kullanımlarının Zorunlu Yönleri
- 436** Kontrollerin Önemi
- 441** Enerji Açıklamalarının Sınırları

455 Ekler

- 455** Temel Ölçüler
- 457** Bilimsel Birimler, Katları ve Altçarpanları

459 Enerjiyle İlgili Gelişmelerin Kronolojisi

470 Tarihte Enerji

475 Kaynakça Notları

479 Kaynakça

525 İsim Dizini

529 Genel Dizin

Önsöz ve Teşekkür

*E*nergy in World History'yi yazmayı Temmuz 1993'te bitirdim, kitap 1994'te çıktı ve yirmi yıl boyunca yeni baskıları yapıldı. 1994'ten beri enerji araştırmaları büyük bir genişleme döneminden geçiyor, ben de bu ilk kitabın üstüne açıkça enerji meseleleriyle ilgili dokuz kitap ile önemli bir bölümü enerjiyi konu alan bir düzine disiplinlerarası kitap daha yayımladım. Hal böyle olunca, bu büyüleyici konuya yeniden dönmeye karar verdiğimde yüzeysel bir güncellemenin işe yaramayacağı açıklık kazanmıştı. Sonuçta bu, yeni bir başlığı olan, yepyeni bir kitaptır: Metin orijinal metinden yaklaşık yüzde 60 daha uzundur, resim sayısı yüzde 40, dipnot sayısı iki kat daha fazladır. Kitabın içine serpiştirilmiş kutularda şaşırtıcı bazı hesaplamaların yanı sıra önemli konular ve temel tablolarla ilgili birçok ayrıntılı açıklama yer alır. Klasik eserlerden (Apuleius, Lucretius, Plutarkos) tutun, Braudel, Eden, Orwell ve Senancour gibi on dokuzuncu ve yirminci yüzyılda yaşamış gözlemcilerin eserlerine varıncaya dek çok çeşitli kaynaklardan alıntılar yaptım. Winnipeg'deki Bounce Design grafikleri güncelledi ve yenilerini hazırladı, Ian Saunders ve Anu Horsman Seattle'da Corbis'ten yirmi dört tane arşiv fotoğrafı ayarladı. Bu tür disiplinlerarası çalışmalarda her zaman olduğu gibi, yüzlerce tarihçi, bilim insanı, mühendis ve ekonomistin çalışmaları olmasaydı bu kitap da mümkün olmazdı.

Winnipeg, Ağustos 2016

BİRİNCİ BÖLÜM

Enerji ve Toplum

Enerji evrensel olan yegâne değer birimidir: Herhangi bir şeyin yapılabilmesi için, enerjinin birçok biçiminden birinin dönüştürülmesi gerekir. Bu dönüşümlerin evrendeki tezahürleri galaksilerin kendi etraflarındaki muazzam dönüşlerinden yıldızlardaki termonükleer tepkimelere, dünyadaki tezahürleriyse levha tektoniğinin okyanus tabanlarını ayıran, yeni dağ sıraları yükselten, kara oluşturan kuvvetlerinden minik yağmur damlalarının birikimsel aşındırıcı etkilerine uzanır. (Romalıların dediği gibi, *gutta cavat lapidem non vi, sed saepe cadendo* – Bir damla su bir taşı kuvvetle değil, sürekli damlayarak deler.) Güneş enerjisi fotosentez yoluyla bitki biyokütlesine çevrilmeseydi, yeryüzünde hayat (Dünya dışından anlamlı bir sinyal alabilmek için yıllardır devam eden girişimlere karşın, hâlâ evrende bildiğimiz tek hayattır) imkânsız olurdu. İnsanların hayatta kalabilmesi, bu dönüşüme ve medeni varoluşları için daha birçok enerji akışına dayanır. Richard Adams'ın (1982, 27) dediği gibi:

Hummalı bir biçimde düşünceler üretebiliriz, ama onları eyleme dönüştürmek için gerekli kaynaklardan yoksunsak düşünce olarak kalırlar... Tarih öngörülemez biçimlerde hareket eder. Gelgelelim tarihteki olaylar mutlaka, enerji bileşenlerine uyum göstermesi gereken bir yapı ya da örgütlenme ile anlam kazanır..

İnsan toplumlarının evrimi sonucunda daha büyük nüfuslar ortaya çıkmış, sosyal düzenlemeler ve üretim düzenlemeleri giderek karmaşık bir hal almış ve giderek daha fazla sayıda insanın hayat kalitesi yükselmeye baş-

lamıştır. Temel bir biyofiziksel bakış açısına göre, hem insanın tarih öncesindeki evrimi hem tarihin izlediği yol, daha yoğunlaşmış ve daha değişken enerji biçimlerinin daha büyük birikimlerini ve akışlarını kontrol etme ve bunları daha düşük maliyete, daha yüksek verimle, daha keseye uygun biçimlerde ısı, ışık ve harekete çevirme arayışı olarak görülebilir. Bu eğilim Amerikalı matematikçi, kimyager ve istatistikçi Alfred Lotka (1880-1949) tarafından maksimum enerji kanununda şöyle genelleştirilmiştir: “İncelenen her örnekte doğal seçim, kullanılmamış bir madde kalıntısı ve kullanılabilir enerji olduğu sürece organik sistemin toplam kütesini, maddenin sistemde dolaşım oranını, sistemdeki toplam enerji akışını artıracak şekilde işler.” (Lotka 1922, 148).

Birbirini izleyen medeniyetlerin, başka bir deyişle biyosferdeki en büyük ve en karmaşık organizmaların tarihi bu yolu izlemiştir. İnsanların daha yüksek enerji akışlarına dayanması, organizmaların evriminin kaçınılmaz bir sürekliliği olarak görülebilir. Wilhelm Ostwald (1853-1932, kataliz üzerine yaptığı çalışmayla kimya alanında 1909’da Nobel Ödülü’nü almıştır) “enerji biliminin ikinci kanununu herhangi bir eylemi ve bütün eylemleri, özellikle de insan eylemlerinin bütünlüğünü” içine alacak şekilde açıkça genişleten ilk bilim insanı olmuştur: “Bütün enerjiler bu dönüşüme hazır değildir, sadece bazı enerji biçimleri hazırdır, bu nedenle onlara serbest enerji denmiştir... Bundan dolayıdır ki serbest enerji, her türden her varlığın tükettiği, her şeyin onun çevrilmesi, dönüşmesi sayesinde yapıldığı sermayedir” (Ostwald 1912, 83). Bu, Ostwald’ı enerji kuralını formüle etmeye götürmüştü: “*Vergeude keine Energie, verwerte sie*” – “Enerji israf etme, enerjiyi yararlı kıl” (Ostwald 1912, 85).

Ostwald’ın izinden gidenlerin, onun vardığı sonuçları nasıl yeniden ifade ettiğini, bazılarının enerji ile bütün insani işler arasındaki bağlantıya çok daha belirlenimci bir açıklık getirdiğini üç alıntıyla gösterebiliriz. 1970’lerin başında Howard Odum (1924-2002) Ostwald’ın işlediği kilit temanın bir versiyonunu ortaya koydu: “Enerji kaynaklarının elverişli olması, varolabilecek çalışma faaliyetinin miktarını belirler ve bu enerji akışlarının kontrol edilmesi, insanın işlerindeki ve doğaya göreli etkisindeki gücü belirler” (Odum 1971, 43). 1980’lerin sonunda Ronald Fox, evrimde enerjiyi konu alan bir kitabı “enerji akışı eşleşmesindeki her iyileştirmeye birlikte kültürel mekanizmalarında bir iyileşme olduğu” sözleriyle tamamlamıştı (Fox 1988, 166).

Enerji arzı ile sosyal ilerlemeler arasında bağlantı kurmak için bilim insanı olmak gerekmez. Eric Blair (George Orwell, 1903-1950) 1937’de yeraltındaki bir kömür madenini ziyareti sonrasında kaleme aldığı *The Road to Wigan Pier*’in ikinci bölümünde şöyle diyordu:

Medeniyetimiz, Chesterton hızı, insanın durup da düşünmeye başladığında anladığından çok daha eksiksiz bir biçimde kömür üzerine kurulmuştur. Bizi hayatta tutan makineler, makineleri yapan makineler hepsi de doğrudan ya da dolaylı olarak kömüre dayanır. Batı dünyasının metabolizmasında kömür madencisi, önem açısından toprağı sabanla süren insandan sonra ikinci sırada yer alır. Kirli olmayan hemen her şeyin omuzlarına yüklendiği bir tür heykel sütundur. Bu nedenle fırsat bulursanız ve bu sıkıntıya katlanmak isterseniz, kömürün çıkarılma süreci gayet izlemeye değerdir. (Orwell 1937, 18)

Ama bu temel bağlantıyı (Orwell’in yaptığı gibi) yeniden ortaya koymak ile (Fox’un yaptığı gibi) enerji akışının her iyileşmesinde kültürel iyileştirmelerin gerçekleştiğini söylemek birbirinden farklıdır. Orwell’in vardığı sonucun istisnası gösterilemez. Fox’un dile getirdiği şey ise, iki kuşak önce antropolog Leslie White’in (1900-1975) kültürel gelişimin birinci önemli kanunu dediği belirlenimci bir görüşün yeniden ortaya konmasıdır açıkçası: “Başka her şey eşit olmak kaydıyla, kültürel gelişimin ölçüsü, her yıl kişi başına elde edilen ve işletilen enerji miktarı olarak doğrudan değişir” (White 1943, 346). Ostwald’ın temel formülasyonu ya da enerjinin evrilen toplumların yapısı ve dinamikleri üzerinde her şeyi içeren etkisi (Orwell’in tutumu) hakkında hiçbir tartışmaya gerek olmayabilir, ama enerji kullanım düzeyi ile kültürel başarılar arasında belirlenimci bir bağlantı kurulması, son derece tartışmalı bir önermedir. Bu nedenselliği (ya da bunun eksikliğini) kitabın son bölümünde inceliyorum.

Kavramın temel niteliği su götürmez. Robert Lindsay’in belirttiği üzere:

Varoluşumuzdaki bütün unsurlara, onu gerçekten de kavradığımızı hissetmemizi sağlayacak bir biçimde uygulanabilen tek bir sözcük bulabilseydik, ekonomik ve güçlü bir şey başarmış olurduk. Enerji sözcüğünün ifade ettiği şeyle olan da budur. Deneyim anlayışımızı hiçbir kavram bu denli birleştirmemiştir.

Peki ama enerji nedir? Şaşırtıcıdır, Nobel Ödülü kazananlar bile görünürdeki bu basit soruya tatmin edici bir cevap vermekte büyük zorluk

çekmektedir. Richard Feynman (1918-1988) meşhur *Lectures on Physics*'te “Bugün fizikte, enerjinin ne olduğuna dair bir bilginin olmadığını anlamak önemlidir. Enerjinin belli bir miktarda küçük baloncuklar halinde geldiğini gösteren bir resim yok kafamızda” (Feynman 1988, 4-2).

Bildiğimiz tek şey, bütün maddenin durağan halde enerji olduğu, enerjinin kendisini birçok farklı biçimde gösterdiği, bu farklı enerji biçimlerinin birçoğu evrensel, her yerde ve kesintisiz, bazıları bir tek yerle son derece sınırlı, seyrek ve gelip geçici çok sayıda dönüşümle birbirine bağlanmıştır (Şekil 1.1). Bu birikimler, potansiyeller ve dönüşümlerin anlaşılması büyük ölçüde on dokuzuncu yüzyılda hızla genişlemiş ve sistematik bir hal almış, bu bilgi nükleer enerjinin nasıl açığa çıkarılacağını fotosentezin nasıl işlediğinden daha önce anladığımız (birincisi kuramsal olarak 1930'ların sonunda, pratikte 1943'te ilk reaktörün çalışmaya başlamasıyla gerçekleşmişti, fotosentezin sekansları ise ancak 1950'lerde açıklık kazandı) yirminci yüzyılda mükemmelleştirilmiştir; enerji dönüşümlerinin karmaşıklıkları üzerine anlamlı bir yorumdur bu.

NEREDEN NEREYE	ELEKTRO- MANYETİK	KİMYASAL	NÜKLEER	TERMAL	KİNETİK	ELEKTRİK
ELEKTRO- MANYETİK		Kimyasal Işıldama	Nükleer Bombalar	Termal Radyasyon	İvmelenen Yükler	Elektro- manyetik Radyasyon
KİMYASAL	Fotosentez	Kimyasal İşleniş		Kaynama	Radyolizle Ayrıştırma	Elektroliz
NÜKLEER	Gama Nötron Tepkimeleri					
TERMAL	Solar Özümseme	Yanma	Fizyon Füzyon	Isı Alişverişi	Sürtünme	Dirençle Isıtma
KİNETİK	Radyometre	Metabolizma	Radyoaktifite Nükleer Bombalar	Termal Genişleme İçten Yanma	Dişliler	Elektrikli Motorlar
ELEKTRİK	Solar Hücre	Yakıt Hücreleri Piller	Nükleer Piller	Termo - Elektrik	Elektrik Jeneratörleri	

Şekil 1.1. Enerji çevrimleri matrisi. Olasılıkların var olduğu yerlerde başlıca iki dönüşümden fazlası tanımlanmamıştır.

AKIŞLAR, BİRİKİMLER VE KONTROLLER

Bilinen bütün enerji biçimleri insanın varoluşu açısından kritik önemdedir, önemlerine göre bir sıralama yapmayı engelleyen bir gerçektir bu. Tarihin akışının büyük bir bölümü hem evrensel ve gezegensel enerji akışlarıyla hem de bunların bölgesel ve yerel tezahürleriyle belirlenmiş ve sınırlanmıştır. Evrenin temel özellikleri sayılamayacak kadar çok galaksi ve yıldız sistemini düzenleyen kütleçekim enerjisinin hükmü altındadır. Kütleçekim gezegenimizin Güneş'e doğru uzaklıkta kalıp onun yörüngesinde dönmesini sağlar ve ayrıca Dünya'yı yaşanabilir kılan yeterince kütsel bir atmosferi tutar. (Kutu 1.1)

Bütün etkin yıldızlarda olduğu gibi Güneş'in de enerjisi füzyondan gelir, bu termonükleer tepkimelerin sonucu Dünya'ya elektromanyetik (solar, radyant) enerji olarak ulaşır. Bu enerjinin akışı görünebilir ışık da dâhil, geniş kapsamlı bir dalgaboyu tayfını kapsar. Bu muazzam akışın yaklaşık yüzde 30'u bulutlarla ve yüzeylerle yansıtılır, yaklaşık yüzde 20'si atmosfer ve bulutlarda soğurulur ve geri kalanı, toplam akışın kabaca yarısı okyanuslar ve karalar tarafından massedilir, termal enerjiye dönüşür ve uzaya geri yansıtılır (Smil 2008a). Dünya'nın jeotermal enerjisi çok daha küçük bir ısı

Kutu 1.1

Kütleçekim ve Dünya'nın yaşanabilir bir yer olması

Karbona dayalı metabolizmanın uç noktadaki toleransı, organik moleküllerin oluşumu ve tepkimeleri için sıvı haline gerek duyulan suyun donma noktasıyla (en alt sınır) ve aminoasitlerin istikrarını bozan, proteinleri parçalayan ısılar ve basınçlarla (en üst sınır) belirlenir. Dünya'nın sürekli yaşanabilirlik bölgesi (hayatı destekleyen bir gezegen için en iyi koşulları sağlayan yörünge yarıçapı aralığı) çok dardır (Perkins 2013). Kısa süre önce yapılan bir hesaplamada sınıra daha önce düşünülenenden çok daha yakın olduğumuz sonucuna varılmıştır: Kopparapu ile çalışma arkadaşları (2014) atmosfer bileşimi ve basıncı dikkate alındığında Dünya'nın yaşanabilir bölgenin iç sınırında, denetimsiz sera gazı etkisinin tolere edilemez derecede yüksek ısıya neden olduğu yarıçapın hemen dışında yörüngede döndüğü sonucuna varmıştır.

Bundan yaklaşık iki milyar yıl önce, Dünya'nın bu etkiye maruz kalmasını önleyecek kadar karbondioksit okyanuslar, arkea ve algler tarafından tutuluyordu; ama gezegen Güneş'ten sadece yüzde 1 daha uzak olsaydı, neredeyse bütün suyu buzullarda kapalı kalmış olurdu. Optimum bir aralıktaki ısılarla bile gezegen, azotun ağırlıkta olduğu, fotosentezden gelen oksijenle zenginleşmiş, yüzey ısını düzenleyen birkaç önemli gaz izi içeren benzersiz atmosferi olmasaydı son derece büyük bir çeşitlilik gösteren hayatı destekleyemezdi; bu ince gaz zarfı, gezegen, atmosferi yerinde tutan kütleçekimi yaratacak kadar büyük olmasaydı varlığını sürdüremezdi.

akışı oluşturur: Gezegenel kütlenin asıl kütleçekimsel birikiminin ve radyo-aktif maddenin bozunumunun bir sonucudur bu ve okyanuslar ile kıtaları yeniden düzenleyip duran, volkanik patlamalar ile depremlere neden olan büyük tektonik süreçleri yönetir.

Dünyaya gelen ısıma enerjisinin sadece küçük bir bölümü, yüzde 0,05'inden azı fotosentez sayesinde bitkilerde yeni kimyasal enerji birikimine dönüşür, daha yüksek bütün yaşam biçimleri için yeri doldurulamaz bir dayanak oluşturur. Canlı metabolizması besinleri yeniden düzenleyip büyüyüp gelişen dokulara çevirir, daha yüksek bütün türlerde bedensel işlevleri ve sürekli ıslığı ayakta tutar. Sindirim ayrıca, çalışan kasların kullandığı mekanik (kinetik) enerjiyi üretir. Hayvanlar enerji çevrimlerinde, bedenlerinin büyüklüğü ve erişilebilir besinlerin elverişli olmasıyla içkin olarak sınırlıdır. Türümüzü diğerlerinden ayıran temel niteliklerden biri de bu fiziksel sınırların, kasların daha verimli kullanılması ve bedenlerimizin dışındaki enerjilerin toplanması sayesinde genişletilmesi olmuştur.

İnsanın zekâsıyla kilit altından kurtulan bu beden dışı enerjiler hem daha güçlü ilk hareketlendiriciler hem de yanmaları ısı doğuran yakıtlar olarak giderek artan çeşitlilikte kullanılmıştır. Enerji stoklarını tetikleyen etkenler bilgi akışına ve muazzam çeşitlilikte yapay nesneye dayanır. Bu aygıtlar çekiç-taşlar ve manivelalar gibi basit aygıtlardan yakıtlı karmaşık motorlar ve nükleer fizyon enerjisi açığa çıkaran reaktörlere uzanan bir yelpazede yer



Şekil 1.2. Gabon'da bir şempanze (*Pan troglodytes*) alet kullanarak kuruyemiş kırıyor (Corbis).

alır. Bu ilerlemelerin temel evrimsel ve tarihsel sıralamasını geniş kapsamlı niceliksel terimlerle özetlemek kolaydır. Fotosentez yapmayan herhangi bir organizmada olduğu gibi insanın en temel enerji ihtiyacı gıdadır. İnsansıların yiyecek yağmalamaları ve artık toplamaları, primat atalarının yiyecek edinme pratiklerine çok benziyordu. Bazı primatlar, ayrıca su samurları ve filer de dâhil başka bazı memeliler, bazı kuşlar (kuzgunlar

ve papağanlar), hatta bazı omurgasızlar (kafadan bacaklılar, sefalodlar) küçük ilkel araç kullanma becerileri repertuarı geliştirmiş olsalar da (Hansell 2005; Sanz, Call ve Boesch 2014; Şekil 1.2) sadece insansılar alet yapımını davranış biçimlerinin ayırt edici bir niteliği haline getirmiştir.

Aletler yiyecek, barınak ve giysi edinme konusunda bize mekanik bir avantaj sağlamıştır. Ateşin kullanımında ustalık kazanmak yerleşim yelpazemizi müthiş ölçüde genişletmiş, bizi diğer hayvanlardan ayırmıştır. Yeni aletler evcilleştirilen hayvanlardan yararlanılmasını, kas gücüyle çalışan daha karmaşık makinelerin yapılmasını, rüzgâr ve suyun kinetik enerjilerinin küçük bir bölümünün yararlı enerjiye çevrilmesini sağlamıştır. Bu yeni ilk hareketlendiriciler insanın hükmü altındaki enerjiyi kat kat artırmıştır, ama kullanımları çok uzun bir süre boyunca, ele geçirilen akışların niteliği ve büyüklüğüyle sınırlı olmuştur. Yelkenler, buna verilebilecek en açık örnektir; bu antik ve etkili aletlerin yetileri binlerce yıl boyunca baskın rüzgâr akımları ve devamlı okyanus akıntılarıyla sınırlı olmuştur. Bu büyük akımlar on beşinci yüzyıl sonunda Avrupalıların Karayipler'e yaptığı yolculuklara yön vermiştir. İspanyol ticaret gemileri, Manila Kalyonları (Galeon de Manila) 1565 ile 1815 arasında 250 yıl boyunca yılda bir-iki kez Pasifik'i aşarak Meksika'dan (Acapulco) Filipinler'e gitmiş olsa da, bu akımlar İspanyolların Hawaii'yi keşfetmesini de engellemiştir (Schurz 1939).

Şömineler, ocaklar ve fırınlarda kontrollü yanma, bitkilerin kimyasal enerjisini termal enerjiye çevirmiştir. Bu ısı doğrudan evlerde, metal eritmekte, tuğla pişirmekte, sayılamayacak kadar çok ürünü işleyip son haline getirmekte kullanılmıştır. Fosil yakıtların yakılması, ısının bütün bu geleneksel doğrudan kullanım biçimlerini daha yaygın ve daha etkili hale getirmiştir. Birkaç temel icat fosil yakıtların yakılmasıyla elde edilen termal enerjiyi mekanik enerjiye çevirmeyi mümkün kılmıştır. Bu ilk olarak buharlı ve içten yanmalı motorlarda, daha sonra gaz türbinleri ve roketlerde yapılmıştır. 1882'den beri fosil yakıtları yakarak, ayrıca suyun kinetik enerjisinden yararlanarak, 1956'dan beri de bir uranyum çekirdeğini parçalayarak elektrik üretiyoruz.

Fosil yakıtların yakılması ve elektrik üretilmesi, yeni bir yüksek enerji medeniyeti biçimi yaratmıştır; bu medeniyet biçiminin genişlemesi bugün bütün gezegene yayılmıştır, başlıca enerji kaynakları bugün payı küçük olmakla birlikte, hızla artan yenilenebilir yeni enerji kaynaklarını, özellikle de (fotovoltaik aygıtların topladığı ya da güneş enerjisi santrallerinde yoğun-

laşan) güneş ve (büyük rüzgâr türbinlerinin dönüştürdüğü) rüzgâr enerjisini de içerir. Bütün bu ilerlemeler, diğer gelişmelerin birbirine bağlanmasına dayanır. Bir akış-modeli benzetmesi kullanırsak, insan dehasının akışını sağlamak için bir kapılar (valfler) bileşiminin kurulması ve harekete geçirilmesi gerekmiştir.

Büyük enerji potansiyelleri açığa çıkarması gereken en dikkat çekici kapılar, gerekli eğitim fırsatlarını, öngörülebilir hukuksal düzenlemeleri, şeffaf ekonomik kuralları, sermayenin yeterince elverişli olmasını ve temel araştırma için zorunlu koşulları içerir. Tahmin edileceği üzere, enerji akışlarının çok artması ya da niteliksel olarak iyileşmesi, yepyeni enerji kaynaklarından önemli ölçüde enerji elde edilmesi genellikle aradan kuşaklar geçmesini gerektirir. Zamanlama, enerjinin tamamı ve sonuçta ortaya çıkan enerji akışlarının bileşimini öngörmek son derece zordur; bu tür dönüşümlerin ilk aşamalarında ilk hareketlendiricileri ve yakıt dayanaklarını değiştirmenin tarım, sanayi, nakliye, yerleşimler, savaş ve Dünya'nın doğal ortamı üzerinde yol açacağı bütün etkileri takdir etmek imkânsızdır. Eylemlerimizin sınırlarını ve başarılarımızın büyüklüğünü değerlendirmek için niceliksel değerlendirmeler temel önemdedir ve bu değerlendirmeler de temel bilimsel kavramlar ve ölçüler hakkında bilgili olmayı gerektirir.

KAVRAMLAR VE ÖLÇÜLER

Bütün enerji çevrimlerinin temelinde birkaç temel prensip yatar. Bütün enerji biçimleri ısıya, yani termal enerjiye çevrilebilir. Bu dönüşümlerin hiçbirinde hiç enerji kaybı olmaz. Enerjinin korunumu, –termodinamiğin birinci ilkesi– en temel evrensel gerçeklerden biridir. Ama çevrim zincirlerinde ilerledikçe yararlı iş potansiyeli sürekli azalır (Kutu 1.2). Bu açıklanamaz gerçek, termodinamiğin ikinci kanununu tanımlar, entropi, bu yararlı enerjinin kaybıyla ilgili ölçüdür. Evrenin enerji içeriği sabit olsa da enerjilerin dönüşümü entropiyi artırır (yararlılığını azaltır). Bir sepet dolusu tahıl ya da bir varil dolusu ham petrol düşük entropili bir enerji birikimidir, metabolizmaya girdiğinde ya da yakıldığında çok fazla yararlı iş ortaya çıkarma yetisine sahiptir; ama düşük ısılı hava moleküllerinin rastgele hareketiyle biter bu süreç, geri alınamaz bir yarar kaybını temsil eden, geri çevrilemez bir yüksek entropi halidir bu.

Bu tek yönlü entropik dağılım, kapalı bir sistemde bir karmaşıklık kaybına, daha büyük bir düzensizlik ve homojenliğe yol açar. Ama ister en

Kutu 1.2

Çevrilmiş enerjinin yararının azalması

Bütün enerji çevrimleri bu ilkenin bir örneğidir. Amerikalı bir okur bu sayfayı aydınlatmak için elektrik ışığı kullanırsa, bu ışığın elektromanyetik enerjisi onu üretmek için kullanılan kömür istifinin içerdiği kimyasal enerjinin sadece küçük bir bölümünü oluşturur (2015'te ABD'de üretilen elektriğin yüzde 33'ünün üretiminde kömür kullanılıyordu). Bir fabrikanın bacasından çıkan ısıyla ya da suyun soğumasıyla kömür enerjisinin en az yüzde 60'ı kaybolur, bir okur eski bir akkor ampulü kullanırsa verilen elektriğin yüzde 95'inden fazlası ampulün kıvrılmış fitilindeki metal elektrik akımına direnirken üretilen ısıya çevrilir. Sayfaya ulaşan ışık ya sayfa tarafından emilir ya da çevresine yansıyıp orada emilir ve ısı olarak yeniden ışıır. Kömürün kimyasal enerjisinin en baştaki düşük entropi girdisi istasyonun üzerindeki havayı, telleri ve ampulün çevresini ısıtan, sayfanın üzerinde fark edilmez bir ısı artışına neden olan dağınık yüksek entropili ısı olarak dağılmıştır. Hiç enerji kaybı olmamıştır, ama son derece yararlı bir enerji biçimi hiçbir pratik yararı olmayan bir biçime indirgenmiştir.

küçük bakteri olsun ister küresel bir medeniyet, bütün canlı organizmalar dışarıdan enerji alıp metabolizmalarında işleyerek bu eğilime geçici olarak karşı koyar. Bu da bütün canlı organizmaların içeri ve dışarı sürekli bir enerji ve madde akışını devam ettiren açık bir sistem olmaları gerektiği anlamına gelir. Bu sistemler canlı oldukları sürece kimyasal ve termodinamik bir denge halinde olamazlar (Prigogine 1947, 1961; von Bertalanffy 1968; Haynie 2001). Negentropileri (büyüme, yenilenme ve evrim) daha büyük bir heterojenlikle, yapısal ve sistemsel karmaşıklığın artmasıyla sonuçlanır. Başka birçok bilimsel ilerlemede olduğu gibi, bu gerçekliklerin tutarlı bir biçimde anlaşılması ancak on dokuzuncu yüzyılda, hızla evrilen fizik, kimya ve biyoloji disiplinlerinin enerji dönüşümlerinin incelenmesine ortak bir ilgi duymasıyla gerçekleşmiştir (Atwater ve Langworthy 1897; Cardwell 1971; Lindsay 1975; Müller 2007; Oliveira 2014; Varvoglis 2014).

Bu temel çıkarlar standart ölçümlerin kural haline getirilmesini gerektirmiştir. İki birim *enerjinin* ölçülmesinde yaygınlık kazanmıştır: Metrik bir birim olan kalori ile Britanya ısı ölçüsü (btu). Bugün temel bilimsel enerji birimi, iş ve ısıya eşitliğine dair ilk doğru hesaplamayı yayımlamış İngiliz fizikçi James Prescott Joule'ün (1818-1889) adını taşıyan juldür (**Kutu 1.3**). *Kuvvet* enerji akışının oranını ifade eder. Standart birimi, beygir gücü, James Watt (1736-1839) tarafından belirlenmiştir. Watt buhar motorunu rahatça anlaşılabilir bir dayanak kullanarak anlatmak istemiş, bu nedenle onun yerine geçeceği başlıca hareket ettirici güç, bir değirmen ya da pompayı çalıştırmakta kullanılan (**Şekil 1.3, Kutu 1.3**) koşumlu bir atla belirgin bir karşılaştırma yapmayı tercih etmişti.

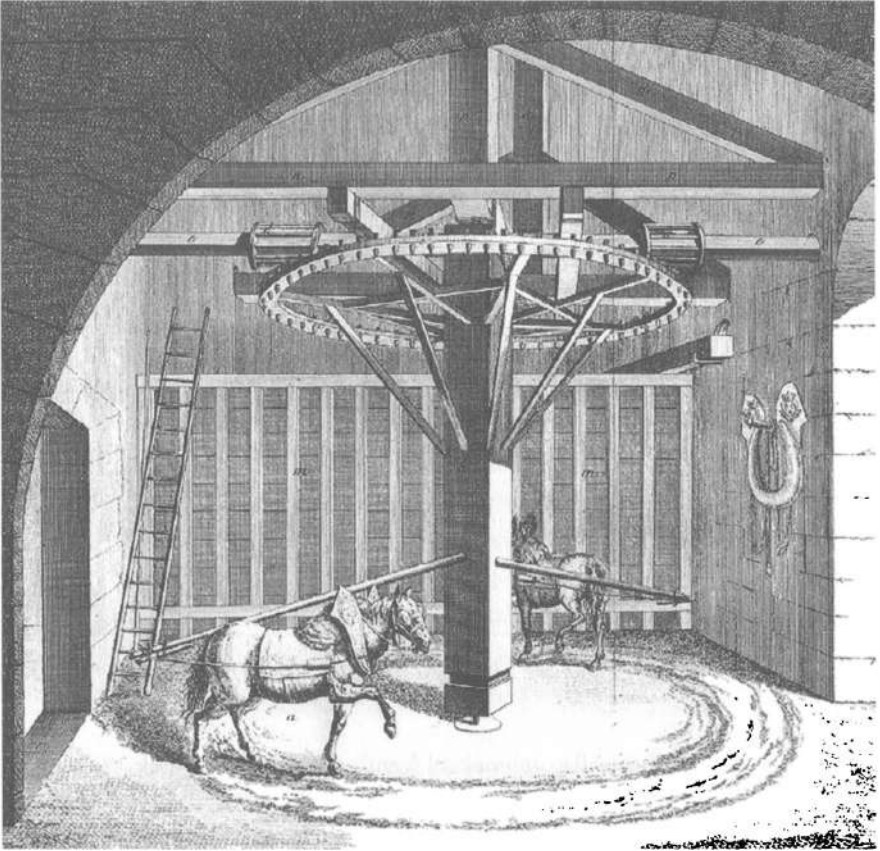
Kutu 1.3

Enerji ve kuvvetin ölçülmesi

Bir julün resmi tanımı, bir newtonluk bir kuvvetin bir metre mesafede gerçekleştirdiği işittir. Bir başka seçenekse, gereken ısıyı dikkate alarak temel bir enerji birimi tanımlamaktır. Bir kalori bir santimetreküplük suyun ısısını bir santigrat artırmak için gerekli ısı miktarıdır. Bu küçük miktarda bir enerjidir: Aynısını bir kiloluk suda yapmak için bin kat daha fazla enerjiye, yani bir kilokaloriye gerek duyulur (çarpanların tam listesi için ekteki “temel ölçüler” bölümüne bakınız). Isı ve işin eşdeğerliği dikkate alındığında kalorileri jule çevirmek için gereken tek şey bir kaloninin kabaca 4,2 jule eşit olduğunu hatırlamaktır. Bu çevrim hâlâ yaygın olan, metrik olmayan İngiliz ölçü birimi, Britanya termal birimi (btu) için de aynı ölçüde basittir. Bir btu kabaca 1.000 jule (kesin olarak 1.055 jule) eşittir. Gündelik gıda ihtiyacı karşılaştırma açısından iyi bir mihenk taşıdır. Orta düzeyde etkin çoğu yetişkin için bu ihtiyaç 2-2,7 Mcal’dır, yani yaklaşık 8-11 MJ’dır, 1 kilo tam buğday ekmeği tüketerek 10 MJ temin edilebilir.

James Watt 1782’de Blotting and Calculation Book’ta bir değirmen atının bir dakika-da 32.400 ayak-pound düzeyinde çalıştığını hesapladı, ertesi yıl bunu 33.000 ayak-pound olarak yuvarladı (Dickinson 1939). Watt saniyede yaklaşık 3 ayaklık bir ortalama yürüme hızı hesaplamıştı, ama bu rakamı yaklaşık 180 poundluk bir çekiş için nereden elde ettiğini bilmiyoruz. Bazı büyük hayvanlar bu kadar güçlüydü, ama on sekizinci yüzyıl Avrupası’nda atların çoğu bir beygir gücü oranını gösteremiyordu. Bugünkü standart kuvvet birimi olan watt saniyede bir jul akışına eşittir. Bir beygir gücü yaklaşık 750 watt’a (tam olarak 745,699 watt’a) eşittir. Günde 8 MJ gıda tüketmek 90 W’dan düşük bir kuvvet oranına (8MJ / 24 saat x 3.600 saniye) tekabül eder ki, bu da standart ampulün kuvvetinden (100 W) azdır. İki gözlü bir ekmek kızartma makinesinin 1.000 W yani 1 kW’a ihtiyacı vardır; küçük arabalar yaklaşık 50 kW’la çalışır; kömür enerjisiyle çalışan büyük bir tesis ya da bir nükleer enerji santrali 2 GW oranında elektrik üretir.

Bir diğer önemli oransa *enerji yoğunluğu*, bir kaynağın kütlesinin bir birimine karşılık gelen enerji miktarıdır (Kutu 1.4). Bu değer yiyecekler açısından kritik önem taşır: bol miktarda bulunan, düşük enerji yoğunluklu yiyeceklerin asla demirbaş yiyecekler arasına giremeyeceği yerlerde bile. Örneğin Meksika havzasının İspanyollardan önceki sakinleri *Opuntia* cinsinden birçok kaktüs türünden toplanması kolay olan firavunincirini her zaman bol miktarda tüketmiştir (Sanders, Parsons ve Santley 1979). Ama çoğu meyvede olduğu gibi firavunincirinin posası ağırlıklı olarak (yaklaşık yüzde 88) sudur, yüzde 10’dan az karbonhidrat, yüzde 2 protein ve yüzde 0,5 lipit içerir, enerji yoğunluğu sadece 1,7 MJ/kg’dır (Feugang vd. 2006). Bu şu anlama gelir: Sadece kaktüslerden toplanan firavunincirlerinin karbonhidratlarıyla hayatta kalan (gerçekdışı bir biçimde diğer iki makrobese gerek olmadığını varsayalım) ufak tefek bir kadının bile hayatta kalmak için her gün bu meyveden 5 kg tüketmesi gerekir; ama aynı kadın aynı miktarda enerjiyi tortilla



Şekil 1.3 On sekizinci yüzyıl ortasında Fransa'da bir halı üretim tesisinde kuyudan su çeken bir bocurgatı çeviren iki at [Encyclopédie'den (Diderot ve d'Alembert 1769-1772) alınmıştır]. O dönemde ortalama bir at bir beygir güçlük sürekli bir çalışma temposunu sürdüremiyordu. James Watt yetiştirilen hayvanların yerini almak üzere kullanılan beygir gücüyle tanımlanan buhar makinelerinden müşterilerin memnun olmasını sağlamak için abartılı bir hesaplama kullanmıştı.

ya da tamale olarak tüketilen, sadece 650 gram kadar öğütülmüş mısırdan da alabilir.

Kuvvet yoğunluğu enerjilerin birim alan başına üretilme ya da tüketilme hızıdır, bu nedenle enerji sistemlerinin kritik bir yapısal belirleyicisidir (Smil 2015b). Örneğin bütün geleneksel toplumlarda şehirlerin büyüklüğü yakacak odun ve kömüre bağlı olmuştur, fitokütle üretiminin içkin olarak düşük kuvvet yoğunluğuyla sınırlandığı da açıktır (Kutu 1.5, Şekil 1.4). Ilıman iklimlerde her yıl sürdürülebilir düzeyde yetişen ağaçların kuvvet

Kutu 1.4
Yiyecek ve yakıtların enerji yoğunlukları

Sıralama	Örnekler	Enerji yoğunluğu (MJ/kg)
Yiyecekler		
Çok düşük	Sebzeler, meyveler	0,8-2,5
Düşük	Kökler, süt	2,5-5,0
Orta	Etler	5,0-12,0
Yüksek	Tahıl ve baklagiller	12,0-15,0
Çok yüksek	Yağlar, hayvansal yağlar	25,0-35,0
Yakıtlar		
Çok düşük	Turba, yeşil odun, otlar	5,0-10,0
Düşük	Tahıl artıkları, açık havada kurumuş odun	12,0-15,0
Orta	Kuru odun	17,0-21,0
Yüksek	Kömür, antrasit	28,0-32,0
Çok yüksek	Ham petrol	40,0-44,0

Kaynaklar: Tek tek yiyecekler ve yakıtların özel enerji yoğunlukları Merrill ve Watt'ta (1973), Jenkins'de (1993) ve USDA'da (2011) sıralanmıştır.

yoğunluğu, en iyi ihtimalle, geleneksel kentlerde ısınma, yemek pişirme ve imalat alanlarındaki enerji tüketiminin kuvvet yoğunluğunun yüzde 2'sine eşittir. Buna bağlı olarak şehirlerin yakıt kaynağı olarak kendilerinden en az 30 kat büyük alanlardan yararlanması gerekmiştir. Bu gerçeklik yiyecek ve su gibi diğer kaynakların yeterli olduğu yerlerde bile şehirlerin büyümesini sınırlamıştır.

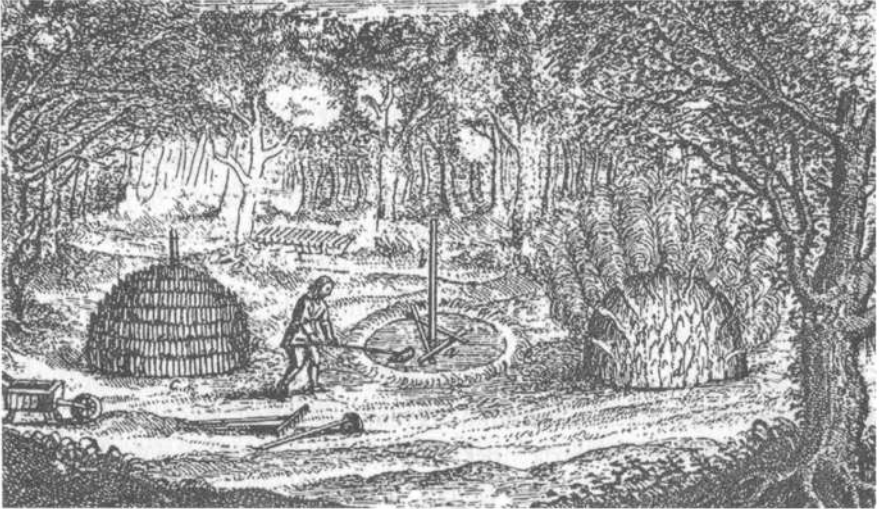
Sanayileşmenin ilerlemesiyle büyük önem kazanmış bir diğer oransa *enerji çevrimlerinin verimliliği*dir. Bu çıktı-girdi oranı ocak, motor ya da ampul olsun, enerji çevrimi yapan şeylerin yaptığı işi betimler. Entropik dağılım hakkında bir şey yapamasa da belli işleri gerçekleştirmek için gerekli enerji miktarını azaltarak çevrimlerin verimliliğini iyileştirebiliriz (**Kutu 1.6**). Bu iyileştirmelerin temel (termodinamik, mekanik) sınırları vardır, ama bazı süreçleri pratik verimlilik sınırlarına itmiş bulunuyoruz, gerçi içten yanmalı motorlar ve ampuller gibi sıradan enerji çevrim süreçleri dâhil, çoğu örnekte daha fazla iyileştirme yapma olasılığı mevcuttur.

Kutu 1.5

Fitokütle yakıtların kuvvet yoğunlukları

Fotosentez çevrimleri gelen güneş ışınlarının yüzde 0,5'ten azını yeni fitokütleyle çevirir. Geleneksel olarak hızlı büyüyen türlerin (kayınlar, okalıptüs, çamlar) yıllık yakacak odun üretkenlikleri en iyi ihtimalle 10 t/ha'dan fazla değildir, daha kuru bölgelerde bu oranlar 5 ile 10 t/ha arasındadır (Smil 2015b). Kuru odunun enerji yoğunluğunun ortalama 18 GJ/t olması halinde 10 t/ha alınması yaklaşık 0,6 W/m²'lik bir hasada tekabül edecektir: (10 t/ha x 18 GJ) / 3,15 x 10⁷ (yıldaki saniyeler) = ~5.708 W; 5.708 W / 10.000 m² (ha) = ~0,6 W / m². On sekizinci yüzyılda büyük bir kentte ısınma, pişirme ve zanaat imalatı için inşa edilmiş alanın en azından 20-30 W/m²'sine ihtiyaç duyulurdu, yakacak odunun da en azından kentten 30 ilâ 50 kat büyük bir alandan gelmesi gerekirdi.

Ama kentler çok büyük oranda odun kömürüne ihtiyaç duyuyordu, sanayi öncesinde bütün geleneksel medeniyetlerin ev içinde ısınmak için tercih ettiği yegâne dumansız yakıt buydu; odun kömürü elde edilmesi ciddi miktarda enerji kaybına neden oluyordu. On sekizinci yüzyıl ortasına gelindiğinde bile tipik odun kömürü-odun oranı hâlâ 1:5 kadar yüksekti, enerji açısından [kuru odun 18 GJ/t, odun kömürü (neredeyse tümüyle karbondur) 29 GJ/t] bu çevrim yaklaşık olarak ancak yüzde 30 verimliydi (5 x 18/29 = 0,32); odun kömürü üretiminde kullanılmak için kesilen odunun kuvvet yoğunluğu da yaklaşık olarak sadece 0,2 W/m² civarındaydı. Buna bağlı olarak kuzeyde ılıman bir iklimde bulunan, ağırlıklı olarak odun kömürüne dayanan büyük sanayi öncesi kentleri (Çin'de Xi'an ya da Pekin iyi örnekler olabilir) bu yakıtı sürekli temin edebilmek için kendilerinin en az 100 katı büyüklüğünde ormanlık bir alana gerek duyuyorlardı.



Şekil 1.4 John Evelyn'in *Silva*'sında resmedildiği üzere on yedinci yüzyıl başı İngilteresi'nde odun kömürü yapımı.

Kutu 1.6

Verimlilik iyileştirmeleri ve Jevons paradoksu

Teknik ilerlemeler birçok etkileyici verimlilik artışını beraberinde getirmiştir, aydınlatmanın tarihi de en iyi örneklerden birini oluşturur (Nordhaus 1998; Fouquet ve Pearson 2006). Mumlar mumyağı ya da balmumundaki kimyasal enerjinin sadece yüzde 0,01'ini ışığa çeviriyordu. Edison'un 1880'lerde ürettiği ampuller kabaca bundan 10 kat daha verimliydi. 1900'e gelindiğinde, kömürün yakıt olarak kullanıldığı elektrik üretim santrallerinde verimlilik sadece yüzde 10'du; ampuller elektriğin sadece yüzde 1'ini ışığa çeviriyordu, bu nedenle kömürün kimyasal enerjisinin sadece yüzde 0,1 kadarı ışıık haline gelebiliyordu (Smil 2005). En iyi gaz türbinli kombine çevrim tesisleri (bir gaz türbininden çıkan sıcak gaz buhar türbini için buhar üretmekte kullanılır) bugün yaklaşık yüzde 60 verimlidir, floresan ışıklarının verimliliği de yüzde 15'e çıkmıştır, ışık saçan diyotların verimliliği de aynı düzeydedir (USDOE 2013). Bu demektir ki doğal gazın enerjisinin yaklaşık yüzde 9'u ışık haline gelir; 1880'lerin sonundan beri 90 katlık bir artış olmuştur. Bu tür kazanımlar sermaye ve operasyon maliyetlerinden tasarruf etmeyi sağlamış, çevresel etkileri azaltmıştır.

Ama geçmişte çevrim verimliliğinin artışı mutlaka fiili enerji tasarruflarıyla sonuçlanmıyordu. İngiliz ekonomist Stanley Jevons (1835-1882) 1865'te daha verimli buhar motorlarının benimsenmesine kömür tüketiminde büyük artışların eşlik ettiğini işaret etmiş, "Yakıtların ekonomik kullanımının tüketimin azaltılmasıyla eşdeğer olduğunu varsaymak tam bir fikir karmaşasıdır. Hakikat tam tersidir. Kural olarak yeni ekonomi biçimleri birçok paralel örnekte kabul edilen bir ilkeye göre tüketim artışına yol açar," sonucuna varmıştır (Jevons 1865, 140). Bu gerçeklik birçok araştırmayla doğrulanmıştır (Herring 2004, 2006; Polimeni vd. 2008), ama kişi başı enerji kullanımının doygunluk düzeyine yaklaştığı ya da çoktan ulaştığı zengin ülkelerde bu etki giderek zayıflamaktadır. Sonuçta son kullanım düzeyinde daha yüksek verimliliğe bağlanabilecek geri tepmeler sıklıkla ufaktır ve zamanla azalır, ekonomi çapında özel geri tepmelerse önemsiz, hatta net pozitif olabilir (Goldstein, Martinez ve Roy 2011).

Yiyecek (yiyeceklerdeki enerji / yiyeceği yetiştirmek için harcanan enerji), yakıt ya da elektrik üretimi için verimlilik hesaplaması yapıldığında, verimlilik genellikle *enerji getirisi* diye anılır. Sadece hayvan gücüne dayalı her geleneksel tarımda net enerji getirisinin birden hatırı sayılır derecede yüksek olması gerekir: yenilebilir hasadın, bu ürünleri üreten insanlar ve hayvanların yanı sıra onlara bağımlı çalışmayan kişilerin de ihtiyaç duyduğu yiyecek ve yem miktarından daha fazla enerji içermesi gerekir. Sadece hayvan enerjisinden kuvvet alan (dolayısıyla kısa süre önce alınan güneş ışınının dönüşümünü içeren) geleneksel tarımlardaki enerji getirilerini doğrudan (tarla operasyonları için yakıt) ve dolaylı olarak (gübre ve böcek ilaçlarını sentezlemek ve tarım makineleri yapmak için gerekli enerjiler) desteklenen, dolayısıyla şaşmaz biçimde **geleneksel tarıma kıyasla daha düşük enerji getirisi olan modern tarımla karşılaştırmaya çalıştığımızda üstesinden gelinemez bir sorun ortaya çıkar (Kutu 1.7).**

Kutu 1.7

Gıda üretiminde enerji getirilerinin karşılaştırılması

1970'lerin başından beri, geleneksel tarımın üstünlüğünü, modern tarımın düşük enerji getirilerini örneklemek için enerji oranları kullanılmaktadır. Bu tür karşılaştırmalar iki oran arasındaki temel bir fark nedeniyle yanıltıcıdır. Geleneksel tarımla ilgili oranlar sadece ekinlerden elde edilen gıda enerjisinin, insan ve hayvan emeği kullanarak bu hasatları üretmek için gerek duyulan gıda ve yem enerjisinin katsayılarıdır. Oysa tersine modern tarımda ortak payda ağırlıklı olarak tarım makinelerini çalıştırmak, makine ve tarım kimyasalları üretmek için gerek duyulan yenilenemez fosil yakıt girdilerinden oluşur; emek girdileri ihmal edilebilir.

Oranlar sadece yenilebilir enerji çıktısının emek girdisine oranı olarak hesaplanabilseydi, modern sistemler insan emeğinin az miktarda kullanılması, hayvanların hiç kullanılmaması nedeniyle geleneksel pratiklerden üstün görünürdü. Modern bir ekin üretiminin maliyeti bütün çevrilmiş fosil yakıtlar ve elektriğin ortak bir paydaya çevrilmesini içerseydi, modern tarımın enerji getirileri geleneksel getirilerin epeyce altında kalırdı. Böyle bir hesaplama enerjilerin fiziksel eşdeğerliği nedeniyle mümkündür. Hem gıda hem yakıtlar benzer birimlerle ifade edilebilir, ama açık bir “elmalarla portakalları aynı sepete koyma” sorunu karşımıza çıkar: Temelde iki farklı enerji girdisi biçimine dayanan iki tarım sisteminin enerji getirilerini basitçe ve doğrudan karşılaştırmanın tatmin edici bir yolu yoktur.

Son olarak *enerji yoğunluğu* ürünler, hizmetler, hatta toplam ekonomik üretimin maliyetini standart enerji birimleriyle, enerjinin kendisiyle ölçer. Sık kullanılan maddeler arasında alüminyum ve plastik son derece enerji yoğun maddelerdir, cam ve kâğıtsa nispeten ucuzdur, kereste (fotosentez maliyeti dışında) yaygın olarak kullanılan en az enerji yoğun maddedir (Kutu 1.8). Geçen iki yüzyıldaki teknik ilerlemeler enerji yoğunluklarında birçok ciddi gerilemeye neden olmuştur. Herhalde en dikkat çekicisi, pik demirin büyük yüksek fırınlarda, kok kömürü kullanılarak eritilmesi, bugün sanayileşme öncesi kömüre dayalı pik demir üretimine kıyasla birim sıcak metal kütlesi başına yüzde 10 az enerji gerektirmektedir (Smil 2016).

Enerjinin enerji maliyeti [buna sıklıkla EROI, yani yatırımın enerji getirisi (*energy return on investment*) denir, ama EROEI, yani enerji yatırımının enerji getirisi (*energy return on energy investment*) demek daha doğru olur] standart varsayımlar ve açıkça belirlenmiş analitik sınırlar kullanan benzer yöntemlerle hesaplanan değerleri karşılaştırıyorsa açıklayıcı bir ölçümdür. Modern yüksek enerji toplumları en yüksek net enerji getirisine sahip fosil yakıt kaynakları geliştirmeyi tercih etmiştir, genel olarak ham petrolü, özel olarak Ortadoğu'daki zengin yatakları sevmemizin başlıca nedenlerinden biri budur; petrolün yüksek enerji yoğunluğu, dolayısıyla kolay taşınabilirliği diğer belirgin avantajlardır (Kutu 1.9).

Kutu 1.8
Sık bulunan maddelerin enerji yoğunlukları

Madde	Enerji maliyeti (MJ/kg)	Süreç
Alüminyum	175-200	Boksitten metal
Tuğla	1-2	Kili pişirerek
Çimento	2-5	Hammaddelerden
Bakır	90-100	Cevherden
Patlayıcılar	10-70	Hammaddelerden
Cam	4-10	Hammaddelerden
Çakıl	<1	Kazılıp çıkarılır
Demir	12-20	Demir cevherinden
Kereste	1-3	Kerestelik ağaçtan
Plastik	60-120	Hidrokarbonlardan
Kontrplak	3-7	Kerestelik ağaçtan
Kum	<1	Kazılarak çıkarılır
Çelik	20-25	Pik demirden
Çelik	10-12	Atık metalden
Taş	<1	Taş ocağından

Kaynak: Veriler Smil'den (2014b) alınmıştır.

KARMAŞIKLIKLAR VE ENGELLER

Enerji depolamayı ve enerji akışlarını ölçmek için standart birimler kullanmak fiziksel olarak doğrudan, bilimsel olarak kusursuz bir yöntemdir, ne var ki ortak bir paydaya indirgenmiş bu sonuçlar aynı zamanda yanıltıcıdır. Her şeyden önemlisi çeşitli enerjiler arasındaki niceliksel farklılıkları yakalayamazlar. İki tür kömür aynı enerji yoğunluğuna sahip olabilir, ama biri çok temiz yanıp geride az miktarda kül bırakabilir, diğeri ise ağır yanıp büyük miktarda sülfür oksit saçabilir ve geride için için yanan büyük bir kalıntı bırakabilir. Buhar motorlarında yakıt olarak kullanılması ideal yüksek enerji yoğunluklu kömürün bol olması (sıklıkla kullanılan “dumansız” sınıfının görelî açıdan değerlendirilmesi gerekir) açıktır ki İngilizlerin on dokuzuncu yüzyılda deniz nakliyatına hakim olmasına katkıda bulunan bir etkidir, zira Fransa’da da Almanya’da da benzer nitelikte kömür kaynakları bulunmuyordu.

Kutu 1.9

Enerji yatırımının enerji getirisi

Fosil yakıtların niteliği ve erişilebilirliğindeki farklar muazzamdır: bir yanda yeraltında düşük kalite ince kömür damarları, bir yanda açık madenlerde çıkarılabilecek kalın bir iyi bitümin kömürü tabakası; bir yanda Ortadoğu'nun devasa hidrokarbon havzaları bir yanda sürekli pompalamayı gerektiren düşük verimlilikli kuyular. Sonuçta EROEI değerleri ciddi bir farklılık gösterir, çünkü daha verimli elde etme tekniklerinin geliştirilmesiyle birlikte değişebilirler. Birazdan vereceğimiz aralıklar sadece yaklaşık göstergelerdir, başlıca çıkarma ve çevrim yöntemleri arasındaki farklara örnektir (Smil 2008a; Murphy ve Hall 2010). Kömür üretiminde EROEI değerleri 10 ile 80 arasında değişir, petrol ve gaz için bu değerler 10 ile 100'ün çok üstü arasında gidip gelir; en rüzgârlı yerlerdeki büyük rüzgâr türbinleri için 20'ye yaklaşabilir bu değerler, ama çoğunlukla 10'un altındadır; fotovoltaik solar hücreler için 2'den yüksek değildir; modern biyoyakıtlarda (etanol, biyodizel) en iyi ihtimalle sadece 1,5'tir, ama üretimleri sıklıkla bir enerji kaybını gerektirir, net bir kazanım olmaz (sadece 0,9-1'lik bir EROEI).

Soyut enerji birimleri yenilebilir ve yenilemez biyokütle arasında bir ayrım yapmaz. Aynı kütleye sahip buğday ile kuru buğday samanı hemen hemen aynı miktarda ısı enerjisi içerir, ama büyük ölçüde selüloz, hemiselüloz ve linyinden oluşan saman insanlar tarafından hazmedilemez, (yüzde 70 nişastalı karbonhidratlar, yüzde 14 kadar proteinden oluşan) buğday ise mükemmel bir temel besin kaynağıdır. Soyut enerji birimleri yiyecek enerjisinin özgün kaynağını da gözden saklar, gereği gibi beslenmek açısından büyük öneme sahip bir meseledir bu. Yüksek enerjili birçok yiyecek hiç protein ya da lipit içermez ya da çok az içerir; bunlar bedeninin normal gelişimi ve dayanıklılığı için gerekli iki besindir; ayrıca bu yüksek enerjili yiyecekler temel mikrobisler, vitamin ya da mineraller de içermeyebilir.

Soyut ölçümlerin gözden sakladığı başka önemli nitelikler de vardır. Enerji depolarına erişim elbette kritik bir meseledir. Ağaç kökünün odunu ile dal odunu aynı enerji yoğunluğuna sahip olabilir, ama iyi testereler ve baltalar olmasaydı, sanayi öncesi birçok toplumda insanlar yakıt olarak sadece dal odunu toplayabilirdi. Afrika ya da Asya'nın en yoksul kesimlerinde bu hâlâ normdur, kadınlar ve çocuklar odunsu fitokütle toplar; bu odunsu fitokütlenin biçimi, dolayısıyla taşınabilirliği de önemlidir, çünkü odun istiflerini başlarının üstünde, hatırı sayılır mesafeler aşarak evlerine taşımaları gerekir. Kullanım kolaylığı ve çevrim verimliliği de bir yakıtın seçilmesinde belirleyici olabilir. Bir ev odun, kömür, fuel oil ya da doğalgazla ısınabilir, ama bugün en iyi gaz ocakları yüzde 97 verimlidir, bu nedenle de bunları kullanmak başka seçeneklere göre daha ucuzdur.

Basit ocaklarda saman yakılması sık sık ateşe kömür atmaya gerektirir, büyük odun parçaları dikkat gerektirmeksizin saatlerce yanabilir. Kuru tezekle, ev içinde havalandırma olmaksızın (ya da tavana açılmış bir delikle az bir havalandırmayla) yemek pişirilmesi, iyi bir ocakta bekletilmiş odunun yakılmasından daha fazla duman üretir, ev içinde biyokütle yakılması düşük gelirli birçok ülkede solunum hastalıklarının başlıca kaynaklarından biridir (McGranahan ve Murray 2003; Barnes 2014). Kökenleri belirtilmediği sürece, yoğunluklar ya da enerji akışları yenilenebilir ve fosil enerjiler arasında bir fark gözetmez, ne var ki bu ayrım belli bir enerji sisteminin doğasını ve sürekliliğini anlamak açısından temel önemdedir. Modern medeniyet fosil yakıtların kitlesel ve giderek artan bir biçimde yakılmasıyla kurulmuştur, ama bu pratik, bu kaynakların yer kabuğundaki miktarı ve kömür ve hidrokarbon yakmanın çevresel sonuçları nedeniyle açıkça sınırlanmıştır. Yüksek enerji toplumları, hayatlarını ancak fosil olmayan kaynaklara geçişle sürdürebilir.

Canlı ve cansız enerji çevrimlerinin verimlilikleri karşılaştırıldığında başka zorluklar da ortaya çıkar. Cansız enerji çevrimleri söz konusu olduğunda, sadece yakıt ya da elektrik girdileri ile yararlı enerji çıktısı arasında bir oran söz konusudur, ama canlı enerji çevriminde gündelik yiyecek (ya da yem) alımının insani ya da hayvani emeğin enerji girdisi olarak sayılmaması gerekir, çünkü bu enerjinin büyük bölümüne temel metabolizma için ihtiyaç duyulur, yani bedenin hayati organlarının işlemlerini desteklemek, beden ısınıp belli bir seviyede tutmak için; temel metabolizma insanlar ya da hayvanlar dinleniyor olsa da çalışıyor olsa da işlemeye devam eder. Net enerji maliyetinin hesaplanması herhalde en tatmin edici çözümdür (**Kutu 1.10**).

Ama bizimkinden çok daha basit toplumlarda, emeğin büyük bir bölümü her zaman fiziksel değil, zihinseldir; bir işe nasıl yaklaşılabileceğine, o işin eldeki sınırlı kuvvetle nasıl gerçekleştirileceğine, enerji harcamasının nasıl azaltılabileceğine karar verilir; düşünmenin, hatta çok derin düşünmenin metabolik maliyeti, zorlu kas gücüne kıyasla çok azdır. Öte yandan zihinsel gelişim yıllar boyunca dil öğrenmeyi, sosyalleşmeyi, akıl hocalarından ve deneyim edinerek öğrenmeyi gerektirir; toplumlar ilerledikçe bu öğrenme süreci resmi okul eğitimi ve öğrenimiyle, gerekli fiziksel altyapılar ve insani uzmanlığı destekleyecek hatırı sayılır dolaylı enerji girdileri gerektiren hizmetlerle daha talepkâr, daha kalıcı bir hal alır.

Böylece bir çember kapanır. Niceliksel değerlendirmelerin gerekliliğinden bahsetmişim, ama enerjiyi tarih içinde tam anlamıyla kavramak her

Kutu 1.10

İnsan emeğinin net enerji maliyetinin hesaplanması

İnsan emeğinin enerji maliyetini ifade etmenin genel olarak kabul edilen bir yolu yoktur, net enerji maliyetini hesaplamak herhalde en iyi seçenektir: Net enerji maliyeti bir insanın hiçbir iş yapılmaya bile var olması için karşılaması gereken enerji ihtiyacının üstündeki enerji tüketimidir. Bu yaklaşım insan emeğini fiili artan enerji maliyetiyle borçlu kılar. Toplam enerji harcaması temel (yani dinlenme halindeki) metabolik hız ile fiziksel faaliyet düzeyinin bir çarpımıdır ($TEE = BMR \times PAL$), artan enerji maliyeti açıkça TEE ile BMR arasındaki fark olacaktır. 70 kg ağırlığındaki yetişkin bir erkeğin BMR'si yaklaşık 7,5 MJ / gün olur, 60 kg ağırlığında bir kadının BMR'si ise yaklaşık 5,5 MJ/gün olacaktır. Çok çalışmanın günlük enerji ihtiyacını yaklaşık yüzde 30 artıracığını varsayarsak net enerji maliyeti erkekler için yaklaşık 2,2 MJ/gün, kadınlar için 1,7 MJ/gün olacaktır; dolayısıyla toplayıcılık, geleneksel tarım ve sanayi işyerinde net günlük enerji harcamalarının bütün yaklaşık hesaplamalarında 2 MJ/gün'ü kullanacağım.

Günlük yiyecek alımı emeğin enerji girdilerinden biri sayılmamalıdır; temel metabolizma (hayati önemdeki organları desteklemek, kan dolaşımını sağlamak, vücut ısınısını sürekli aynı seviyede tutmak için) biz dinlenirken de çalışırken de çalışır. Kas fizyolojisiyle ilgili araştırmalar, özellikle de Archibald V. Hill'in (1886-1977, 1922 Nobel Tıp Ödülü sahibi) çalışmaları kasların çalışmasının verimliliğini niceliksel terimlerle ortaya koymayı mümkün kılmıştır (Hill 1922; Whipp ve Wasserman 1969). Süreklilik gösteren aerobik performansların net verimliliği yaklaşık yüzde 20'dir, bu da fiziksel bir işe bağlanabilecek 2 MJ/gün'lük metabolik enerjinin yaklaşık 400 kJ/gün'e eşit yararlı iş üreteceği anlamına gelir. Bütün ilgili hesaplamalarda bu yaklaşıklık kullanacağım. Oysa tersine Kander, Malanima ve Warde (2013) enerji kaynaklarının tarihsel karşılaştırmasında fiili olarak yararlı enerji harcamadan ziyade toplam gıda alımını kullanmıştır. Kişi başına yıllık ortalama 3,9 GJ gıda alımının 1800 ile 2008 arasında değişmediğini varsaymışlardır.

şeyin juller ve wattlar üzerinden sayısal hesaplara indirgenmesinden, bunların her şeyi kapsayan açıklamalar olarak ele alınmasından çok daha fazlasını gerektirir. Bu zorluğa iki yönden yaklaşacağım: Enerji ve kuvvet gereklilik ve yoğunluklarına dikkat çekip, verimlilikleri iyileştirmenin yollarına işaret edeceğim; ama belli enerji kullanımlarını sınırlayan ya da teşvik eden birçok niceliksel özelliği de görmezden gelmeyeceğim. Enerji ihtiyaçları ve kullanımlarının zorunlu yönleri tarihe güçlü bir damga vurmuş olsa da bu temel önemdeki evrimi belirleyen etkenlerin birçok ayrıntısı, dizilimi ve sonuçları, insanların saiklerine ve tercihlerine atıfta bulunarak, medeniyetimizin tarihini şekillendirmiş bu şaşırtıcı ve sıklıkla da görünürde açıklanamaz tercihleri teslim ederek açıklanabilir ancak.

İKİNCİ BÖLÜM

Tarih Öncesinde Enerji

Homo cinsinin kökenlerini anlamak, sonraki evriminin ayrıntılarını doldurmak, yeni bulgular birçok eski köşe taşını geriye ittiği, mevcut bir hiyerarşiye kolayca oturmayan türlerin keşfi genel tabloyu karmaşıktırdığı için sonu gelmeyecek bir çabadır (Trinkaus 2005; Reynolds ve Gallagher 2012). 2015 itibarıyla tarihlendirmesi güvenilir en eski insansı kalıntıları *Ardipithecus ramidus*'a (1994'te bulunmuş olup 4,4 milyon yıl öncesinden kalmaz) ve *Australopithecus anamensis*'e (1967'de bulunmuş olup 4,1-5,2 milyon yıl öncesinden kalmaz) aittir. Etiyopya'da bulunan *Australopithecus deyiremeda* (3,3-3,5 milyon yıl öncesi) bu listeye 2015'te yapılmış dikkat çekici bir ilavedir (Haile-Selassie vd. 2015). Daha genç insansılar arasında *Australopithecus afarensis* (1974'te Laetoli, Tanzania ve Etiyopya'da Hadar'da ortaya çıkarılmıştır), *Homo habilis* (1960'ta Tanzania'da keşfedilmiştir) ve *Homo erectus* (1,8 milyon yıl öncesinden itibaren, Afrika, Asya ve Avrupa'da 250.000 yıl kadar öncesine uzanan birçok kalıntı bulunmuştur) yer alır.

İlk *Homo sapiens* kemiklerinin (Richard Leakey'nin Etiyopya'da 1967'den itibaren yaptığı meşhur keşifler) yeniden analiz edilmesi yaklaşık 190.000 yıl öncesine ait olduklarını göstermiştir (McDougall, Brown ve Fleagle 2005). Dolayısıyla doğrudan atalarımız hayatlarını basit toplayıcılar olarak geçirmiştir, türümüzün ilk küçük nüfusları ancak 10.000 yıl önce bitkiler ve hayvanların ehlileştirilmesine dayalı yerleşik bir varoluşa geçmiştir. Bu da insansıların toplayıcılık stratejilerinin milyonlarca yıl boyunca primat atalarınıninkine benzediği anlamına gelir; ama bugün elimizde, insansıların beslenme biçiminin günümüzde yaşayan kuyruklu maymunların beslenme bi-

çiminden yaklaşık 3,5 milyon yıl önce farklılaştığını gösteren, Doğu Afrika'da ortaya çıkarılan izotopik kanıtlar bulunuyor. Sponheimer ile çalışma arkadaşları (2013) bu tarihten sonra birkaç insansı kolunun ögünlerine ^{13}C (C_4 ya da krassulacean asit metabolizması –CAM fotosentezi– tarafından üretilir) bakımından zengin yiyecekler eklemeye başladıklarını, Afrikalı memelilerde pek rastlanmayan son derece değişken bir karbon izotopu bileşimine sahip olduklarını göstermiştir. Dolayısıyla C_4 açısından zengin bitkilere dayanmanın kökleri çok eskiye uzanır, modern tarımda C_4 açısından zengin iki bitkinin, mısır ve şeker pancarının ortalama verimi, tahılı ya da şeker içeriği için üretilen diğer bütün türlerden daha yüksektir.

Nihayetinde türümüzün ortaya çıkmasına neden olan ilk evrimsel yol ayrımı beynin daha büyük olması ya da alet yapımı değil, iki ayak üzerinde yürümektir; başlangıcı yaklaşık yedi milyon öncesine götürülebilecek yapısal olarak imkânsız, ama son derece büyük sonuçlar doğurmuş bir uyarlanmadır bu (Johanson 2006). İnsanlar normal hareket biçimleri dik yürümek olan yegâne memelidir (diğer primatlar sadece ara sıra böyle yapar), dolayısıyla iki ayak üzerinde yürümek nihayetinde bizi insan yapan çığır açıcı kritik uyarlanma olarak görülebilir. Aslında iki ayak üzerinde yürümek (esasinda kesintiye uğrayan bir dizi düşüş) içkin olarak kararsız ve hantaldır: “İnsanların yürümesi riskli bir iştir. İnsan bir anda yüzüstü yere kapaklanabilir; aslına bakılırsa insan attığı her adımda felaketin eşliğinde dolanır.” (Napier 1970, 165) İki ayak üzerinde yürümek bizi kas-iskelet yaralanmalarına açık hale getirmenin yanı sıra yaşla ilişkili kemik kaybına, osteopeniye (kemik yoğunluğunun normalden düşük olmasına) ve osteroporoza yol açmıştır (Latimer 2005).

Peki o halde neden iki ayak üstünde yürüyoruz sorusuna, bu açık soruya getirilmiş birçok cevap vardır, bu cevapların bazıları, Johanson'un (2006) özlü bir biçimde savunduğu üzere ikna edicilikten gayet uzaktır. Avcıları caydırmak için daha uzun görünmek gibi bir gerekçenin, çok daha büyük memeli türlerinden gözü korkmayan vahşi köpekler, çitalar ya da çakallar üzerinde bir etkisi olamazdı. Uzun otların ötesini görebilmek için ayağa kalkmak avcılarını çekmekten başka bir işe yaramazdı, aşağı sarkmış dallarda meyve arama işi dört ayakla hızla koşma özelliğinden vazgeçmeksiz halledilebilirdi; vücudun soğutulması gölgede dinlenerek sabah ya da akşam serinliğinde toplamaya çıkarak sağlanabilirdi. Genel enerji harcamasındaki farklılıklar en iyi açıklamayı sunuyormuş gibi görünmektedir (Lovejoy 1988). İnsansılar, diğer memeliler gibi enerjilerinin büyük bölümünü

üremeye, beslenmeye ve güvenliklerini sağlamaya harcıyordu; iki ayak üzerinde yürümek bütün bunların yapılmasına katkıda bulunmuşsa o nedenle benimsenmiş olsa gerekti.

Johanson'un belirttiği üzere (2006, 2): “Doğal seçim iki ayak üzerinde yürümek gibi bir davranış *yaratamaz*, ama ortaya çıkan davranışın seçilmesini sağlayabilir.” Daha dar bir anlamda bakıldığında iki ayak üzerinde yürümenin, sırf yürümenin enerji maliyeti nedeniyle seçilmesini teşvik edecek yeterince biyomekanik avantaj sunup sunmadığı açık değildir (Richmond vd. 2001); gerçi Sockol, Raichlen ve Pontzer (2007) yürüyen şempanzeler ve yetişkin insanların enerji harcamasını ölçtükten sonra insanların yürümesinin, şempanzelerin hem dört ayaklı hem iki ayaklı yürümesine nazaran yüzde 75 az enerji harcanmasını sağladığını ortaya çıkarmıştır. Bu farklılık anatomi ve yürüme biçimindeki farklılıktan, hepsinden de önemlisi insanlarda kalçanın daha geniş, arka bacakların daha uzun olmasından kaynaklanır.

İki ayak üzerinde yürüme muazzam bir evrimsel değişiklikler silsilesi başlatmıştır (Kingdon 2003; Meldrum ve Hilton 2004). Dik yürümek insanların kollarını serbest bırakmış, silah taşımalarını, yiyecekleri buldukları yerde tüketmek yerine grup olarak toplandıkları yere taşımalarını kolaylaştırmıştır. Aslında iki ayak üzerinde yürümek el yatkınlığı ve alet kullanımının geliştirilmesi için gerekliydi. Hashimoto ile çalışma arkadaşları (2013) alet kullanmanın temelindeki uyarlanmaların insanların iki ayak üzerinde yürümesi için gerekli olan uyarlanmalardan bağımsız geliştiği, zira hem insanlarda hem maymunlarda nasıl ki elde fiziksel olarak bütün parmaklar birbirinden ayrıysa, her bir parmağın birincil sensorimotor kortekste ayrı olarak temsil edildiği sonucuna varmıştır. Bu durum, her bir parmağın alet kullanımı için gerekli karmaşık manipülasyonlardan bağımsız olarak kullanılması becerisini yaratır. Ama iki ayak üzerinde yürümek söz konusu olmasaydı, alet yapımı ve kullanımı sırasında eli hızlandırmak için gövdeyi kaldıraç olarak kullanmak imkânsız olurdu. İki ayak üzerinde yürümek ağız ve dişleri de dilin önkoşulu olan daha karmaşık bir çağrı sistemi geliştirmekte serbest bırakmıştır (Aiello 1996). Bu gelişmeler, enerji maliyeti nihayetinde şempanzelerdeki düzeyin üç katına çıkan, temel metabolizmanın toplam maliyetinin altıda birine varan daha büyük beyinler gerektiriyordu (Foley ve Lee 1991; Lewin 2004). Ortalama ensefalizasyon katsayısı (beden ağırlığına göre fiili/beklenen beyin kütlesi) primatlar ve erken insansılarda 2-3,5'tur, insanlardaysa 6'nın biraz üstündedir. Üç milyon yıl önce *Austra-*

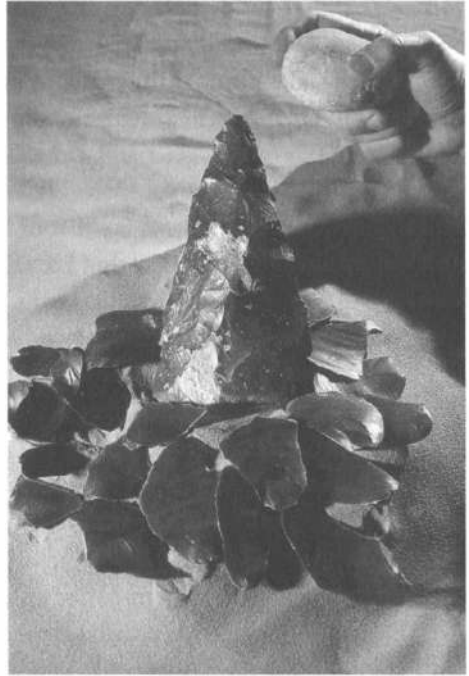
lopithecus afarensis'in hacmi 500 cm³'ten küçüktü, bu hacim 1,5 milyon yıl önce *Homo erectus*'ta iki katına çıktı, sonra *Homo sapiens*'te kabaca yüzde 50 arttı (Leonard, Snodgrass ve Robertson 2007).

Ensefalizasyon katsayısının daha yüksek olması (hayatta kalma açısından aksilikler çıkaran, insansıları diğer memelilerden ayırán) sosyal karmaşıklığın doğması açısından kritik önemdeydi, tüketilen yiyeceğin kalitesindeki değişikliklerle yakından ilişkiliydi. Beynin özel enerji ihtiyacı, iskelet kaslarının enerji ihtiyacının kabaca 16 katı kadardır; insan beyni dinlenme halinde metabolizma enerjisinin yüzde 20/25'ini tüketir, diğer primatlarda bu oran yüzde 8-10, diğer memelilerde sadece yüzde 3-5'tir (Holliday 1986; Leonard vd. 2003). Genel metabolizma hızını korurken büyük bir beyne sahip olmanın yegâne yolu (insanların dinlenme halindeki metabolizması aynı kütleye sahip diğer memelilerinkinden daha yüksek değildi), metabolik açıdan pahalı diğer dokuların kütesinin azalmasıydı. Aiello ile Wheeler (1995) sindirim sistemi yolunun küçülmesinin en iyi seçenek olduğunu, zira bağırsak kütesinin (kalp ya da böbrek kütesinden farklı olarak) beslenme biçimine bağlı olarak ciddi bir biçimde farklılık gösterebileceğini savunmuştur.

Fish ve Lockwood (2003), Leonard, Snodgrass ve Robertson (2007), Hublin ve Richards (2009) beslenme biçiminin niteliği ile beyin kütesinin primatlarda önemli oranda pozitif korelasyon gösterdiğini; insansıların et dâhil, daha iyi diyetlere geçmesinin, yüksek enerji ihtiyacı kısmen sindirim sistemi yolunun küçülmesiyle karşılanan daha büyük beyinleri desteklediğini doğrulamıştır (Braun vd. 2010). Bugün varolan insan dışı primatlarda bağırsak kütesinin yüzde 45'inden fazlası kalın bağırsakta, yüzde 14-29'u ince bağırsaktadır; insanlarda bu oranlar tersine çevrilmiştir, bağırsak kütesinin yüzde 56'sı ince bağırsakta, sadece yüzde 17-25'i kalın bağırsaktadır; ince bağırsakta sindirilebilecek yüksek nitelikli, enerji yoğun yiyeceklerin (et, kuruyemişler) benimsendiğini gösteren açık bir işarettir bu. Et tüketiminin artması da insanların beden kütleleri ve boylarındaki artışları açıklamaya, ayrıca çeneler ve dişlerin küçülmesini açıklamaya yardımcı olur (McHenry ve Coffing 2000; Aiello ve Wells 2002). Ama daha fazla et alınması, evrim geçirmekte olan insansıların enerji dayanağını değiştiremezdi: İnsansıların herhangi bir yiyeceği güvence altına almak için toplarken, çöpçülük ederken, avlanırken, balık yakalarken sadece kaslarına ve basit stratejilere dayanmaları gerekiyordu.

İlk tahta aletlerin (sopalar) doğuşunun izini sürmek imkânsızdır, çünkü sadece oksijen almayan ortamlarda, çoğunlukla bataklıklarda saklanan aletler uzun zaman boyunca korunabilmiştir. Basit aletleri şekillendirmek için kullanılan sert taşlar söz konusu olduğunda çürüme sorun değildir, yeni bulgular insansıların doğrulanabilir ilk taş aletlerinin tarihini daha geriye itmektedir. İlk taş aletlerin yaklaşık 2,5 milyon yıl öncesine ait olduğu konusunda elli-altmış yıl boyunca bir konsensüs var olmuştur. Çakıla dayanan, nispeten küçük ve basit Oldowan çekiç taşları (kenarlı damarlar), kesiciler ve ince tabakalar hayvanları kesmeyi, kemiklerini parçalamayı çok kolaylaştırıyordu (de la Torre 2011). Ama Kenya'da Batı Turkana'da Lomekwi yerleşiminde ortaya çıkarılan en son bulgular, bilinen en eski taş aletin yapım tarihini yaklaşık 3,3 milyon öncesine itmiştir (Harmand vd. 2015).

İnsansılar yaklaşık 1,5 milyon yıl önce daha büyük yassı kaya parçaları çıkarıp iki yüzü el baltaları, penalar ve satırlar yapmaya başlamıştır; Acheul çağına (1,2- 0,1 milyon yıl öncesi-ne) özgü stildedir bu aletler. Tek bir damarın yontulması 20 santimetreden kısa keskin kenarlar yaratıyordu, bu pratikler geniş bir taş alet yelpazesi yaratmıştır (Şekil 2.1). Tahta mızraklar daha büyük hayvanların avlanması açısından temel önemdeydi. 1948'de Almanya'da bir fil iskeletinin içinde bulunan neredeyse kusursuz bir mızrağın son arabuzul çağına (115.000-125.000 yıl öncesi) ait olduğu ortaya çıkarıldı, 1996'da Schöningen'de açık bir linyit madeninde bulunan mızrakların 400.000-380.000 yıl öncesine ait olduğu ortaya çıkarıldı (Thieme 1997), öyle anlaşıyor ki yaklaşık 300.000 yıl öncesinden itibaren tahta mızraklara taş uçlar takılmaya başlanmıştır.



Şekil 2.1 İlk kez *Homo ergaster*'in yaptığı Acheul taş aletleri, taş tabakalarının çıkarılıp usta işi kesici temrenler üretilmesiyle oluşturulmuştu (Corbis).

Güney Afrika'da ortaya çıkarılan yeni bulgular, kabzalı, çok bileşenli aletlerin ilk yapım tarihini daha önce belirtilenden yaklaşık 200.000 yıl önceye itmektedir. Wilkins ile çalışma arkadaşları (2012) Kathu Pan'da bulunan, yaklaşık 500.000 yıl önce yapılmış taş uçların mızrak ucu olarak iş gördüğü sonucuna varmıştı. Gerçek uzun menzilli, sivri uçlu silahlar Afrika'da 90.000 ilâ 70.000 yıl önce evrilmiştir (Rhodes ve Churchill 2009). Kısa süre önce Güney Afrika'da keşfedilen bir diğer bulguysa önemli bir teknik ilerlemenin (bileşik alet yapımında kullanılmak üzere esasen ısıtılmış taştan küçük temren, yani mikrolit üretiminin) 71.000 yıl kadar önce başladığını göstermiştir (Brown vd. 2012). Daha büyük bileşik aletler, ancak 25.000 yıl kadar önce (Avrupa'da Gravettian dönemi) taşlanmış ve kabzalanmış baltaların üretimiyle, çakmak taşının daha etkili bir biçimde tabakalara ayrılmasıyla yaygınlık kazanmış, keskin kenarlı birçok alet ortaya çıkmıştır; zıpkınlar, iğneler, testereler, çömlekler, dokunmuş iplikçikten eşyalar (kumaşlar, ağlar ve sepetler) da bu dönemde icat edilip benimsenmiştir.

Magdalen teknikleri ile (17.000 ilâ 12.000 yıl öncesi; bu dönem Güney Fransa'da La Madeleine'de bu aletlerin bulunduğu bir kaya sığınağından adını almıştır) tek bir taştan 12 metreye varan mikrotemren kenarlar üretilebiliyordu, (mızrakların üstüne geçirilen) modern kopyalarla yapılan deneyler bu aletlerin av verimini işaret etmektedir (Petillon vd. 2011). Taş uçlu mızraklar geç Paleolitik'te mızrak atıcıların icadı sonrasında çok daha güçlü silahlar haline gelmiştir. Kaldıraçlı bir atış silahın ivmesini kolayca iki katına çıkarıyor, daha yakına gitme gereksinimini azaltıyordu. Taş uçlu oklar bu avantajları daha ileri taşımış, nişan almanın kesinliğine katkıda bulunmuştu.

Isınmak ve pişirmek için kontrollü ateş kullanımının ne zaman başladığını asla bilemeyeceğiz: Açık havada, bu soruyla ilgili kanıtlar birbirini izleyen pek çok olay sonucu ortadan kalkmıştır, yerleşilen mağaralardaysa mekânın nesiller boyunca kullanılması bu kanıtları imha etmiştir. Ateşin kontrollü kullanımına ilişkin iyi kanıtlara dayalı tarihler geriye doğru gitmektedir: Goudsblom (1992) bu tarihi 250.000 yıl öncesi olarak vermiştir; ondan on iki yıl sonra Goren-Inbar ve çalışma arkadaşları (2004) bu tarihi 790.000 yıl kadar önceye itmiştir, fosil kayıtlarıysa bazı pişirilmiş yiyeceklerin tüketiminin 1,9 milyon yıl öncesine uzandığını göstermektedir. Ama hiç kuşku yok ki Yukarı Paleolitik Çağı'na gelindiğinde (30.000 ilâ 20.000 yıl öncesinde, *Homo sapiens sapiens* Avrupa'da Neandertallerin yerini aldığı) ateş kullanımı yaygınlaşmıştı (Bar-Yosef 2002; Karkanas vd. 2007).

Pişirmek her zaman insanın evriminin önemli bir bileşeni olarak görülmüştür, ama Wrangham (2009) pişirmenin, elverişli yiyecek yelpazesinde büyük bir genişlemeye, yiyeceklerin niteliğinde büyük bir yükselmeye neden olduğu, ayrıca pişirmenin benimsenmesi nihayetinde karmaşık sosyalleşmeye, yerleşik hayatlara ve “benliğin ehlileşmesine” yol açan birçok fiziksel (dişlerin küçülmesi, sindirim sisteminin hacim kaybetmesi dâhil) ve davranışsal değişikliği (yiyecek istiflenen depoları savunma ihtiyacının koruyucu kadın-erkek bağlarını teşvik etmesi gibi) beraberinde getirdiği için atalarımız üzerinde “canavarca” bir etkisi olduğu inancındadır. Tarih öncesinde pişirme açık havada yakılan ateşlerle yapılıyordu, et alevin üstüne asılıyor, sıcak köze gömülüyor, sıcak taşların üstüne yerleştiriliyor, sert posta sarılıyor, kille kaplanıyor ya da suyla doldurulmuş deri keselere sıcak taşlarla birlikte yerleştiriliyordu. Bu düzenleme ve yöntemlerin çeşitliliği nedeniyle tipik yakıt çevrim verimlerini hesaplamak imkânsızdır. Deneyler odun enerjisinin yüzde 2-10’unun pişirmeye yarar ısı haline geldiğini, akla yatkın varsayımlar da yıllık odun tüketiminin en fazla kişi başına 100-150 kg’yi bulduğunu göstermektedir (Kutu 2.1).

Ateş ısınmak ve pişirmenin yanı sıra bir mühendislik aracı olarak da kullanılıyordu: Modern insanlar taşların tabakalanma özelliklerini iyileştirmek için 164.000 yıl kadar önce taşları ısıyla işlemeye başlamıştır (Brown vd., 2009). Mellars Güney Afrika’da 55.000 yıl kadar öncesinde bitki örtüsü-

Kutu 2.1

Açık havada yakılmış ateşte et pişirmek ve odun tüketimi

Geç Paleolitik’te açık havada yakılmış ateşte et pişirme uygulamasının yol açtığı azami düzeyde odun tüketimine ilişkin akla yatkın, gerçekçi varsayımlar şöyledir (Smil 2013a): Kişi başına ortalama 10 MJ günlük gıda enerjisi alımı (yetişkinler için yeterlidir, toplam nüfusların ortalamasından yüksektir) et toplam gıda alımının yüzde 80’ini (8 MJ) oluşturur; hayvan leşlerinden 8-10 MJ/kg’lik bir gıda enerjisi yoğunluğu (mamutlarda tipiktir, büyük toynaklılarda genellikle 5-6 MJ/kg’dır); sıcak iklimlerde ortalama 20, daha soğuk iklimlerde ortalama 10 derecelik bir ortam ısı; 80 derecede pişmiş et (77 santigrat derece iyi pişmiş et için yeterlidir); etin yaklaşık 3 kJ/kg santigrat ısı kapasitesi; açık havada yakılan ateşin sadece yüzde 5’lik pişirme verimi ve açıkta kurumuş odunun ortalama 15 MJ/kg’lik ortalama enerji yoğunluğu. Bu varsayımlar kişi başına günlük ortalama yaklaşık 1 kg’lik mamut eti (ve yaklaşık 1,5 kg büyük toynaklı eti) alımı ve günlük yaklaşık 4-6 MJ odun ihtiyacı anlamına gelir. Yıllık toplam 1,5-2,2 GJ ya da (bir kısmı yaş, bir kısmı kuru) 100-150 kg odun olacaktır. 20.000 yıl önce yaşamış 200.000 kişi için küresel ihtiyaç 20.000-30.000 t olacaktır; tarım öncesi mevcut odunsu fitokütle düşünüldüğünde ihmal edilebilir bir paydır (10^{-8} kertesinde).

nün kontrollü olarak yakıldığına ilişkin kanıtlar bulunduğunu ileri sürmektedir. Erken Holosen'de avcı-toplayıcıların bir çevresel idare aracı olarak ormanlık alanları yakması, (hayvanları çekmek ve görünürlüğü iyileştirmek için toplanan bitkilerin yeniden büyümesini teşvik ederek) avcılığa katkıda bulunmak, insanların hareketini kolaylaştırmak ya da yenilen bitkilerin toplanmasını iyileştirmek veya senkronize etmek için gerçekleştirilmiş olsa gerektir (Mason 2000).

Arkeolojik kayıtlardaki büyük mekânsal ve zamansal değişiklikler tarih öncesi toplumların enerji dengeleriyle ilgili basit genellemeler yapılmasını engellemektedir. Varlığını sürdüren toplayıcılarla ilk temasların betimlenmesi, bu insanları konu alan antropolojik araştırmalar kesinlikten uzak analogiler sunar: Uç koşulların hakim olduğu ortamlarda modern bilimsel yöntemlerle incelenilecek kadar uzun süre varlığını sürdürmüş gruplarla ilgili bilgiler daha ılıman iklimlerde, daha verimli bölgelerde yaşamış tarih öncesindeki toplayıcıların hayatlarına ilişkin sınırlı bir kavrayış verir. Ayrıca incelenmiş toplayıcı toplumların birçoğu göçebe çobanlar, çiftçiler ya da deniz aşırı göçlerden etkilenmiştir (Headland ve Reid 1989; Fitzhugh ve Habu 2002). Ama tipik bir toplama örüntüsünün yokluğu, enerji akışlarını yöneten, toplayıcı ve avcı grupların davranışlarını belirleyen birkaç biyofiziksel zorunluluğun tanınmasını engellemez.

TOPLAYICI TOPLUMLAR

En kapsamlı güvenilir kanıt koleksiyonları, modern toplayıcı nüfusların ortalama nüfus yoğunluğunun (doğal yerleşim alanlarında, yiyecek edinme becerileri ve tekniklerinde bir çeşitliliği yansıtarak) üç kerteğe yayıldığını gösterir (Murdock 1967; Kelly 1983; Lee ve Daily 1999; Marlowe 2005). En düşük kerte tek bir kişi /100 km² ile birkaç yüz kişi /100 km² arasında değişir, incelenmiş 340 kültürde 25 kişi/100 km² gibi genel bir ortalamaya ulaşılmıştır; işlevsel uzmanlıkları ve sosyal tabakalanmaları giderek artan daha karmaşık toplumları destekleyemeyecek kadar düşük bir rakamdır bu. Toplayıcıların ortalama nüfus yoğunlukları, bol miktarda selülozlu fitokütle sindirebilen aynı büyüklükteki otçul memelilerin nüfus yoğunluğundan düşüktü.

Allometrik denklemler km²'ye yaklaşık 5 tane 50 kg'lık memeli düştüğü tahmininde bulunurken, şempanzelerin nüfus yoğunluğu 1,3-2,4 / km²'dir, yirminci yüzyıla ulaşan avcı-toplayıcıların nüfus yoğunluğuysa ılıman iklimlerde km²'de bir kişinin altındadır, Eski Dünya'da 0,24, Yeni Dünya'daysa

0,4'tür (Marlowe 2005; Smil 2003a). Nüfus yoğunlukları bol bulunan bitkilerin toplanmasını avcılıkla birleştiren gruplarda (iyi incelenmiş örnekler arasında buzul sonrası Avrupa'daki gruplar, daha yakın dönemde Meksika havzasındaki gruplar yer alır) ve suda yaşayan türlere büyük ölçüde bağımlı olan kıyı toplumlarında (Baltık bölgesinde) ciddi oranda yüksektir.

Yumuşakça toplamak, balık avlamak, kıyıya yakın yerlerde deniz memelisi avlamak en yüksek toplayıcı nüfus yoğunluklarının devam etmesini sağlamış, yarı kalıcı, hatta kalıcı yerleşimler kurulmasına yol açmıştır. Pasifik kuzeybatısındaki sahil köyleri büyük evleriyle, deniz memelilerini topluca örgütlenerek avlamalarıyla yerleşik hayatları açısından istisnadır. Bu yüksek yoğunluklu topluluklar, basitçe biyosferik enerji akışlarından kaynaklanmıyordu: Kutba doğru ilerledikçe azalıyor, ekvatora doğru indikçe (daha yüksek fotosentez verimliliğine oranla) artıyor değillerdi; avlanması mümkün hayvanların toplam kütlesine de tekabül etmiyorlardı. Ekosistem değişkenleriyle, bitkisel ve hayvansal yiyeceklere olan göreceli bir bağımlılıkla, mevsimlik olarak depolanan gıdaların kullanılmasıyla belirleniyorlardı. İnsandışı primatlara çok benzer şekilde, bütün toplayıcılar etoburdu, ama bitki toplamaya kıyasla çok daha küçük bir yenilebilir gıda rezervuarı hedeflendiğinden, ki beslenme düzeyleri arasında enerji alışverişinin azalmasının doğal bir sonucudur bu, daha büyük hayvanların öldürülmesi, enerji açısından başlıca zorluklardan biriydi.

Otoburlar yaprak döken ılıman ormanlarda net asal üretimin sadece yüzde 1-2'sini, bazı tropikal otlaklarda yüzde 50-60'ını tüketir; bu oranın yüzde 5-10'u çoğunlukla otlatmayı yansıtır (Smil 2013a). Genellikle yenilen fitokütlenin yüzde 30'dan azı sindirilir, büyük bir bölümü solunur, memeliler ve kuşlarda bu fitokütlenin sadece yüzde 1-2'si zookütleye çevrilir. Bunun bir sonucu olarak en yaygın olarak avlanan otoburlar, yaşadıkları ekosistemlerin fitokütlesinde en başta depolanan enerjinin yüzde 1'inden azını temsil ediyorlardı. Bu gerçeklik, avcılarının neden nispeten büyük yetişkin beden kütlesini yüksek verimlilik ve yüksel bölgesel yoğunlukla birleştiren hayvanları öldürmeyi tercih ettiğini açıklar: yaban domuzları (30 kg), geyik ve antiloplar (çoğunlukla 25-500 kg) olağan hedeflerdi.

Bu gibi hayvanların nispeten yaygın olduğu yerlerde, örneğin tropikal ya da ılıman otlaklarda ya da tropikal ormanlık alanlarda, avlanmak daha fazla ödül getiriyordu, ama tropikal bölgelerde hayvan türlerinin bol olduğu algısı yaygın olsa da, tam tersine buralarda ormanlar avlanarak sömürme açısından daha aşağı ekosistemlerdir. Çoğu tropikal orman hayvanları ağaç-

larda yaşayan, çiçek ya da meyve yiyen, yuvaları ağaçların tepesinde olduğundan ulaşılamayan (birçoğu geceleyin ortaya çıkar), hareketli küçük türlerdir (maymunlar, kuşlar) ve bunların avlanmasının enerji getirisi düşüktür. Sillitoe (2002), Papua Yeni Gine yaylalarında tropikal bir yağmur ormanında hem toplayıcılığın hem avcılığın maliyetli olduğunu, toplayıcıların yiyeceklerinden aldığı enerjinin dört katı daha fazla enerjiyi avlanmaya harcadığı sonucuna varmıştır. Açıktır ki böyle düşük bir enerji getirisi, avlanmanın başlıca gıda temin yolu olmasını mümkün kılmıyordu (negatif enerji getirisi sadece hayvansal proteinlerin alınmasıyla açıklanabilir), yeterince yiyecek sağlamak için bazı hareketli tarım biçimlerine başvurmaya gerekiyordu.

Bailey ve çalışma arkadaşları (1989) tropikal yağmur ormanlarında evcilleştirilmiş bitkiler ve hayvanlara bir şekilde bağlı olmaksızın yaşayan toplayıcılara ilişkin açık, kesin etnografik anlatılar bulunmadığı sonucuna varmıştır. Malezya'da bulunan arkeolojik kanıtlara göre sagu ve domuz yoğunluklarının yüksek olması bazı istisnaları mümkün kılabileceğinden, Bailey ve Headland (1991) daha sonra bu sonucu değiştirmiştir. Aynı şekilde toplayıcılık da tür bakımından zengin olan tropik bölgelerin yanı sıra ılıman



Şekil 2.2 Tropikal yağmur ormanları tür bakımından zengin, ama daha geniş avcı nüfusları destekleyecek bitkiler açısından nispeten yoksuldur. Bu resimde Kosta Rika'da La Fortuna'daki üst bitki tabakası görülüyor. (Corbis).

ormanlarda da ödüllendirici olmaktan şaşırtıcı derecede uzaktır. Bu ekosistemler gezegenin fitokütlesinin çoğunu depolar, ama bunu çoğunlukla uzun ağaç gövdelerinin ölü dokularında gerçekleştirir, insanlar ağaç gövdelerinin selülozunu ve linyinini sindiremez (Smil 2013a). Enerji bakımından zengin meyveler ve tohumlar toplam bitki kütlesinin çok küçük bir bölümünü oluşturur, sıklıkla da yüksek sayvanlarda bulunduklarından ulaşılmaları zordur; tohumlar sıklıkla sert kabuklarla korunur, tüketilmeden önce enerji yoğun işlemlerden geçirilmeleri gerekir. Tropikal ormanlarda toplayıcılık yapmak daha fazla aranmayı gerektirir; çok büyük bir tür çeşitliliği olması, bazı kısımları toplanmaya hazır asmalarla ağaçlar arasında hatırı sayılır mesafeler olabileceği anlamına gelir (Şekil 2.2). Brezilya yemişlerinin hasadı bu gibi sınırlamalara verilebilecek mükemmel bir örnektir (Kutu 2.2).

Tropikal ve boreal ormanlarda avlanmak sıklıkla hayal kırıklığı yaratsa da otlaklar ve açık ormanlık alanlar toplayıcılar ve avcılar için mükemmel fırsatlar sunuyordu. Buralarda birim alan başına, yoğun bir ormanda olduğundan çok daha az enerji depolanır, ama bu enerjinin çok daha büyük bir bölümü kolayca toplanabilen, son derece besleyici tohumlar ve meyvelerde ya da büyük nişastalı kök ve yumru topluluklarındadır. Yüksek enerji yoğunluğu (25 MJ/kg kadar) nedeniyle kuru yemişler özellikle gözde yiyeceklerdir, bazılarını, örneğin ceviz ve meşe palamutlarını toplamak kolaydır. Ormanların tersine, otlaklarda otlayan birçok hayvan gelişip çok büyük boyutlara ulaşabilir, sıklıkla büyük sürüler halinde hareket edebilir ve ava harcanan enerjiye karşılık mükemmel getiriler sunabilir.

Kutu 2.2

Brezilya cevizinin hasadı

Brezilya cevizi yüksek lipit içeriği (yüzde 66) nedeniyle yaklaşık 27 MJ/kg içerir (tahıllar için 15 MJ/kg'ye kıyasla), yaklaşık yüzde 14 proteinden oluşur ve potasyum, magnezyum, kalsiyum, fosfor ile yüksek düzeyde selenyum kaynağıdır (Besin Değeri 2015). Brezilya cevizlerinin hasadı hem çok emek isteyen hem tehlikeli bir iştir. *Bertholletia*'nın uzunluğu yaklaşık 50 metreyi bulur, ağaçlar dağınık olarak yerleşmiştir. Hindistancevizine benzer büyük bir dış kabukla kaplı ağır (yaklaşık 2 kg) kapsüllerin içinde 8 ilâ 24 ceviz vardır. Ceviz toplayıcıları hasatlarının zamanını iyi ayarlamalıdır: Hasat çok erken olursa, tohum keseleri ağacın üst kısımlarında ulaşılabilir yerlerde olur, toplayıcıların bir kez daha gelmek için enerji sarf etmesi gerekir; çok geç olursa düşmüş keseleri açabilen yegâne hayvan olan, büyük kemirgenlerden *agoutis* (*Dasyprocta punctata*) tohumları hemen yiyecek ya da bazılarını yiyecek zulasında saklayacaktır (Haugaasen vd. 2010).

İnsansılar leş toplayıcılar, emsalsiz koşucular olmaları ya da zekice pusular kurlmaları sayesinde otlaklarda ve ormanlık alanlarda hiç silahları olmadan et elde edebiliyordu. İlk insanların fiziksel donanımlarının etkileyici olmadığı, etkili silahların da bulunmadığı dikkate alındığında atalarımızın ilk başlarda leş toplayıcılıkta avcılıktan çok daha iyi olmaları çok büyük bir ihtimaldi (Blumenschine ve Cavallo 1992; Pobiner 2015). Büyük avcılar (aslanlar, leoparlar, kılıç dişli kediler) genellikle geride kısmen yenmiş otobur leşleri bırakıyordu. Bu et ya da en azından besleyici kemik iliği akbabalar, çakallar ve diğer leş yiyiciler tarafından gövdeye indirilmeden önce, haberleşme sayesinde ilk insanlara ulaşılıyor olabilirdi. Ama Dominguez-Rodrigo (2002) leş yiyiciliğin yeterince et sağlamayacağını, otlaklarda yalnızca avcılığın yeterince hayvansal protein sağlayacağını savunmuştur. Neresinden bakılırsa bakılsın insanların iki ayak üzerinde yürümeleri ve diğer memelilerden daha iyi terlemeleri, en hızlı otoburların bile yorgunluktan tükeninceye dek takip edilmesini mümkün kılmıştır (Kutu 2.3).

Carrier (1984), insanların sıcaklık dağılım oranlarının dikkat çekici düzeyde olmasının atalarımızın yeni bir yaşam ortamı, sıcakkanlı avcılarının yaşam ortamını benimsemesine yarayan dikkat çekici bir evrimsel avantaj sağladığı kanısındadır. İnsanların bol bol terleyebilmeleri, dolayısıyla sıcak ortamlarda sıkı çalışabilmeleri, daha soğuk iklimlere göç eden nüfuslarda korunmuştur: Farklı iklim bölgelerindeki nüfusların ekrin bezi yoğunluklarında büyük farklılıklar yoktur (Taylor 2006). Orta ve yukarı enlemlerde yaşayan insanlar sıcak iklim yerlilerinin terleme düzeyine, kısa bir iklime alışma süreci sonrasında ayak uydurabilir.

Ama gerekli aletler icat edilip benimsendiğinde bunlarla avlanmak avın peşinde koşmaya tercih edilir olmuştur Faith (2007). Orta Taş Çağı'na ait 51, Geç Taş Çağı'na ait 98 bulguyu inceledikten sonra Afrika'daki ilk avcılarının bufalo dâhil büyük toynaklı hayvanları öldürmekte son derece yetkin olduğunu doğrulamıştır. Büyük hayvanları avlamanın enerji açısından gerekli kıldığı koşullar insanların sosyalleşmesine de hesaplanamayacak büyük bir katkıda bulunmuştur. Trinkaus (1987, 131-132), "insanların ayırt edici özelliklerinin çoğunun, örneğin iki ayak üzerinde yürümek, el alışkanlığı kazanmak, incelikli teknoloji, dikkat çekici ensefalizasyon, fırsatçı bir toplayıcılık sisteminin talepleriyle teşvik edildiği düşünülebilir," sonucuna varmıştır.

Kutu 2.3**Koşmak ve insanların ısı yayması**

Bütün dört ayaklıların farklı yürüyüş biçimleri için optimum hızları vardır, atlarda tanık olduğumuz yürüme, tırıs, eşkin gibi. İnsanların koşmasının enerji maliyeti aynı ağırlıktaki memelilerin koşma maliyetine kıyasla nispeten yüksektir, ama onların aksine, insanlar 2 ile 6 m/s arasındaki olağan hızlar için bu maliyeti, koşma hızından ayırabilir (Carrier 1984; Bramble ve Lieberman 2004). İki ayak üzerinde yürümek ve verimli ısı dağılımı bu özelliği açıklar. Dört ayaklıların solunumu her bir lokomotor döngüsü için bir nefesle sınırlıdır. Dorsoventral bağlanma göğüs kafesini ritmik olarak sıkıştırıp genişletirken, göğüs kafesi kemikleri ve kaslarının ön uzuvların etkisini masnetmesi gerekir; ama insanın nefesinin sıklığı, uzun adım sıklığına göre değişebilir: İnsanlar çeşitli hızlarda koşabilir, ama dört ayaklıların optimum hızı yapısal olarak belirlenir.

İnsanın olağanüstü termoregülasyon becerisi çok yüksek terleme oranlarına dayanır. Atlar bir saatte derilerinin bir metrekaresinde 100 gram oranında su kaybeder, develerde bu oran 250 g/m², ama insanlarda bu kayıp 500 g/m²'den fazladır; en yüksek oranlar saatte 2 kg'nin üstüne çıkar (Torii 1995; Taylor ve Machado-Moreira 2013). Terleme oranı 550-625 W'lık bir ısı kaybı anlamına gelir, bu son derece ağır çalışma sırasında bile ısıyı düzenlemeye yeterli bir düzeydir. İnsanlar ayrıca terlediklerinden daha azını içebilir, geçici kısmi bir su kaybını saatler sonra karşılayabilirler. Koşmak insanları, hayvanları takatleri kesilinceye kadar takip edebilecek, gündüzleri ortaya çıkan, yüksek ısılı avcılara çevirmiştir (Heinrich 2001; Liebenberg 2006). Belgelenmiş takipler arasında, Kuzey Meksika'da Tarahumara yerlilerinin geyik takipleri ile Paiuteler ile Navajoların çatalboynuzlu antilopları alt etmesi yer alır. Kalahari'de yaşayan Basarwa kabilesi kurak mevsimde duikerler ve gemsbokları takatleri kesilinceye dek takip edebilir, Avustralya Aborijenleri de kanguruları. Yalınayak koşan avcılar enerji maliyetlerini atletik ayakkabılar giyen modern koşuculara kıyasla yaklaşık yüzde 4 azaltmıştır (akut bilek ve kronik alt bacak yaralanmalarına da daha az maruz kalırlar) (Warburton 2001).

Avlanmanın insan toplumlarının evrimindeki rolü çok açıktır. Büyük hayvanların ilkel silahlarla avlanmasında bireysel başarı kabul edilemeyecek derecede düşüktü, hayatta kalabilir avcı gruplarının yaralı hayvanları izlemek, kesmek, etleri taşımak, kazanılan etleri toplamak için işbirliğine elverişli asgari boyutta olması gerekiyordu. Toplu avcılık açık arayla en büyük ödülleri getiriyordu, hayvanlar (çalılar, taşlar, tahta çitler ya da yamaçlarla) sınırları belirlenmiş alanlara iyi bir planla, iyi bir yönetimle sürülüyor, önceden hazırlanmış ağıllarla ya da doğal tuzaklarla kapana kısıtılıyor ya da (herhalde en basit ve dâhiyane çözümle) yarlardan aşağı sürülüyordu (Frison 1987). Birçok büyük otobur (mamutlar, bizon, geyik, antilop, dağ koyunu) bu şekilde katledilebiliyor, böylece donmuş ya da işlenmiş (tütsülenmiş, kurutulmuş ve dövülmüş) et elde ediliyordu.

Alberta’da Fort Mcleod yakınındaki Kafaüstü Bufalo Yarı (Head-Smashed-In Buffalo Jump), UNESCO Dünya Mirası mekânlarından biri olup bu yenilikçi avlanma stratejisinin yaklaşık 5700 yıl boyunca kullanıldığı en seyre değer mekânlardan biridir. “Avi başlatmak için... gençler... kayıp bir dananın sesini taklit ederek sürüyü kandırıyor, kendilerini izletmeye başlıyordu. Bufalolar sürülme hattına (avcıların bufaloları yara sürmesine yardımcı olmak için oluşturulmuş uzun taş yığınları) yaklaşırken avcılar sürünün arkasını çeviriyor, rüzgârın estiği yönü kapatıyor, hayvanları bağırarak, halatlar sallayarak korkutuyordu.” Sonra da sürüyü yardan aşağı sürüyordu (UNESCO 2015a). Hayvansal protein ve yağın enerji getirişi yüksekti. Geç Pleistosen avcıları bu işte belki de çok hüner kazanmıştı, Kuaterner Çağı’nı inceleyen birçok kişi geç **Paleolitik** megafaunanın, beden kütlesi 50 kg’dan yüksek hayvanların nispeten **hızla** silinip gitmesinin **büyük** ölçüde (hatta tümüyle) avlanmadan kaynaklandığı sonucuna varmıştır (Martin 1958, 2005; Fiedel ve Haynes 2004), ama bu konuda kesin hüküm hâlâ belirsizdir (**Kutu 2.4**).

Tarım öncesi bütün toplumlar hepçildi; mevcut yiyecek kaynaklarını görmezden gelmek gibi bir lüksleri yoktu. Toplayıcılar çok çeşitli bitki ve hayvan türleri tüketiyor olsalar da genellikle sadece başlıca birkaç yiyecek öğünlerinde ağırlık taşıyordu. Toplayıcıların tohumları tercih etmesi kaçınılmazdı. Tohumları toplaması ve depolaması kolaydı, ayrıca bunlar yüksek enerji içeriğini nispeten yüksek protein paylarıyla birleştiriyordu. Yabani **ot** tohumları, yetiştirilmiş tohumlar kadar gıda enerjisine sahipti (buğdayın

Kutu 2.4

Geç Pleistosen megafaunasının kaybolması

Yavaş üreyen hayvanların (uzun bir gebelik süreci sonrasında tek bir yavru doğuran hayvanların) sürekli öldürülmesi nesillerinin tükenmesine yol açabilir. Geç Pleistosen’deki toplayıcıların günlük gıda ihtiyacının, kişi başına 10 MJ’lik yüksek bir düzeyde olduğunu, çoğunlukla et yediklerini, bu etin büyük bölümünün (yüzde 80) megafaunadan geldiğini varsayarsak, iki milyonluk nüfuslarının yaklaşık 2 Mt (taze ağırlık) ete ihtiyacı olurdu (Smil 2013a). Avlanan tek tür mamutlar olsaydı, bu; yılda 250.000-400.000 hayvanın öldürülmesini gerektirirdi. Megaotoburların avlanması diğer büyük memelileri (filler, dev geyikler, bizonlar, yaban öküzlerini) de hedef alıyordu; bu türlerin bir karmasından 2 Mt et üretmek yılda yaklaşık iki milyon hayvanın öldürülmesini gerektirirdi. Geç Pleistosen’de türlerin neslinin tükenmesine getirilebilecek daha akla yatkın bir açıklama doğal (iklim ve bitki örtüsündeki değişiklikler) ve antropojenik (avlanma ve ateş) etkenlerin bir bileşimidir (Smil 2013a).

enerjisi 15 MJ/kg'dir), kuru yemişlerin enerji yoğunluğuyse yaklaşık yüzde 80 yüksektir (cevizin enerjisi 27,4 MJ/kg'dir).

Bütün yabani etler mükemmel bir protein kaynağıdır, ama çoğu çok az yağ içerir, bu nedenle de enerji yoğunluğu çok düşüktür; küçük, yağsız memelilerin enerji yoğunluğu, tahıllarinkinin yarısından azdır. Büyük, nispeten yağlı türlerin avcılarının yaygın tercihi olması da hiç şaşırtıcı değildir. Tek bir küçük mamut, 50 ren geyiği kadar yenilebilir enerji sağlıyordu, bizonun enerjisiye 20 geyiğin enerjisine rahat rahat eşitti (Kutu 2.5). Neolitik atalarımız işte bu nedenle devasa mamutları basit taş uçlu silahlarıyla pusuya düşürmek istiyordu, Kuzey Amerika yaylalarındaki yerliler işte bu nedenle uzun süre dayanacak kurutulmuş et hazırlamak için yağlı et arıyor, bizonların peşinde o kadar enerji harcıyordu.

Kutu 2.5

Avlanan hayvanların beden kütleleri, enerji yoğunlukları ve gıda enerjisi içerikleri

Hayvanlar	Beden kütlesi	Enerji yoğunluğu (MJ/kg)	Hayvan başına gıda enerjisi (MJ)
Balinalar	5.000-40.000	25-30	80.000-800.000
Büyük hortumlu memeliler (filler, mamutlar)	500-4.000	10-12	2.500-24.000
Büyük Sığırlar (yaban öküzleri, bizonlar)	200-400	10-12	1.000-2.400
Büyük boynuzlular (elk, ren geyiği)	100-200	5-6	250-600
Foklar	50-150	15-18	500-1.800
Küçük sığırlar (geyikler, ceylanlar)	10-60	5-6	25-180
Büyük maymunlar	3-10	5-6	5-30
Lagomorflar (tavşanlar)	1-5	5-7	3-17

Notlar: Yenilebilir oranın, balinaların beden kütlelerinin üçte ikisi, diğer hayvanların beden kütlelerinin yarısı olduğunu varsayıyorum. Balinaların ortalama enerji yoğunluğunu, beden kütlelerinin yüzde 25'inin balina yağı olduğunu varsayarak hesapladım.

Kaynaklar: Sanders, Parsons ve Santley (1979), Sheehan (1985) ile Medeiros ve çalışma arkadaşlarının (2001) verileri kaynak alınmıştır.

Ama enerjiyle ilgili değerlendirmeler toplayıcılık davranışına tek başına eksiksiz bir açıklama getirmez. Toplayıcılar her zaman baskın olmuşlarsa, optimum toplayıcılık (toplayıcılar ve avcıların toplayıcılığa harcanan zaman ve çabayı en aza indirerek net enerji kazanımlarını en yüksek seviyeye çıkarmaya çalışması) genel stratejileri olsa gerekti (Bettinger 1991). Optimum toplayıcılık büyük, yağlı memelilerin avlanması ya da kabukları zor kırılabilir enerji yoğun kuruyemişler yerine besin değeri daha az bitki parçalarının toplanmasının tercih edilmesini açıklayabilir. Birçok toplayıcı hiç kuşkusuz net enerji getirilerini en yüksek seviyeye çıkaracak biçimlerde hareket etmiştir, ama diğer varoluşsal zorunluluklar sıklıkla bu tür davranışlar aleyhine işlemiştir. En önemli zorunlu koşullar arasında güvenli gece sığınaklarının elverişli olması, bölgelerin rakip gruplara karşı savunulması, güvenilir su kaynaklarına, vitaminlere ve minerallere ihtiyaç duyulması yer alır. Yiyecek tercihleri ve çalışmayla ilgili tutumlar da önemliydi (Kutu 2.6).

Tarih öncesi enerji dengelerini kurmayı beceremememiz, kabul edilemez bazı genellemelere yol açmıştır. Bazı gruplarda toplayıcılığa harcanan toplam çaba nispeten azdı, günde sadece birkaç saattir. Bu bulgu toplayıcıların boş vakit ve uykuyla dolu bir tür maddi bolluk içinde yaşayan “ilk zengin toplum” olarak resmedilmesine yol açmıştır (Sahlins 1972). En dikkat çekicisi de Botswana’da Kalahari Çölü’nde yabancı bitkiler ve et tüketerek yaşayan Dobe! Kung halkının, mutlu, sağlıklı ve kuvvetli hayatlar yaşadıkları ileri sürülen tarih öncesi toplayıcıların hayatına açılan mükemmel bir pencere olduğu düşünülmüştür (Lee ve DeVore 1968). Çok sınırlı ve şaibeli kanıtlara dayanan bu sonuca karşı çıkılması gerekir, ki karşı çıkmıştır (Bird-David 1992; Kaplan 2000; Bogin 2011).

Toplayıcıların zenginliğiyle ilgili basite indirgeyici kuramlar, hem toplayıcılığın gerektirdiği zorlu, sıklıkla da tehlikeli işlerin büyük bölümünü, hem de çevresel sıkıntılar ve bulaşıcı hastalıkların toplayıcı toplumların çoğunu harap etme sıklığını göz ardı eder. Mevsimsel yiyecek kıtlıkları tatsız bitki dokularının yenmesini zorunlu kılmış, kilo kaybına, sıklıkla da yıkıcı kıtlıklara yol açmıştır. Mevsimsel kıtlıklar bebek ölüm oranlarının (bebek katli dâhil) yükselmesine, doğurganlık oranlarının düşmesine neden olmuştur. 1960’larda toplanan demografik veriler ile enerji harcama verileri yeniden incelendiğinde, Dobe !Kung’un sağlığı ve beslenme durumunun “en iyi ihtimalle, dengesiz, en kötü ihtimalle neslinin tükenmesi tehlikesiyle karşı karşıya olan bir toplumu işaret ettiği” sonucuna varılması sürpriz değildir

Kutu 2.6

Yiyecek tercihleri ve çalışmayla ilgili tutumlar

Yiyecek tercihleri, son derece benzer toplayıcı grupların karşılaştırılmasıyla ikna edici bir biçimde örneklenmiştir. Botswana'daki !Kung Basarwa antropoloji literatüründeki kötü şöhretlerini bol miktarda bulunan, son derece besleyici mongongo cevizlerine bağımlılıklarına borçludur; mongongo bu kabileye toplayıcılıkta belgelenmiş en yüksek enerji getirisini sağlar. Ama bir başka Basarwa grubu olan /Aise, mongongo cevizlerine ulaşabilecek olsalar da yemezler, çünkü onlara göre bu cevizlerin tadı güzel değildir (Hitchcock ve Ebert 1984). Aynı şekilde Güney Avustralya'da yaşayan kıyı grupları balıkçılık sayesinde yüksek enerji yoğunluklarına ulaşmıştır, ama boğazda bulunan arkeolojik kanıtlar Tazmanya'daki kabuklu istiflerinde pullu balık artıklarına rastlanmadığını göstermektedir (Taylor 2007).

Kültürel gerçekliklerin basite indirgeyici enerji modellerine ters düşmesinin mükemmel bir örneğine Lizot'nun (1977) (Kuzey Amazonya'da) birbirine komşu Yanomami yerli gruplarını karşılaştırmasında rastlarız. Ormanla çevrelenmiş grup, yaban domuzu, tapir, maymun nüfusunun daha az olduğu bir ortamda yaşayan, aynı avlanma becerileri ve aletlerine sahip komşularının tükettiği hayvansal yiyecek enerjisi ve proteinin yarısından azını tüketiyordu. Lizot'nun açıklaması şöyledir: Birinci gruptaki insanlar daha tembeldi, pek sık avlanmıyorlar, kısacası o kadar iyi beslenmeyi tercih etmiyorlardı. "Bir hafta... erkekler bir kez bile avlanmaya gitmedi, sadece en sevdikleri halüsinojeni (*Anadenanthera peregrina*) toplayıp günlerini uyuşturucu alarak geçirdiler; kadınlar hiç et olmadığından yakınıyordu, ama adamlar duymazlıktan geliyordu." (Lizot 1977, 512).

Bu avlanmanın sağladığı enerjide gözlenen büyük varyasyonlara verilebilecek, kaynakların elverişliliği (hayvanların varlığı) ya da avın enerji maliyeti (iki grubun da basit ve neredeyse benzer aletlere sahip olduğu düşünülürse) ile ilgisi olmayan, sadece çalışmayla ilgili tutumdan kaynaklanan, sık rastlanan bir örnektir. Enerji açıklamalarına uygun düşmeyen eylemlere verilebilecek bir başka örneğe de Tanzanya'daki Hadza kabilesinde et paylaşımıyla ilgili verilerin analizinde rastlarız (Hawkes, O'Connell ve Jones 2001). Büyük hayvanların etinin yaygın olarak paylaşılmasına getirilebilecek en iyi açıklama, büyük av hayvanlarının avlanmasına için risklerin azaltılmasıdır, ama Hadzaların et paylaşımının ardında risk azaltan karşılıklılık beklentisi yoktur, paylaşımın amacı esasen istenen bir komşu olarak avcının statüsünü güçlendirmektir.

(Bogin 2011, 349). Froment'in (2001, 259) belirttiği üzere "Tehlikelere, ağır bir yük olan hastalıklara ayak uydurmaya çalışan avcı-toplayıcılar Cennet Bahçesi'nde yaşamıyorlardı, hiç yaşamamışlardı; zengin değillerdi, yoksullardı, ihtiyaçları sınırlıydı, tatminleri sınırlıydı."

Yirminci yüzyılda az sayıda toplayıcı grup için yapılan yaklaşık hesaplamalar en yüksek net enerji getirilerinin, bazı köklerin toplanmasından elde edildiğini göstermektedir. Harcanan her birim enerjiye karşılık 30-40 birim kadar gıda enerjisi alınıyordu. Oysa tersine birçok av seferinde, hepsinden de önemlisi tropikal yağmur ormanlarında yerde ya da ağaçlarda ya-

şayan memelilerin avlanması net bir enerji kaybına yol açıyor ya da zar zor bir denklik sağlıyordu (Kutu 2.7). Toplayıcılığın tipik getirisi 10-20 kattı, büyük memelilerin avlanmasına benzer bir düzeydeydi. Tarih öncesi getiriler biyokütle bakımından zengin birçok ortamda hiç kuşkusuz daha yüksekti, bu da toplumsal karmaşıklıkta tedrici bir artışı mümkün kılıyordu.

Aslına bakılırsa birçok toplayıcı toplum, genellikle sadece daha sonraki tarım toplumlarıyla ilişkilendirilen karmaşıklık düzeylerine ulaşmıştır. Bu toplumların yerleşimleri daimi, nüfus yoğunlukları yüksek, gıda depoları geniş ölçekli, toplumları tabakalı, ritüelleri ayrıntılıydı; ekin yetiştirmeye yeni başlamışlardı. Moravya'da lös bölgesindeki Yukarı Paleolitik mamut avcılarının iyi inşa edilmiş taş evleri vardı, çeşitli mükemmel aletler üretiyor, kili pişirebiliyorlardı (Klima 1954). Güneybatı Fransa'daki Yukarı Paleolitik grupların sosyal karmaşıklığı, Atlantik'in güçlü etkisinden kaynaklanıyordu; bu etki gayet serin yazlara, ama istisnai derecede ılıman kışlara yol açıyor, ürün yetiştirme mevsimini uzatıyor, kıtanın en güneyinde, periglasial Avrupa'nın herhangi bir yerindekinden daha büyük otobur sürüleri yaşatan açık tundraların ya da step benzeri bitki örtüsünün üretkenliğini yoğunlaştırıyordu (Mellars 1985). Bu Paleolitik kültürlerin karmaşıklığı en iyi biçimde dikkat çekici heykelleri, oymaları, kaya resimleriyle ortaya konmuştur (Grayson ve Delpech 2002; French ve Collins 2015) (Şekil 2.3).

Karmaşık toplayıcılıkta verimliliğin en yüksek düzeye ulaşması suda yaşayan kaynakların tüketilmesiyle ilişkilendirilmiştir (Yesner 1980). Güney İskandinavya'da Mezolitik yerleşimlerde yapılan kazılar Buzul Çağı sonrası avcılarının büyük etobur kaynaklarını tükettikten sonra liman yunusu ve bali-

Kutu 2.7

Toplayıcılığın net enerji getirileri

Kutu 1.10'da betimlenen yöntemi kullandım ve tarih öncesi toplayıcıların daha küçük boyutta olduklarını varsaydım (yetişkinlerin ortalama ağırlığını 50 kg olarak aldım). Bu varsayıma göre temel metabolizmanın günde yaklaşık 6 MJ'ye (saatte yaklaşık 250 kJ), bir yetişkininse var olmak için günde yaklaşık 8 MJ ya da kabaca saatte 330 kJ yiyecek enerjisine ihtiyacı vardır. Bitki toplamak çoğunlukla hafif ya da orta zorlukta emek harcamayı gerektiriyordu, avlanmak ve balık tutmaksa zorluk dereceleri hafif ile ağır arasında değişen işlerdi. Tipik toplayıcılık faaliyetleri erkekler için temel metabolizma için gerekli oranın dört katını, kadınlar içinse beş katını, yani saatte yaklaşık 900 kJ gerektiriyordu. Temel varoluş ihtiyaçlarını çıkarmak toplayıcılığın net enerji girdisini kabaca saatte 600 kJ'ye getirir. Enerji çıktısı sadece, toplanan bitkiler ya da öldürülen hayvanların yenilebilir kısımlarının değeridir.



Şekil 2.3 Güney Fransa'da Chauvet Mağarası'nda bir duvarda kömür kalem hayvan resimleri. Dikkat çekici bir benzerlik sergileyen bu resimler 32.900 ilâ 30.000 yıl öncesine aittir. (Corbis).

na avcısı, balıkçı, deniz kabuklusu toplayıcısı haline geldiklerini göstermiştir (Price 1991). Bu insanlar mezarlıkları da olan daha büyük, sıklıkla da daimi yerleşimlerde yaşıyorlardı. Balıkçılığa dayanan Kuzeybatı Pasifik kabilelerinin sağlam yapılmış ahşap evlerde yaşayan birkaç yüz kişilik yerleşimleri vardı. Somon türlerinin düzenli aralıklarla geçmesi mükemmel bir besin kaynağı olmak üzere güvenle depolanabilecek (tütsülenebilecek) güvenilir ve kolay tüketilebilir bir kaynağı güvence altına alıyordu. Somon yüksek yağ içeriği nedeniyle (yaklaşık yüzde 15) morina balığının (3,2 MJ/kg) üç katı enerji yoğunluğuna sahiptir (9,1 MJ/kg). Denizde avcılığa dayalı yüksek nüfus yoğunluğunun en ileri örneklerinden biri Kuzeybatı Alaska'da yaşayan İnuitlerdir, İnuitlerin göç eden çubuklu balinaların avlanmasından elde ettiği enerji getirileri 2.000 katın üstündedir (Sheehan 1985) (**Kutu 2.8**).

Birkaç mevsimlik enerji akışına dayalı bir gıda arzı kapsamlı, sıklıkla da incelikli depolamayı gerektirir. Depolama pratikleri arasında permafrostla saklama; deniz ürünleri, küçük yemişler ve etlerin kurutulması ve tüt-sülenmesi; tohumlar ve köklerin depolanması; yağlayarak saklama; sosis, kuruyemişli ekmek ve un yapma yer alıyordu. Geniş ölçekli, uzun vadeli yiyecek depolama pratiği toplayıcıların zamana, işe ve doğaya karşı tutu-

Kutu 2.8

Alaskalı balina avcıları

Dört aydan kısa bir süre boyunca, göç rotaları Alaska sahillerinden geçen şeritli balinaları sahile yakın yerlerde avlamakla uğraşan umiak (çerçevesi sürüklenen odunlar ya da balina kemiğinden yapılmış, fok derisiyle kaplanmış, mürettebatı sekiz kişiyi bulan tekneler) içindeki adamlar, kendileriyle temas kurulması öncesindeki nüfusları neredeyse 2.600 kişiyi bulan yerleşimleri için yiyecek toplamışlardı (Sheehan 1985; McCartney 1995). En büyük yetiştiren şeritli balinaların ağırlığı 55 tonu bulur, ama en sık karaya vuran, olgunluğa erişmemiş iki yaşındakiler bile yaklaşık 12 tondur. Balina yağı (yaklaşık 36 MJ/kg) ve *muktuk*'un (deri ve yağ, greyfurtunkine benzer bir C vitamini içeriğine sahiptir) yüksek enerji yoğunlukları avlanmanın 2000 kattan fazla enerji getirisi sağlamasıyla sonuçlanmıştı.

Pasifik'in kuzeybatısındaki sahil kabilelerinin her yıl somon göçü sırasındaki avlanmaları da daha düşük, ama yine de istisnai derecede yüksek enerji getirileri sağlıyordu: Yukarı akıntıyla dönen balıkların yoğunluğu sıklıkla o kadar yüksek oluyordu ki balıkçılar onları kepçeyle teknelerine doldurabiliyor ya da kıyıya getirebiliyordu. Bu yüksek enerji getirileri geniş daimi yerleşimleri, sosyal karmaşıklığı ve sanatsal yaratıcılığı (büyük ahşap totemler) ayakta tutuyordu. Bu kıyı yerleşimlerinin nüfus artışının nihai sınırlarını dayatan şey, giyecek, yatak-yorgan ve av aletleri için gerekli hammaddeleri sağlamak için diğer deniz türlerini ve karada yaşayan av hayvanlarını avlama zorunluluğuydu.

munu değiştirmiş; yüksek nüfus yoğunluklarının istikrar kazanmasına katkıda bulunmuştu (Hayden 1981; Testart 1982; Fitzhugh ve Habu 2002). Zamanı planlama ve zamandan tasarruf etme ihtiyacı belki de en önemli evrimsel yarardı. Bu yeni varoluş biçimi sık sık hareket etmeyi engelliyordu, artı birikime dayalı farklı bir geçim biçimi ortaya çıkarmıştı. Bu süreç kendi kendisini büyüten bir süreçti: Güneş enerjisi akışlarının çok daha büyük bir bölümünü manipüle etme çabası toplumları daha karmaşık hale gelme yoluna sokmuştu.

İnsansıların evrimini anlayışımız son iki kuşakta etkileyici biçimde gelişmiş olsa da kilit bir belirsizlik alanı varlığını korumaktadır: Paleolitik beslenme biçimlerinin yararlarına ilişkin bütün popüler iddiaların aksine, tarım öncesi geçim biçiminin temsili bir bileşimini hâlâ yeniden kurabilmiş değiliz. Bu şaşırtıcı bulunmamalıdır (Henry, Brooks ve Piperno 2014). Yiyecek tüketiminden arta kalan kolayca çözünebilir bitki kalıntıları çok nadiren on binlerce yıl boyunca dayanır, milyonlarca yıl dayanmaları asla mümkün değildir, bu da tipik öğünlerde bitkisel yiyeceklerin payını niceliksel olarak belirlemeyi son derece zorlaştırmaktadır. Kemikler sıklıkla dayanır, ama hayvanların avlanmalarından arta kalan kemiklerle insanların avlanmalarından arta kalan kemiklerin titizlikle birbirinden ayrılması gerekir, bu du-

rumda bile belli beslenme biçimlerini ne derece temsil ettiklerini yorumlamak imkânsızdır.

Pryor ile çalışma arkadaşlarının (2013) dikkat çektiği üzere, yaygın bir biçimde kabul gören, Avrupa Üst Paleolitik avcı toplayıcılarını büyük ölçüde ağaçsız coğrafyalarda yaşayan büyük memeli avcıları olarak resmeden tablo bu gibi antik yerleşimlerde bitki artıklarının kötü bir biçimde korunmuş olmasından kaynaklanır. Bu araştırmacıların yaptığı araştırma, bu yerleşimlerde insanların tükettiği bitkilerin makrofosil kalıntılarının bulunması olasılığının yeterince dikkate alınmadığını, “bitkisel yiyecekler tüketme becerisinin bu soğuk Avrupa yerleşimlerinin başarıyla sömürgeleştirilmesinde hayati bir bileşen” olabileceğini göstermiştir (Pryor vd. 2013, 971). Henry, Brooks ve Piperno (2014) diş taşlarında ve taş aletlerin üzerinde kalan bitki artıklarını (nişastalı tahıllar ve fitolitler) analiz etmiş, hem modern insanların hem Neandertal çağdaşlarının rizomlar ve ot tohumları dâhil aynı ölçüde geniş bir bitkisel yiyecek yelpazesi tükettiği sonucuna varmıştır.

Beden uzunluğu ve kütlesindeki, kafatası özelliklerindeki değişiklikler (çene kemiğinin zayıflaması) baskın diyetlerin dolaylı göstergeleridir ve çeşitli yiyecek karışımlarından ortaya çıkmış olabilir. Hayvanları öldürmek ve kesmekte kullanılan taş aletlere ilişkin bulgular geniş süreler zarfında kişi başına ortalama et tüketimiyle ilişkilendirilebilir, bu nedenle sadece doğrudan kararlı izotop kanıtları ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ve $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ oranları) uzun vadeli protein kaynaklarının, beslenme seviyelerinin ve kara ile denizdeki sınırlarının doğru bir biçimde belirlenmesini sağlar; başlıca iki yoldan (C_3 ve C_4) sentezlenen fitokütleyi bu bitkilerle beslenen heterotroflardan ayırır; bizi besleme biçiminin tamamının temel bileşimi hakkında bilgilendirir. Bu araştırmalar bile ortalama makrobesin (karbonhidrat, protein ve lipid) alımına ilişkin güvenilir örüntülere çevrilemez, ama izotop verileri Avrupa’da Gravettian döneminde hayvansal proteinlerin öğünlerde tüketilen proteinin başlıca kaynağı olduğunu, denizde yaşayan türlerin toplama yaklaşık yüzde 20 katkıda bulunduğunu, kıyı yerleşimlerinde bu katkının çok daha fazla olduğunu gösterir (Hublin ve Richards 2009).

Toplayıcıların enerjisi meselesini bir kenara bırakmadan önce, toplayıcılığın erken tarım toplumlarının hepsinde önemli bir role sahip olduğunu belirtmem gerekir. Konya Ovası’nda MÖ yaklaşık 7200’e ait olan büyük Neolitik tarım yerleşimi Çatalhöyük’te ilk çiftçiler tahıllar ve yabani bitkilerin ağırlıkta olduğu öğünlerle besleniyordu, ama yapılan kazılarda bü-

yük yaban öküzlerinden tutun tilkilere, porsuklardan tavşanlara varıncaya dek avlanmış hayvanların kemikleri ortaya çıkarılmıştır (Atalay ve Hastorf 2006). Kuzey Suriye’de Tell Abu Hureyra’da avcılık bitkilerin evcilleştirilmeye başlamasından sonra 1000 yıl boyunca kritik bir yiyecek kaynağı olarak kalmıştır (Legge ve Rowley-Conwy 1987). Hanedanlık dönemi öncesi Mısır’da (MÖ 3100 öncesi) gernik buğdayı ve arpa yetiştirme, su kuşları, antilop, yabani domuz, timsah ve fil avıyla tamamlanmıştır (Hartmann 1923; Janick 2002).

TARIMIN KÖKENLERİ

Neden bazı toplayıcılar tarıma başlamıştır? Bu yeni pratikler neden bu kadar büyük bir yaygınlık kazanmış, benimsenmeleri neden evrimsel açıdan gayet hızlı bir biçimde gerçekleşmiştir? Tarımın tek bir nedeni olmadığını, birbirine bağlı çok sayıda etkileşimden kaynaklandığını söyleyen Rindos’a (1984) katılarak bu zorlayıcı soruları bir kenara bırakabiliriz. Ya da Bronsón’un belirttiği üzere (1977, 44) “Karmaşık, çok yönlü bir uyarlanma sistemiyle uğraşıyoruz, insanların uyarlanma sistemlerinde... her açıdan etkili tek ‘nedenler’ var olamaz.” Ama birçok antropolog, çevrebilimci ve tarihçi tam olarak bu tür asal nedenleri bulma çabası içindedir, tarımın kökenleriyle ilgili çeşitli açıklayıcı kuramların araştırıldığı birçok yayın mevcuttur (Cohen 1977; Pryor 1983; Rindos 1984; White ve Denham 2006; Gehlsen 2009; Price ve Bar-Yosef 2011).

Tarımsal ilerlemelerin evrimsel niteliğine ilişkin ezici kanıtlar, olasılıkları daraltmayı mümkün kılıyor. Tarımsal kökenlere ilişkin en ikna edici açıklama, nüfus artışı ve çevresel sıkıntıların bileşiminde, daimi ekin yetiştirmeye geçişin hem doğal hem sosyal etkenlerden kaynaklandığının kabul edilmesinde yatar (Cohen 1977). Richerson, Boyd ve Bettinger (2001) geç Paleolitik’te iklim çok soğuk, CO₂ seviyesi çok düşük olduğundan, bu koşullar daha sonraki dönemlerde iklimin ısınmasıyla birlikte değiştiğinden, Pleistosen’de tarımın imkânsız olduğunu, Holosen’de zorunlu bir hal aldığını savunmuşlardır. Bugünden 10.000 ilâ 5.000 yıl öncesi arasında, ekin yetiştirmenin üç kıtada en az yedi yerde bağımsız olarak gelişmiş olması bu argümanı güçlendirmektedir (Armelagos ve Harper 2005).

Temelde ekin yetiştirmek yeterli yiyecek tedarik etmek için girişilen bir çabadır, bu nedenle tarımın kökenleri tam olarak, ancak enerji zorunluluğunun bir başka örneği olarak açıklanabilir. Toplayıcılık ve avcılıktan

elde edilen getirinin azalması, birçok toplayıcı toplumda başlangıç halindeki ekme-biçme çabalarının yavaş yavaş genişlemesine yol açmıştır. Daha önce belirttiğimiz üzere toplayıcılık ve tarım çok uzun süreler boyunca yiyecek üretiminde farklı düzeylerde paya sahip olmuş, bir arada var olmuştur. Ama tarımın kökenleriyle ilgili akla yatkın bir açıklama tarımın birçok sosyal avantajı olduğunu görmezden gelemiz. Yerleşik düzende ekin yetiştirme daha fazla kişinin bir arada kalmasının etkili bir yoluydu, ailelerin daha büyük olmasını, maddi varlık birikimi oluşturmaya hem savunma hem saldırı için örgütlenmeyi kolaylaştırıyordu.

Hatta Orme (1977), yiyecek üretiminin kendi başına önemsiz bir amaç olabileceği, ama tarımın hem doğuşunun hem yayılmasının kritik sosyal nedenleri olduğuna kuşku olmadığı sonucuna varmıştır. Tarımın kökenlerine ilişkin enerjiye dayalı basite indirgeyici açıklamalar, ilk tarım çabalarının net enerji getirilerinin sıklıkla, daha önceki ya da eş zamanlı toplayıcılık faaliyetlerinden az olmasıyla da zayıflar. İlk tarım çabaları, toplayıcılıkla karşılaştırıldığında genellikle insanların daha fazla enerji harcamalarını gerektiriyordu, ama bu çabalar nüfus yoğunluklarının daha yüksek olmasını destekleyebiliyor, daha güvenilir bir gıda arzı sunabiliyordu. Bu durum neden bu kadar fazla sayıda toplayıcı toplumun, daimi olarak tarıma geçmeden önce binlerce, en azından yüzlerce yıl boyunca komşu tarım gruplarıyla sürekli etkileşim (büyük ölçüde de ticaret) içinde olduğunu açıklar (Headland ve Reid 1989).

Yetiştirilmiş bitkilerin ve süt ile et veren hayvanların yaygınlık kazanmasının başlangıcında yer alan, evcilleştirmenin gerçekleştiği tek bir merkez yoktur; ama Eski Dünya'da tarımın kökenlerinin bulunduğu en önemli bölge daha önceden düşünüldüğü gibi Güney Levant değil, Dicle ve Fırat nehirlerinin yukarı kısımlarıydı (Zeder 2011). Bu da yiyecek üretiminin optimum bölgelerin merkezlerinde değil, kıyılarında başladığı anlamına gelir. İran'da Zagros Dağları'nın eteklerinde bulunan Chogha Golan'ın botanik sicili, bu gerçekliği doğrulayan en yakın dönemli kanıtı oluşturur (Riehl, Zeidi ve Connard 2013): yabani arpa (*Hordeum spontaneum*) üretimi burada yaklaşık 11.500 yıl önce başlamış, daha sonra yabani buğday ve yabani mercimek üretimi de buna eklenmişti.

İşleme açısından toplayıcılık ile tarım arasında açık bir eşik ya da keskin bir bölünme olmadığını vurgulamak temel önemdedir; zira yabani bitkiler ve hayvanlar, açıkça tanımlanabilir morfolojik değişimlerin dam-

gasını vurduğu gerçek evcilleştirilme öncesinde uzun süre boyunca idare edilmiştir. Daha önceki anlayışların tersine bitkiler ve hayvanların evcilleştirilmesi, neredeyse eşzamanlı olarak ilerlemiş, gayet hızlı bir biçimde etkili bir düzenleme doğurmuştur (Zeder 2011). Bazı bitki türlerinin ilk kez görüldüğü yaklaşık tarihler şöyledir: Ortadoğu'da gernik buğdayı (*Triticum dicoccum*), siyez buğdayı (*Triticum monococcum*) ve arpa (*Hordeum vulgare*) (Şekil 2.4) ilk kez bugünden yaklaşık 11.500-10.000 yıl önce, Çin'de darı (*Setaria italica*) 10.000 yıl, pirinç (*Oryza sativa*) 7000 yıl önce, Meksika bal-kabağı (*Cucurbita* türleri) 10.000 yıl, mısır (*Zea mays*) 9.000 yıl ve And patatesi *Solanum tuberosum* 7.000 yıl önce ortaya çıkmıştır (Price ve Bar-Yosef 2011). Hayvanların ilk kez evcilleştirilmesinin tarihi 10.500-9.000 yıl öncesine uzanır, ilk keçiler ve koyunlar evcilleştirilmiş, onları sığır ve domuzlar izlemiştir.

Avrupa'da tarıma Neolitik geçişle ilgili başlıca iki açıklama bu sürecin yerlilerin taklit etmeleriyle ilerlediğini (kültürel yayılma) ya da nüfusların yayılması (demik yayılma) sonucu ortaya çıktığını işaret eder. Pinhasi, Fort ve Ammerman'ın (2005) erken Neolitik yerleşimlerden toplanan malzemeyi radyokarbon yöntemiyle tarihlendirmesi, demik yayılma tahminiyle tutarlılık gösteren sonuçlar vermiştir; buna göre demik yayılma çok büyük olasılıkla Kuzey Levant ve Mezopotamya bölgesinden başlamış, yılda ortalama 0,6-1,1 km hızla kuzeybatıya doğru ilerlemişti. Geç Avrupalı avcı-toplayıcı iskeletlerinden alınan mitokondriyal DNA'nın ilk çiftçiler ve modern Avru-



Şekil 2.4 Islah edilen ilk tahıllar. a–c. Gernik buğdayı (*Triticum dicoccum*), siyez buğdayı (*Triticum monococcum*), ve arpa (*Hordeum vulgare*) Ortadoğu'da tarımın başlamasının temeli olmuştur. (Corbis).

palıların mitokondriyal DNA'larıyla karşılaştırılması da bu sonucu destekler: Bu karşılaştırmalar ilk çiftçilerin yerli toplayıcıların soyundan gelmediğini, Neolitik'in başında göç etmiş nüfuslar olduğunu ikna edici bir biçimde ortaya koyar (Bramanti vd. 2009).

Erken tarım sıklıkla sıralı ekim biçiminde gerçekleşiyordu (Allan 1965; Spencer 1966; Clark ve Haswell 1970; Watters 1971; Grigg 1974; Okigbo 1984; Bose 1991; Cairns 2015). Bu pratik çerçevesinde sıklıkla kısa ekim dönemlerinden (1-3 yıl) sonra epeyce uzun (10 yıl ya da daha fazla) süren nadas dönemleri oluyordu. Ekosistemler, iklimler ve başat ekinlere bağlı birçok farklılık gözlenmesine rağmen çoğu açıkça enerji harcamayı asgari düzeye indirme çabalarından kaynaklanan birçok benzerlik de söz konusuydu. Döngü doğal bitki örtüsünün temizlenmesiyle başlıyordu, doğal bitki örtüsünün biçilmesi veya yakılması sıklıkla zemini ekime hazırlamaya yetiyordu. Yürüme mesafesini asgariye indirmek için tarlalar ya da bahçeler yerleşimlerin olabildiğince yakınına açılıyordu, ikincil ürünün temizlenmesi tercih edilen seçenektir: Örneğin Rappaport (1968) Tsembaga'da (Yeni Gine) balta girmemiş ormanda 381 bahçeden sadece bir tanesinin temizlendiğini ortaya çıkarmıştır. Bazı tarlaların hayvanlar zarar vermesin diye çitlerle çevrilmesi gerekiyordu: Bu durumda çit yapmak için ağaç kesmek en fazla miktarda emek girdisi gerektiren iş oluyordu. Bitkisel azot yanma sırasında büyük ölçüde kayboluyordu, ama mineral besinler toprağı zenginleştiriyordu.

Ağır işleri erkekler yapıyordu (iyi aletler olmadığından, bitki örtüsü yakılıveriyordu; bazı ağaçların çit yapmak için kesilmesi gerekiyordu), kadınların işiyse ağırlıklı olarak tohum ekmek ve hasattı; tahıllar ve yumrular getirileri nispeten yüksek olduğundan ekilen başlıca bitkilerdi (Rappaport 1968). Daha sıcak olan bütün bölgelerde, özellikle ekim-dikimin yoğun olduğu bahçelerde birlikte ekim, karışık ekim ve aşamalı hasat çok sık uygulanıyordu. Sıralı tarım Avustralya dışında bütün kıtalarda önemli bir pratikti. Güney Amerika'da antik dönemdeki uygulamalar (çoğunlukla MÖ 500 ile MÖ 1000 arasında) Amazon havzasında *terra preta* olarak damgasını bırakmıştır: derinliği 2 metreyi bulan, yanmış odun ve ekin kalıntıları, insan atıkları ve kemikler içeren kara toprak (Glaser 2007; Junqueira, Shepard ve Clement 2010). Kuzey Amerika'da Kanada kadar kuzeye ulaşmıştır; Huronlar burada uzun dönüşüm döngüleriyle mısır ve fasulye yetiştiriyor, hektar başına 10-20 kişiyi destekliyordu (Heidenreich 1971).

Nüfus yoğunluğunun az, elverişli arazilerin bol olduğu bölgelerde bu pratik toplayıcılıktan daimi ekim-dikime uzanan evrimsel diziye uygun düşen bir parçadır. Elverişli arazilerin azalması, çevresel bozulma, daha yoğun ekim-dikim yapılması yönünde baskıların artması, tarımın önemini hızla azaltıyordu. Net enerji getirileri büyük bir farklılık gösteriyordu. Yeni Gine yaylalarında Tsembaga tarımının enerji getirisi yaklaşık 16 kattı (Rappaport 1968). Yeni Gine’de yapılmış başka bir araştırmada enerji getirilerinin 6-10 kattan yüksek olmadığı ortaya çıkarılmıştır (Norgan vd. 1974), ama Kekchi Maya’da (Guatemala) mısır hasadı en az 30 katlık bir enerji getirisine sahipti (Carter 1969). Net getirilerin çoğu küçük tahıllar için 11-15 kat, çoğu yumru, muz, ayrıca mısır için 20-40’tı; azami net enerji getirisi bazı kökler ve baklagillerde 70’e yaklaşıyordu (Kutu 2.9). Bir kişinin beslenmesi çoğunlukla, 2-10 hektarlık bir alanın düzenli olarak temizlenmesini gerektiriyordu, fiilen ekilip biçilen alan kişi başına 0,1 hektar ile 1 hektar arasında değişiyordu. Orta düzeyde verimli sıralı tarım bile en iyi toplayıcılığa kıyasla bir kerte daha yüksek nüfus yoğunluklarını destekliyordu.

Yağış azlığının ya da uzun mevsimler boyunca yağmur yağmamasının ekim-dikimi verimsiz ya da imkânsız kıldığı yerlerde göçebe çobanlık etkili

Kutu 2.9

Sıralı tarımda enerji maliyetleri ve nüfus yoğunlukları

Net enerji maliyeti sıralı tarımın getirilerini hesaplamak için kullanılmıştır. Ortalama emek girdisinin 700 kJ/saat gerektirdiğini varsayıyorum. Çıktılar, depolama kayıpları ve tohum ihtiyaçları dikkate alınmadan hesaplanmış yenilebilir hasattır.

Nüfuslar	Başlıca ekinler	Enerji girdileri (saat)	Enerji getirileri	Nüfus yoğunluğu (kişi/hektar)
G.doğu Asya	Yumrular	2.000-2.500	15-20	0,6
G.doğu Asya	Pirinç	2.800-3.200	15-20	0,5
Batı Afrika	Darı	800-1.200	10-20	0,3-0,4
Mezoamerika	Mısır	600-1.000	25-40	0,3-0,4
K. Amerika	Mısır	600-800	25-30	0,2-0,3

Kaynaklar: Conklin (1957), Allan (1965), Rappaport (1968), Carter (1969), Clark ve Haswell (1970), Heidenreich (1971), Thrupp ve çalışma arkadaşları (1997) ile Coomes, Girmard, Burt’un (2000) verilerine dayanılarak hesaplanmıştır.

bir alternatif olmuştur (Irons ve Dyson-Hudson 1972; Galaty ve Salzman 1981; Evangelou 1984; Khazanov 2001; Salzman 2004). İdareli otlatma çok sayıda Eski Dünya toplumunun enerji dayanaklarından biri olmuştur, bazı toplumlar yoksul ve yalıtılmış olarak kalsa da bazıları tarihin en korkulan uzun mesafeli müdahalecileri arasında yer alır: Xiongnu erken Çin hanedanlarıyla yüzyıllar boyunca çatışma içinde olmuş, 1241'deki Moğol istilası bugünkü Polonya ve Macaristan kadar batıya ulaşmıştır.

Hayvancılık av hayvanını korumanın bir biçimidir, büyük hayvanlar, özellikle de sığırlar için fırsat maliyetleri daha fazla olan bir hasat erteleme stratejisidir (Alvard ve Kuznar 2001). Daha büyük hayvanlar tercih edilir, ama daha yüksek yetiştirme oranları koyunlar ve keçilerden yanadır. Hayvanlar, dikkat çekici derecede düşük düzeyde harcanan insan enerjisiyle, otları süte, ete ve kana çevirir (Şekil 2.5). Çobanların emeği hayvanların güdülmesiyle, avcılara karşı korunmasıyla, sulanmasıyla, doğuma yardım etmekle, düzenli olarak süt sağlamakla, ara sıra kesim yapmakla, kimi zaman da geçici barınaklar yapmakla sınırlıydı. Bu tür toplumların sürdürülebilir nüfus yoğunluğu toplayıcı gruplarınkinden yüksek değildi (Kutu 2.10).

Göçebe otlatma pratiği binlerce yıl boyunca Avrupa ve Ortadoğu'nun çeşitli bölgelerine, Afrika ve Asya'da geniş bölgelere hâkim olmuştur. Bu yerlerin hepsinde, kimi zaman yarı göçebe tarım-çobanlık karmaları ile karışmıştır; özellikle de Afrika'nın bazı bölgelerinde toplayıcılığın önemli bir bileşeniyle harmanlanmıştır. Sıklıkla daha üretken çiftçiler tarafından kuşa-



Şekil 2.5 Maasai çobanı ve sığırları (Corbis).

Kutu 2.10

Göçebe çobanlar

Helland (1980) çoban toplumlarda düşük emek gereksinimleri olduğunu, Doğu Afrika'da tek bir çobanın çok sayıda büyükbaş hayvan türünü idare ettiğini işaret ederek göstermiştir: 100 deve, 200 sığır, 400 koyun ve keçi. Khazanov (1984) Asya çobanları için benzer düzeyde yüksek rakamlar verir: Moğolistan'da 2.000 koyunu atlı iki çoban, Türkmenistan'da 400-800 sığırı yetişkin bir çoban ve bir çocuk güdüyordu. Az emek ihtiyacının cazibesi, birçok çobanın yolculuk etmeyi bırakıp yerleşik çiftçiler haline gelmeye yanaşmamlarının kilit nedenlerinden biriydi. Bunun sonucunda birçok göçebe toplum kuşaklar boyunca, yerleşik çiftçilerin komşusu olarak var olmuş, yıkıcı kuraklıklar ya da mevcut otlaklarda ciddi bir kayıp olması nedeniyle sürülerini terk etmişlerdir.

Çobanların geçimi için kişi başına asgari sayı 5-6 sığır, 2,5-3 deve ya da 25-30 keçi ya da koyundu. Geleneksel Maasai kabilesinde daha fazla sayıda sığıra sahip olunması (kişi başına 13-16 baş), asgari kan alma gereğiyle açıklanmaktadır; bu iş 5-6 haftada bir sıkılmış şahdamarının delinip 2-4 litre kan alınmasını gerektiriyordu. Kuraklık zamanlarında 80 sığırılık bir sürünün 5-6 kişilik bir aileye kan sağlaması gerekiyordu, kişi başına 13-16 hayvan da diyebiliriz (Evangelou 1984). Bütün örneklerde göçebe nüfus yoğunlukları bu yerleşik çiftçilerinkine kıyasla düşüktü; Doğu Afrika'da çoğu kez nüfus yoğunluğu 0,8-2,2 kişi/km² ve 0,03-0,14 kişi/hektar (Helland 1980; Homewood 2008).

tılan, yaygın olarak da yerleşik toplumlarla takaslara bağımlı olan bu göçebelilerin bazıları sınırlı dünyalarının ötesinde pek az etkiye sahipti. Ama birçok grup, tarım toplumlarını tekrar tekrar işgal, geçici olarak da fethederek Eski Dünya'nın tarihinde büyük bir etkiye sahip olmuştur (Grousset 1938; Khazanov 2001). Sadece çobanlık yapan bazı gruplar ve bazı tarım-çobanlık grupları bugüne ulaşmıştır (en başta Orta Asya'da ve Sahelian'da, Doğu Afrika'da); ama bu grupların varlığı giderek marjinal bir hal almaktadır.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

Geleneksel Tarım

Toplayıcılıktan tarıma geçmek sadece enerji zorunluluklarıyla açıklanabilir olmasa da tarımın evrimi daha geniş nüfusları yaşatmak için arazi verimliliğini artırmaya (sindirilebilir enerji kazancını artırmaya) yönelik sürekli bir çaba olarak görülebilir. Bu daraltılmış çerçevede dahi enerji olmayan önemli değerlendirmeler (yeterli mikrobesein, vitamin ve mineral tedariki gibi) unutulmamalıdır, ama bütün geleneksel köylü toplumlarının ağırlıklı olarak vejetaryen beslenme biçimlerine sahip olması nedeniyle, genel olarak temel ürünlerden, özel olarak tahıllardan elde edilen sindirilebilir enerji üretimine odaklanmak tabloyu çarpıtacak bir basitleştirme olmaz.

Sadece tahıllarda karşımıza çıkan bir tablo vardır: gayet yüksek bir hasat miktarı (başta sadece yaklaşık 500 kg/ha, nihayetinde en yoğun geleneksel tarımlarda 2 t/ha'dan fazla) ile birlikte kolayca sindirilebilir karbonhidratlar ve orta düzeyde yüksek protein (bazıları, en başta da mısır önemli miktarda lipit içerir). Tahılların olgunlaştıklarındaki enerji yoğunlukları (15-16 MJ/kg) taze yumrulara kıyasla beş kat yüksektir, dışarıda kurutulduklarında nem içerikleri uzun vadeli depolamayı mümkün kılacak kadar düşüktür (evlerde küplerde, tahıl depolarında daha geniş ölçekte). Temel tahıllar diğer ekinlerle (en başta yağlı tohumlar ve hububat baklagiller) her yıl dönüşümlü ekim yoluyla ya da tahılların iki kez ekilmesi yoluyla gıda verimliliğini artırmayı mümkün kılacak kadar hızlı olgunlaşır (geleneksel çeşitler 100-150 günde olgunlaşır).

Boserup (1965, 1976) gıda enerjisi ile köylü toplumlarının evrimi arasındaki bağlantıyı bir tercih meselesi olarak kavramsallaştırmıştır. Belli bir tarım sistemi verimliliğinin sınırına ulaştığında, insanlar göç etmeyi, kalmayı

ve nüfuslarına istikrar kazandırmayı, kalmayı ve nüfuslarının azalmasına izin vermeyi ya da daha verimli bir tarım biçimi benimsemeyi tercih edebilir. Son seçenek ille de diğer çözümlere nazaran daha cazip ya da daha olası değildir; bu seçeneğin benimsenmesi sıklıkla ertelenir ya da istemeye istemeye tercih edilir, çünkü böyle bir değişiklik neredeyse şaşmaz bir biçimde daha yüksek enerji girdileri gerektirir; çoğu örnekte hem insan hem hayvan emeği ister. Verimliliğin artması, aynı bölgelerin (hatta daha küçük alanların) ekilip biçilmesi sayesinde daha büyük nüfusları yaşatacaktır, ama yoğunlaşmış ekim-biçim faaliyetinin net enerji getirisi artmayabilir, fiilen azalabilir.

Ekilip biçilen araziye daimi olarak genişletmeye (daha yüksek enerji girdileri gerektiren bir seçenektir bu; en başta ilksel ormanların temizlenmesi, bataklıkların kurutulması, teraslanmış tarlalar inşa edilmesi gerekir) yavaşlamak kenarda kalmış araziler üzerinde hak iddia etmenin gecikmesine yol açmıştır. Karolenj Avrupası'nda köylerin nüfusu aşırı düzeydeydi, bu köylerin tahıl tedarikleri kronik olarak yetersizdi, ama sadece Almanya'nın ve Flandre'nin bazı bölgelerinde kolayca tarım yapılabilir bölgelerde yeni tarlalar yaratılmıştı (Duby 1968). Ortaçağ Avrupası'nda Alman köylülerinin, nüfusun yoğun olduğu batı bölgelerinden dalga dalga göç edip Bohemya, Polonya, Romanya ve Rusya'da, civarda tarımla uğraşanların işe yaramaz gözüyle baktığı ormanlık ve otlak bölgelerde yeni tarım bölgeleri açtığına tanık olunmuştu. Aynı şekilde Çin de verimli ama soğuk kuzeydoğu bölgelerini (Mançurya) ancak on sekizinci yüzyılda sömürgeleştirmeye başladı, dış çeperde kalan Endonezya adalarında tarım bugün bile, nüfusun yoğun olduğu Java'daki yüksek verimlilikle kıyaslandığında düşük bir yoğunluk gösterir. Her yerde, düzenli, yoğun nadas işleminden yıllık ekim biçime, sonrasında da çoklu hasada geçiş binlerce yıl almıştı.

Tarım pratiklerinde ve tarımı yapılan ekinlerde birçok farklılık gözlenmesine rağmen bütün geleneksel tarımlar aynı enerjik temele sahipti. Güneş ışınlarının fotosentezle çevrilmesinden, insanlar için yiyecek, hayvanlar için yem üretiminden, toprağın verimini artırmak için atıkların geri dönüşümünden, basit tarım aletleri yapmak amacıyla metallerin eritilmesi için üretilen yakıtlardan güç alıyorlardı. Buna bağlı olarak geleneksel tarım, prensipte tam anlamıyla yenilenebilirdi. Gerçekte bu durum sıklıkla, biriktirilmiş enerji stoklarının erimesine yol açmıştı, en önemlisi ilksel ormanların yaygın olarak temizlenmesiyle yeni tarım alanlarının yaratıldığı öncü aşamalarda yaşanmıştı bu durum. Neresinden bakılırsa bakılsın, bu girişim tümüyle gü-

neş enerjisi akışlarının neredeyse derhal çevrilmesine dayanıyordu (ekinlerin hasadı için gerekli birkaç ay ile olgun ağaçlar kesilinceye kadar geçen onlarca yıl arasında değişen tipik gecikmeler söz konusuydu).

Ekim-biçimin doğal otlakların yerini aldığı (depolanan fitokütlede çok daha küçük bir kayba yol açtığı) yerlerde bile bu yenilenebilirlik sürdürülebilirliğin garantisi değildi. Zayıf tarım pratikleri toprağın verimliliğini azaltıyor ya da aşırı düzeyde erozyona ya da çölleşmeye yol açıyor, bu da ürün getirisinin azalmasına, hatta ekim-biçimin tümüyle terk edilmesine neden oluyordu. Çoğu bölgede geleneksel tarımdaki geniş alanlara ekimden, yoğun ekim-biçime geçmişti: tarımın başlıca itici güçleri (insan ve hayvan kasları) binlerce yıl boyunca değişmedi, ama ekim-biçim pratikleri, tarımı yapılan çeşitler, emeğin örgütlenmesi büyük bir dönüşüm geçirdi. Dolayısıyla geleneksel tarımın tarihi hem sürekliliğin hem değişimin izlerini taşır.

Tarımın yoğunlaşmasının ilerlemesi, daha yüksek nüfus yoğunluklarını ayakta tuttu, ama sadece doğrudan tarım faaliyetleri için değil, kuyu açmak, sulama kanalları, yollar, gıda depoları inşa etmek, tarlaları teraslandırmak gibi kritik destekleyici önlemler için de daha yüksek enerji harcanmasını da gerektiriyordu. Buna karşılık bu iyileştirmeler, daha iyi aletler ile evcil hayvanların ya da su ve rüzgâr enerjisiyle çalışan basit makinelerin çeşitlerini çoğaltmak için daha fazla enerji harcanmasını gerekli kılıyordu. Daha yoğun tarım, en azından saban sürülmesi için hayvan enerjisine dayanıyordu; saban sürmek, genellikle tarlada açık arayla en fazla enerji gerektiren işti. Amerika kıtaları dikkat çekici istisnalar oluşturunuyordu: Mezoamerika'da (Orta Amerika) tarımla uğraşan toplumların da İnka patates ve mısır üreticilerinin de hayvanı olmamıştı. Evcil hayvanlar beslemek, yem üretimi için daha yoğun bir tarım yapılmasını gerektiriyordu. Hayvanlar harman dövmek ve değirmenciliğin yanı sıra başka birçok tarla işinde de kapsamlı olarak kullanılıyor, araziye dayalı yiyecek dağılımı için vazgeçilemeyecek denli önem taşıyorlardı. Hayvanların tımarları, yemlenmeleri ve üremeleri, ayrıca koşum takımları, nalları ve diğer donanımlarının üretimi yeni bir karmaşıklık ve beceriler dizisini beraberinde getirmişti.

Ama yoğun tarım yolunda atılmış bütün adımlar, çok sayıda ürünün tarımının yapılması kadar enerji-yoğun değildi; bu iş, ekim ve hasat dönemlerinde eldeki iş gücünü tekrar tekrar kısıtlıyordu; daha güçlü tarım hayvanlarına bağlılığı artırıyordu ki bu da hayvanların yemlerinin üretilmesi için daha fazla araziye gerekli kılıyordu; ya da sulama kanalları inşa ederek, bun-

ların bakımını yaparak desteklenmesi gerekiyordu ki bu da tekrar tekrar ağır işler görmeyi gerektiriyordu. Mekanik bir benzerlik kuracak olursak mevcut fotosentez potansiyelinden daha yüksek bir pay elde etmeyi mümkün kılan bazı değişiklikler, ya mevcut akışları sekteye uğratan ya da sindirilebilir fitokütleye çevrilmelerini neredeyse engelleyen enerji harici kritik kapılar (valfler) açılmasını gerektiriyordu.

Bitkiler için kilit bir makrobesin olan azotun elverişliliği, belki de bu açıdan en önemli örnektir, azotu depolayan taneli ekinlerin (baklagiller) tahıllar ve yumrularla dönüşümlü ekilmesi genel gıda üretimini artırmış, ayrıca önemli tarımsal-ekosistemsel yararlar da sağlamıştı. Aynı şekilde sulama aygıtlarının tasarımıdaki yenilikler ve yeni ürün çeşitleri ile yeni kültür bitkilerinin benimsenmesi verimliliklerin, yıllık hasatların artmasına katkıda bulunmuştu. Buna karşılık yoğunlaşmış tarım sadece enerji (daha fazla yiyecek ve yem) yararları sağlamakla kalmamış, uzun vadeli planlamayı, uzun vadeli yatırımı ve iyileştirilmiş bir işgücü örgütlenmesini gerektirdiği kadar, daha geniş kapsamlı sosyal ve ekonomik bütünleşmeyi de teşvik ettiğinden sanayi öncesi medeniyetlerin ilerlemesine katkıda bulunmuştur.

Elbette ki tarımın yoğunlaşmasının her biçimi, merkezileşmiş örgütlenme ve denetim gerektirmiyordu. Kısa, sığ sulama kanalları ya da kuyular kazılması, birkaç teras ya da yükseltilmiş tarla inşası tek tek köylü ailelerinde ya da köylerde tekrar tekrar ortaya çıkmıştır. Ama bu tür faaliyetlerin yaygınlaştırılması nihayetinde hiyerarşik bir koordinasyonu ve yerel üstü bir idareyi gerekli kılıyordu. Büyüyen şehirler için daha fazla miktarda tahıl ve yağlı tohum işlemek amacıyla daha güçlü enerji kaynaklarına duyulan ihtiyaç insan ve hayvan kaslarının yerini alacak ilk önemli kaynakların geliştirilmesi, tahıl öğütmek ve yağlı tohum bastırmak için su ve rüzgâr akışlarının kullanılması açısından önemli bir itki olmuştur. Tarımın binlerce yıl içinde geçirdiği evrim, ortak tarım pratikleri ile ortak enerji zorunluluklarının sınırları çerçevesinde geniş kapsamlı bir işleyiş biçimleri ve verimlilik yelpazesinin ortaya çıkmasıyla sonuçlanmıştı.

Başlıca ortak noktalar temel tarla ve hasat sonrası işlerini, ekim alanında tahılların yaygın bir baskınlık göstermesini, büyük ölçüde çevre koşullarıyla belirlenen üretim döngüleri dizisini içeriyordu. Geleneksel tarımın yoğunlaşması yolunda atılan dört büyük adım şunlar olmuştur: Hayvan emeğinin daha verimli kullanılması, sulama alanındaki ilerlemeler, gübrelemenin artması, dönüşümlü ekim ile çok sayıda ürünün ekimi. Birçok çevresel ve

teknik sınırlamaya rağmen geleneksel tarımlar birkaçı dışında bütün toplayıcı toplumlarınkinden birkaç kerte daha yoğun nüfusları ayakta tutabilmişti. Ortaya çıkmalarından sonra nispeten erken tarihlerde başta az, ama önemli sayıda yetişkinin giderek genişleyen bir tarım dışı faaliyet yelpazesıyla uğraşmasını mümkün kılan bir enerji fazlası yaratmaya başlamışlardı; bu da nihayetinde son derece büyük bir çeşitlilik ve tabakalanma gösteren sanayi öncesi toplumları ortaya çıkarmıştı. Geleneksel tarımların üretim sınırları, ancak fosil yakıt girdisinin artmasıyla ortadan kalktı; fosil yakıtlar tarımsal işgücünü toplam işgücünün sadece küçük bir bölümüne indirirken, yüksek enerjiye dayalı modern kent toplumlarının yükselmesini mümkün kıldı.

ORTAK VE ÖZGÜN YÖNLER

Ekin yetiştirmenin gerekleri, tarla işleri dizisine genel bir örüntü dayatıyordu. Benzer ekinler yetiştirilmesi, çok benzer tarımsal pratikler, aletler ve basit makinelerin icat edilmesine ya da benimsenmesine yol açmıştır. Bu yeniliklerin bazıları erken ortaya çıkmış, hızla yayılmış, sonra binlerce yıl boyunca değişmeden kalmıştır. Bazı yeniliklerse çok uzun bir süre boyunca ortaya çıktıkları bölgelerle sınırlı kalmıştır, ama yayıldıklarında hızlı bir iyileştirme sürecinden geçmişlerdir. Orak ve döven ilk kategoriye girer, demir kulaklı pulluk ve tohumaker ikinci kategoridedir. Aletler ve basit makineler tarla işlerini daha kolay hale getiriyor (böylece mekanik bir avantaj sağlıyor), verimlilik ve hızı artırıyor, daha az sayıda insanın daha fazla yiyecek üretmesini sağlıyordu; sonuçta ortaya çıkan enerji fazlası yapılar ve eylemlere harcanabiliyordu: Orak ve pulluk olmasaydı katedraller olmazdı ya da Avrupa'nın keşif seferleri yapılmazdı. Önce tarla işleri, aletler ve basit makinelere ilişkin kısa araştırmalar sunacağım, sonra da tahılların başat ürünler olmasını ve ekim döngülerinin kendine özgü yönlerini betimleyeceğim.

Tarla İşleri

Geleneksel tarımın büyük bir bölümü ağır işler görülmesini gerektiriyordu, ama bu gibi dönemlerin ardından sıklıkla, uzun süren, daha az talepkâr faaliyet dönemleri ya da mevsimlik tatiller geliyordu; neredeyse sürekli yüksek bir hareketlilik gerektiren toplayıcılık hayatından gayet farklı bir varoluş örüntüsüydü bu. Toplayıcılıktan tarıma geçmek kemiklerimizde açık bir fiziksel kayıt bırakmıştır. Avrupa'da hayatları 33.000 yıla yayılan, Yukarı

Paleolitik'ten yirminci yüzyıla uzanan, yaklaşık 2.000 bireyin iskelet kalınlarının incelenmesi, nüfus giderek yerleşik bir hayat tarzına geçerken bacak kemiklerinin bükülme gücünde bir azalma olduğunu ortaya koymuştur (Ruff vd. 2015). Bu süreç yaklaşık 2000 yıl önce tamamlanmıştır, o tarihten beri yiyecek üretimi daha mekanik bir hal alırken bacak kemiklerinin gücü daha fazla azalmamıştır; toplayıcılıktan tarıma, hareketlilikten yerleşikliğe geçişin insanın evriminde gerçekten de dönemsel bir bölünme yarattığını doğrulayan bir gözlemdir bu.

Çevresel zorunluluklar, geleneksel tarımda tarla işlerinin zamanlamasını belirliyordu; MÖ ikinci yüzyılda Marcus Cato'nun kaleme aldığı, bugüne ulaşan en eski tarım incelemesi olan *De agri cultura*'da vurgulanan bir zorunluluktur bu: "Bütün tarla işlerini zamanında yapmaya dikkat edin, çünkü tarımda izlenmesi gereken yol budur: bir şeyi yapmakta geç kalırsanız, diğer her şeyi yapmakta geç kalırsınız." Tohum ekimi binlerce yıl boyunca elle yapılmıştır, ama diğer bütün tarla işleri aletlerin kullanılmasını gerektiriyordu; alet çeşitliliği zamanla artmıştı, erken tarihlerde tasarlanmış bazı tarım makineleri bulunsa da, bu tür aletler ancak erken modern dönemde (1500-1800) yaygınlık kazanmaya başlamıştır.

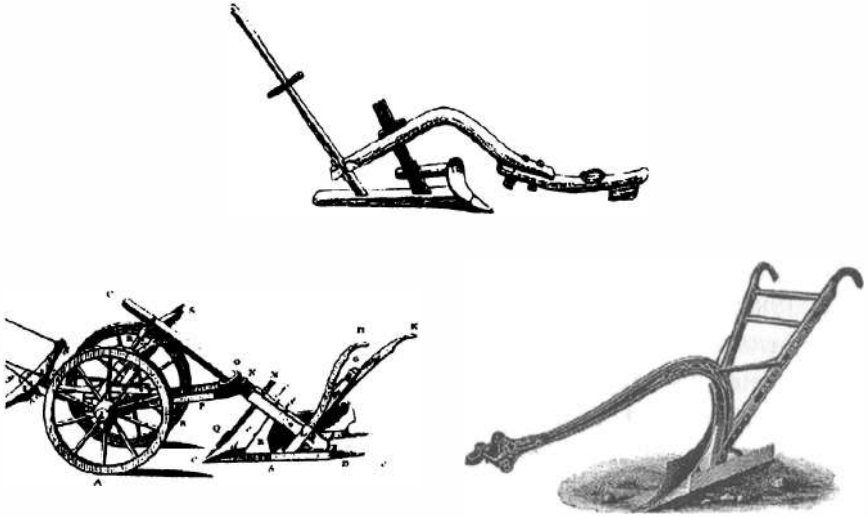
Geleneksel tarım aletlerine, uygulamalarına ve makinelerine ilişkin değerlendirmeler bu bölümün daha sonraki kısımlarında bahsi geçen belli bölgeler ya da ülkelerde tarımın tarihini konu alan kitaplarda ve şu özel kaynaklarda daha ayrıntılı olarak bulunabilir: Roma dünyası için White (1967), Britanya için Morgan (1984), Danimarka için Lerche (1994), ABD için Ardrey (1894) ve Çin için Bray (1984). Sonraki sayfalarda bütün önemli uygulamaları ve ekim-biçim alanında kilit pratikler ve ilerlemeleri betimlerken bu kaynakların hepsini kullandım; sadece hayvanların koşum takımlarını, geleneksel hayvan gücüyle ilgili bölümde ele aldım.

Eski Dünya'nın yüksek kültürlerinin hepsinde bu dizi saban sürmeyle başlamıştır. Klasik bir Çin risalesinde belirtildiği üzere: "Hiçbir kral ya da devlet yöneticisi bundan vazgeçemezdi." Antik dönemden kalma yazılar da saban sürmenin vazgeçilmezliğini yansıtır. Hem Sümerlilerin çivi yazısı kayıtları hem Mısırlıların hiyeroglifleri saban sürmenin yer aldığı resim yazılardır (Jensen 1969). Saban sürmek, zemini tohum atmaya çapalamaktan daha iyi hazırlar: Sıkışmış toprağı kırar, zararlı otları kökünden söker, filizlerin büyüüp boy atabileceği gevşek, iyi havalandırılmış bir zemin hazırlar. Mezopotamya'da MÖ 4000 sonrasında yaygın olarak kullanılan ilk ilkel kazıyıcı sabanlar (*ard*) bir sapı olan sivri uçlu ahşap sopalardan ibaretti.

Daha sonraları bunların çoğunun ucuna metal takılmıştır, ama bu aletler yüzyıllar boyunca simetrik biçimlerini (iki yanlarına toprak atıyorlardı) ve hafifliklerini korumuştur. Tohumlar için sığ bir oluk açan, kesilmiş zararlı otları yüzeyde bırakan bu basit sabanlar, hem Yunan hem Roma tarımının (Latince *aratrum*) demirbaş aletleri olmuştur. Ortadoğu, Afrika ve Asya'nın geniş kesimlerinde yirminci yüzyıla dek kullanılmışlardır. Bu aletler en yoksul bölgelerde, en uç durumlarda, insan tarafından çekiliyordu. Böyle bir çaba ancak hafif, kumlu topraklarda çapalamaktan hızlı ilerleyebilirdi (Bray 1984). Saban kulağının eklenmesi, açık arayla en önemli iyileştirme olmuştur. Saban kulağı sürülmüş toprağı bir yana iter, (kısmen ya da tümüyle) çevirir, kesilmiş zararlı otları gömer, karığın dibini bir sonraki iş için temizler. Saban kulağı, kazıyıcı saban kullanımında gerektiği üzere toprağın çapraz sürülmesi yerine tarlanın bir seferde sürülmesini de mümkün kılar. İlk saban kulakları sadece düz tahta parçalarıydı, ama MÖ birinci yüzyıl öncesinde Han Çinlileri saban demirlerine takılan kavisli metal levhalar kullanmaya başlamıştı (Şekil 3.1).

Ortaçağ'da Avrupa'daki ağır sabanlarda tahta bir saban kulağı ile dökme demir saban demirinden önce toprakta bir kesik açan bir keski bulunuyordu. On sekizinci yüzyılın ikinci yarısı boyunca Batı'da ağır sabanlarda ağır tahta tekerleklerin kullanımı devam etti, ama bu sabanlar artık tam kavisli saban demirleri taşıyordu (Şekil 3.1). Bu kulaklı sabanlar Avrupa ve Kuzey Amerika'da ancak, önce 1860'larda Bessemer süreciyle, kısa süre sonra da açık ocaklarda daha büyük miktarlarda üretilen ucuz çeliğin elverişli hale gelmesiyle yaygınlık kazanmıştı (Smil 2016) (Şekil 3.1). Saban sürmek çoğu toprakta, ardında büyük yığınlar bırakıyor, bunların tohum atma işleminden önce kırılması gerekiyordu. Eski saban kültürlerinde tırmık kullanılmasının nedeni buydu. Tırmıkların gelişimi ilkel çalı-çırpı tırmıklarla başlamış, tahta kazıklar, metal dişler ya da disklerin takıldığı çeşitli ahşap ya da metal çerçevelere uzanmıştır. İçeride dönük tırmıklar ya da çubuklar sıklıkla yüzeyi daha da düzeltmek için kullanılmıştır.

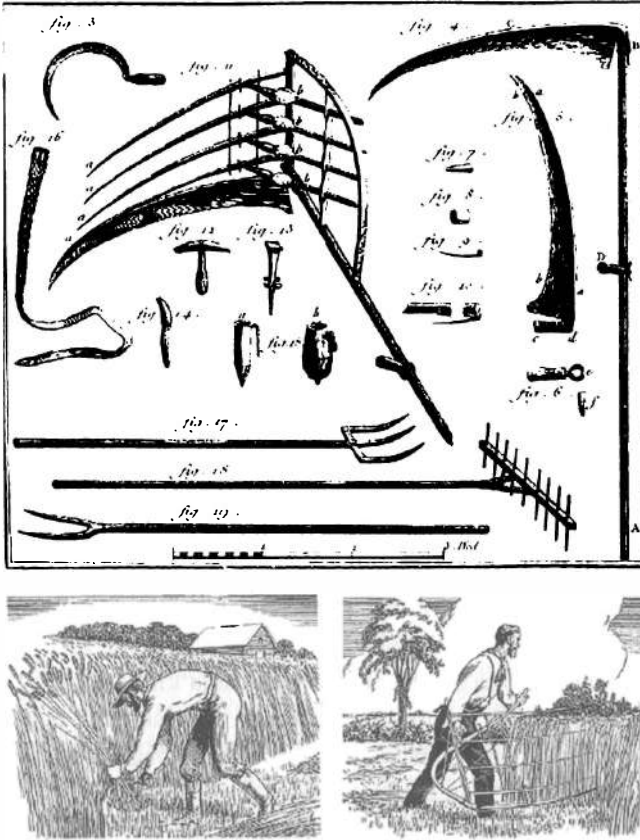
Saban sürme, tırmıklama ve düzenlemenin ardından zemin tohum atmaya hazır hale geliyordu. Tohum ekerler Mezopotamya'da MÖ 1300 gibi erken bir tarihte, ekim sabanları Han Çinlileri tarafından kullanılmışsa da yaygın olarak yapılan elle tohum ekimi (israfa ve dengesiz filizlenmeye yol açar) Avrupa'da on dokuzuncu yüzyıla dek yaygın olmuştur. Bir sabana iştirilmiş bir kutudan çıkan bir tüpten tohum atan basit tohum ekerler ilk



Şekil 3.1 Kavisli kulaklı pullukların evrimi. Geleneksel Çin pulluğunun (yukarıda) kolay kırılmayan dökme demirden küçük, ama düzgünce kavis yapan bir kulağı vardı. Avrupa'da Ortaçağ'da kullanılan, önden bir arabaya bağlanan ağır pulluklarda (altta solda) saban demirinin önünde kökleri kesmek için sivri uçlu bir bıçak bulunuyordu. On dokuzuncu yüzyılda Amerika'da kullanılan verimli oklu pulluktaysa (altta sağda) saban demiri ve kulak birleşerek düzgünce kavis yapan bir çelik halini almıştı. Kaynaklar: Hopfen (1969), Diderot ve D'Alembert (1769-1772) ile Ardrey (1894).

olarak Kuzey İtalya'da on altıncı yüzyılın sonunda yayılmaya başlamıştır. Çok geçmeden, yapılan birçok yenilik sayesinde bu aletler karmaşık tohum atma makineleri haline gelmiştir. Büyüyen ekinlerin bakımı büyük ölçüde çapalamayla yapılıyordu. Gübreler ve diğer organik atıklar tarlalara arabalarla, tahta sarnıçlarla ya da Doğu Asya'da yaygın olduğu üzere omuzda taşınan bir sopanın iki ucuna asılan kovalarla getiriliyordu. Sonra bu atıklar dirgenle savruluyor, saçılıyor ya da kepçeyle boşaltılıyordu.

Oraklar, birçok toplayıcı toplumun kullandığı kısa, keskin taş keskinlerin yerini alan ilk hasat aletleri olmuştu; Roma Galyasında yaklaşık 1,5 metre uzunluğunda kesici kenarları olan büyük tırpanlar kullanılıyordu (Tresemer 1996; Fairlie 2011). Orakların (en eski tasarımlarıyla) tırtıklı ya da düz kenarları, yarı dairesel, düz ya da hafifçe kavisli temrenleri vardı. Orakla kesmek yavaş ilerleyen bir işti, tahıl toplamaya yarayan kızakları olan tırpanlar daha geniş alanlarda yapılan hasatlarda tercih ediliyordu (Şekil 3.2). Ama orakla hasat yapıldığında, tırpanın geniş bir alandaki etkisine kıyasla, kulakların dağıtmasından kaynaklanan tahıl kayıpları azalıyordu; bu pratik Asya'da kolayca dağılan pirincin hasadında devam etti. Mekanik



Şekil 3.2 Fransa'da yayımlanmış *Encyclopédie*'de (Diderot ve d'Alembert 1769-1772) orak ve tırpan resimleri. Sağdaki basit tırpan otları biçmekte kullanılıyordu, kalburlu olansa tahıl hasadında. Tırpanların dövülmesi (düzleştirilmesi) ve keskinleştirilmesinde kullanılan aletlerin yanı sıra tırmık ve dirgenler de gösterilmiştir. Alttaki resimlerde on dokuzuncu yüzyılda Amerika'da orak ve kalburlu tırpan kullanılarak yapılan tahıl hasadı görülür.

toplayıcılar Amerika ve Avrupa'daki tahıl tarlalarına ancak on dokuzuncu yüzyılın ilk yıllarında geldi (Aldrich 2002). Hasadı yapılan ürünler evlere başın üstünde taşınan demetler halinde, omuzda sopalara asılarak taşınan ya da hayvanların iki yanına asılan küfelerle, insanların ya da yük hayvanlarının çektiği ya da ittiği el arabaları, ya da arabalarla getiriliyordu.

Ekinlerin işlenmesine hatırı sayılır miktarda enerji harcanıyordu. Harman yerine yayılan tahıllar, sopalar ya da dövenlerle dövülüyor, demetler kalburlara vuruluyor ya da özel taraklarla taranıyordu. Hayvanlar yayılmış tahılın üstün-

de yürümek ya da ağır kızaklar ya da silindirleri çekmek için kullanılıyordu. Kolla çevrilen yelpazelerin kullanılması, yabalama öncesinde kabuk ve pislğin tahıldan ayrılması sepetler ve kalburlar kullanarak elle yapılıyordu. Tahılların öğütülmesi için de, bu işin mekanikleştirilmesinde hayvanlar, su ve rüzgâr değirmenlerinin kullanılması öncesinde de zahmetli el emeğine ihtiyaç duyulmuştu. Tohumların yağı ve kamışların şekerli suyu, elle ya da hayvan gücüyle çalıştırılan preslerle çıkarılıyordu.

Tahılların Hâkimiyeti

Bütün geleneksel tarımlarda çeşitli tahıllar, yağlar, lifler ve yemlik ekinler üretilmişse de yaygın tarla işleriyle ilgili olarak betimlediğimiz sıralama çok büyük bir sıklıkla tahılların yetiştirilmesinde uygulanıyordu. Eski Dünya tarımlarında, sabanla sürmenin dışında sık görülen, ortak olduğu açık diğer özellik, hiç kuşku yok ki yıllık tarımda tahılların ağır basmasıydı. Saban kullanılmayan Mezoamerika toplumları, mısır a dayalı olmaları itibarıyla bu özelliği paylaşıyordu, İnkalar bile ancak kısmi bir istisna oluşturunuyordu: İnkalar yüksek yerlere ve dik dağ yamaçlarına geniş bir yelpazeye yayılan patates çeşitleri ekiyorlardı, ama daha alçak yerlerde de mısır yetiştiriyorlardı, ayrıca And Dağları'nın yüksek yaylalarında kinoa tarımı yapıyorlardı (Machiavello 1991). Bu tahılın tarımı, kavisli ve keskin bir ucu olan ahşap bir çubukla karık açmak için ayakla itilen enine bağlanmış bir çubuktan oluşan bir ayak sabanı olan *chaki taklla*'ya dayanıyordu.

Birçok tahıl sadece yerel ya da bölgesel önem taşıyordu, vegan Batı diyetlerinde kısa süre önce rağbet görmeye başlayan İnka kinoası bunlar arasında yer alıyordu, ama temel tahıl çeşitleri çıktıkları bölgeden dünyanın dört bir yanına yavaş yavaş yayılmışlardı. Buğday Yakındoğu'dan, pirinç Güneydoğu Asya'dan, mısır Mezoamerika'dan, darılar Çin'den yayılmıştı (Vavilov 1951; Harlan 1975; Nesbitt ve Prance 2005; Murphy 2007). Tahılların önemi evrimsel değişiklikler ve enerji zorunluluklarının bir bileşimine bağlıdır. Toplayıcı toplumlar çok çeşitli bitkiler topluyordu, yararlanılan ekosisteme bağlı olarak ya yumrular ya da tohumlar bu toplumların gıda enerjisini sağlıyordu. Yerleşik toplumlarda temel yiyecek olarak yumru seçeneği kısıtlı tutulmuştu.

Hasadı yeni yapılmış yumruların su içeriği, etkili bir ısı ve nem kontrolü olmadığından uzun süreli olarak depolanmasına izin vermeyecek kadar yüksektir. Bu zorluk aşılabılır olsa bile, ağır olmaları, daha kuzeydeki enlemlerde

(ya da daha yükseklerde) yoğun olarak yerleşik nüfusları kış aylarında ayakta tutabilmek için geniş hacimli depolama alanları gerektiriyordu. Yüksekte yaşayan And toplumları bu sorunu patatesleri *chuño* olarak saklayarak çözmüştü. Quechua ile Aymara'nın dondurma, çiğneme ve kurutma süreçleriyle ürettiği, suyu alınmış bu yiyecek aylarca, hatta yıllarca depolanabilir (Woolfe 1987). Yumruların proteini azdır (genelde tahıllardaki proteinin beşte biri kadardır: bazı durum buğdaylarında yüzde 13 oranında protein bulunur, beyaz patatesten protein oranı yüzde 2'dir). Baklagillerde tahıllardakinin iki katı kadar protein bulunur (bezelyede yaklaşık yüzde 20, fasulye ve mercimekte yüzde 18 ve yüzde 26), soya fasulyesinde tahılların üç katı kadar protein vardır (yüzde 35-38, bazı kültür ekinlerinde ağırlığın yüzde 40'ına ulaşabilir). Ama baklagil ekinlerin ürünleri, demirbaş tane hasadının sadece bir bölümünü oluşturur: ABD tahıllarının ortalama getirisi 1960'ta 2,5 t/ha, 2013'te 7,3 t/ha'ydı; bakliyat üretimiye aynı yıllarda 1,4 t/ha ve 2,5 t/ha'ydı (FAO 2015a).

Dolayısıyla tahıllara bağlılık açık enerji avantajlarıyla ilgili bir meseledir. Tahılların asli önemi, gayet yüksek düzeydeki ürün getirisinin, iyi besin değeriyle (karbonhidratların yüksek, proteinlerin orta düzeyde fazla olması), olgunlaştıklarında nispeten yüksek bir enerji yoğunluğuna sahip olmalarıyla (yumrulara nazaran kabaca beş kat yüksektir), uzun vadeli depolamaya uygun düşük nem içeriğiyle (iyi havalandırılmış depolarda, tahıllar yüzde 14,5'ten az su içeriyorlarsa bozulmaz) birleşmesinden kaynaklanır. Belli bir türün başat olması büyük ölçüde, çevre koşulları (her şeyden önce yetiştirme döneminin uzunluğu, uygun toprakların bulunması, yeterli su bulunması) ve tat tercihleriyle ilgilidir. Toplam enerji içeriği itibarıyla bütün tahıllar dikkat çekici bir benzerlik gösterir: Çeşitli tahılların olgun tohumları arasındaki farklar çoğunlukla yüzde 10'dan azdır (**Kutu 3.1**).

Tahılların gıda enerjisinin büyük bölümü karbonhidratlardan kaynaklanır, karbonhidratlar büyük ölçüde kolayca sindirilebilir polisakkaridler (nişasta) olarak bulunur. İnsanların beslenmesinde nişastaların payının artması, evcilleştirilmiş ilk hayvanın beslenmesinde dikkat çekici bir uyarlanmaya yol açmıştır: genetik mutasyonlar köpeklerde nişasta sindirimini, kurtların etobur beslenme biçimine kıyasla artırmıştır; bu türün evcilleştirilmesinde önemli bir adım olmuştur (Axelsson vd. 2013). Tahılların protein içeriği daha geniş bir yelpazeye yayılmıştır; birçok pirinç kültüründe yüzde 10'dan azdır, sert yaz buğdayında yüzde 13, kinoa da yüzde 16'dır. Proteinler karbonhidratlarla aynı enerji yoğunluğuna sahiptir (17 MJ/kg),

Kutu 3.1

Başlıca tahılların enerji yoğunluğu ile karbonhidrat ve protein içeriği

Tahıllar	Enerji içeriği (MJ/kg)	Karbonhidratlar (%)	Protein (%)
Buğday	13,5-13,9	70-75	9-13
Pirinç	14,8-15,0	76-78	7-8
Mısır	14,7-14,8	73-75	9-10
Arpa	13,8-14,2	73-75	9-11
Darı	13,5-13,9	72-75	9-10
Çavdar	13,3-13,9	72-75	9-11

Kaynaklar: USDA (2011) ve Nutrition Value'dan (2015) derlenmiş aralıklar

ama insanların beslenmesinde oynadıkları asıl rol enerji kaynağı olmak değil, sindirimleri beden dokularının yapılması ve onarılması açısından temel önemde olan dokuz temel aminoasidi sağlamaktır (WHO 2002). Bitkiler ve hayvansal yiyeceklerdeki bu temel aminoasitleri tüketmeksizin, bedendeki proteinleri sentezleyemeyiz.

Bütün hayvansal yiyecekler ve bütün mantarlar mükemmel bir protein kaynağıdır (dokuz temel aminoasidin hepsine de yeterli oranda sahiptirler), ama en başta gelen dört tahılın (buğday, pirinç, mısır, darı) hepsinde ve diğer önemli tahıllarda (arpa, yulaf ve çavdar) lisin bulunmaz, yumrular ve baklagillerin çoğunda da metiyonin ve sistein bulunmaz. En sıkı vejetaryen diyetlerde bile belli aminoasitlerin bulunmadığı yiyecekleri birleştirerek tam protein alımı sağlanabilir. Tahılların ağırlıkta olduğu vejetaryen diyetlere büyük ölçüde bağlı olan bütün geleneksel tarım toplumları bu temel eksikliğe, öğünlerinde tahıllar ve baklagilleri birleştirerek, birbirlerinden bağımsız (açıkçası biyokimya bilgisine sahip değilken; zira aminoasitler ve rolleri ancak on dokuzuncu yüzyılda keşfedilmiştir) basit bir çözüm bulmuşlardır.

Çin'de soya fasulyesi (eksiksiz proteine sahip az sayıda önemli bitkisel yiyecekten biridir), fasulyeler, bezelyeler ve fıstıklar kuzeyde üretilen darı ve buğday, güneyde üretilen pirinçle birlikte tüketilmiştir. Hindistan'da *dal*'dan (Hintçede mercimek, bezelye ve nohut dâhil baklagiller için kullanılan geleneksel bir terim) alınan protein her zaman buğday ve pirince dayalı öğünleri zenginleştirmiştir. Avrupa'da en yaygın baklagil-tahıl bileşimleri bezelye ve fasulyelerle, buğday, arpa ve çavdara dayanıyordu. Yeni Dünya'da mısır ve

fasulyeler çok çeşitli yemeklerde birlikte tüketilmekle kalmıyordu, yaygın bir biçimde birlikte ekiliyor, aynı tarlada birlikte yetiştiriliyordu.

Bu demektir ki tümüyle vejetaryen diyetler bile yeterli protein alımı sağlayabilir. Şunu da belirtmek gerekir ki neredeyse bütün geleneksel toplumlar, ete çok büyük bir değer vermiştir; et tüketiminin yasaklandığı yerlerde yüksek kalite hayvansal protein tüketmek için ya süt ürünlerine (Hindistan) ya da balığa (Japonya) yönelmişlerdir. Buğdayda bulunan iki protein besleyicilikleri nedeniyle değil, fiziksel (viskoelastik) özellikleri nedeniyle benzersizdir. Monomerik glüten proteinler (gliadin) ağdalıdır, polimerik glüten proteinler (glutenin) ise elastiktir. Suyla birleştiklerinde mayalanmış bir hamurun kabarmasını mümkün kılacak kadar elastik, ama mayanın fermentasyonu sırasında oluşan karbondioksit kabarcıklarını koruyacak kadar güçlü bir glüten kompleksi oluştururlar (Veraverbeke ve Delcour 2002).

Bu buğday proteinleri olmasaydı, Batı medeniyetinin temel yiyeceği olan mayalanmış ekmek olmazdı. Maya hiçbir zaman sorun olmamıştır: Yabani (doğal olarak mevcut) *Saccharomyces cerevisiae* birçok meyve ve taneli yemişin kabuklarında bulunur, birçok maya çeşidi evcilleştirilmiş, bu da gen ifadelerinde ve koloni morfolojisinde değişikliklere yol açmıştır (Kuthan vd. 2003). Tahılların geleneksel diyetlerde baskın olması, tahıl üretiminin enerji dengelerini tarımsal üretkenliğin en açıklayıcı göstergesi haline getirir. Çok çeşitli tarla ve çiftlik işlerinde, tipik tarımsal emek gereksinimleri ve bunların enerji maliyetleriyle ilgili veriler elimizde mevcuttur (Kutu 3.2).

Fakat yaklaşık enerji dengelerini hesaplamak için bu düzeyde ayrıntıya gerek yoktur. Geleneksel tarımda tipik net enerji maliyetlerinin temsili ortalamasını kullanmak gayet işe yarar. Orta zorlukta faaliyetlerin tipik enerji gereksinimleri erkeklerde temel metabolik oranın yaklaşık 4,5, kadınlarda 5 katı kadardır, yani sırasıyla 1 ve 1,35 MJ/saat'tir (FAO 2004). Erkekler ve kadınlar için varoluşsal gereksinimlerin çıkarılması net işgücü enerji maliyetlerini 670 ve 940 kJ/saat yapar. Basit ortalama kabaca 800 kJ/saat'tir, bunu geleneksel tarımda ortalama bir saatlik emeğin net gıda enerjisi maliyeti olarak kullanacağım. Aynı şekilde brüt tahıl üretimi hasat edilen miktarın uygun enerji eşdeğerlikleriyle çarpılması yoluyla hesaplanır (nem oranı yüzde 15'ten az olup depolanabilecek tahıllar için genel olarak 15 GJ/ton'dur).

Bu iki ölçütün oranı bu kritik çiftlik işlerinin brüt enerji getirisini, dolayısıyla verimliliğini gösterir. Net enerji getirileri (tohum gereksinimleri, öğütme ve depolama sırasındaki kayıpların çıkarılması sonrasında) ciddi

Kutu 3.2
Geleneksel tarımda emek ve enerji gereksinimleri

İşler	İnsanlar/ Hayvanlar	Hektar başına saat	Enerji maliyeti
Çapalama			O-A
Genel	1/—	100-120	O-A
Yaş toprak	1/—	150-180	A
Pulluk/saban			O-A
Ahşap pulluk	1/1	30-50	A
Ahşap pulluk	1/2	20-30	A
Çelik pulluk	1/2	10-15	O
Tırmıklama	1/2	3-10	O
İşler	İnsanlar/ Hayvanlar	Hektar başına saat	Enerji maliyeti
Tohum ekmek			H-O
Tohum saçmak	1/—	2-4	O
Tohumeker	1/2	3-4	H
Zararlı ot temizliği	1/—	150-300	O-A
Hasat			O-A
Orak (buğday)	1/—	30-55	A
Orak (pirinç)	1/—	90-110	A
Kalbur	1/—	8-25	A
Demet bağlama	1/—	812	O-A
Şoklama	1/—	2-3	A
Bıçerdöver	1/2	1-3	O
Bıçerbağlar	1/3	1-2	O
Kombin	4/20	2	O
Harman dövme			H-A
Çiğname	1/4	10-30	H
Dövmek	1/—	30-100	A
Harman dövme makineleri	7/8	6-8	O

Notlar: Hafif işte (H) ortalama yetişkin bir erkek bir dakikada 20 kJ'den az gıda enerjisi tüketir. Ortalama (O) kuvvet gerektiren işlerde dakikada en fazla 30 kJ gıda enerjisi harcanır, ağır işlerdeyse (A) dakikada en fazla 40 kJ. Kadınlarda aynı oranlar yüzde 30 daha azdır.

Kaynaklar: Verilen aralıklar Bailey (1908), Rogin (1931), Buck (1937), Shen (1951), Esmay ve Hall'da (1968) sunulan verilere dayanarak derlenmiş ve hesaplanmıştır. Enerji maliyeti göstergeleri Durnin ve Passmore'da (1967) değerlendirilen metabolik araştırmalara dayanarak tahmin edilmiştir.

biçimde daha azdır. Çiftçilerin ertesi yılki tohum atma faaliyetleri için her hasadın bir bölümünü bir kenara ayırmaları gerekiyordu. Ürün getirisinin az olmasıyla birlikte elle tohumlama nedeniyle tohum kaybının yüksek olması, Ortaçağ'da ekilen tahılların üçte birinin, hatta yarısının bir kenara ayrılması gerektiği anlamına gelebiliyordu. Hasat edilen ürün miktarının artmasıyla birlikte bu oranlar yavaş yavaş yüzde 15'in altına indi. Bazı tahıllar bütün olarak yenir, ama yiyeceklerin fiilen hazırlanması (pişirilmesi) öncesinde çoğu tahıl önce öğütülür, bu süreçte de tam tahıl kütlelerinin önemli bir bölümünü yitirir (**Kutu 3.3**).

Geleneksel çiftliklerde depolamadan ileri gelen kayıplar (küflenme, mantarlanma, böceklenme ve küplere erişebilen kemirgenler nedeniyle) yenilebilir tahıl toplamını yüzde 3-4 ilâ 10'un üzeri arasında azaltıyordu. Daha önce belirttiğimiz üzere nem oranı yüzde 15'ten az olan tahıllar uzun süre depolanabilir; nem oranının yüksek olması, özellikle sıcaklığın daha yüksek olduğu ortamlarda tohumların çimlenmesine, böceklenmesine, küflenmesine uygun ortamı yaratır. Bunun yanı sıra gereği gibi depolanmayan tahıllar kemirgenlere yem olabilir. On sekizinci yüzyılın ortası gibi yakın bir tarihte

Kutu 3.3 Tahıl öğütme

Tam tahıl unları kabuğun tamamını içerir, ama beyaz un sadece tahılın endosperminden yapılır (toplam ağırlığın yaklaşık yüzde 83'ü), kepek (yaklaşık yüzde 14) ve germ (yaklaşık yüzde 2,5) başka işlerde kullanılmak üzere bir kenara ayrılır (Wheat Foods Council 2015). Beyaz pirinç üretimi, öğütmede daha yüksek bir kayıp verilmesini gerektirir. Kabuk katmanı pirinç tahılı kütlelerinin yüzde 20'sini oluşturur, bu katmanın alınmasıyla kahverengi pirinç üretilir. Kepek katmanı tahılın yüzde 8-10'unu oluşturur ve kepeğin farklı oranlarda alınması daha çok ya da az beyaz pirinç üretir ki bu nihai ürün tahılın baştaki ağırlığının yüzde 70-72'si kadar ağırdır (IRRI 2015).

Japonya'da gıda kıtlığıyla ilgili anlatılarda, insanların kahverengi pirinç yemek zorunda kaldıklarından, işler daha da kötüye gittiğinde arpayla karışık kahverengi pirinç yendiğinden, nihayetinde sadece arpa tüketildiğinden bahsedilir (Smil ve Kobayashi 2011). Mısırın öğütülmesi sırasında ucundaki kapakçık, kepek katmanı ve germ alınır, tahıl tanesinin yüzde 83'ünü oluşturan endosperm kalır. Tortilla, tamales, masa harına yapımında kullanılan mısır unu alkali ortamda pişirme (*nixtamalization*) yani misket limonu çözeltilisine yatırılmış tanelerin yaş öğütülmesiyle elde edilir (Sierra-Macías vd. 2010; Feast ve Phrase 2015). Bu usul kepekleri taneden ayırır, hemiselülozu çözerek taneleri yumuşatır, mikotoksin varlığını azaltır ve niyasinin (B3 vitamini) biyoayarlanımını sağlar.

bile, tohum atma gereksinimleri ile depolamadan ileri gelen kayıplar Avrupa'da tahıllardan elde edilen brüt enerji kazanımını yaklaşık yüzde 25 azaltmış olabilir.

Ekim Döngüleri

Yıllık ekim döngülerinin ortak yönleri ve tahıl ekiminin baskınlığı, yöreler ve bölgelerin inanılmaz bir çeşitlilik gösteren, kendilerine özgü özelliklerini gölgede bırakmıştır. Bu özelliklerin bazılarının ayrıksı kültürel kökenleri vardır, ama çoğu, farklı ortamlara verilmiş karşılıklar ve uyarlanmalar olarak gelişmiştir. Bunların en başında, ekilecek başlıca ürünlerin, dolayısıyla tipik beslenme biçiminin çevre koşullarına bağlı olarak belirlenmesi gelir. Çevre koşulları, tarımsal emeğin idaresini belirleyen yıllık tarım döngülerini de şekillendirmiştir. Buğday birçok iklimde (yarı çöllerin yanı sıra yağmurlu bölgelerde de yetişir, 30 ve 60 derece kuzey enlemleri arasında yetiştirilen başlıca ekindir), yükseklikte (deniz seviyesinden tutun, deniz seviyesinin 3000 metre üstüne kadar) ve iyi kurutulmuş olması kaydıyla birçok toprakta yetiştiği için Ortadoğu'dan bütün kıtalara yayılabilmektedir (Heyne 1987; Sharma 2012).

Oysa pirinç köken itibarıyla tropikal ovalarda yetişen yarı sulak bir bitkidir, hasattan hemen öncesine dek su altında kalmış tarlalarda yetişir (Smith ve Anilkumar 2012). Pirinç ekimi de Güney Asya'daki doğuş merkezinin çok ötesine yayılmıştır, ama en iyi ürünler her zaman yağmurlu tropikal ve tropikal altı bölgelerde alınmıştır (Mak 2010). Sırtlı sulak tarlaların inşası ve bakımı, fideliklerde tohumların çimlendirilmesi, fidelerin dikilmesi, ek sulamanın sağlanması buğday üretiminden çok daha yüksek bir emek gereksinimi doğurur. Mısırsa buğdayın tersine en iyi ürünü, yetişme mevsiminin sıcak ve yağmurlu olduğu bölgelerde verir, ama o da iyi kurutulmuş toprakları sever (Sprague ve Dudley 1988). Patates en iyi ürünü yazların serin, yağmurun bol olduğu bölgelerde verir.

Yıllık tarım döngüleri hem kurak tropikal altı bölgelerde hem muson bölgelerinde suyun bulunabilirliğine, ılıman iklimlerde yetiştirme mevsiminin uzunluğuna bağlıdır. Mısır'da, dokuzuncu yüzyılın ikinci yarısında da imi sulama yaygın olarak benimseninceye dek Nil nehrinin taşkınları yıllık ekim döngüsünü belirlemiştir. Genellikle kasımda sular çekilir çekilmez tohum atma işi başlıyordu, suların yükselmeye başladığı haziran sonu ile hızla geri çekildiği ekim sonu arasında hiçbir tarla işi yapılmıyordu; hasat ekim-

den 150-185 gün sonra yapılıyordu (Hassan 1984; Janick 2002). Bu örüntü on dokuzuncu yüzyıla dek büyük ölçüde değişmeksizin hakim olmuştur.

Asya'da muson bölgesinde pirinç üretiminin genellikle bol olan, ama geciken yaz yağmurlarına bağlı olması gerekmiştir. Örneğin Çin'de yapılan yoğun ekimde, ilk pirinçlerin fideleri nisan ayında fideliklerden alınıp tarlalara dikilir. İlk ekinin temmuzdaki hasadının hemen ardından geç pirinç ekilir, o da sonbahar sonunda hasat edilir, sonra onun yerine bir kış ekini dikilir. Ilıman bölgelerde çifte ürün dikimi, çok daha az baskıyla uygulanıyordu. Batı Avrupa'da sonbaharda dikilip, kışın yeşil kalan ekinler beş ilâ yedi ay sonra hasat ediliyordu. Bunların ardından baharda tohumu atılan ekinler dikiliyordu, onlar da dört-beş ayda olgunlaşıyordu. Soğuk kuzey bölgelerde nisanda zeminin buzu çözülmüş oluyordu, ama tek bir yıllık ekinin dikimi için, öldürücü soğuk tehlikesinin geri çekilmiş olacağı mayıs sonuna dek beklemek gerekiyordu, öldürücü soğukların geri gelmesi öncesinde bir ekinin olgunlaşmaya sadece üç ayı oluyordu.

İklimin dikte ettiği ekim ritmi, insan ve hayvan gücünün seferber ve idare edilmesi üzerinde son derece dalgalanan talepler yaratıyordu. Tek bir yıllık ekinin yetiştirildiği bölgelerde uzun aylar boyunca kış nadasına yatılıyordu, Kuzey Avrupa ve Kuzey Amerika ovalarında tahıl tarımının gayet tipik bir niteliğidir bu. Evcil hayvanların bakımının yapılması elbette ki yıl boyunca süren bir faaliyetti, ama yine de bu işten çok fazla boş zaman kalıyordu ve bu zamanın bir bölümü ev içinde yapılan zanaatlere, tarım aletlerinin onarımına ya da inşaata harcanıyordu. Kuzey Çin'de daha kısa süren kış aylarında birçok gün sulama işlerinin sürdürülmesine ve genişletilmesine harcanıyordu.

Baharları saban sürülmesi, tohum atılması birkaç hafta boyunca sıkı çalışılmasını gerektiriyordu, bunu da birkaç ay boyunca daha kolay bir rutin izliyordu (gerçi pirinç tarlalarından zehirli otların temizlenmesi zahmetli bir iş olabiliyordu). Hasat en fazla vakit alan işti, sonbahar aylarında saban sürülmesi çok daha uzun bir süreye yayılabiliyordu. O kadar uçlara varmayan iklimlerin bir kış ekini dikilmesini mümkün kıldığı yerlerde (Batı Avrupa'da, Kuzey Çin Ovası'nda, Kuzey Amerika'nın doğu bölümlerinin büyük kısmında) yaz ekininin hasat edilmesiyle kış ekininin dikilmesi arasında iki-üç ay geçiyordu. Oysa tersine yağış miktarının o kadar eşit dağılmadığı ülkelerde, özellikle de Asya'da muson yağmurlarının düştüğü bölgelerde tarım işleri, ancak sınırlı tarlalarda gerçekleştiriliyordu. Ekim ve hasadın tam zamanın-

da gerçekleştirilmesi özellikle kritik önemdeydi. En iyi ekim döneminin bir hafta bile geçirilmesi hasadın ciddi derecede azalmasına neden olabiliyordu. Erken bir hasat, yüksek nem oranı nedeniyle emek yoğun bir kurutma sürecini gerektirebiliyordu, hasadın gecikmesi ise aşırı olgunlaşmış kulakların parçalanması nedeniyle kayıplara neden olabiliyordu.

Biçerdöverler öncesinde elle yapılan tahıl hasadı, en fazla vakit alan işti, saban sürmeden üç-dört kat daha uzun sürüyordu ve tek bir ailenin idare edebileceği bölgenin büyüklüğüne açık sınırlar getiriyordu. Bir ekinin, bir sonrakinin ekimi için hızla hasat edilmesi gerektiğinde, iş gücü talebi artıyordu. Eski bir Çin atasözünde bu ihtiyaçtan dem vurulur: “Hem darı, hem buğday olgunlaşıp sarardığında, iş tutan kızlar bile yardıma koşar.” Buck (1937) bu gerekliliği Çin’deki geleneksel tarıma ilişkin kapsamlı çalışmalarında niceliklerle ifade etmiştir: Çin’de iki ekinin ekildiği bölgede ekim ile hasat (mart ile eylül arası) sırasında mevcut işgücünün neredeyse tamamı (ortalama yüzde 94-98’i) kullanılıyordu. Hindistan’ın bazı bölgelerinde yazın en güneşli iki ayında mevcut işgücünün yüzde 110, hatta yüzde 120’sinden fazlasına gerek duyuluyordu; Asya’da muson bölgesinin diğer kısımlarında da benzer bir durumun baskın olduğu gözleniyordu (Clark ve Haswell 1970). Bu ortak enerji dar boğazı, ancak ve ancak bütün aileler uzun saatler boyunca ya da göçebe işgücüne dayanarak zahmetle çalışırsa aşılabiliyordu.

Birçok tarımda sadece en fazla emek gerektiren tarla işlerine ayrılması olan hayvan gücünün kullanılması çok daha eşitsiz bir görünüm sergiliyordu. Örneğin Güney Çin’de mandaların azami çalışma süresi bahar başında iki ay ekim, tırpanlama ve toprak düzleme, yazın altı hafta hasat ve kış ekimi için bir ay tarla hazırlığı (yine saban sürme ve tırpanlama), toplam 130-140 gündü, yani yılın yüzde 40’ından azdı (Cockrill 1974). Kuzey Avrupa’da tek ekinin yetiştirildiği tarım rejimlerinde yük atları sonbahar ve ilkbaharlarda saban sürme, yazları hasat sırasında sadece 60-80 gün ağır tarla işlerinde çalışıyordu, ama bunların çoğu nakliyatla kullanılıyordu. Tipik bir iş günü, Afrika’da birçok yerde öküzler için sadece beş saat ile Asya’da pirinç tarlalarında çalışan mandalar ile Avrupa veya Kuzey Amerika’da tahıl hasadında çalışan atlar için on saati aşkın bir süre arasında değişiyordu.

YOĞUNLAŞMAYA GİDEN YOLLAR

Daha fazla miktarda ürün elde etme yönünde hiçbir arayış, üç temel ilerleme olmaksızın başarıya ulaşamazdı. Bunların birincisi, insan emeğinin yerini

kısmen hayvan emeğinin almasıydı. Pirinç tarımında bu durum genellikle sadece insanların yaptığı en yorucu işi ortadan kaldırdı, zahmetli çapalama işi yerini maddelerin kullanıldığı derinden saban sürmeye bıraktı. Kuru arazilerde çiftlik hayvanlarının emeği, insan emeğinin yerine geçti ve birçok çiftlik işinin yanı sıra tarla işini de hatırı sayılır ölçüde hızlandırarak insanlara diğer üretken faaliyetlerini sürdürme ya da daha kısa süre çalışma özgürlüğü kazandırdı. İtici güç niteliğindeki bu asli değişiklik işleri hızlandırmak ve kolaylaştırmaktan fazlasını yaptı, ister saban sürme, ister tohum atma, ister samanın ayrılması olsun yapılan işin niteliğini de iyileştirdi. İkincisi, sulama ve gübreleme ekin verimi, su ve besin maddesi kıtlığı üzerindeki iki kilit kısıtlamayı ılımlı düzeye çekti, hatta tümüyle ortadan kaldırdı. Üçüncüsü, gerek çok sayıda ekin ekerek ya da dönüşümlü ekim yoluyla çok çeşitli ekinler yetiştirilmesi geleneksel tarımı hem daha esnek hem daha verimli kıldı.

Çin’de köylülere ait iki deyiş bu iki kısıtlamanın ortadan kaldırılmasının ve üretimin çeşitlendirilmesinin önemini aktarır. “Hasat olup olmaya-
cağı suya bağlıdır, hasadın ne kadar büyük olacağıysa gübreyle.” Bir diğer deyişe şöyledir: “Darı üstüne darı ek, sonunda oturup ağlarsın.” Yük hayvanlarının kullanılması sonuçları tarlalarda ekin yetiştirme ve hasadın ötesine geçen, enerji açısından temel önemde bir ilerlemeydi. Yük hayvanları hem gübredeki besinlerin kaynağı olarak hem de bunları ekinlere dağıtan asli kuvvet olarak gübreleme açısından vazgeçilmez bir önem kazandı. Birçok yerde sulama için gerekli enerjiyi de sağladılar. Daha güçlü ana kuvvetler ile daha iyi sulama ve besin tedariki de çok sayıda ürünün ekilmesini ve dönüşümlü ekimin artmasını sağladı. Buna karşılık bu ilerlemeler, üç yoğunlaşma yolu birbirini güçlendiren geri besleme devreleriyle birbirine bağlı olduğundan çok sayıda daha güçlü hayvanı ayakta tutabildi.

Yük Hayvanları

Envilleştirme farklı özellikler gösteren ve iş gören birçok soyun ortaya çıkmasıyla sonuçlandı; bu hayvanların ağırlıkları bir büyüklük kertesine dağılıyordu; küçük eşeklerin ağırlığı 100 kg’yi aşarken, en ağır yük atlarının ağırlığı 1.000 kg’nin üstüne çıkıyordu. Hint öküzlerinin ağırlığı 400 kg’den biraz azdı; İtalyan Romagnola ya da Chianina sığırları onlardan iki kat daha ağırdı (Bartosiewicz vd. 1997; Lenstra ve Bradley 1999). Asya ve Avrupa’nın bazı bölgelerinde çoğu at sadece midilliydi, boyları 14 karıştan kısaydı, ağırlıkları da Asya öküzünden fazla değildi. Geleneksel bir İngiliz ölçüsü olan bir

kariş 10,16 cm'dir, hayvanın boyu yerden cıdağıya, boynu ve başının altında kürek kemikleri arasındaki çıkıntıya kadar ölçülür. Roma atları 11-13 kariştı. Erken modern dönemde Avrupa'daki at türlerinin en ağırları (Belçika Brabançonları, Fransız Boulonnais ve Percheronlar, İskoç Clydesdaleler, İngiliz Suffolklar ve Shirelar, Alman Rhinelanderlar, Rusya'nın ağır yük atları) 17 karişa yaklaşıyor, hatta bunu aşıyordu, ağırlıkları da 1.000 kg'ye yakın ya da bunun biraz üstündeydi (Silver 1976; Oklahoma Eyalet Üniversitesi 2015). Mandaların ağırlığı 250 kg ile 700 kg arasında değişebiliyordu (Cockrill 1974; Borghese 2005).

Geleneksel tarımlarda çeşitli tarla ve çiftlik işlerinde hayvanlar kullanılıyordu, ama çift sürme hiç kuşkusuz hayvanların en büyük farkı yarattığı faaliyetti (Leser 1931). Genelde çalışan hayvanların çekiş gücü kabaca ağırlıklarıyla doğru orantılıdır, fiili performanslarını belirleyen diğer değişkenler arasında hayvanın cinsiyeti, yaşı, sağlık durumu, deneyimi, hasadın verimi ve toprak koşulları yer alır. Bütün bu değişkenler geniş bir yelpazede farklılık gösterebileceği için sıradan çalışan türlerin yararlı gücünü, tipik aralıklarla özetlemek daha tercih edilir (Hopfen 1969; Cockrill 1974; Goe ve Dowell 1980). Tipik bir yükün ağırlığı, hayvanın ağırlığının yüzde 15'i kadardır, ama atlar için bu ağırlık kısa süreli güç uygulamaları (yaklaşık 2 kW) için yüzde 35'i, üstün bir güç harcadıkları birkaç saniye için çok daha fazlasını bulabilir (Collins ve Caine 1926). Büyük bir kitle ve nispeten yük-

Kutu 3.4

Tipik ağırlıklar, yükler, çalışma hızları ve evcil hayvanların gücü

Hayvanlar	Ağırlıklar (kg)	Ortalama aralık	Tipik yük (kg)	Olağan hız (m/sn)	Güç (W)
Büyükbaş					
Atlar	350-700	800-1.000	50-80	0,9-1,1	500-850
Katırlar	350-500	500-600	50-60	0,9-1,0	500-600
Öküzler	350-700	800-950	40-70	0,6-0,8	250-550
İnekler	200-400	500-600	20-40	0,6-0,7	100-300
Buffalolar	300-600	600-700	30-60	0,8-0,9	250-550
Eşekler	200-300	300-350	15-30	0,6-0,7	100-200

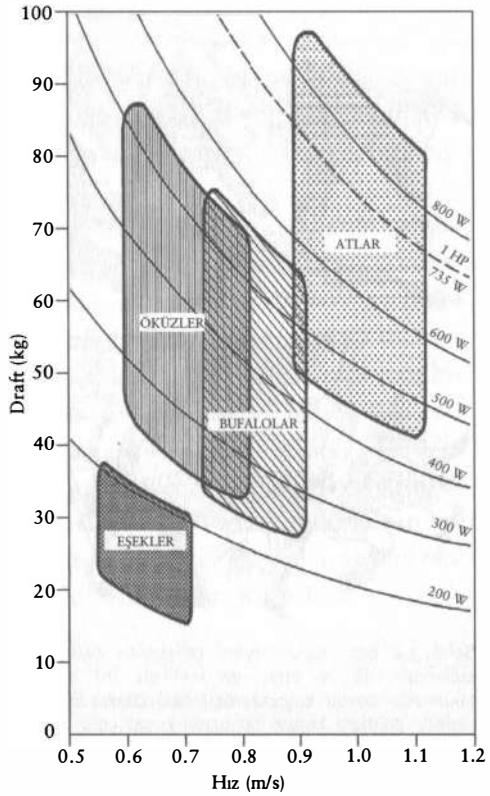
Not: Güç değerleri en yakın 50 W'ye yuvarlanmıştır.

Kaynaklar: Hopfen (1969), Rouse (1970), Cockrill (1974), Goe ve Dowell (1980).

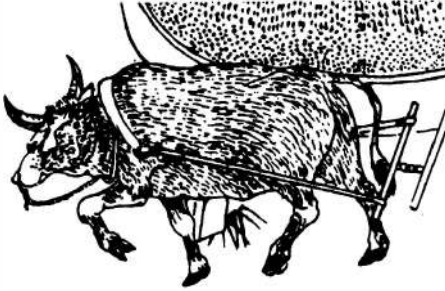
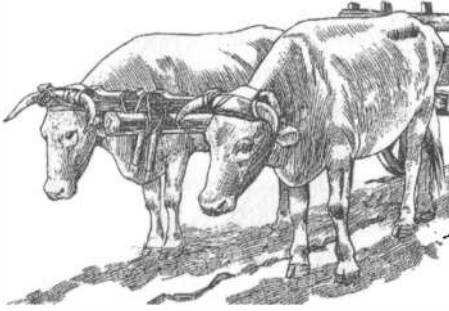
sek hızın bir araya gelmesi, atları en iyi yük hayvanları haline getirir, ama çoğu at bir beygir gücü (745 W) düzeyinde sürekli güç uygulayamaz, genellikle kuvvetleri 500 ilâ 850 W'tır (Kutu 3.4, Şekil 3.3).

Yük taşımının fiili koşulları işe göre (ağır ve hafif işlerde uç noktalar, derinden çift sürme ile tarla düzleme olabilir) ve toprak tipine göre (ağır killi topraklarda daha zor, kumlu topraklarda daha kolay) büyük bir farklılık gösteriyordu. Yüzeysel çift sürme (tek bir saban kulağıyla) ve ot biçme 80-120 kg'lık, derinden saban sürme 120-170 kg'lık ve mekanik biçerdöver 200 kg'lık sürekli bir çekiş gerektiriyordu. Ortalama büyüklükte bir çift at bile bu işlerin hepsini yapabiliirdi, ama bir çift öküz derinden çift sürmeye ya da biçerdöverle hasat yapmaya yeterli değildi. Aynı zamanda mekanik zorunluluklar nedeniyle küçük hayvanlar tercih ediliyordu: Her şey eşit olduğunda, küçük hayvanların çekiş hatları çekiş yönüne daha paraleldir, bu da verimin daha yüksek olması sonucunu doğurur, çift sürmede, daha alçak bir çekiş hattı da sabanın üstüne düşen yükü azaltır, saban süren kişinin sabanı yönlendirmesini kolaylaştırır. Ayrıca daha hafif hayvanlar, sıklıkla daha çevik olur, daha hafif olmalarını sebat ve dayanıklılıkla telafi ederler.

Çekiş potansiyeli ancak pratik koşum takımlarıyla etkili bir performansla çevrilebilir (Lefebvre des Noëttes 1924; Haudricourt ve Delamarre 1955; Needham 1965; Spruytte 1983; Weller 1999; Gans 2004). Çekiş gücünün, etkili bir biçimde aktarılmasını ve ayrıca insanın hayvanın hareketlerini kontrol etmesini mümkün kılan bir tertibatla iş noktasına (saban kulağı ya



Şekil 3.3 Hayvanların yük gücüne ilişkin, atların açık üstünlüğünü gösteren karşılaştırmalar. Hopfen (1969), Rouse (1970) ve Cockrill'deki (1974) verilerden derlenmiştir.



Şekil 3.4 Baş boyunduruğu, çalıştırılan öküzlerde kullanılan ilk ve biraz da verimsiz bir koşum takımıydı. Boyun boyunduruğu Eski Dünya'nın her yerinde sığırlara koşum takmanın başat yolu haline geldi. Hopfen'dan (1963) ve Ming hanedanlığının son dönemine (1637) ait bir resimden alınmıştır.

da biçerdöverin kenarı) aktarılması gerekir. Bu tür tasarımlar basit görünebilir, ama ortaya çıkmaları uzun zaman almıştır. İşe koşulan ilk hayvanlar olan sığırlara boyunduruk takılıyordu, bunlar hayvanın boynuzları ya da boynuna bağlanan düz ya da kavisli ahşap çubuklardan oluşuyordu.

En eski Mezopotamya koşumları (en iyi güçlü, kısa boyunlu hayvanlarda kullanılmış, daha sonra İspanya ve Latin Amerika'da yaygınlaşmıştır) başın ya önünde ya arkasında sabitlenen çift baş boyunduruğuydu (Şekil 3.4). İlkel bir koşum takımıydı bu: Uzun, ahşap bir çubuktan ibaretti; boyna sabitlenmesini sağlayan düzenek ağır iş sırasında hayvanı soluksuz bırakabiliyordu, çekiş açısı da fazla genişti. Ayrıca bir öküzün

ya da ineğin nefesinin yetmesini sağlamak için hayvanların boylarının hemen hemen aynı olması, daha hafif işleri tek bir hayvan görebilecek olsa bile bir çift hayvanın koşulması gerekiyordu. Avrupa'nın birkaç bölgesinde (Doğu Baltık bölgesi, Güneybatı Almanya) daha rahat bir tek baş boyunduruğu kullanılmıştı. İki dingile ya da koşum kayışları ve bir araba falakasına bağlanan tek bir boyunduruk Doğu Asya'da ve Orta Avrupa'da yaygındı (Şekil 3.4). Afrika, Ortadoğu ve Güney Asya'da çift boyun boyunduruğu yaygındı.

Atlar en güçlü yük hayvanlarıdır. Beden kütleleri ön ve arka arasında neredeyse eşit bölünmüş sığırların tersine atların ön kısımları arka kısımlarına göre dikkat çekici derecede daha ağırdır (yaklaşık 3'e 2 oranında), dolayısıyla çeken hayvan eylemsizlik hareketinden sığırlara kıyasla daha iyi yararlanabilir (Smythe 1967). Atlar ağır, ıslak topraklar dışında, tarlalarda yaklaşık 1 m/s hızında çalışabilir, bu, öküzlere göre yüzde 30-50 daha yüksek bir hızdır. Bir çift atın azami iki saatlik çekişi, en iyi sığır çiftinden neredeyse iki kat daha fazla olabilir. Dolayısıyla en büyük atlar, 2kW'yi aşan ya

da üç standart beygir gücünden fazla hızlarda kısa sürelerde çalışabilir. Ama kambur sığırlar tropik bölgelerde etkili ısı düzenlemeleri sayesinde daha üstün bir performans gösterir, kene istilasına da o kadar açık değildirler. Mandalar nemli tropikal bölgelerde serpilip gelişir ve kaba yemi sığırdan daha etkili bir biçimde dönüştürebilir, tümüyle suyun altına gömüldüklerinde suyun içindeki bitkileri de yiyebilirler.

Çalışan atların görüldüğü en eski resimlerde, atları tarlalarda çalışırken değil, hafif tören ya da saldırı arabalarını çekerken görürüz. Antik dönemlerin büyük bir bölümünde, yük atlarının koşum takımı bir sırt boyunduruğu olmuştur (Weller 1999). Sırt boyunduruğu doğrudan hayvanın cıdağısının arkasına yerleştirilen, göğsünden geçip boyunduruğun iki yanına bağlanan bir göğüs bağıyla ve bir palan kolaniyle (sırttan ve karından geçen bir kuşak) yerine tutturulan, ahşap ya da metal çatalı bir aygıttır. Lefebvre des Noëttes'in (1924) Roma koşum takımını hatalı bir biçimde yeniden kurgulaması, göğüs kuşağı yukarı kayma eğilimi gösterdiği için hayvanı nefessiz bıraktığından bunun çok verimsiz bir düzenek olduğu yönünde hatalı, ama yıllarca yaygın olarak kabul gören bir sonuca varılmasına neden olmuştur (Kutu 3.5).

Kutu 3.5

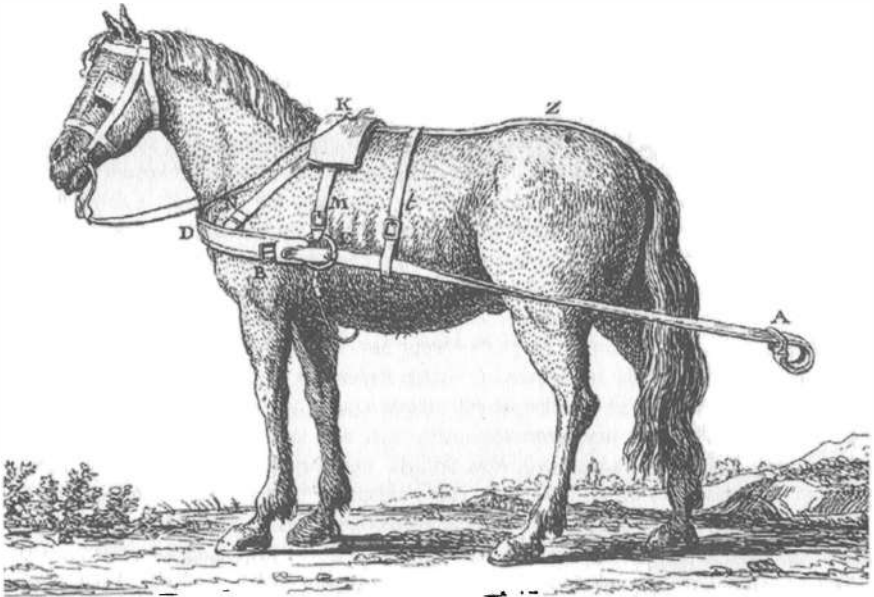
Koşumların ve çekiş gücünün karşılaştırılması

Yıllardır birçok yazıda, boğaz ve belden geçen antik koşum takımlarının, çekiş noktasının son derece yüksek olması ve boğazdaki kayışın boğulma etkisi yaratması nedeniyle ağır tarla işlerine uygun olmadığı iddiası tekrar tekrar ileri sürülmüştür. Bu sonuç, 1910'da Fransız subay Richard Lefebvre des Noëttes'in (1856-1936) yeniden kurguladığı bir koşum takımıyla 1910'da yaptığı ve 1924'te *La Force Motrice à travers les Âges* adlı kitabında yayımladığı fiili denemelere dayanıyordu. Bu bulgular sadece birçok klasik yazar tarafından değil, yirminci yüzyılda kaleme aldıkları teknik ilerleme tarihleriyle öne çıkan üç tarihçi, Joseph Needham (1965), Lynn White (1978) ve Jean Gimpel (1997) tarafından da kabul edilmiştir.

Ama bu bulgular hatalı bir yeniden kurguya dayanıyordu: Jean Spruytte'nin 1970'lerde gereği gibi yeniden kurgulanmış (doğrudan omuz başının arkasına yerleştirilen ve göğüste kayışlarla sağlamlaştırılan) sırt koşumuyla yaptığı denemeler boğulmayla sonuçlanmadı ve koşum takımı iki at yaklaşık 1 tonluk bir yük çekerken gayet iyi sonuç verdi (Spruytte 1977). Bu da "klasik kültürlerin, hayvanları koşumlama sistemleri kusurlu olduğu için "tıkandığı" fikrini çürüttü (Raepsaet 2008, 581). Ama Spruytte denemelerinde hafif (bir Roma arabasından çok daha hafif) bir on dokuzuncu yüzyıl arabası kullanmıştı, bu nedenle de atların büyüklüğündeki fark görmezden gelinebilirse de yaptığı testler iki bin yıl öncesinde yaygın olan koşulları tam anlamıyla tekrarlamıyordu. Bunlar bir yana, Theodosius Kanunları'na (MÖ 439) göre atların çektiği arabalara ağırlık sınırı (500 kg) getirildiğine bakılırsa, "Romalıların, ağır yük çekmenin atlarda neden olduğu sıkıntının bilincinde olduğu kesin görünmektedir." (Gans 2004, 179).

Çin’de erken Han hanedanı devrinde kullanılan göğüs koşumunun çekiş noktası, hayvanın en güçlü göğüs kaslarından çok uzakta kalıyordu (Şekil 3.5). Yine de bu tasarım bütün Avrasya’da tutulmuş; beşinci yüzyıl gibi erken bir tarihte, büyük ihtimalle göç eden Ostrogotlar sayesinde İtalya’ya, bundan 300 yıl kadar sonra da Kuzey Avrupa’ya yayılmıştı. Ama atların üstün iş hayvanlarına dönüşmesi bir başka Çin icadından sonra oldu. Boyun koşumu Çin’de ilk kez, muhtemelen MÖ birinci yüzyıl gibi erken bir tarihte, sert boyunduruğa yumuşak bir destek olarak kullanıldı; ama sonra yavaş yavaş tek bir bileşene dönüştü. Beşinci yüzyıla gelindiğinde Donghuang fresklerinde bu düzeneğin basit versiyonu görülebiliyordu. Filolojik kanıtlar, dokuzuncu yüzyıla gelindiğinde bu düzeneğin Avrupa’ya ulaştığını, burada yaklaşık üç yüzyıl boyunca genel kullanımda olduğunu, 700 yılı aşkın bir süre sonra atların yerini makineler alıncaya dek tasarımın büyük ölçüde değişmeden kaldığını düşündürür. Çin’de sayıları azalmakta olan yük atlarında hâlâ kullanılmaktadır.

Standart boyun koşumu tek bir oval ahşap (daha sonra aynı zamanda metal) çerçeveden (eğri tahta) oluşur; atın omuzlarına rahat otursun diye üstü kaplanmış, sıklıkla da altına ayrı bir boyun minderi konur. Koşum

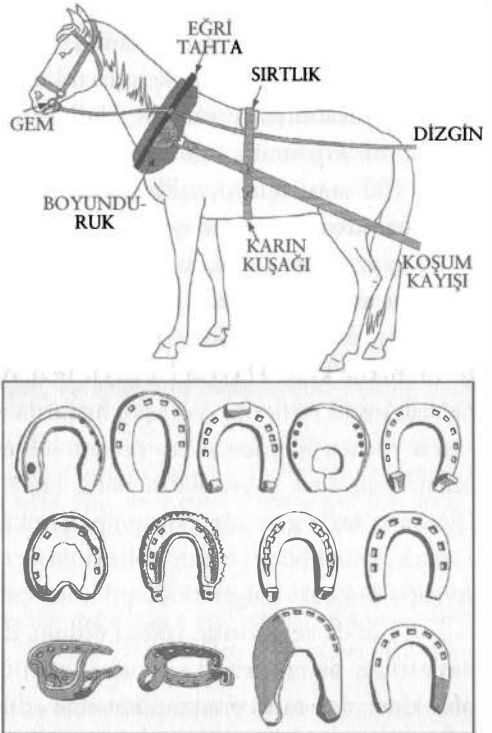


Şekil 3.5 Göğüs koşumu, *Encyclopédie*’den (Diderot ve D’Alembert 1769-1772) alınmış resim. Yirminci yüzyıla kadar hafif işlerde kullanılmıştır.

dingilleri atın kürek kemiklerinin hemen üstünde çerçeveye bağlanır (Şekil 3.6). Atın hareketleri gemle, yani ağzına yerleştirilen, dizginlere bağlanan, bir başlığa takılmış metal bir parçayla kontrol edilir. Boyun koşumu istenen alçak çekiş açısını sağlıyor, hayvanın güçlü göğüs ve omuz kaslarının kullanılması sayesinde ağır bir güç uygulanmasını mümkün kılıyordu. Boyun koşumu hayvanların istisnai derecede önemli ağır işler için tek tek ya da çiftler çiftler etkili ekipler kurmasını da mümkün kılıyordu.

Etkili bir koşum takımı, hayvanın üstün bir performans göstermesinin yegâne koşulu değildi, bu nedenle kullanılması bir tarım devrimi başlatmadı (Gans 2004). Ağır çalışan atlar tahılla besleniyordu, bu da bir ekim-dikim döngüsü gerektiriyor, nispeten pahalı koşum takımları ve nallar kullanılmamasını zorunlu kılıyordu; daha zayıf ve yavaş çalışan öküzler sadece saman ve tahıl kabuklarıyla beslenebiliyor, ucuz koşum takımları kullanıyordu. At nalları toynakların kenarına oturan, duyarsız toynak duvarına çakılan çivilerle tutturulan U şeklinde metal levhalardır (Şekil 3.6). Bunların kullanılması hayvanın yumuşak toynaklarının aşırı yıpranmasını önlemiş, çekiş gücünü ve dayanıklılığını artırmıştır. Bu, özellikle Batı Avrupa'nın serin ve yağışlı ikliminde önem taşıyordu. Yunanlarda at nalı yoktu; onlar toynakları samanla dolu deri parçalarıyla kaplıyordu. Romalılar at nalını biliyordu (ama *soleae ferreae*'leri klipsler ve bağcıklarla tutturuluyordu), çivili nallarsa ancak dokuzuncu yüzyıl sonrasında yaygınlaştı.

Koşum dingillerine bağlanan, onları birbirine bağlayıp tarla aletlerine tutturarak falakalar



Şekil 3.6 On dokuzuncu yüzyıl sonuna özgü tipik bir koşum takımının parçaları (Telleen 1977 ve Villiers 1976'ya dayanarak) – on sekizinci yüzyıl ortasında kullanılan çeşitli at nalları (Diderot ve d'Alembert 1769-1772). Soldan başlayarak bu şekiller sırasıyla tipik İngiliz, İspanyol, Alman, Türk ve Fransız at nallarıdır.

eşitsiz çekişten kaynaklanan gerilimi eşitliyordu. Hayvanlara yön verilmesini kolaylaştırıyor, çift ya da tek sayıda atın koşuma vurulmasını mümkün kılıyorlardı. Atlar ayrıca daha dayanıklıydı (sığırlar günde 4-6 saat çalışırken, atlar 8-10 saat çalışabiliyordu) ve daha uzun yaşıyordu, öküzler de atlar da 3-4 yaşında çalışmaya başlasalar da öküzler genellikle sadece 8-10 yıl dayanıyordu, atlarsa 15-20 yıl çalışmaya devam edebiliyordu. Son olarak atların bacak anatomisi, ayakta durmanın enerji maliyetlerini ortadan kaldırarak hayvana benzersiz bir avantaj kazandırıyor. Atın incik kemiğinin hemen arkasından geçen çok güçlü bir asıcı bağı ve kaslarını kullanmaksızın bacağına “kilitleyebilmesini” sağlayan bir çift tendonu (yüzeysel ve derin parmak gericiler) vardır. Bunlar hayvanın, metabolizmasına neredeyse hiç yük olmaksızın ayakta dikilirken dinlenmesini, hatta uyuklamasını ve otlarken pek az enerji harcamasını sağlar (Smythe 1967). Diğer bütün memeliler ayakta dikilirken, yataken olduğuna nazaran yüzde 10 daha fazla enerjiye ihtiyaç duyar.

Daha küçük yapılı, koşum takımları daha kötü hayvanlar bile büyük bir fark yaratmıştı (Esmay ve Hall 1968; Slicher van Bath 1963). Çapayla çalışan bir köylünün, tahıl ekmek üzere bir hektarlık bir araziye hazırlaması en az 100 saat, ağır topraklarda 200 saat kadar sürüyordu. Öküzün çektiği basit bir sabanla bile bu iş 30 saati biraz aşan bir sürede tamamlanabiliyordu. Çapaya bağlı tarım, hayvanların çektiği sabanların mümkün kıldığı ekim ölçeğine asla ulaşamazdı. Hayvan emeği çift sürme ve hasadı hızlandırmanın yanı sıra, daha derin kuyulardan büyük hacimlerde sulama suyu çekilmesini de mümkün kıldı. Hayvanlar değirmen, öğütücü, pres gibi gıda işleyen makinelerin insan yetilerini çok aşan hızlarda işletilmesi için kullanılıyordu. Uzun süren yorucu işlerden sonra dinlenmek de üretim miktarının artması kadar önemliydi, ama hayvanların daha fazla çalışması yemlik ekin yetiştirmek için daha fazla arazinin ekilmesini gerektiriyordu. Atların bakım masrafının zaman zaman bütün tarım bölgesinin üçte birini bulduğu Kuzey Amerika ve Avrupa'nın bazı bölgelerinde bu kolayca gerçekleştiriliyordu.

Çin'de ve nüfusun yoğun olduğu diğer Asya ülkelerinde sığırların yük hayvanları olarak tercih edilmesi şaşırtıcı değildir. Geviş getiren hayvanlar olduklarından sadece samandan elde edilen kaba yemle ve otlayarak ayakta kalabiliyorlardı. Çalışırken fazla tahılla beslenmeleri gerekmiyordu: Konsantre yemler büyük ölçüde kepek ve küspe gibi ekin işleme süreçlerinin artıklarından elde edilebiliyordu. Benim tahminime göre Çin'deki geleneksel tarımda yük hayvanlarının yemlerinin yetiştirilmesi, her yıl ekilip biçilen

arazilerin sadece yaklaşık yüzde 5'inde gerçekleşiyordu. Hindistan'da yemlik ekinler, ekilip biçilen bütün toprakların yaklaşık yüzde 5'inde üretiliyordu geleneksel olarak, ama bu yemin çok büyük bir bölümü süt veren hayvanlara gidiyor, bir bölümüyle kutsal inekler besleniyordu (Harris 1966; Heston 1971). İş gören enenmiş boğalara verilen yemin üretimi, muhtemelen bütün tarım arazilerinin yüzde 3'ünden az bir bölgede gerçekleştiriliyordu. Hindistan alt kıtasında nüfusun en yoğun olduğu bölgelerde sığırlar, yol kenarları ve kanal kıyılarında otlayarak ve pirinç samanı ile hardal küspesinden tutun parçalanmış muz yapraklarına varıncaya dek yan ürünlerin bir bileşimiyle besleniyordu (Odend'hal 1972).

Hindistan ya da Çin'de yük hayvanları açıkça enerji konusunda ucuza geliyordu. Hayvanların birçoğu ekin hasadı için insanlarla yarışamıyordu, bazıları en fazla yılda bir kişinin yiyeceğini yetiştiren bir arazi gerektiriyordu. Ama hayvanların yıllık yararlı emeği, yılda 300 gün çalışan üç-beş köylünün emeğine eşitti. On dokuzuncu yüzyılda Avrupa ya da Amerika'da ortalama bir at böyle yüksek bir görelî getiri sağlayamıyordu, ama o da bir enerji lütfuydu (Kutu 3.6). Atın yıllık yararlı emeği, yaklaşık altı çiftçinin emeğine eşdeğerdi, beslenmesi için kullanılan arazide (çalışmayan bütün hayvanlar dâhil) yaklaşık altı kişi için yiyecek yetiştirilebiliyordu. On dokuzuncu yüzyılda yük atı sadece zahmetli insan emeğinin bir muadili olarak görülebilirse

Kutu 3.6

Bir yük atının enerji maliyeti, verimliliği ve performansı

500 kg'lık olgun bir atın ağırlığını korumak için her gün yaklaşık 70 MJ sindirilebilir enerjiye ihtiyacı vardır (Subcommittee on Horse Nutrition 1978 / Atların Beslenmesi Altkomisyonu). Atın yemi tahıl ağırlıklıysa, bu sadece 80 MJ'lık brüt enerji alımı anlamına gelebilir; yem, ağırlıklı olarak daha az sindirilebilir samandan oluşuyorsa brüt enerji alımı 100 MJ'ye tırmanabilir. İşin ne olduğuna bağlı olarak çalışma dönemlerinde gerekli yem miktarı bakım sırasında gerekli olanın 1,5-1,9 katına çıkar. Brody (1945) saatte yaklaşık 10 MJ harcayarak 500 W güçle çalışan 500 kg ağırlığında bir Percheron bulmuştu. 6 saat çalışma, 18 saat dinlenmeyle (3,75 MJ/saat) bu, günde toplam 125 MJ yapar. Tahmin edileceği üzere, yem vermeye ilgili geleneksel tavsiyeler birbirine uyar: Yirminci yüzyıl başında Amerikalı çiftçilere çalışan atlarına her gün 4,5 kg yulaf, 4,5 kg de saman vermeleri tavsiyesinde bulunulmuştu (Bailey 1908) ki bu da günde 120 MJ anlamına gelir. Bir at ortalama 500 W güçle altı saatte yaklaşık 11 MJ yararlı iş yapabilir, ortalama bir erkek 2 MJ'den az katkıda bulunabilir; gerçi 80 W'nin üstünde sürekli güç uygulayamaz, 150 W'nin üstüne ancak kısa süreli olarak çıkabilir. Bir atsa sürekli 500 W'de çalışabilir ve kısa süreli olarak 1 kW'nin üstüne çıkabilir; bir düzine adamın güç uygulayarak çıkabilecekleri bir düzeydir bu.

de kendi geçimini sağladı, ama güçlü, iyi beslenmiş atlar insanın yetisini ve dayanıklılığını aşan işler gerçekleştirebiliyordu.

İnsanlar ormanları tarım arazisine çevirirken atlar keresteleri sürükleyip ağaç köklerini çekebiliyor, derinden sürdükleri sabanlarla humuslu toprakları kırıyor ya da ağır makineleri çekebiliyordu. Elbette ki hayvan emeğinin, çiftleşen bir sürüyü ayakta tutmanın ya da tarla işi için yeterli yem sağlamanın ötesine geçen ek enerji maliyetleri vardı; bu ek enerji maliyetleri her şeyden önce koşumlar ve nalların hazırlanmasında, hayvanların tımarında kendisini gösteriyordu. Ama gübrelerin geri dönüşümünden, süt, et ve deriden sağlanan ek yararlar da vardı. Gübre geri dönüşümü kıt besin ve organik madde kaynağı olarak bütün yoğun geleneksel tarımlarda önemli olmuştu. Büyük ölçüde vejetaryen toplumlarda et (Avrupa'nın bazı bölgelerinde at eti dâhil) ve süt değerli mükemmel protein kaynaklarıydı. Tarım ve geleneksel imalat için temel önemde çok sayıda aletin yapımında deri kullanılıyordu.

Sulama

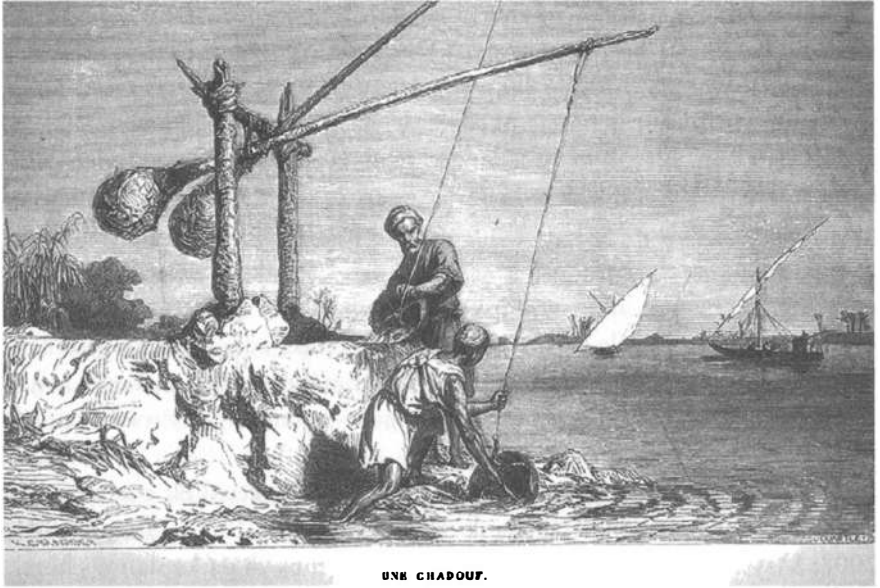
Ekinlerin su talebi birçok çevresel, tarımsal ve genetik değişkene bağlıdır, ama toplam mevsimsel ihtiyaç genellikle hasat edilen tahılın kütesinin yaklaşık 1.000 katıdır. 1 ton buğday yetiştirmek için 1.500 ton suya ihtiyaç vardır ve bir ton pirinç için en az 900 ton su gerekir. Suyu daha verimli kullanan bir C₄ ekini olan, su kullanma verimliliği en yüksek temel tahıl mısırdan bir ton üretmek için yaklaşık 600 ton su yeterlidir (Doorenbos vd. 1979; Bos 2009). Bu da 1-2 t/ha'lık buğday üretimi için yetiştirme mevsiminin dört ayında toplam su ihtiyacının 15-30 cm olduğu anlamına gelir. Oysa tersine Ortadoğu'nun kurak ve yarı kurak bölgelerinde yıllık yağış miktarı hafiften bir atıştırma ile 25 cm arasında değişiyordu.

Dolayısıyla böyle yerlerde ekin yetiştirme, vadi topraklarını doyuran ve bir ekinin olgunlaşmasını mümkün kılan mevsimlik sellerin erişemeyeceği yerlerde tarlalar kurulur kurulmaz ya da nüfus artışı suyun az olduğu mevsimde ikinci bir ekinin dikilmesini gerektirir gerektirmez sulama yapılmasını gerektiriyordu. Sulamaya mevsimlik kuraklıkla başa çıkmak için de gerek duyuluyordu. Mevsimlik kuraklık özellikle Asya'da musonların yaşandığı bölgenin en kuzey kısımlarında, Pencap'ta ve Kuzey Çin Ovası'nda belirgindi. Pirinç yetiştirmek elbette ki seller ve tarlaların kurutulması için kendisine özgü düzenlemeler yapılmasını gerektiriyordu.

Yerçekimine dayalı sulama (kanallar, göletler, tanklar ya da barajların kullanılması) hiç su taşımayı gerektirmez, enerji maliyeti en düşük yöntemdir. Ama su yüzü meylinin az olduğu nehir vadilerinde ya da tarım yapılan büyük ovalarda büyük hacimlerde yüzey ya da yer altı suyu taşımak gerekmiştir hep. Birçok taşıyıcı sadece alçak bir toprak set üstünden çekiliyordu, ama sıklıkla dik dere kenarlarını aşmaları ya da derin kuyulardan çekilmeleri gerekiyordu. Hareketli kısımların cilasının kaba olmasının ya da yağlayıcıların eksik olmasının ağırlaştırdığı kaçınılmaz verimsizlikler, işi uzatıyordu. Gücünü insan kaslarından alan sulama, zahmetli işlerin kural olduğu toplumlarda bile büyük bir iş yükünü temsil ediyordu. Bu işi kolaylaştırmak için hayvan gücünün ya da su akışının kullanıldığı mekanik aygıtların tasarlanmasının yanı sıra daha yükseğe su taşınmasını mümkün kılmak için çok dâhiyane çözümler geliştirilmişti.

Sulamak için su taşıma amacıyla etkileyici bir çeşitlilik gösteren mekanik aygıtlar icat edildi (Ewbank 1870; Molenaar 1956; Oleson 1984, 2008; Mays 2010). En basit aygıtlar (sıkıca örülmüş ya da kaplanmış kürek benzeri kepçeler, sepetler ya da kovalar) 1 metreden alçak yüksekliklere su taşımakta kullanılıyordu. Bir üç ayaktan bir halatla sarkıtılan bir kepçe ya da kova biraz daha etkilidir. Her iki aygıt da Doğu Asya ve Ortadoğu'da kullanılmıştı, ama yaygın olarak kullanılan en eski su taşıma yöntemi Arapça *şaduf* olarak bilinen denge ağırlığına dayalı çekicidir. İlk kez MÖ 2000'e ait Babil işi silindir bir mühür üstünde görülen, antik Mısır'da yaygın olarak kullanılmış bu aygıt MÖ 500 civarında Çin'e ulaşmış, nihayetinde Eski Dünya'nın tamamına yayılmıştır. Temelde çapraz yerleştirilen ya da bir direğin üstüne bir manivela olarak yerleştirilen ahşap uzun bir sopa olan şaduf kolayca yapılıp onarılabiliyordu (Şekil 3.7).

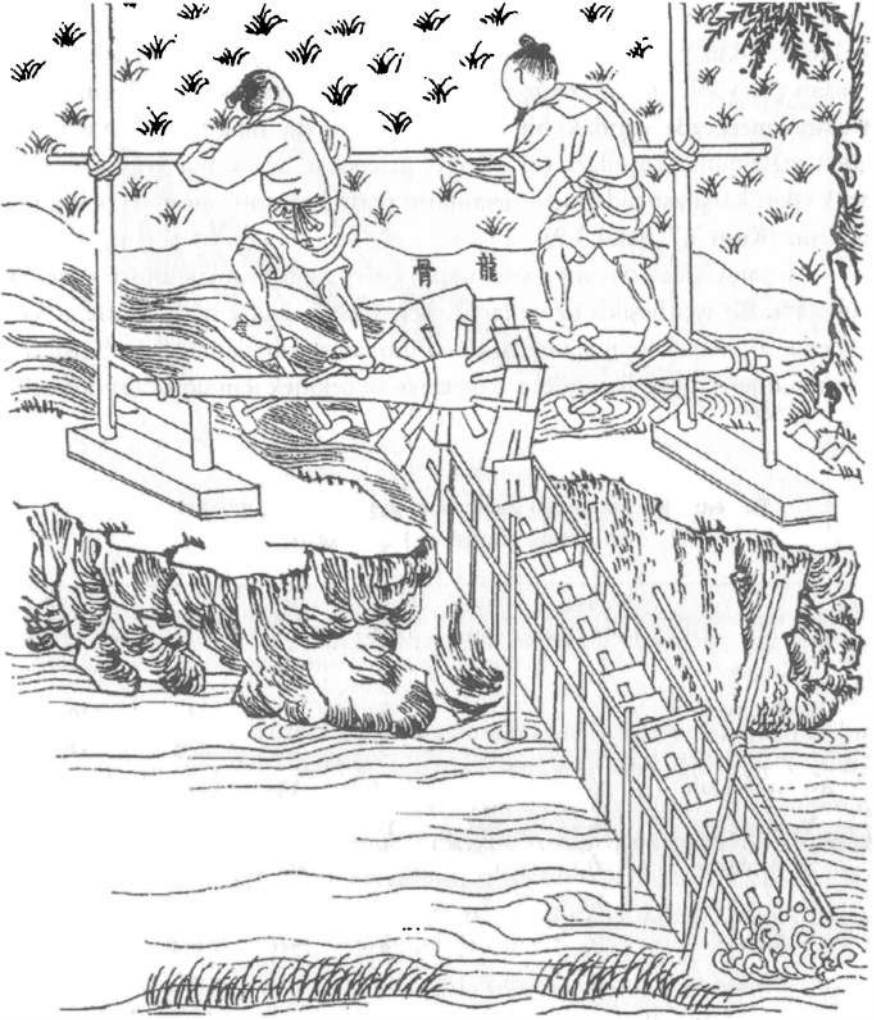
Şadufa bağlı kovayı indiren kısım uzun kola asılıydı ve büyük bir taş ya da bir çamur topuyla dengeleniyordu. Genellikle 1-3 metre kadar etkili bir çekiş gücüne sahipti, ama bu aygıtların iki ilâ dört düzeyde peş peşe kullanımı Ortadoğu'da yaygındı. Tek bir adam 2-2,5 metreye 3 m³/s çıkarabiliyordu. Bir halatı çekmek gayet yorucu olabiliyordu, ama bir silindir içindeki ahşap bir sarmalı döndürmek için bir Arşimet vidasını (Romen dillerinde *cochlea*, Arapça *tanbur*) çevirmek daha da yorucu olabiliyor, ancak alçak yüksekliklere (25-50 cm) çekmek mümkün olabiliyordu. Asya'da çarklar yaygın olarak kullanılıyordu. Çin işi su merdivenleri (ejder sırtı makineleri, *long gu che*) kare paletli ahşap pompa zinciri olarak çalışıyordu; bir dizi küçük tah-



Şekil 3.7 Şaduf kullanan Mısırlı köylülerin görüldüğü, on dokuzuncu yüzyıla ait bir gravür (Corbis).

ta, zincir dişlileri üstünde hareket ediyor, sonu gelmez bir zincir oluşturarak ahşap bir oluk üzerinden su taşıyordu (Şekil 3.8). İtici zincir dişlisi, bir direğe yaslanarak kendilerini destekleyen iki ya da daha fazla sayıda adamın ittiği yatay bir sopanın içine yerleştiriliyordu. Bazı merdivenler el manivelalarıyla ya da yürüyerek bir çember çizen hayvanlarca çalıştırılıyordu.

Bu aygıtların hepsi de hemen her zaman ya hayvanların ya da akan suyun gücüyle çalıştırılıyordu. Hindistan'da yaygın olan halat ve kovalı taşıma (*monte* ya da *charsa*) bir bayırdan aşağı yürüyerek uzun bir halata bağlı deri bir torbayı çeken bir ya da iki çift öküzle çalıştırılıyordu. İki halat çemberine yerleştirilmiş, ahşap bir silindirin alt kısmına indirilip doldurulan, en tepede bir kanala su boşaltan sonu gelmez bir kil çömlekler dizisi Yunanlar tarafından zaten kullanılmaktaydı. Bu düzenek Arapça adıyla *sakiya* diye biliniyordu, Akdeniz'de yaygın olarak kullanılan bir aygıttı. Dairesel bir yol içinde yürüyen, gözleri örtülmüş tek bir hayvanın gücüyle çalıştırıldığında genellikle saatte 8 m³'ü aşmayan bir hızla su çıkarıyordu. Bu aygıtın Mısır'da iyileştirilmiş bir versiyonu olan *zavafa*, daha yüksek bir hızla su çekiyordu (6 metre derinliğindeki bir kuyudan saatte 12 m³).



Şekil 3.8 Çin'deki antik "ejderha sırtı makinesi" köylülerin bir direğe yaslanıp çubuklu bir dingil üstünde yürümesiyle çalışıyordu. Ming hanedanlığının son dönemlerine ait bir resimden uyarlanmıştır.

Hem Müslüman ülkelerde hem Çin'de yaygın olarak kullanılan başka bir aygıt olan Noria (*hung che*) tek bir tekerleğin sırtına sabitlenmiş kil çömlekler, bambu tüpler ya da metal kovalardan oluşuyordu. Tekerlekler bir çark donanımı varsa eğer bir su akıntısıyla ya da çember çizerek yürüyen hayvanlarca dik açılı dişliler sayesinde çevrilebiliyordu. Suyu, boşaltıldığı yalağın üstüne tekerleğin yarıçapı kadar daha çıkarmanın gerekmesi hatırı

sayılı bir verimsizlik yaratıyordu, Mısır'da *tabliya* bu verimsizliği ortadan kaldırdı. Öküz gücüyle çalıştırılan bu iyileştirilmiş aygıt, tümüyle metalden oluşan çift yönlü bir tekerleğe dayanıyordu; tekerler dış kısmıyla su alıyor, bu suyu merkezde, yandaki bir yalağa boşaltıyordu. Bu aygıtları çalıştıracak gücü sağlamanın koşulları, çekiciler ve geleneksel su taşıma aygıtlarının saatlik işleri karşılaştırıldığında, insanların performansının sınırları belirginlik kazanır (Kutu 3.7, Şekil 3.9).

İnsan gücüne dayanan sulamanın enerji maliyeti olağanüstü derecede yüksekti. Bir işçi beşlikli tırpanla bir hektarlık buğdayı sekiz saatte biçebiliyordu, ama aynı işçinin buğdayın su ihtiyacını karşılamak için bitişikteki bir kanal ya da dereden sadece 1 metreye su çekmek için üç ay (günde sekiz

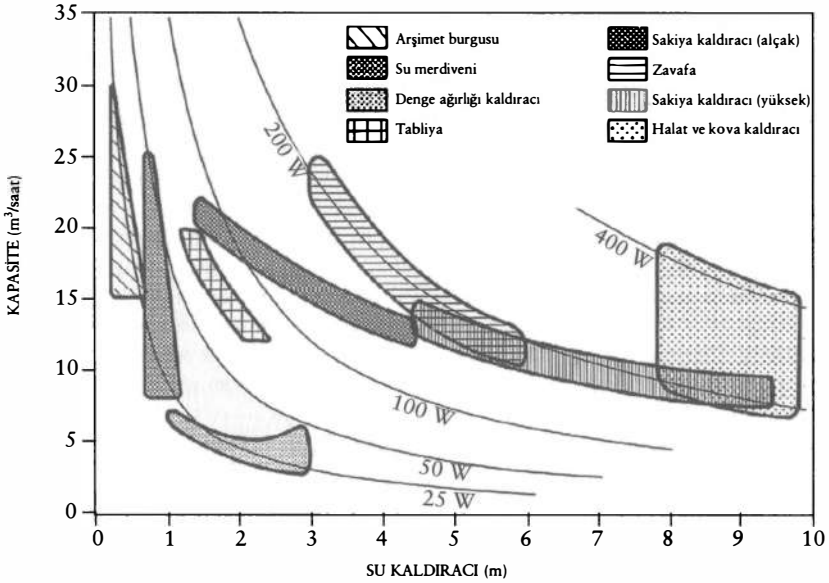
Kutu 3.7

Su çekmekte kullanılan geleneksel aygıtların güç gereksinimleri, çekiş güçleri ve kapasiteleri

Aygıtlar	İnsanlar/ Hayvanlar	Çekiş (m)	Kapasite (m ³ /s)	İş (kJ)	Girdi (kJ)	Verimlilik (%)
Kepçeler	2/—	0,6	5	30	440	7
Askılı kepçeler	2/—	1	8	80	440	18
Şaduf	1/—	2,5	3	75	220	34
Arşimet burgusu	2/—	0,7	15	100	440	23
Yandan çark	1/—	0,5	12	60	220	27
Su merdiveni	2/—	0,7	9	60	440	14
Halat ve kova	3/4	9	17	1.500	5.690	26
Sakiya	1/2	6	8	470	2.740	17
Zavafa	1/2	6	12	710	2.740	26
Noria kaldırıcı (yüksek)	1/2	9	9	790	2.740	29
Noria kaldırıcı (alçak)	1/1	1,5	22	325	1.480	22
Tabliya	1/1	2,5	12	295	1.480	20

Not: Enerji maliyetleri insanlar için 60 W, hayvanlar için 350 W ortalama güç girdisi varsayılarak hesaplanmıştır.

Kaynaklar: Molenaar (1956), Forbes (1965), Needham ve arkadaşları (1965) ve Mays'taki (2010) verilerden derlenmiş ve hesaplanmıştır.



Şekil 3.9 Sanayi öncesi devirde su çekmekte kullanılan aygıt ve makinelerin çekiş uzunlukları, hacimleri ve güç ihtiyaçlarının karşılaştırılması. Molenaar (1956), Forbes (1965), Needham ve meslektaşlarının (1965) verilerinden yararlanarak hazırlanmıştır.

saat) çalışması gerekiyordu. Ekinlerin sulamaya verdiği cevapların büyük bir farklılık göstermesi geleneksel sulamanın enerji getirisiyle ilgili genellemeler yapılmasını imkânsız kılar. Ekinler arasında ciddi farklılıklar görülmesinin yanı sıra, üretim miktarı da suyun bulunabilir olmasına bağlıydı (fıstıklar geçici su eksikliğine epey duyarlıdır, mısır ise biraz hassastır). Gerçekçi bir örnek enerji getirilerinin kolayca 10 katı ya da daha yüksek olabileceğini gösterir (Kutu 3.8).

Oysa tersine, İnkaların bazı projelerinde net enerji getirilerinin düşük olması gerekiyordu. Kütleçekime dayalı sulama su çekilmesini gerektirmiyordu, ama basit aletlerle kayaları yontup uzun ve geniş kanallar (10-20 metre genişliğinde ana hatlar) oluşturmak emek yoğun bir işti. Parcoy ile Picuy arasındaki ana arter 700 km uzanarak otlaklar ve tarlaları suluyordu (Murra 1980), fetihçi İspanyollar gayet iyi inşa edilmiş kanallarla küçük mısır tarlalarına su taşıdığını gördüklerinde hayrete düşmüşlerdi. Uygun basamaklamanın sağlanması için bütün büyük sulama projeleri titiz bir planlama ve yönetim gerektiriyor, çok sayıda işçinin seferber edilmesi gerekiyordu. Getiri (sulanan ekinlerin gıda enerjisinin devasa emek yatırımını aşması)

Kutu 3.8

Buğday sulamanın enerji getirileri

Tek bir özel hesaplama geleneksel sulamanın hatırı sayılır enerji getirileri olduğunu gösterir. Saha araştırmaları yıllık su arzında yüzde 20'lik bir eksilmenin kritik çiçeklenme döneminde yoğunlaşması halinde, kış buğdayı üretiminde yarı yarıya bir azalma olduğunu göstermektedir (Doorenbos vd. 1979). Qing hanedanının son dönemlerinde 1,5 t/ha'lık iyi bir hasat, 0,2 hektarlık tipik küçük bir tarlada yaklaşık 150 kg daha az olacaktı. 10 cm'lik yağış eksikliğini sulamayla kapatmak 200 ton su gerektirir, ama oluklu sulama (toprağın sızdırması ve buharlaşma nedeniyle) sadece yüzde 50 verimli olduğundan bir kanaldan yapılan fiili su tedarikinin en az iki kat daha fazla olması gerekir. Yürüyen iki köylünün çalıştırdığı bir merdivenle 1 metreden alçağa 400 ton su çekmek 80 saat sürecek ve 65 MJ ilave gıda enerjisi gerektirecektir, artan buğday üretimiye (yüzde 10'luk tohum ve depolama kayıpları sonrasında) yaklaşık 2 GJ sindirilebilir enerji içerir. Buna bağlı olarak su merdiveni çevirme, gıda maliyetinden yaklaşık 30 kat daha fazla gıda enerjisi getirecektir.

besbelli ki yıllarca, hatta on yıllarca mümkün olmuyordu. Ancak ve ancak iyice oturmuş, hükmettikleri toprakların farklı bölgeleri arasında kaynakları bir yerden diğerine aktarabilecek merkezi hükümetler bu tür kamusal inşaat projelerine girişebilirdi. Çoğu örnekte ekinlerden daha yüksek verim almak için suyun idare edilmesi, tarlaların sulanmasını da gerektiriyordu, ama bazı tarımlar tam tersi bir süreçle ekin üretimini yoğunlaştırmıştı.

Birçok bölgede, aşırı miktardaki su kurutulmazsa sürekli tarım hayal bile edilemez bir şey olurdu. Konfüçyüs öncesindeki yedi büyük bilgeden biri olan İmparator Yu (MÖ 2205-2198) Çin tarihindeki yerini büyük ölçüde master planına ve sel sularının kurutulması yönündeki uzun süreli çabasını kahramanca örgütlemeye borçludur (Wu 1982). Mayalar ve Meksika havzasında onlardan sonra yaşayanlar ise, basit teraslamadan ve kaynaklara dayalı sulamadan tutun incelikli drenaj sistemlerine ve yükseltilmiş tarla inşasına varıncaya dek su idaresini gerektiren yoğun ekin üretimi biçimleri benimsemişlerdi (Sanders, Parsons ve Santley 1979; Flannery 1982; Mays ve Gorokhovich 2010). Çin'in Guangdong eyaletinin bir bölümünde yüzyıllar içinde benzersiz bir drenaj tarımı biçimi gelişmişti (Ruddle ve Zhong 1988). Yoğun bir biçimde ekin dikilmiş setler birkaç tür sazanla dolu göletleri birbirinden ayırıyordu. Organik atıkların (insan, domuz, ipek böceği dışkısı, ekin artıkları, otlar, yaban otları ve gölet birikintileri) geri dönüştürülmesi şeker kamışı, pirinç, çok sayıda sebze ve meyve, ipek böcekleri için bol miktarda dut ve ayrıca yüksek miktarda balık üretilmesini mümkün kılıyordu.

Gübreleme

Atmosferdeki CO₂ ve su, karbon ve hidrojen sağlar, yeni karbonhidrat olarak bitki dokularının büyük bir bölümünü oluşturan iki elementtir bunlar. Ama fotosentez için iki element daha gereklidir. İhtiyaç duyulan miktara bağlı olarak bunlara mikrobesein ya da makrobesein denir. Mikrobeseinlerin sayısı daha fazladır, her şeyden önce bunların arasında demir, bakır, sülfür, silikon ve kalsiyum yer alır. Ama sadece üç makrobesein vardır: Azot, fosfor ve potasyum (N, P ve K). Azot açık ara en önemli olandır. Bütün enzimler ve proteinlerde bulunur ve sürekli ekilip biçilen topraklarda azalması en muhtemel elementtir (Smil 2001; Barker ve Pilbeam 2007). 1 t/ha'lık buğday hasadı (1800 civarında Fransa ya da ABD'de yapılan tipik bir hasat, tahıl ve saman olarak) 1'er kg kalsiyum ve magnezyum (Ca ve Mg), 2,5 kg sülfür (S), 4 kg potasyum, 4,5 kg potasyum ve 20 kg azot kaldırıyordu (Laloux vd. 1980).

Yağmur, toz, hava değişimleri, ekin artıklarının geri dönüşümü çoğu örnekte eksilen fosfor, potasyum ve mikrobeseinleri yeniler, ama gübreleme yapmaksızın ekin yetiştirmenin devam etmesi azot eksikliği yaratır, azotun bulunabilirliği büyük ölçüde tahıl büyüklüğünü ve protein içeriğini belirlediğinden, bu eksiklikler bodurluk, az getiri ve besin kalitesinin kötülüğü gibi sonuçlar doğuruyordu. Geleneksel tarım ancak üç yoldan azotu geri koyabiliyordu: İstenmeyen ekin artıklarını doğrudan geri dönüştürerek, yani yem, yakıt ya da ev içinde başka biçimlerde kullanılmak üzere tarlalardan kaldırılmayan saplar ve samanların bir bölümünü doğrudan toprağa karıştırarak; çeşitli organik maddeler uygulayarak, hepsinden de önemlisi (genellikle kompost haldeki) hayvan ve insan sidik ve dışkılarını, diğer organik atıkları toprağa yayarak; bir dahaki sefere baklagil olmayan bir ürün ekmek üzere toprağın azot içeriğini artırmak için baklagillerden ürünler yetiştirerek (Smil 2001; Berklian 2008).

Tahıl sapları başlıca azot kaynaklarından biriydi, ama bunların doğrudan geri dönüşümü sınırlıydı. Modern kısa saplı bitkilerin tersine geleneksel tarım ürünleri tahıldan çok sap veriyordu, samanın tahıla oranı genellikle 2:1'di. Bu kadar fazla bitki kütlesinin çift sürme sırasında toprağa karıştırılması birçok hayvan için büyük bir sıkıntı yaratabilirdi, ama böyle bir durum neredeyse hiç ortaya çıkmamıştı. Ekin artıklarının ancak küçük bir bölümü doğrudan toprağa karıştırılıyordu, çünkü bunlara hayvan yemi ve yatağı olarak (ancak bundan sonra gübre olarak geri dönüşüme giriyordu), evlerde yakıt, inşaat ve imalatın hammaddesi olarak ihtiyaç duyuluyordu.

Ama ormanlık bölgelerde samanlar ve saplar genellikle tarlada yakılıyor, neredeyse tümüyle azot kaybına neden olunuyordu.

Sidik ve dışkı geri dönüşümü yüzyıllar içinde Avrupa ve Doğu Asya'da mükemmelleştirildi. Çin şehirlerinde insan atıklarının büyük bir bölümü (yüzde 70-80) geri dönüşüme giriyordu. Aynı şekilde 1650'lere gelindiğinde Edo'nun (bugünkü Tokyo) neredeyse bütün insan atıkları geri dönüştürülüyordu (Tanaka 1998). Ama bu pratiğin yararlılığı bu tür atıkların bulunabilirliği ve düşük azot içerikleriyle sınırlıdır; bu pratik tekrarlanan ağır bir emek gerektirir. Depolama ve işleme sırasındaki kayıplar öncesinde bile yıllık insan atığı getirisi kişi başı sadece 3,3 kg nitrojen (azot) kadardı (Smil 1983). Bu atıkların şehirlerden toplanması, depolanması ve çevredeki kırsal kesime dağıtılması büyük ölçekli kötü kokulu sanayiler yaratmıştı, ki bunlar Avrupa'da bile kanalizasyon sistemi tam anlamıyla kurulmadan önce on dokuzuncu yüzyılın büyük bölümü boyunca varlığını sürdürmüştü. Barles'in tahminlerine göre (2007), 1869'da Paris, yıllık yaklaşık 4,2 Mt azot ürettiyordu, bunun yüzde 40'ı hayvan gübrelerinden, yaklaşık yüzde 25'i insan atıklarından elde ediliyordu; on dokuzuncu yüzyılın sonlarında şehrin ürettiği dışkının yaklaşık yarısı toplanıyor ve amonyum sülfat üretmek üzere endüstriyel olarak işleniyordu (Barles ve Lestel 2007).

Çok daha bol miktardaki hayvansal atıkların geri dönüşümü (ki bu ağıllar ve ahırların temizlenmesini, tarlaya uygulanma öncesinde karışık atıkların kompostlanmasını ya da sıvı halde fermentasyonunu ve atıkların tarlalara götürülmesini gerektiriyordu) çok da vakit alan bir işti. Çoğu hayvan dışkısında sadece yaklaşık yüzde 0,5 düzeyinde azot bulunduğundan, bu besinin önceden uygulanması ve tarladaki kayıpları genellikle baştaki içeriğin yüzde 60'ını bulduğundan, daha yüksek getiri elde etmek için organik atıkların kitlesel olarak uygulanması gerekiyordu. On sekizinci yüzyılda Flander tarlaları ortalama 10 t/ha, bazıları 40 t/ha gübre, insan dışkısı, küspe ve kül alıyordu; devrim öncesi Fransa'da bazı oranlar yaklaşık 20 t/ha'ydı (Slicher van Bath 1963; Chorley 1981). Aynı şekilde 1920'lerin Çin'ine ilişkin ayrıntılı anlatılarda ülke çapındaki ortalamanın 10t/ha'nın üstünde olduğu, Çin'in güneybatısında küçük çiftliklerin ortalama yaklaşık 30 t/ha gübre aldığını gösterir.

Akla gelebilecek her organik atık geleneksel tarımda gübre olarak kullanılıyordu. Cato'nun *De agri cultura*'sında güvercin, keçi, koyun, sığır dışkıları "ve diğer bütün dışkılar", ayrıca saman, acı bakla, kepek, fasulye sırkaları,

anız, pırnar ve meşe yaprakları gübre olarak sayılır; Romalılar tahılları baklagillerle dönüşümlü ekmenin getiriye artıracığını biliyorlardı (acı bakla, fasulye ve baklaya dayanıyorlardı). Asya’da organik atık kullanımı daha seçiciydi, azot bakımından nispeten zengin atıklardan (yağlı tohum küspesi, balık atıkları) azotun sadece izine rastlanan kanal ve nehir çamurlarına kadar her şey kullanılıyordu. Şehirler büyüdükçe yiyecek atıkları, her şeyden de önce bitki atıkları yeni bir geri dönüştürülebilir madde kaynağı yarattı.

En yüksek azot içeriğine sahip organik gübre guanodur (en iyi çökeltilerde azot içeriği yaklaşık yüzde 15 oranındadır); bu, Peru sahili boyunca uzanan kuru iklimli adalarda bulunan deniz kuşu dışkıdır. Güney Amerika’yı fetheden İspanyollar İnkaların guano kullanma biçiminden etkilenmişti (Murra 1980). ABD’ye guano ithalatı 1824’te, İngiltere’ye 1840’ta başladı; 1850’lerde guano ithalatı hızla arttı, ama 1872’de en zengin kaynaklardan, Peru’nun Chinha Adaları’ndan yapılan ihracat son buldu (Smil 2001). Bunun sonrasında sanayileşen ülkelerin tarımları hasatlarını yakıt, metal, makine ve organik olmayan gübre girdisiyle sübvansetmeye başladığından Şili kökenli nitratlar dünyanın en önemli azot ticareti kaynağı haline geldi, bu süreci beşinci bölümde biraz ayrıntılı olarak anlatıyoruz.

Tarlalardaki fiili uygulamalar geri elde edilebilir gübre miktarına (ağıla kapatılmış hayvanlarda çok yüksek, otlayan hayvanlarda ihmal edilebilir düzeyde), insan atıklarının ele alınma biçimiyle ilgili tutumlara (yasaklamadan tutun rutin geri dönüşüme) ve ekin yetiştirme yoğunluğuna bağlı olarak büyük farklılıklar gösteriyordu. Geri dönüştürülen atıklardaki azot miktarına ilişkin kuramsal tahminler, nihai katkı miktarından çok uzaktır. Bunun nedeni boşaltım, toplama, kompostlama, uygulama ve nihayetinde ekinlerin azot alımı sırasında kayıp miktarının çok yüksek olmasıdır (bu da büyük ölçüde amonyak buharlaşmasından ve yer altı sularına karışmadan kaynaklanır) (Smil 2001). Genellikle baştaki azot miktarının üçte ikisini aşan bu kayıplar, muazzam miktarda organik atık uygulama ihtiyacını daha da artırmıştır. Bunun sonucunda bütün yoğun geleneksel tarımlarda, tarım emeğinin büyük bölümünün organik atıkların toplanması, fermante edilmesi, taşınması ve uygulanması gibi hiç de cazip olmayan ağır işlere harcanması gerekmiştir.

Yeşil gübreleme Avrupa’da antik Yunan ve Roma devirlerinden beri etkili bir biçimde uygulanıyor, Doğu Asya’da da yaygın olarak kullanılıyordu. Bu uygulama büyük ölçüde azotu sabitleyen baklagillerle, başta bak-

lalara (*Astralagus*, *Vicia*) ve yoncalara (*Trifolium*, *Melilotus*), daha sonra alfalfaya (*Medicago sativa*) dayanmıştı. Bu bitkiler yılda 100-300 kg N / ha sabitleyebiliyordu, diğer ekinlerle dönüşümlü olarak ekildiklerinde sürülmelerinden üç-dört ay önce toprağa 30-60 kg azot ekleyebiliyorlardı, daha sonra bir tahıl ya da yağ veren bir ekin ekiliyor, bu ürünün getirisi artırılıyordu.

Nüfus yoğunluğunun yüksek olması kış aylarında başka ekinlerin ekilmesini de elverişli kılıyordu. Bu pratik toplam azot miktarını kaçınılmaz olarak azaltır ve getiriye etkiler. Kısa vadede ilave karbonhidratlar ve yağlar üretilmesini sağladığından enerji açısından daha avantajlı olacaktır. Uzun vadede yeterli azot tedariki o kadar önemlidir ki yoğun tarımlar azotu sabitleyen baklagiller olmaksızın yapamaz, yenilebilir ürünler yerine bunları ekip dikmeleri gerekir. Her yıl ya da daha uzun süreli ekim dönüşüm dizilerinin bir parçası olarak tekrarlanan bu istenen pratik muhtemelen geleneksel tarımdaki en takdir edilesi enerji optimizasyonunu temsil eder. Şüphesiz bu pratik, karmaşık ekim dönüşümlerine dayanan bütün yoğun tarım sistemlerinin çekirdeğini oluşturuyordu, ama baklagil ekim döngüleri dâhil standart dönüşümler (Norfolk'ta dört yıllık buğday, şalgam, arpa ve yonca ekimleri örneğinde olduğu gibi) ancak 1750 ile 1880 arasında Avrupa'da yaygın bir biçimde benimsendi ve simbiyotik azot sabitlenme oranı en az üç katına çıkarken, baklagil olmayan ekinlerin getirisinin artması da güvence altına alındı (Campbell ve Overton 1993).

Chorley (1981, 92) bu değişikliğin gerçekten çığır açıcı olduğunu kabul etmiş, kendisinin Tarım Devrimi dediği gelişmeyi buna dayandırarak açıklamıştı:

İlerleme, geniş bir cephede gerçekleşmiş birçok küçük değişikliğin sonucu olsa da önemi her şeyi aşan büyük bir değişiklik vardı: Baklagillerin gelişmesi ve bunun sonucunda azot tedarikinin artması. Bu ihmal edilen yeniliğin, sanayileşme devrinde Avrupa'nın ekonomik kalkınmasında buhar gücünün önemine benzer bir önemi olduğunu ileri sürmek hayalcilik mi olur?

Wrigley bunun sonucunda İngiliz tarımında ortaya çıkan kazanımları, İngiliz tarımının 1300 ve 1800'deki performansını karşılaştırarak örneklemiştir, Muldrew (2011) 1650 sonrasındaki değişikliklerin giderek çeşitlilik gösteren ve besleyici bir beslenme biçimini nasıl doğurduğunu, işçilerin beslenme biçimindeki bu iyileşmelerin verimliliğin yükselmesini, istihdamın sürekliliğini ve zenginliğin artmasını nasıl teşvik ettiğini belgelemiştir.

Ekinlerin Çeşitliliği

Modern tarıma monokültürler hakimdir, her yıl aynı ekinden ekilmesi ticari tarımda bölgesel uzmanlaşmayı yansıtır. Ama aynı türün tekrar tekrar ekilip dikilmesinin enerji ve çevre açısından maliyeti yüksektir. Bu ekinler, eksilen besinlerin yerine konması için gübre gerektirir, ayrıca geniş bölgelerde yapılan tektip ekimle çoğalan böceklerin kontrolü için kimyasallar kullanılması gerekir. Mısır gibi sıralı ekinlerin monokültürlerinde toprağın büyük bir bölümü tenteler kapanmadan önce yağmura maruz kalır; bu gibi ürünler toprak kaymasının olduğu bölgelere ekildiklerinde ağır bir erozyona yol açar. Oksijenden yoksun olan, sele maruz kalmış topraklarda sürekli piringç ekim-dikimi yapılması toprakların niteliğini düşürür.

Uzun deneyimler, kadim dönemlerdeki birçok tarımcıya monokültürlerin tehlikelerini öğretmiştir. Bunun tersine tahılların ve baklagillerin dönüşümlü olarak ekilmesi ya topraktaki azotu yeniler ya da en azından topraktaki azot rezervlerinin azalmasını hafifletir. Çeşitli tahıllar, kökler, yağlı ve lifli ekinlerin yetiştirilmesi hasadın tamamen başarısız olması riskini azaltır, inatçı böceklerin yerleşmesini engeller, erozyonu önler ve toprağın daha iyi özelliklerini korumasını sağlar (Lowrance vd. 1984; USDA 2014). İklim ve toprak koşullarına uygun düşecek, özel beslenme tercihlerini karşılayacak ekim dönüşümleri tercih edilebilir; tarımsal bir bakış açısıyla bunlar son derece tercih edilir, ama her yıl birden fazla ekinin yetiştirildiği yerlerde (çoklu ekim) açıktır ki daha fazla emek gerektirirler. Kurak dönemlerin yaşandığı yerlerde sulamaya ihtiyaç duyulacaktır, her yıl aynı tarlada üç-dört türün yetiştirildiği, yoğun çok ürünlü tarım için ciddi bir gübrelemeye de ihtiyaç duyulur. Aynı tarlada, aynı zamanda iki ya da daha fazla ekin yetiştirildiğinde (birlikte ekim) emek gereksinimi daha da yükselebilir. Çok ürün ekip biçmenin temel ödülü aynı miktarda ekilip biçilebilen toprakla daha büyük nüfusların ayakta tutulabilmesidir.

Geleneksel ekin çeşitliliği ve bunların dönüşüm şemaları muazzamdır. Örneğin Buck'ın Çin tarımına ilişkin ikinci araştırmasında 168 yerel bölgede hayret verici bir sayıda, 547 farklı ekim biçimi tespit edilmişti (Buck 1937). Ama birkaç kilit ortak özellik bulunduğu açıktır. Bunların hiçbirisi daha önce bahsettiğimiz, neredeyse küresel bir pratik olan, baklagiller ile tahıllar arasında bağlantı kurma pratiği kadar dikkat çekici değildir. Toprağın verimliliği ve protein üretimine katkılarının yanı sıra bazı baklagiller, en başta da

soya fasulyesi ve fıstık geleneksel beslenme biçimlerinde her zaman sevilen iyi yenilebilir yağlar da verir. Küspe, yağ çıkarıldıktan sonra geri kalan katı madde ya evde beslenen hayvanlar için yüksek proteinli yem haline gelir ya da mükemmel bir organik gübre olur.

İkinci ortak noktayı daha önce belirtmiştik: Yeşil gübre ile yemeklik ekinlerin dönüşümlü ekilip biçilmesinin bütün yoğun geleneksel tarımlarda önemli bir yeri vardır. Üçüncü bir ortak nokta, ekinlerin dönüşümlü olarak yetiştirilmesi, demirbaş karbonhidratlar (tahıllar ve yumrular) ve yağlık ekinlerle birlikte lif üretme isteğini de yansıtıyordu. Bu nedenle geleneksel Çin tarımı buğday, pirinç ve arpanın soya fasulyesi ve fıstıkla ya da susamın pamuk ve hint keneviriyiyle birlikte ekildiği çok sayıda şema içerir. Avrupalı köylüler temel tahıllar (buğday, çavdar, arpa ve yulaf) ve baklagillerin (bezelye, mercimek, fasulye) yanı sıra lif için keten ve kenevir de yetiştiriyorlardı. Mayaların ekinleri arasında Yeni Dünya tarımının üç temel ürünü yer alıyordu: mısır, fasulye ve balkabağı. Ama yumrular (tatlı patates, manyok, Meksika turpu) ile lif için agave ve pamuk da yetiştiriliyordu (Atwood 2009).

ISRARLA VARLIĞINI SÜRDÜRMEK VE YENİLİK

Geleneksel tarım pratiklerinin ataleti birçok örnekte birkaç bin yıl sonra bile şaşmaz bir biçimde kendisini gösterir: Kuru toprakta yetişen tahıllar elle dağıtılarak ekilir; insanın belini büken bir çabayla sulu tarlalara pirinç filizleri dikilir; yavaş hareket eden öküzlere koşum takılır, basit ahşap sabanlar sürülür; oraklar ya da tırpanlarla hasat yapılır, dövenler ya da hayvanlarla harman dövülür. Ama tekrarlanan işlerin görünürdeki bu değişmezliği hemen her zaman tedrici de olsa çok sayıda değişikliği de gözden saklıyordu. Bu yenilikler daha iyi tarım tekniklerinin yayılmasından yeni ekinlerin benimsenmesine uzanıyordu.

Ekinlerin yayılması, yeni temel karbonhidratlar (mısır, patates) ve mikroblesinler açısından zengin yeni sebzeler ve meyvelerin tarımını başlatarak derin ve köklü bir etki yarattı. Bazı yayılmalar nispeten yavaş ve birden fazla yol izliyordu. Örneğin salatalık (*Cucumis sativus*) Avrupa'ya iki farklı yayılma geldi, birincisi (İslam'ın yayılması öncesinde) karadan İran'dan (Doğu ve Kuzey Avrupa'ya) uzanan bir yol izledi, ikinci yayılma Endülü's'e uzanan bir deniz yoluyla oldu (Paris, Daunay ve Janick 2012). Hiç kuşkusuz en fazla sonuç doğuran yeni ürün yayılması, Avrupalıların Amerika kıtalarını fethetmesi sonrasında yaşandı, bunun sonrasında patates, mısır,

domates, biberler dünya çapında yayıldı; ananas, papaya, vanilya ve kakao ağaçları tropikal bölgelerde yetiştirilmeye başladı (Foster ve Cordell 1992; Reader 2008). Herhalde tarım devrimini takdir etmenin en iyi yolu ısrarla varlığını sürdüren dört geleneksel tarım düzeninin uzun uzun incelenmesi, ardından Kuzey Amerika’da sanayi öncesi tarımın kaydettiği hızlı ilerlemeye bakılması olur.

Bu dört geleneksel tarım düzeninden ilki tarihsel olarak, örnekleri Mısırlıların pratiklerinde görülen Ortadoğu tarımıdır. Mısır’da doğal sınırlamalar (ekilebilir arazinin sınırlı olması, neredeyse hiç yağmur yağmaması) ve çevre koşullarının olağanüstü verimi (Nil’in her yıl taşması tahmin edilebilir düzeyde su ve besin sağlıyordu) birleşerek daha erken hanedan dönemlerinde son derece verimli bir tarım ortaya çıkarmıştı. Yirminci yüzyıl başında, uzun bir durgunluk dönemi sonrasında, Mısırlı köylüler güneş enerjisiyle sürdürülen (fossil enerjiyle hiçbir şekilde desteklenmeyen) tarımda elde edilebilecek en yüksek üretim miktarına hâlâ ulaşabiliyordu.

Geleneksel Çin tarımı Doğu Asya’nın takdir edilesi derecede üretken ekim biçimlerine bir örnektir. Bu pratikler dünyanın kültürel olarak bütünleşmiş en büyük nüfuslarını ayakta tutuyordu, 1950’lere kadar da şaşırtıcı bir sağlamlıkla varlıklarını sürdürdüler. Bu ısrarlı varlıkları, modern bilimsel yöntemlerle incelenmelerini ve performansları hakkında güvenilir bazı nicelikler üretilmesini mümkün kıldı. Karmaşık Mezoamerika toplumları saban sürülmeksizin, yük hayvanları kullanılmaksızın yapılan benzersiz ve son derece üretken bir tarım biçimine dayanıyorlardı. Avrupa tarımı Akdeniz’deki basit başlangıçlardan evrilmiş, on sekizinci ve on dokuzuncu yüzyıllarda hızlı ilerlemeler kaydetmişti. Geleneksel Avrupa tarım tekniklerinin Kuzey Amerika’ya aktarılması ve on dokuzuncu yüzyılda ABD’de tarımsal yeniliklerin görülmemiş bir hızla ulaşması dünyanın en etkili, verimli geleneksel tarım düzenlemesini yarattı.

Antik Mısır

İzlerini MÖ 5000’in biraz öncesinde gördüğümüz hanedanlar öncesi Mısır tarımı, bol miktarda avlanma (antilop ve domuzların yanı sıra timsahlar ve filler), kuş avcılığı (kaz, ördek), balıkçılık (sel altında kalan sığlık bölgelerde özellikle kolay bir işti) ve bitki toplayıcılığıyla (otlar, kökler) bir arada yürüyordu. Gernik buğdayı ve iki sıralı arpa ilk tahıllardı, koyunlar (*Ovis aries*) evcilleştirilen ilk hayvanlar olmuştu. Nil sularının çekilmesini takiben ekim

ve kasım aylarında tohum atılıyordu, zararlı otları temizleme işi nadir olarak yapılıyordu, hasat da beş-altı ay sonra kaldırılıyordu. Arkeolojik kayıtlara dayalı hesaplamalar hanedanlar öncesi Mısır tarımının ekilmiş topraklarda hektar başına 2,6 kişiyi doyurduğunu gösterir, ama daha muhtemel uzun vadeli bir ortalama bu oranın yaklaşık yarısına tekabül eder.

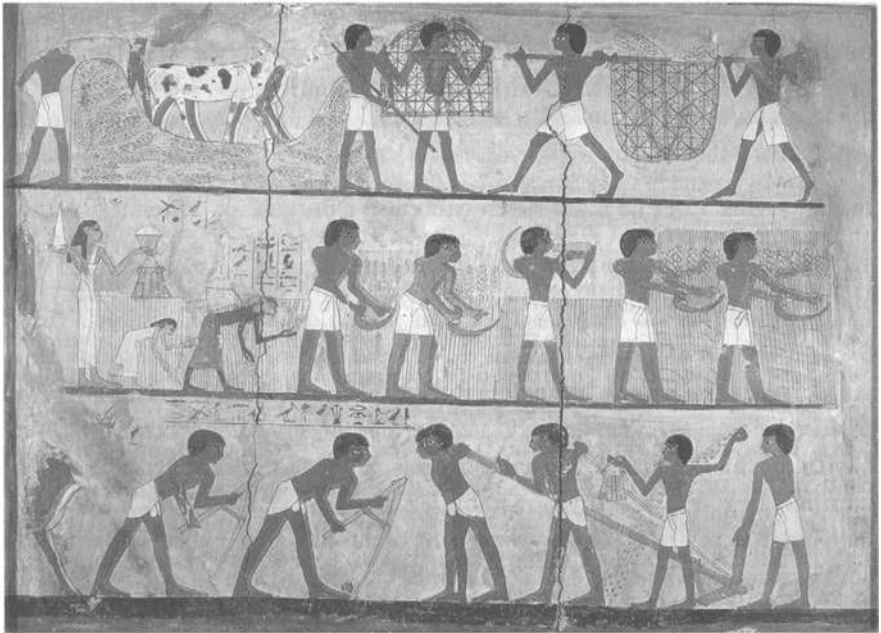
Mısır tarımı sulama nedeniyle her zaman serpildi, ama hem Eski Krallık'ta (MÖ 2705-2205) hem Yeni Krallık'ta (MÖ 1550-1070), bu her yıl gelen sel sularının nispeten basit bir biçimde manipüle edilmesini gerektiriyordu. Bu manipülasyon daha yüksek ve güçlü setler inşa ederek, drenaj kanallarını kapatarak, sel havzalarını alt kısımlara ayırarak gerçekleştiriliyordu (Butzer 1984; Mays 2010). Mezopotamya ve İndüs Vadisi'nde olduğunun tersine daimi kanallarla sulama yapmak gibi bir seçenek yoktu burada: Nil'in eğiminin çok az olması (1:12.000) radyal kanallar inşa etmeyi imkânsız kılıyordu, kanalların ilk sınırlı kullanımı Ptolemaios zamanında (MÖ 330 sonrası) yaşanan Fayyum çöküntü havzasında oldu.

Aynı şekilde hanedanlar döneminde, etkili su çekme aygıtlarının bulunmaması yüksek yerlerde bulunan tarım arazilerinin sulanmasını büyük ölçüde sınırladı. MÖ on dördüncü yüzyıldaki Amarna döneminden beri kullanılan karşıt noktalar arasında dengeye dayalı çekiciler sadece bahçe benzeri küçük arazilerin sulanmasına uygundu. Sürekli yüksek kapasiteli çekişler için ihtiyaç duyulan, hayvanların çektiği *sakiya* ancak Ptolemaios döneminde benimsendi. Bu nedenledir ki hanedanlar döneminde yaz ekinleri ekilip biçilmiyordu, sadece daha kapsamlı bir kış ekimi yapılıyordu. Buğday ve arpa baskın ürünlerdi, hasat çakmaktaşıdan dişli temrenleri olan ya da kısa girintili ahşap oraklarla yapılıyordu, saman zeminin epey üstünden, kimi zaman başın hemen altından kesiliyordu. Ortaçağ Avrupası'nda da yaygın olan bu uygulama hasadı kolaylaştırıyor, ekinin dövme zeminine daha kolay taşınmasını ve dövme işinin daha temiz hallolmasını sağlıyordu. Mısır'ın kuru ikliminde, hasat sonrasında geride kalan saman daha sonra ihtiyaç duyulduğunda dokumacılık, tuğla yapımı ve pişirme yakıtı olarak kullanılmak üzere kesiliyor, arta kalan kısım evcil hayvanlar tarafından otlanıyordu.

Mısır mezarlarındaki resimler bu sahneleri canlandırır. Unsou'nun mezarındaki sahnelerde köylülerin tohumları çapaladıkları, ayıkladıkları, oraklarla hasat yaptıkları, kesilmiş tahılları öküzlerin çektiği dövenlerle dövülmek üzere küfelerde taşıdıkları görülür (Şekil 3.10). Paheri'nin mezarındaki yazıtlar devrin enerji sınırlamalarını ve gerçekliklerini belagatli bir

dille ifade eder (James 1984). Bir denetçi işçilere buyurur: “Çabuk olun, kıpırdayın, su geliyor, demetlere ulaşacak.” İşçilerin cevabı: “Güneş kızgın! Arpanın bedeli güneşe balık olarak verilsin!” Bu yazıt hem işçilerin yorgunluğunu hem de selin mahvettiği tahılın balıkla telafi edilebileceğinin bilincinde olduklarını gayet güzel özetler.

Öküzleri kırbaçlayan oğlan çalışan hayvanları neşelendirmeye çalışır: “Kendiniz için çekin düveni, kendiniz için dövün... Sizin yemeniz için kabuklar, efendilerinize arpa. Gönlünüz yorgun düşmesin! Hava serin.” Öküzlere tahıl kabuklarının yanı sıra arpa ve buğday samanı veriliyordu, hayvanlar sel havzasında ve ekilmiş arazilerde yabancı otlar arasında otlanıyordu. Tarım yoğunlaştıkça sığırlar mevsimlik olarak delta bataklıklarında otlamaya götürüldü. Saban sürme sırasında öküzlere çift baş boyunduruğu takılıyor, kesekler ahşap gelberiler ve tokaçlarla kırılıyor, dağılan tohumlar koyunlar tarafından çiğnenip toprağın içine itiliyordu. Eski Krallık kayıtları çok sayıda öküzün yanı sıra ciddi miktarda inek, eşek, koyun ve keçi sürüleri bulunduğunu gösterir.



Şekil 3.10 Doğu Teb’de on sekizinci hanedanlıktan (Yeni Krallık) Unsou’nun lahdinde Mısır’daki tarım faaliyetlerini gösteren bir sahne (Corbis).

Butzer'in (1976) Mısır'ın demografik tarihini yeniden kurgulamasına göre Nil vadisinin nüfus yoğunluğu MÖ 2500'de ekilebilir arazide hektar başına 1,3 kişiye, MÖ 1250'de hektar başına 1,8 kişiye, Roma'nın Kartaca'yı yıktığı devirde (MÖ 149-146) hektar başına 2,4 kişiye ulaşmıştı. Roma yönetimi sırasında Mısır'da ekilip biçilen toprakların toplamı 2,7 Mha'ydı, bunun yüzde 60'ı Nil Deltası'nda bulunuyordu. Bu arazi ülkedeki yaklaşık beş milyon kişi için gerekli yiyeceğin yaklaşık 1,5 katını verebiliyordu. Artık genişleyen Roma İmparatorluğu'nun refahı için büyük önem taşıyan bir meseleydi: Mısır Roma'nın en büyük tahıl tedarikçisiydi (Rickman 1980; Erdkamp 2005). Sonrasında Mısır tarımı geriledi ve durgunluk dönemine girdi.

1820'ler gibi yakın bir tarihte bile ülke, Roma yönetimi sırasında tarım yaptığı arazilerin ancak yarısı kadarını ekip biçiyordu. Ama yüksek verim nedeniyle bu arazi, hem ülke içinde hem dışında iki bin yıl önce iki katı büyük bir arazinin besleyebileceği kadar insanı yaşatıyordu. Verimlilik ancak 1843 sonrasında, Nil'de kurulan ilk barajların kanal ağlarını besleyecek yeterli su debisi sağlaması sonrasında daimi sulamanın yayılmasıyla hızlı bir artış gösterdi. Ülke çapında çoklu ekim endeksi 1830'larda 1,1'ken 1900'de 1,4'e çıktı, 1920'lerde 1,5'i aştı (Waterbury 1979). Tarım hâlâ hayvan gücüne dayalıydı, ama organik olmayan gübrelerin de desteğiyle fellahlar ekilebilir arazinin her bir hektarıyla altı kişiyi besleyebiliyordu.

Çin

İmparatorluk Çin'i de uzun süren çalkantı ve durgunluk dönemleri yaşadı, ama geleneksel tarımı Mısır tarımına göre hatırı sayılır derecede yenilikçiydi (Ho 1975; Bray 1984; Lardy 1983; Li 2007). Başka yerlerde olduğu gibi Çin tarımının da ilk aşamaları o kadar yoğun değildi. MÖ üçüncü yüzyıl öncesinde geniş ölçekli sulama yoktu, çifte ekin ekimi ya da dönüşümlü ekim ya hiç yoktu ya da çok az uygulanıyordu. Kuzeyde kurak topraklarda yetiştirilen darı, aşağı Yangzi havzasında yağmur sularından beslenen pirinç başlıca ürünlerdi. En erken evcilleştirilmiş hayvanlar domuzlardı (bunun ilk kanıtları bugünün 8.000 yıl öncesine uzanır, Jing ve Flad 2002), ayrıca bu hayvanlar açık ara en fazla görülen hayvanlardı, ama gübre kullanımının açık kanıtları ancak MÖ 400 sonrasında karşımıza çıkar.

Mısır'ın fazladan tahıl üretimiyle Roma İmparatorluğu'nu beslediği dönemde (Çin'de Han hanedanlığı dönemi, MÖ 206-MS 220) Çinliler Avrupa ve Ortadoğu'nun asırlar, hatta bin yıl kadar sonra benimsediği birkaç

alet ve uygulama geliştirmişti. Bu ilerlemeler arasında, hepsinden önemlisi demir kulaklı pulluklar, atlar için boyun koşumu, tohum atma delgileri ve dönen savurma pervaneleri vardı. Bütün bu yenilikler erken Han hanedanlığı döneminde (MÖ 206-9) yaygın olarak kullanılmaya başlamıştı. Herhalde en önemli yenilik dökme demirden kulaklı pulluğun yaygın olarak benimsenmesi olmuştur.

Kırılğan olmayan metalden yapılan (bu malzemenin dökümü MÖ üçüncü yüzyılda mükemmel hale getirilmişti), kitlesel olarak üretilen bu pulluklar ağır işleri kolaylaştırırken ekim olasılıklarını yaygınlaştırıyordu. Ahşap pulluklardan daha ağır olsalar da çok daha az sürtünme yaratıyor, su basmış killi topraklarda bile tek bir hayvan tarafından çekilebiliyorlardı. Çok tüplü ekim delgileri, elle tohum saçmadan kaynaklanan tohum israfını azaltıyordu, elle çalıştırılan savurma pervaneleri de dövülmüş tahılları temizlemek için gerekli zamanı büyük ölçüde azaltıyordu. Atlara takılan verimli boyun koşumu tarla işlerinde büyük bir fark yaratmamıştı, çünkü yoksul kuzey bölgelerinin tamamında o kadar talepkâr olmayan öküzler atlara nazaran keseye daha uygun bir seçenek olarak kalmıştı (atları iyi yem ya da tahılla beslemek gerekiyordu), güneydeki sulu tarlalardaysa sadece boyunduruk takılan mandalar kullanılıyordu.

Tarımda yaşanan temel değişiklikler açısından hiçbir hanedanlık dönemi Han hanedanlığı ile boy ölçüşemez (Xu ve Dull 1980). Bundan sonra yaşanan ilerlemeler yavaş oldu, MÖ on dördüncü yüzyıl sonrasında kırsal teknikler neredeyse durgunlaştı. Ming hanedanlığı (1368-1644) ile Qing hanedanlığının ilk dönemi (1644-1911) arasında artan tahıl üretiminin yarısından biraz fazlası ekilip biçilen arazilerin genişletilmesinden kaynaklanmıştı (Perkins 1969). Geri kalan artışın büyük bir bölümünün ardında daha yüksek emek girdileri (her şeyden de önemlisi daha fazla sulama ve gübreleme) bulunuyordu. Daha iyi tohumlar ve yeni ürünler, en başta da mısır, bazı bölgesel farklılıklar görülmesini sağlamıştı.

Çin’de tarımın yoğunlaşmasına katkıda bulunan en önemli ve kalıcı etken hiç kuşkusuz kapsamlı sulama sistemlerinin tasarlanması, inşa edilmesi ve bakımla ayakta tutulmasıydı (Şekil 3.11). 1900’e gelindiğinde faaliyet halinde olan bütün projelerin neredeyse yarısının 1500’den önce tamamlanmış olması bu planların kadimliğini gösteren en iyi kanıttır (Perkins 1969). Bugün hâlâ elli-altmış milyon insan için yiyecek yetiştirilen tarlaları sulayan Sichuan’daki Dujiangyan’ın, herhalde en ünlü kadim sulama sisteminin



Şekil 3.11 Guangxi’de Guilin’in kuzeyindeki büyük longji (ejder sırtı) pirinç teraslarının küçük bir bölümü, bu terasların kökenleri Yuan Hanedanlığı’na uzanır (1271-1368). Kaynak: https://en.wikipedia.org/wiki/Longsheng_Rice_Terrace#/media.

kökleri MÖ üçüncü yüzyıla uzanır (UNESCO 2015b). Min Jiang’ın yatağı Guanxian’da havzaya giriş noktasında kesilmiş, dere daha sonra akıntının ortasında kayalık ok başlarının inşa edilmesiyle tekrar tekrar alt bölümlere ayrılmıştı.

Yolu değiştirilen su kanal kollarına akıtılıyor, suyun akışı da setler ve barajlarla kontrol ediliyordu. Bambudan örülmüş, kayalarla doldurulmuş sepetler başlıca yapı malzemesiydi. Suyun alçak olduğu mevsimlerde dibin taranması ve setlerin onarılması bu sulama sisteminin 2.000 yılı aşkın bir süre boyunca ayakta durmasını sağlamıştı. Bu tür sulama projelerinin inşası ve kesintisiz bakımı (ayrıca uzun gemi kanallarının inşası ve diplerinin temizlenmesi) uzun vadeli bir planlama, kitlesel işgücü seferberliği ve büyük bir sermaye yatırımı gerektiriyordu. Bu koşulların hiçbiri etkili bir merkezi otorite olmaksızın yerine getirilemezdi. Çin’deki etkileyici büyük ölçekli su projeleri ile ülkenin hiyerarşik bürokrasilerinin yükselmesi, mükemmelleşmesi ve daimiliği arasında sinerjik bir ilişki olduğu açıktır.

İnsan gücüne dayalı su çekme işi zahmetli ve vakit alıcıydı, enerji maliyetleri de biraz yüksekti, ama yüksek getirinin ödülleri de yüksekti. Sula- ma, kritik büyüme döneminde ekinlere ilave su sağladığında, suyun net besin olarak doğrudan enerji getirisini (sulama kanallarının inşa ve bakım maliyet- leri dışarıda bırakıldığında) kolayca 30'a yakın oluyordu (bkz. **Kutu 3.8**). Daha hassas büyüme dönemlerinde su kıtlığının telafi edilmesi, ilave hasatta, su basamaklarını çeviren köylülerin tükettiği yiyeceğin yaklaşık 20 katı ka- dar gıda enerjisi getirebiliyordu.

Çin'de pirinç yetiştirilen bölgelerde hayvan gübresinin ve insan dışkı- sının uygulanması on dokuzuncu yüzyıl sonunda ve yirminci yüzyıl başında hektar başına 10 ton düzeyindeydi. Şehirlerde ve kasabalarda büyük miktarda organik atık toplanıyor, kırsal kesime taşınıyor, bu da büyük bir atık işle- me ve nakliyat sanayii yaratıyordu (**Kutu 3.9**). Batılı seyyahlar Çin'deki bu yüksek yoğunluklu gübre üretim işini takdir ediyorlardı; ilginçtir, Avrupa'nın daha önceki deneyimlerine ne kadar benzediğinin hiç farkında değillerdi (King 1927). Ne var ki hiçbir kültür, Güney Çin'de Guangdong vilayetinde hendek ve göletler bölgesinde yapılan yoğun tarımı destekleyen bilinen en büyük orga- nik atık uygulamasını geride bırakamamıştır; burada hektar başına 50 ilâ 270 ton domuz ve insan dışkısı uygulanıyordu (Ruddle ve Zhong 1988).

Kutu 3.9

Çin'de geri dönüştürülen organik malzemenin azot içeriği

Geleneksel geri dönüşümün çapı (dolayısıyla atık biyokütleyi toplamaya, işlemeye ve uygu- lamaya vakfedilmiş enerjiler) çok büyük olmalıdır, çünkü araziye uygulanan ya da pullukla sürülen (yeşil gübre gibi) organik malzemelerin nitrojen (azot) içeriği çok düşüktür: İnsan ve hayvan atıkları büyük ölçüde sudur, yeşil gübreler de öyle, sadece (yenilebilir yağların çıkarılması sonrasında kalan posa) küspenin azot içeriği fazladır. Karşılaştırma açısından belirtelim: Ürede, en başta gelen modern sentetik gübrede yüzde 46 azot bulunur.

Malzemeler	Azot içeriği (tazeyken ağırlık %)
Domuz gübresi	0,5-0,6
İnsan dışkısı	0,5-0,6
Yeşil gübre (bakla ve fasulye)	0,5-0,3
Küspe (soya fasulyesi, fıstık, kolza)	4,5-7,0
Nehir ve göl alüvyonu	0,1-0,2

Kaynaklar: Söz konusu aralıklar Smil'de toplanan (1983, 2001) çeşitli tarihsel ve modern Çin kaynaklarında aktarılan verilerden derlenmiştir.

Kompostlama ve başka birçok organik atığın (ipekböceği dışkısından kanal ve gölet çamuruna, yosunlardan yağ küspesine) düzenli olarak uygulanması toplama, fermante etme ve dağıtma yükünü daha da artırıyordu. Tahmin edileceği üzere, Çin’de geleneksel tarımda çalışan toplam işgücünün en az yüzde 10’u gübrelerin idare edilmesiyle uğraşıyordu, Kuzey Çin Ovası’nda buğday ve arpanın ağır gübrenmesi genellikle insan iş gücünün (beşte bire yakın) ve bu ekinlerin üretiminde çalışan yük hayvanı gücünün (üçte bire yakın) de en fazla vaktini alan işti. Ama bu yatırım çok ödüllendiriciydi: Net enerji getirisi genellikle 50’nin üstündeydi (**Kutu 3.10**).

Geleneksel Çin tarımındaki genel gıda enerjisi getirileri yirminci yüzyılın ilk yirmi yılında, performansın zirvede olduğu dönemdeki kadar yüksek değildi. Bunun başlıca nedeni tarımın çok az mekanikleşmiş olmasıydı, bu da insani işgücünün hakimiyetinin devam ettiği anlamına geliyordu. 1920’ler ve 1930’lardaki geleneksel Çin tarımının neredeyse bütün yönleriyle ilgili niceliksel bilgilerin zenginliği (Buck 1930, 1937) bu sistemi çok ayrıntılı olarak betimlemeyi, doğru enerji hesaplamaları hazırlamayı mümkün kılar. Tarlaların çoğu çok küçüktü (sadece 0,4 hektar kadardı), çiftliklere uzaklıkları beş-on dakika kadardı. Tarım arazilerinin neredeyse yarısı sulanıyordu, dörtte biri de teraslıydı.

Ekilip biçilen toprakların yüzde 90’ından fazlasına tahıl, yüzde 5’inden azına tatlı patates, yüzde 2’sine lif, yüzde 1’ine sebze ekilmişti. Kuzeydeki çiftliklerin sadece üçte birinde en az bir öküz bulunuyordu, güneydeki arazilerin üçte birinden azında da bir manda vardı. Hayvan emeğinin büyük

Kutu 3.10

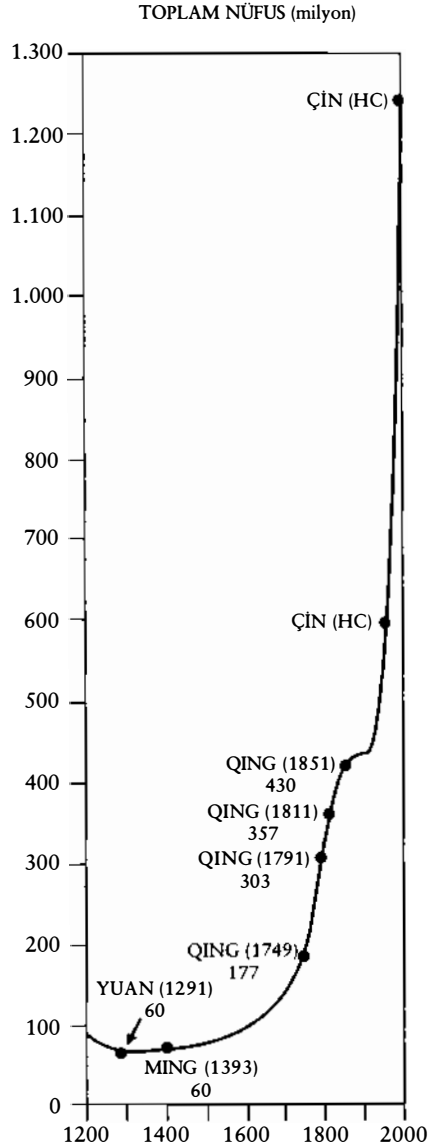
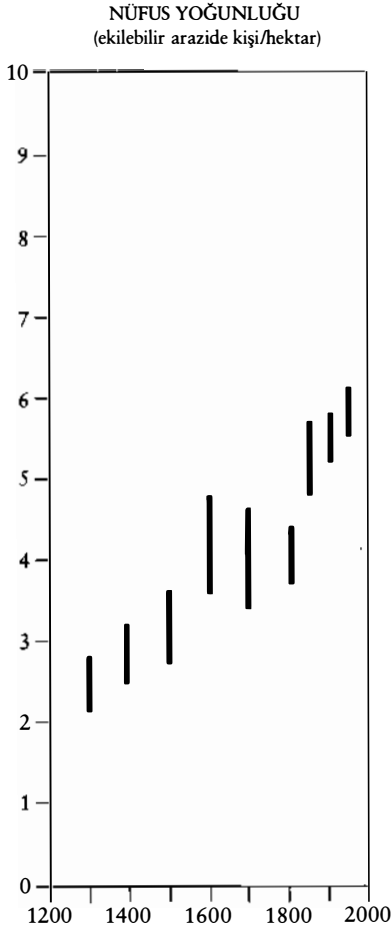
Gübrelemenin net enerji getirisi

Qing hanedanlığının geç dönemlerinde kışın 1,5 t/ha’lık iyi bir buğday hasadı 300 saatin üstünde insan emeği, yaklaşık 250 saatlik de hayvan emeği gerektiriyordu. Gübreleme bu toprakların sırasıyla yüzde 17’sini ve yüzde 40’ını oluşturuyordu. İhtiyatlı bir tahminle, hektar başına uygulanan 10 ton gübrenin sadece yüzde 0,5’inin azot olduğunu varsayıyorum (Smil 2001). Kaçınılmaz olan filtreleme ve buharlaşma kayıpları sonrasında, bu miktarın ancak yarısı fiilen ekinlere verilebiliyordu. Azotun her bir kilosu yaklaşık 10 kg daha tahıl üretmeye yarıyordu. Gübrenmemiş ekinlerle karşılaştırıldığında en az 250 kg daha fazla bir tahıl getirisi söz konusudur. Bu tahılın ancak yüzde 3-4’ü hayvan yemi olarak kullanılabiliyordu. Öğütme sonrasında tahıl en az 200 kg un yani yaklaşık 2,8 GJ gıda enerjisi veriyordu, insan emeği içinse yaklaşık 40 MJ gıda enerjisi harcanıyordu. Dolayısıyla gübrelemenin net enerji getirisi 70 civarındaydı ki bu da etkileyici bir yarar/maliyet oranıydı.

bölümü ekinlere harcanıyordu (pirinç yüzde 90, buğday yüzde 70), ama sabanla sürme ve tırmıklama dışında Çin'deki tarla işlerinin neredeyse tamamı insan emeğine dayanıyordu. Hem öküzler hem mandalar pek tahılla beslenmiyordu, dolayısıyla enerji getirileri sadece insan emeği dikkate alınarak hesaplanabilir. Kuzeyde sulanmayan topraklarda yetiştirilen buğday genellikle hektar başına en fazla 1 ton ürün veriyordu, üretimi 600 saati aşkın emek istiyordu, tarla işleri ve ekin işleri için gerekli gıda enerjisinin her birimi için, öğütülmemiş tahılda 25 ilâ 30 birim gıda enerjisi getirisi vardı.

Yerel ve bölgesel pirinç tarlaları Ming hanedanlığı sırasında zaten yüksekteydi, yirminci yüzyılın ilk yirmi-otuz yılı içinde ulusal ortalama hektar başına 2,5 tondtu. Bu tür, 20 ilâ 25 kat brüt enerji getirisi olan hasatları üretmek için yaklaşık 2.000 saat emek vermek gerekiyordu. Mısırın brüt enerji getirisi 40'a kadar çıkıyordu, ama mısır gevreği Çin'de hiçbir zaman sevilen bir yiyecek olmadı. Baklagiller için (soya fasulyeleri, bezelye, fasulye) getiriler nadiren 15'in üstüne çıkıyordu, genelde 10 kadardı. Kolza tohumu, fıstık ve susamdan elde edilen yağların getirisi de yaklaşık bu kadardı. Tahıllar bütün gıda enerjisinin yüzde 90'ını temin ediyordu, köylü ailelerinde et tüketimi ihmal edilebilir düzeydeydi (genellikle sadece bayramlarda tüketiliyordu). Ama bu tekdüze vejetaryen beslenme biçimleri nihayetinde yüksek nüfus yoğunluklarını ayakta tutuyordu.

Antik dönemde Çin'deki nüfus yoğunlukları, Mısır'daki ortalamalardan çok da farklı değildi, en yoksul kuzey bölgelerde hektar başına yaklaşık 1 kişi ile güneyde pirinç yetiştirilen bölgelerde hektar başına 2 kişinin epey üstüne çıkıyordu; bölgeler arasında da büyük farklılıklar gözleniyordu, Mançu yönetimindeki Qing hanedanlığının ilk iki yüzyılında Çinlilerin kuzeydoğu bölgelerine göç etmeleri yasaklanmıştı, dağlık güney bölgelerindeyse nüfus yoğunluğu çok düşüktü. Ekimin tedricen yoğunlaşmasının yanı sıra basit beslenme biçimleri nihayetinde çok daha yüksek nüfus oranlarını ayakta tutabiliyordu. Ming (1368) ve Qing (1644-1911) hanedanlıklarının yaklaşık olarak yeniden kurgulanmasına göre 1400'de tarım arazilerinde hektar başına 2,8 kişi olan nüfus yoğunluğu 1600'e gelindiğinde hektar başına 4,8 kişiye çıkmıştı (Perkins 1969). Müreffeh Qianlong hükümlerinin sırasında (1736-1796) gözlenen hafif gerileme nüfusun yeni tarım arazileri açarak yayılmasının bir sonucuydu. Nüfus yoğunluğundaki artış on dokuzuncu yüzyıl boyunca da devam etti, on dokuzuncu yüzyıl bittiğinde ortalama nüfus yoğunluğu hektar başına 5 kişiydi; Java'da o yıllarda gözlenen ortalamadan



Şekil 3.12 Uzun vadeli perspektiften Çin'deki nüfus yoğunluğu. Qing hanedanlığı zamanında ekilip biçilen arazinin ciddi bir biçimde genişlemesi, çok geçmeden ülkede nüfus artışının devam etmesiyle ağır bir yükün altında kaldı. Yoğunluk çubukları tarihsel tahminlerin belirsizliğini işaret eder. Perkins (1969) ve Smil'deki (2004) verilere dayanır.

yüksekti, Hindistan'da gözlenen ortalamanın en az yüzde 40 üstündeydi (Şekil 3.12).

Buck'ın 1930'ların ilk yılları için yaptığı araştırmalar (1937) ülkede nüfus yoğunluğu ortalamasının, ekilebilir topraklarda hektar başına en az 5,5 kişi olduğunu gösterir. Bu oran neredeyse o dönem Mısır'da olduğu kadar yüksekti, ama Mısır'da arazilerin tamamı sulanıyordu ve organik olmayan gübreler kullanılmaya başlamıştı. Oysa tersine Çin'de ülke çapında ürünlerin verimlilik ortalaması kuzeyde kurak topraklarda yapılan tarım nedeniyle sıkıntıya girmiş durumdaydı. Güneyde pirinç yetiştirilen bölgede nüfus yoğunluğu 1800'e gelindiğinde hektar başına 5 kişiyi çoktan aşmıştı, 1920'lerin sonuna gelindiğinde bu bölgenin geniş kısımları hektar başına 7 kişiyi yaşıyordu. Kurak topraklarda yapılan buğday üretiminin tersine sulu pirinç tarımının net enerji getirileri şaşmaz bir biçimde daha düşüktü, ama bu, hektar başına daha fazla ürün elde edilmesiyle dengeleniyordu: en verimli bölgelerde pirinç ve buğdayın birlikte yetiştirilmesi hektar başına 12-15 kişiyi besleyebiliyordu.

Mezoamerika Kültürleri

Yük hayvanlarının kullanılmadığı (dolayısıyla çift sürmenin yapılmadığı) klasik Mezoamerikan medeniyetlerin tarımları Eski Dünya kültürlerinin tarımlarıyla ciddi farklılıklar gösteriyordu. Ama onlar da etkileyici düzeyde yüksek nüfus yoğunluklarını ayakta tutabilecek yoğun tarım yöntemleri geliştirmiş, bugün dünya çapında yetiştirilen birkaç yiyeceği ehlileştirmişlerdi, bunların başında da biber (*Capsicum annuum*) ile domates (*Solanum lycopersicum*) geliyordu. Kökeni Mezoamerika olan, gıda dışı en önemli ürünse pamuktur (*Gossypium barbadense*). Moleküler analizler Yucatan Yarımadası'nın pamuğun ilk kez ehlileştirildiği yer olduğunu gösterir, modern pamuk kültür bitkilerinin gen havuzlarının kökeni ise Güney Meksika ve Guatemala'ya uzanır (Wendel vd. 1999).

Tropikal Maya ovaları ile yükseklerde bulunan daha kurak Meksika havzası en büyük başarıların elde edildiği yerler olmuştu. Bu bölgelerin halkları arasında büyük bir etkileşim olmasına, mısırın her ikisinin de temel ürünü olmasına rağmen iki bölgenin tarihi arasında ciddi bir fark vardır. Maya kültürünün gerilemesinin nedenleri hâlâ tartışmalıdır (Haug vd. 2003; Demarest 2004), Meksika kültürü ise İspanyol işgaliyle yıkılmıştır (Leon 1998). Maya kültürü Klasik dönemin başlangıcı, yani yaklaşık MÖ 300 ön-

cesinde uzun bir süre boyunca tedrici bir gelişme göstermişti. Bugünkü Meksika (Yucatan), Guatemala ve Belize'nin bazı bölgelerini içine alan bölge yaklaşık olarak MÖ 1000'e kadar karmaşık bir medeniyete sahip olmuştur. Sonra dünya tarihinin en muamma dolu gelişmelerinden biri olmuş, klasik Maya toplumu çözülmüş, 8. yüzyılda üç milyon olan Maya nüfusu, İspanyol işgali sırasında sadece 100.000'e gerilemişti (Turner 1990).

Tarımsal kötü uygulamalar (aşırı erozyon ve su idaresinde bir arıza) Mayaların çöküşünün nedenlerinden biri olarak gösterilmiştir (Gill 2000). Mayalar gelişimlerinin ilk aşamalarında yer değiştiren tarımcılardı, ama sonra yavaş yavaş yoğun tarım biçimlerini benimsemişlerdi (Turner 1990). Yaylalarda yaşayan Mayalar sürekli ekilip biçilen yamaçlarda ağır erozyonu önleyen ve suyu koruyan, büyük kaya duvarlı teraslar inşa etmişlerdi. Ovalarda yaşayan Mayalar etkileyici kanal ağları inşa etmiş, mevsimlik su basmalarını önlemek için tarlaları sel basma seviyesinin üstüne taşımışlardı. Antik Mayalara ait, bazıları MÖ 1400 gibi erken tarihlerden kalma yükseltilmiş, sırtlı tarlalar bugün havadan çekilen fotolarda hâlâ görülebiliyor. Bu tarlaların 1970'lerde açıkça tanımlanması ve tarihlendirilmesi, Mayaların taşınmalı tarımla sınırlı olduğu yönündeki baskın kavrayışın yanlış olduğunu kanıtlamıştır (Harrison ve Turner 1978).

Meksika havzasında peş peşe karmaşık kültürler kurulmuştu: Önce Teotihuakanolar (MÖ 100-850), sonra Toltekler (960-1168), on dördüncü yüzyıl başına kadar da Aztekler burada yaşamıştı (Tenochtitlan 1325'te kurulmuştu). Bitki toplayıcılığı ve geyik avcılığından yerleşik tarıma doğru uzun bir geçiş dönemi yaşanmıştı. Su düzenlemesiyle birlikte tarımın yoğunlaşması Teotihuacan döneminin başlarında başlamış, tedricen öyle bir evrim göstermişti ki İspanyol işgali sırasında bölge nüfusunun en az üçte biri gıdası için su idaresine bağımlı olarak yaşıyordu (Sanders, Parsons ve Santley 1979).

Teotihuacan civarındaki daimi kanal sulama sistemi yaklaşık 100.000 kişiyi ayakta tutabiliyordu, ama Mezoamerika'daki en yoğun tarım *chinampas*'a dayanıyordu (Parsons 1976). Bu dikdörtgen tarlalar Texcoco, Xalco ve Xochimilco göllerinin sığ sularının 1,5 ilâ 1,8 metre üstüne kurulmuştu. Bu tarlaların inşasında çıkarılan çamur, ekin artıkları, otlar ve yosunlar kullanılmıştı. Tarlaların zengin alüvyonlu toprakları sürekli ekilip biçiliyor ya da sadece bir-iki ay nadasa bırakılıyordu, kenarları da ağaçlarla güçlendiriliyordu. *Chinampa*'lar verimsiz bataklıkları çok verimli tarlalar ve bah-

çelere dönüştürüyor, toprağın su emmesi sorununu çözüyordu. Teknelerle tarlalara erişim hasadın şehir pazarlarına kolayca taşınmasını sağlıyordu. *Chinampa* tarımı harcanan emek karşılığında dikkat çekici bir getiri sağlıyordu, yüksek yarar/maliyet oranı MÖ 100 gibi erken bir tarihte başlanan, Aztek yönetiminin son yıllarında zirve noktasına tırmanan bu pratiğe neden bu kadar sık rastlandığını açıklar (Kutu 3.11).

İspanyol işgali sırasında Texcoco, Chaco ve Xochimilco göllerinde yaklaşık 12.000 hektarlık *chinampa* tarlası bulunuyordu (Sanders, Parsons ve Santley 1979). Bu 70 milyon insan/gün emek gerektirmiştir. Ortalama bir çiftçinin kendi ailesine yetecek yiyeceği yetiştirmek için yılın en az 200 günü çalışması gerekiyordu, dolayısıyla büyük hidrolik projelerde yaklaşık 100 günden fazla çalışamazdı. Bu vaktin önemli bir bölümünün mevcut setler ve kanalların bakımına ayrılması gerektiğinden 1 hektarlık yeni bir *chinampa* eklemek için en az 60 ilâ 120 çiftçinin mevsimlik emeğine ihtiyaç duyuluyordu. Araçlar farklıydı, ama İspanyollar öncesinde Meksika havzası açıktır ki Ming Çin'i, o dönem Asya'daki büyük çağdaşı kadar hidrolik bir medeniyetti. Uzun vadeli, iyi planlanmış, merkezi olarak koordine edilen çabalar ve muazzam bir insan emeğinin harcanması bu medeniyetin tarımsal başarısının kilit bileşenleri olmuştu.

Sulamayla yetiştirilen mısır, doğası gereği buğdaya göre daha yüksek miktarda ürün veren bir tahıldır ve en iyi Mezoamerikan tarımların desteklediği nüfus yoğunlukları çok yüksekti. Yüksek ürün veren bir hektarlık bir *chinampa* gıda enerjilerinin yüzde 80'ini bu tahıldan alan 13 ilâ 16 kişiyi doyurabiliyordu. Doğal olarak Meksika havzasının tamamı için ortalama-lar hatırı sayılır derecede düşüktü, çevre bölgelerde hektar başına 3 kişiden

Kutu 3.11

Meksika havzasında yükseltilmiş tarlalar

Bir chinampa sulanmamış bir arazinin dört katı kadar fazla ürün verebilir. 3 t/ha'lık bir mısır hasadı, onda biri tohum ve atık olarak ayrıldıktan sonra, kuru arazideki bir tarlaya nazaran yaklaşık 30 GJ daha fazla gıda enerjisi verecektir. Tarlalar su seviyesinin en az 1,5 metre üstüne çıkacak şekilde yükseltiliyordu, böylece 1 hektarlık bir chinampa 15.000 m³'lük bir göl çökeltisi ve çamur birikintisi gerektiriyordu. Günde beş-altı saat çalışan bir erkek en fazla 2,5 m³ tarla hazırlayabiliyordu. Dolayısıyla 1 hektarlık bir yükseltilmiş tarla hazırlamak bir kişinin 6.000 saat emek vermesini gerektiriyordu. Enerji maliyetinin 900 kJ/s olması halinde bu iş, yaklaşık 30 GJ'lik ilave bir gıda enerjisi gerektiriyordu; tek bir yıl içinde hasadın artmasıyla kazanılan bir miktardı bu.

azken, daimi bir sulamanın yapıldığı iyi kurutulmuş topraklarda hektar başına yaklaşık 8 kişiyi bulabiliyordu bu oran (Sanders, Parsons ve Santley 1979). Meksika havzasında İspanyol işgali (1519) öncesinde, vadide tarım yapılabilir bütün araziye kullanan yaklaşık bir milyonluk nüfusun ortalama yoğunluğu hektar başına 4 kişiydi. Bugün Peru ile Bolivya arasında bulunan, İnkaların kilit bölgesi olan Titicaca Gölü çevresindeki sulak arazilerde, yükseltilmiş tarlalarda yapılan patates tarımı hemen hemen benzer nüfus yoğunluklarını ayakta tutuyordu (Denevan 1982; Erickson 1988).

Avrupa

Avrupa'da büyük ölçüde Çin'de olduğu gibi nispeten sürekli iyileşmelerin yerini verimlilikte durgunluğa bıraktığı dönemler ve barış zamanı yaşanan büyük bölgesel kıtlıklar on dokuzuncu yüzyıla dek varlığını sürdürdü. Ama on yedinci yüzyıla dek Avrupa tarımı genel olarak Çinlilerin başarılarının gerisinde kaldı, doğudan gelen yenilikleri her zaman geç benimsedi. Hakkında pek az bilgi sahibi olduğumuz Yunan tarımı çağdaşı Ortadoğu tarımları kadar etkileyici değildi kesinlikle. Romalılar yavaş yavaş orta düzeyde karmaşık bir tarım geliştirmişlerdi ki buna ilişkin betimlemeler Cato (*De agricultura*), Varro (*Rerum rusticarum libri III*), Columella (*De re rustica*) ve Palladius'un (*Opus agriculturae*) eserlerinde bugüne ulaşmıştır. Bu yazılar sıklıkla yeniden basılmıştır (herhalde şerhler ve notların yer aldığı tek ciltlik en iyi koleksiyon Gesner [1735] tarafından basılmıştır) ve on yedinci yüzyıla dek ciddi bir etki yaratmıştır (White 1970; Fussell 1972; Brunner 1995).

Nüfusun yoğun ve otlak arazilerin az olduğu, yüksek nüfusun büyük sürülere sahip olmayı engellediği Çin'in iç bölgelerinin tersine, hayvan besiciliği her zaman Avrupa tarımının güçlü bir bileşeni olmuştur. Romalıların karma tarımı tahıllar ve baklagillerin dönüşümlü ekilmesini, kompost hazırlamayı, baklagillerin yeşil gübre olarak toprağa karıştırılmasını içeriyordu. Son derece değerli güvercin dışkılarında tutun küspeye varıncaya dek olası bütün organik atıkların geri dönüştürülmesi sıklıkla yoğun bir işti. Toprağın asitlenmemesini sağlamak için tekrar tekrar kireçleme yapılıyordu (toprağa tebeşir ya da kireçli toprak karıştırılıyordu). Tarlaların en az üçte biri nadasa bırakılıyordu.

Sıklıkla nallanan öküzler başlıca yük hayvanlarıydı. Pulluklar ahşaptı, tohum atma elle, hasat oraklarla yapılıyordu. Plinius'un betimlediği, bu-

güne ulaşan birkaç rölyefte resmedilmiş Galya işi mekanik bir biçerdöver sınırlı bir biçimde kullanılıyordu. Tahılın dövülmesi işi hayvanları üstünde yürüterek ya da dövenlerle yapılıyordu, elde edilen ürünün miktarı da az ve son derece değişkendi. Milattan sonraki ilk yüzyıllarda Romalıların buğday tarımına yapılan girdilerin yeniden kurgulanması hektar başına 0,5 tonluk tipik bir hasat için 180 ilâ 250 saat insan emeği (yaklaşık 200 saat hayvan emeği) gerektiğini göstermektedir. Böyle bile olsa, çoğu kez 30 ile 40 arasında değişen brüt gıda enerjisi getirileri, gayet yüksekti (**Kutu 3.12**).

Avrupa tarımının verimliliği Batı Roma İmparatorluğu'nun çöküşü ile büyük Avrupa yayılmasının başlangıcı arasındaki bin yılda çok yavaş bir değişim geçirdi. On üçüncü yüzyılın başında buğday üretimi büyük ölçüde değişmeyen yollardan ilerledi, hanedan öncesi Mısır'daki ortalamadan yüksek nüfus yoğunluklarını destekleyemiyordu. Ama Ortaçağ kesinlikle, önemli teknik yeniliklerden yoksun bir dönem değildi (Seeböhm 1927; Lizerand 1942; Slicher van Bath 1963; Duby 1968, 1998; Fussell 1972; Grigg 1992; Astill ve Langdon 1997; Olsson ve Svensson 2011). En önemli değişikliklerden biri yük atlarına boyun koşumu takılmasıydı.

Büyük ölçüde bu iyileştirilmiş koşum takımı sayesinde atlar, kıtanın daha zengin bütün kesimlerinde başlıca yük hayvanı olarak öküzlerin yerini almaya başladı. Ama bu geçiş çok yavaş oldu, tamamlanması yüzyıllar aldı. Avrupa'nın hali vakti yerinde bölgelerinde nallama ile boyun koşumunun kural haline geldiği on birinci yüzyıl ile on altıncı yüzyıl arasında gerçekleşti. İngiltere'de gayet iyi belgelenmiş ilerlemeler, Domesday sayımı (1086) sırasında atların hükümdara ait bütün yük hayvanlarının sadece yüzde 5'ini, ama köylülere ait hayvanların yüzde 35'ini oluşturduğunu gösterir (Langdon 1986). 1300'e gelindiğinde bu oranlar sırasıyla yüzde 20 ve yüzde 45'e yükselmışti, bir durgunluk dönemi sonrasında atlar ancak on altıncı yüzyıl sonunda yük hayvanlarının çoğunluğunu oluşturur hale geldi.

İngilizce verilerin nispeten zengin olması, bu geçiş döneminin karmaşıklığını da gösterir. Atlar uzunca bir süre boyunca, karışık ekiplerde hızı belirleyen etken olarak öküzün yerini tuttu. Atların benimsenmesi açık bir bölgesel örüntü gösteriyordu (Doğu Anglia İngiltere'nin geri kalan bölgelerinin önündeydi), küçük mülk sahipleri atları çiftliklerinde kullanma konusunda çok daha ilericiydi. Baskın toprak tiplerindeki farklılıklar (killi topraklar öküzlere uygundu), yemlerin uygunluğu (geniş otlaklar öküzlere uygundu) ve çalışan iyi hayvanlar satın almak, et satmak için pazarlara erişim (kasa-

Kutu 3.12
Avrupa'da buğday hasatlarında işgücü gereksinimi, 200-1800

İşler	Buğday hasadı için çalışılan saat (hektar başına insan/hayvan)		
	İtalya, 200	İngiltere, 1200	Hollanda, 1800
Pullukla sürme			
Öküzler	37/74	25/150	
Atlar			15/30
Tırmıklama	8/16	7/14	5/10
Tohum ekme			
Tohum saçma	4/—	4/—	
Tohumeker			3/6
Gübreleme			40/60
Hasat kaldırma			
Orak	50/—	50/—	
Kalbur			24/—
Taşıma	15/30	10/20	7/14
Harman dövme			
Çiğneme (öküz)	30/60		
Dövme		30/—	33/—
Savurma	25/—	25/—	30/—
Ölçme, paketleme	8/—	7/—	10/—

Kaynaklar: Hesaplamalar Baars (1973), Seeböhm (1927), White (1970), Stanhill (1976), Langdon'daki (1986) bilgilere dayanmaktadır.

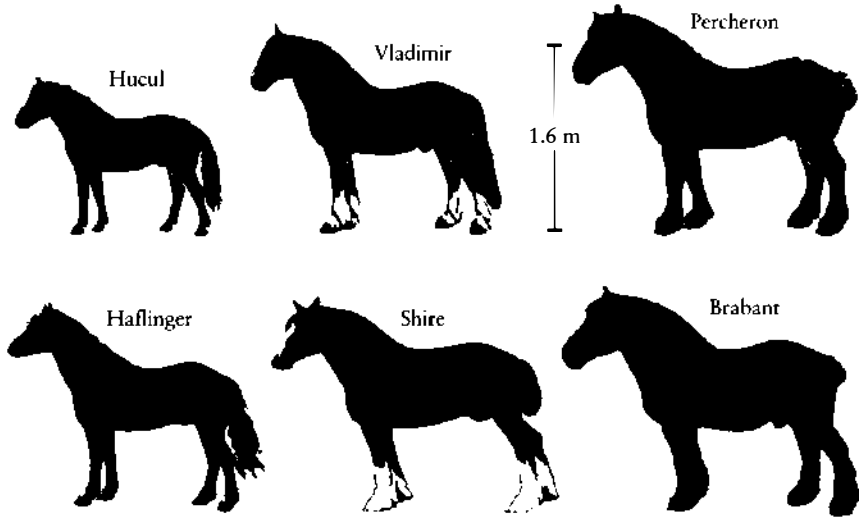
balara yakınlık atları destekliyordu) gibi etkenler bir araya gelerek karmaşık bir sonuç doğurdu. Diğer karşıt etkenler arasında tutuculuk ve değişime direniş göstermek, işletme maliyetlerinin daha düşük olması için çabalamak ve öncü ruh vardı. Bu geçiş pullukların tasarımlarının kötü olması nedeniyle, çoğu Ortaçağ atlarının zayıflığı yüzünden de sekteye uğradı.

Geniş ahşap pençeler, ağır ahşap tekerlekler ve büyük ahşap saban kullakları muazzam bir sürtünme yaratıyordu. Yaş topraklarda bu direnci aşmak için gerek öküz gerek at dört ilâ sekiz hayvan kullanılması sıra dışı değildi. Nispeten verimsiz olmasına rağmen düz saban kulaklı pulluklar ve daha büyük hayvan ekipleri (giderek atları da içeriyorlardı) ekilen toprağın genişletil-

mesi açısından temel önemdeydi. Saban kulaklı pulluklarla toprağın sürülmesi tarlaları yükseltilmiş araziler ve derin saban izleriyle bölerek etkili bir yapay drenaj örüntüsü yaratıyordu. *Chinampa*'lar kadar seyredeğer olmadığı kesin olmakla birlikte, aşırı tarla sularının bu biçimde kontrol edilmesi çok daha yaygın mekânsal ve tarihsel etkiler doğurmuştu. Saban kulaklı pulluklarla tarlaların sürülmesi Kuzey Avrupa'nın geniş sulak düzlüklerini kurak Ortadoğu arazilerinin yerlisi olan buğday ve arpa yetiştirmeye açmıştı.

Ortaçağ'ın sonuna gelindiğinde Alman yerleşimlerinin sınırı, kulaklı sabanla sürülen toprakların en doğu ucunu belirler haldeydi. Bu teknik Kuzey Denizi ile Urallar arasındaki Avrupa düzlüklerinde ancak on dokuzuncu yüzyılda kullanılır oldu, o zamana kadar Balkanlar'ın büyük bölümünde de görülmedi. Açıktır ki bu tekniğin kullanılması hem Kuzeybatı ve Orta Avrupa'da tarımsal ilerlemeleri güvenceye alan devrimci bir değişiklik hem de serin ve sulak düzlüklerin süregiden tarımsal refahının kilit bir bileşeniydi. On dokuzuncu yüzyılda Avrupa çiftlikleri ve yollarında yaygın olan ağır yük atları, yüzyıllardır devam eden besiciliğin bir ürünüydü (Villiers 1976), ama bu ilerleme yavaştı, Ortaçağ'daki atlar da Romalı öncüllerinden pek büyük değildi (Langdon 1986). Ortaçağ sonlarında bile hayvanların çoğu 13-14 karıştan uzun değildi, yük atlarının gücü ancak boyları 16-17 karış, ağırlıkları 1 tonu bulan hayvanların on yedinci yüzyılda Batı Avrupa'da çok yaygınlaşması sonrasında takdir edilesi ölçüde artmaya başladı (Şekil 3.13).

Bu durum, Ortaçağ'da İngilizlerin ağır killi topraklarda atların yarsız olduğu yönündeki şikâyetlerini açıklar. Tersine on dokuzuncu yüzyılın ağır yük atları sulak arazilerde, ağır topraklarda, düz olmayan bozuk arazide dikkat çekiyordu. On dokuzuncu yüzyılda bir çift iyi at bir günde dört öküzlük bir ekipten yüzde 25-30 daha fazla tarla işi yapıyordu. Bu hız yoğunlaşma açısından üç kazanım yarattı: Mevcut tarlaların daha sık ekilip biçilmesi (özellikle de zararlı otları öldürmek için nadasız toprakların sürülmesi), yeni bir arazide yapılan ekimin genişletilmesi ve iş gücünün başka tarla ya da çiftlik işleri için serbest kalması. Avrupa'da çoğu bölgede ürünlerin dönüşümlü olarak ekilmesi, iki atlık bir ekibin bakımını dört öküzün bakımından daha ucuz kılacak kadar konsantre yemi kolayca sağlayabiliyordu. Öküzden ata geçişin yavaşlığı, çiftlik ürünleri üretiminde gözlenen büyük bölgesel dalgalanmalar ve demirbaş tahıl hasadının çok düşük düzeyde olmaya devam etmesi yük atlarının sayılarının giderek artmasına bağlanabilecek, sürekli iyileşen bir verimliliği işaret etmeyi imkânsız kılar.



Şekil 3.13 Avrupa'da kullanılan yük atları 12 karıştan (1,2 m) küçük midilli benzeri hayvanlardan tutun, uzun boylu (16 karıştan uzun) ağır hayvanlara (1 ton civarında) varan bir yelpazeye uzanıyordu. Silver'dan (1976) alınan hayvan siluetleri, boyut farklarını gerçeğe uygun bir şekilde yansıtmaktadır.

Atların üstünlüğü, ancak on yedinci ve on sekizinci yüzyıllarda daha güçlü hayvanlar yük hayvanlarının çoğunluğunu oluşturduğunda, bunlar çok daha yoğun bir tarımın bir parçası olarak çalışmaya başladıklarında belirginlik kazandı. Yol taşımacılığında atların avantajları daha önceden kabul edilmişti. İş atları enerji tedariki açısından büyük bir zorluk da yaratıyordu. Etkili koşum takımları ve at nallarıyla mümkün olan ağır işler için gerekli enerjinin, işe koşulan sığırlar için yeterli olan kaba yemden (ot ya da saman) daha iyi yemlerden alınması gerekiyordu. Güçlü iş atlarının konsantre yemlere, tahıllara ya da baklagillere ihtiyacı vardı. Buna bağlı olarak çiftçilerin hem ailelerini hem hayvanlarını geçindirmek için ekip biçmeyi yoğunlaştırmaları gerekiyordu; yoğun tarım nüfus yoğunluklarının hâlâ hayvan yemine ihtiyaç olmaksızın yoğun tarımı yaratacak kadar düşük olduğu bölgelerde doğdu.

Tarihte fiyatları görebildiğimiz verilerin bolluğu birkaç ülke için uzun vadeli üretim eğilimlerini yeniden kurgulamayı mümkün kılar (Abel 1962). Doğal olarak ciddi bölgesel farklılıklar bulunuyordu, ama geniş ölçekli döngüsel dalgalanmalar şaşmaz bir etkendi. Göreli bir refahın yaşadığı dönemler (en başta 1150-1300, on altıncı yüzyıl ve 1750-1800) sulak topraklar ve ormanların yoğun bir biçimde tarlaya dönüştürülmelerinin damgasını taşı-

yordu. Bu dönemlerde ayrıca ücra bölgeler sömürgeleştirilmiş, ekmek ve her yerde bulunan temel gıdalara ilaveten çok daha büyük bir çeşitlilik gösteren gıdalar ortaya çıkmıştı. Büyük ekonomik gerilemeler ve savaşların yaşandığı dönemler açlıklar, büyük nüfus kayıpları, tarlalar ve köylerin terk edilmesine neden olmuştu (Centre des Recherches Historiques 1965; Beresford ve Hurst 1971). On dördüncü yüzyılda salgınlar ve savaşlar büyük nüfus kayıplarına yol açmıştı. On beşinci yüzyılın ilk yirmi-otuz yılında Avrupa 1300'deki nüfusundan yaklaşık üçte bir daha az nüfusa sahipti, Almanya ise 1618 ile 1648 arasında köylülerinin beşte ikisini kaybetmişti.

Güvensizlik on sekizinci yüzyılın sonuna dek Avrupa köylü tarımında ısrarla varlığını sürdüren bir nitelik olmaya devam etti, köylülerin sefil hali on dokuzuncu yüzyılın ilk yirmi-otuz yılında Avrupa'nın daha zengin kısımlarında bile hâlâ belirgindi. 1823'te Fransa'yı gezen Cobbett (1824, 111) "elleriyle tezek dağıtan kadınlar" görünce hayrete kapılmış, Fransız tarlalarında kullanılan tarım aletlerinin "uzun yıllar önce, belki de bir asır önce İngiltere'de kullanılanların hemen hemen aynısı gibi görüldüğünü" belirtmişti. Ama bundan kısa bir süre sonra gayet yoğun bir tarım, sonunda Atlantik Avrupası'nın çok büyük bir bölümünde kural haline gelmişti.

Bu yoğun tarımın başlıca nitelikleri nadasın tedricen terk edilmesi ve birkaç standart ürünün dönüşümlü olarak ekilmek üzere benimsenmesiydi. Patates tarımı 1770 sonrasında yaygınlaştı, büyük baş hayvan üretimi yaygınlaştı ve daha ağır gübreler daha düzenli kullanılır oldu. On sekizinci yüzyılda Flander'da yıllık gübre, insan dışkısı, küspe ve kül uygulaması kolayca hektar başına ortalama 10 tonu buluyordu (Slicher van Bath 1963). Hollanda ekin verimliliğinde lider olarak yükseldi. 1800 civarında Hollanda çiftlikleri başlıca ürünleri olarak arpa, yulaf, çavdar, fasulye, bezelye, patates, kolza tohumu, yonca ve yeşil yemin yanı sıra başlıca yemeklik ürün olarak buğday yetiştiriyordu; tarım arazilerinin yüzde 10'undan azı nadastaydı, çiftlik hayvanı üretimiyle yakın bir bütünleşme söz konusuydu (Baars 1973).

Bir hektar Hollanda buğdayı yetiştirmek için gerekli çalışma saatleri Ortaçağ ya da Roma pratiklerine nazaran pek az değişmişti, güçlü atlar öküzlerin yerini aldığından iş yapılan saatler aslında gerilemişti, ama daha iyi kültür ekinleri ve yoğun gübreleme en yüksek buğday üretiminin Ortaçağ'dakinden dört kat daha fazla olmasını sağlamıştı. Bunun sonucunda on dokuzuncu yüzyıl başında Hollanda tarımının net enerji getirisi 160 kattan fazlaydı; Ortaçağ İngilteresi'nde buğday üretiminde 40 kattan az bir kaza-

Kutu 3.13

Avrupa'da buğday hasatlarının enerji maliyeti ve getirisi, 200-1800

	Buğday hasadının enerji maliyeti ve getirisi		
	İtalya, 200	İngiltere, 1200	Hollanda, 1800
Çalışma saati	177	158	167
Enerji maliyeti (MJ)	142	126	134
Tahıl getirisi (t/ha)	0,4	0,5	2,0
Gıda getirisi (GJ)	3,3	4,9	22,2
Net enerji getirisi	23	39	166
Hayvanların çalıştığı saatler	180	184	120

Kaynaklar: Hesaplamalar Seeböhm (1927), White (1970), Baars (1973), Stanhill (1976), Langdon (1986) ve Wrigley'deki (2006) bilgilere dayanmaktadır.

nım, MS 200 civarında İtalya'da Romalıların tahıl tarımında 25 kattan az bir kazanım söz konusuydu (Kutu 3.13).

Tarımın yoğunlaşması, on dokuzuncu yüzyıl başında aşırı üretimin neden olduğu bir bunalımı izleyen iyileşme sonrasında çoğu Avrupa ülkesinde devam etti. Almanya'dan iki örnek bu değişiklikleri gösterir (Abel 1962). 1800'de Alman tarlalarının yaklaşık dörtte biri nadasa bırakılmıştı, ama bu oran 1883'e gelindiğinde yüzde 10'dan azdı. Kişi başı yıllık ortalama et tüketimi 1820 öncesinde 20 kg'den azdı, ama yüzyıl sonuna gelindiğinde neredeyse 50 kg'yi bulmuştu. Daha önceki üç ekinli dönüşümlerin yerini dört ekinli diziler almıştı. Norfolk'ta popüler bir döngüde buğdayın ardından şalgam, arpa ve yonca ekiliyordu, altı ürünli dönüşümler de yaygınlaşıyordu. Toprağın aşırı asitlenmesini düzeltmek için kalsiyum sülfat, kireçli toprak ya da kireç uygulanması hali vakti daha iyi olan bölgelerde yaygınlaşıyordu.

Daha iyi tasarlanmış uygulamaların benimsenmesi de on dokuzuncu yüzyılda ivme kazandı, yük hayvanlarının sayılarının artması da buna eşlik ediyordu: 1815 ile 1913 arasında at, öküz ve eşeklerin (ata denk) toplam sayısı Britanya'da yüzde 15, Hollanda'da yüzde 27, Almanya'da yüzde 57 arttı (Kander ve Warde 2011). 1850'ye gelindiğinde, hızla yoğunlaşan tarım giderek artan kent nüfuslarına gıda tedarik edebildiğinden bütün önemli tarım bölgelerinde ürün getirileri artıyordu. Yüzyıllar süren dalgalanmalar sonrasında kıtanın en yoğun biçimde ekilip biçilen bölgelerinde nüfus yoğunlukları (Hollanda, Almanya, Fransa ve İngiltere'nin bazı bölgeleri) 1900'e

gelindiğinde ekilebilir arazilerde hektar başına 7-10 kişiye ulaştı. Bu düzeyler makineler ve kömürle üretilen gübreler sayesinde dolaylı olarak alınan hatırı sayılır enerji desteğini yansıtıyordu. On dokuzuncu yüzyıl sonunda Avrupa tarımı melez bir enerji sistemi haline geldi: Canlı asli iticilere hâlâ kritik düzeyde bağımlıydı, ama birçok fosil enerji girdisinden giderek daha fazla yarar sağlıyordu.

Kuzey Amerika

Devrim sonrası Amerikan tarımının tarihi, gayet yüksek ve hızlanan yenilik hızı nedeniyle dikkat çekicidir. Bu değişiklikler on dokuzuncu yüzyıl sonunda dünyanın emek açısından en verimli tarımının ortaya çıkmasıyla sonuçlandı (Ardrey 1894; Rogin 1931; Schlebecker 1975; Cochrane 1993; Hart 2004; Mundlak 2005). On sekizinci yüzyılın son yirmi-otuz yılında Kuzey Amerika'nın kuzeydoğu eyaletlerinde ekin yetiştirme Avrupa'daki ilerlemelerin gerisinde kaldı, bu durum güney eyaletlerinde daha da fazla gözleniyordu. Saban demirleri dövme demirden, saban kulakları gelişigüzel metal parçalarla kaplanmış ahşap pulluklar yüksek sürtünmeye, ağır tıkanıklığa ve boyunduruğa bağlanmış öküzlerin sıkılmasına yol açıyordu. Tohum atma elle, hasat orakla, dövme tırmıklayarak yapıyordu; ama güneyde ilkel bir uygulamayla hayvanlar ekinlerin üstünde yürütülüyordu.

Bütün bunlar yeni yüzyılda hızla değişti. Önce pulluk konusunda değişiklikler oldu (Ardrey 1894; Rogin 1931). Charles Neubold 1797'de dökme demir bir pulluk çıkardı, Jethro Wood'un patentleri (1814 ve 1819) bu pulluğun kendi içinde değiştirilebilir bir versiyonunu kullanışlı hale getirdi, 1830'ların başına gelindiğinde iyileştirilmiş dökme demir pulluklar yerlerini çelik pulluklara bırakmaya başladı. Bunların ilki testere ağzı çeliğinden 1833'te John Lane tarafından yapıldı, John Deere bu ürünü ticari hale getirdi; Deere'in dökme demirden saban kulağı için yaptığı orijinal (1843) reklamda, pürüzsüz hale getirilmiş bu metalin "her tür toprağı kazıp temizleyeceği, en kötü toprakta bile takılıp kalmayacağı" vaat ediliyordu (Magee 2005).

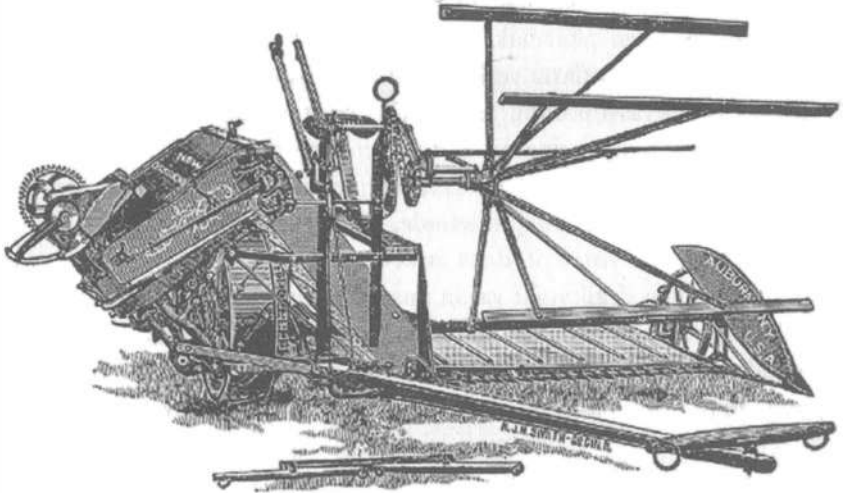
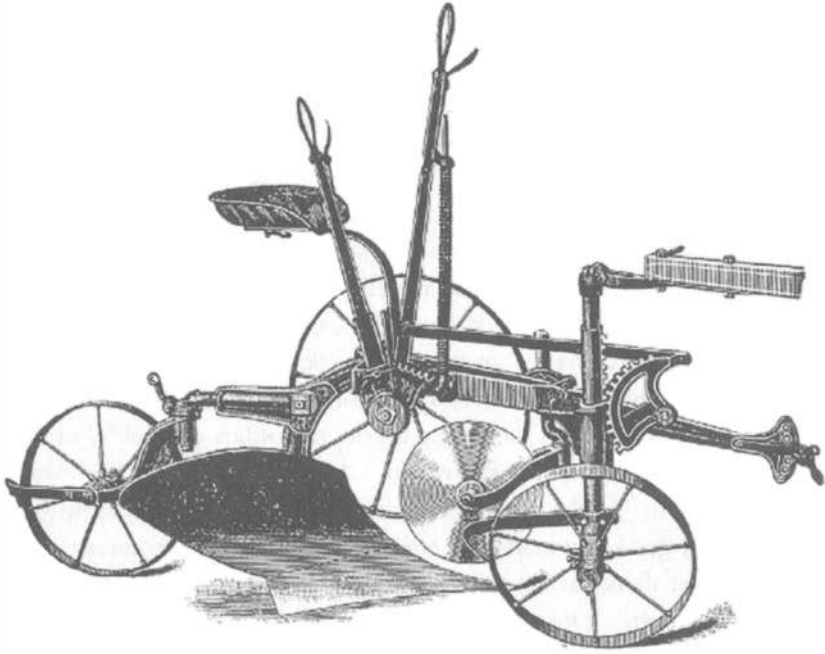
Bessemer'deki çelik ocaklarında ucuz çelik üretimi, saban kulaklarını kolayca bulunabilir kıldı: Lane 1868'de katmanlı çelik pulluğunu çıkardı. İki ve üç tekerlekli pulluklar da 1860'larda yaygınlaştı (Şekil 3.14). Bir düzine kadar atın çektiği, on tane saban demirinin bulunduğu toplu pulluklar kuzeydeki alçak eyaletlerde ve Kanada'nın otlak eyaletleri Manitoba, Saskatchewan ve

Alberta'da yeni tarım arazileri açmak için kullanılıyordu. Devasa, çelik kulaklı pulluklar ağır bir biçimde nemli otlu toprakların kesilmesini, Kuzey Amerika'daki geniş düzlüklerin tahıl üretimine açılmasını mümkün kılmıştı.

Pulluk konusundaki ilerlemelere başka yenilikler de eşlik etti. Tohum delgileri ve at gücüyle çalışan biçerdöverler 1850'ye gelindiğinde yaygın bir biçimde kullanılıyordu. İlk mekanik biçerdöverlerin patenti İngiltere'de 1799 ile 1822 arasında verildi, Amerikalı iki mucit, Cyrus McCormick ve Obed Hussey bu temel üzerine çıkarak 1830'lardan itibaren kitlesel üretim yapan pratik makineler geliştirmeye başladılar (Greeno 1912; Aldrich 2002). 1850'lerde yoğun bir biçimde satışa başladılar, İç Savaş'ın sonuna gelindiğinde bu makinelerin 250.000'i kullanımdaydı. İlk hasat makinesinin patenti 1858'de C. W. ve W. W. Marsh tarafından alındı, bu makine biçilmiş hasadın iki adam tarafından bağlanması gerektiriyordu, ilk başarılı ip düğümleyici de 1878'de John Appleby tarafından yapıldı.

Bu yenilik, istiflenmeye hazır, bağlanmış tahıl demetlerini boşaltan tam anlamıyla mekanik bir tahıl hasatçısı için ihtiyaç duyulan son bileşendi (Şekil 3.14). Bu makinelerin on dokuzuncu yüzyıl son bulmadan hızla yayılması, çoklu pullukla birlikte sadece Kuzey Amerika'da değil, Arjantin ve Avustralya'da da geniş otlak arazilerinin açılmasını mümkün kıldı. Ama demet bağlayan en iyi hasat makinesinin performansı çok geçmeden, 1880'lerde California'da Stockton Works'ün pazarladığı atla çekilen ilk kombine makinelerin piyasaya çıkmasıyla gölgede kaldı. Şirketin 1886 sonrasındaki standart kombinesi Houser makineleri 1900'e gelindiğinde California'daki buğdayın üçte ikisini kesiyor, eyalet tarlalarında 500'ü aşkın makine çalışıyordu (Cornways 2015).

En büyük makinelerin 40 ata ihtiyacı vardı ve 40 dakikadan kısa bir sürede bir hektar buğdayın hasadını yapabiliyorlardı; ne var ki hayvan gücüyle çalışan makinelerin sınırlarını zorluyorlardı, çünkü koşum takımlarının takılması ve 40 atın sürülmesi muazzam bir zorluktu. Ama atların kullanılması on dokuzuncu yüzyılda geleneksel Amerikan tarımında meydana gelen iş gücü değişikliğinin en iyi örneğidir. Yüzyıl başında bir tarlada çalışan bir çiftçiye (80 W) yaklaşık 800 W'lık bir hayvan gücü (iki öküz) eşlik ediyordu; yüzyıl sonuna gelindiğinde California'daki buğday tarlasında kombine makine çalıştıran bir çiftçinin elinde 18.000. W (30 atlık bir ekip) vardı, çiftçi enerji akışlarının denetçisi haline gelmiş, çiftlik işlerinin vazgeçilmez enerji kaynağı olmaktan çıkmıştı.



Şekil 3.14 Üç tekerlekli çelik pulluk (1880'lerde Illinois'de Moline'de Deere & Co. tarafından yapılmıştır) ve sicimli tahıl biçerdöveri (on dokuzuncu yüzyılın son yıllarında, New York'ta Auburn'da yapılmıştır). Bu iki yenilik Amerikan düzlüklerini geniş ölçekli tahıl tarımına açtı. Ardrey'den (1894) alınmıştır.

1800’de New England çiftçilerinin (elle tohum atıyor, öküzlerin çektiği ahşap pulluklar ve çalı tırmıkları, oraklar ve harman dövenler kullanıyorlardı) buğday hasadını üretmek için 150-170 saat çalışmaları gerekiyordu. 1900’e gelindiğinde California’da atların çektiği çoklu pulluklar, yaylı dişli tırmıklar ve kombine hasat makineleri dokuz saatten kısa bir sürede aynı hasadı üretebiliyordu (Kutu 3.14). 1800’de New England’lı çiftçiler bir kilogram buğday üretebilmek için yedi dakikadan fazlasına ihtiyaç duyuyordu, ama 1900’de California’da Central Valley’de bu iş yarım dakikadan kısa bir sürede tamamlanıyordu, emek verimi bir asırda kabaca 20 kat artmıştı.

Net enerji harcamaları açısından düşünüldüğünde bu farklar biraz daha büyüktü: Sonraki yüzyıllarla kıyaslandığında 1800’de işe harcanan saatlerin büyük bir bölümü daha ağır işlerle, pullukları çekmekle, oraklar, harman dövenleri kullanmakla geçiyordu, tohum atma ve depolama sırasındaki kayıplar hatırı sayılır düzeyde gerilemişti. 1800’le karşılaştırıldığında çiftlik işleri için gerek duyulan gıda enerjisi, 1900’de buğday hasadı olarak ortalama 25 kat daha fazla yenilebilir enerji üretiyordu. Doğal olarak bu büyük farklılıklar ancak kısmen daha iyi makinelerin sonucu olan daha yüksek verimlilikten kaynaklanıyordu. İnsan emeğinin enerji getirilerinin hızla artmasının ardındaki diğer önemli neden at gücünün insan kaslarının yerine geçmesiydi. Amerikalı mucitler çok geniş bir yelpazeye yayılan etkili uygulamalar ve makineler üretmişlerdi, ama tarımın başlıca itici güçleri olarak yük hayvanlarını devreden çıkarmakta ancak sınırlı ölçüde başarılı olmuşlardı.

Harman dövme atların yerlerini yavaş yavaş buharlı makinelere bıraktığı tek büyük operasyon oldu. Amerika’da hızla genişleyen tarımın giderek büyüyen at ve katır sürülerine dayanması gerekiyordu. Bunlar genellikle güçlü, büyük ve iyi beslenmiş hayvanlardı, enerji maliyetleri de şaşırtıcı derecede yüksekti. 1900’e gelindiğinde yemlerinde, 1800’de New England öküzlerinin ihtiyaç duyduğundan yüzde 50 daha fazla enerjiye ihtiyaç duyuyorlardı, sadece sap ya da saman değil yulaf ya da mısır da istiyorlardı. Bu yemlik tahılın üretilmesi insanlar için ekin üretimini azaltıyordu, bu maliyetleri gayet doğru bir biçimde sayıya dökmek de mümkündür (USDA 1959). Yirminci yüzyılın ilk yirmi yılında Amerika’daki atlar ve katırların sayısı 25 milyon civarında kaldı. Bunların bakımı ve çalışması için yem yetiştirmek, Amerika’da tarım yapılan arazilerin dörtte birini gerektiriyordu (Kutu 3.15). Böyle büyük bir gereksinim, ancak Amerika’nın büyük tarım arazilerine sahip olması nedeniyle

Kutu 3.14

Saat/hektar olarak emek gereksinimleri (insan/hayvan) ve Amerikan buğdayının enerji maliyeti, 1800-1900

İşler	1800	1850	1875	1900
Pullukla sürme				
Ahşap pulluk	20/40			
Dökme demir pulluk		15/30		
Çelik pulluk			8/24	
Çelik çok bıçaklı pulluk				3/30
Tırmıklama				
Fırça tırmık	7/14			
Dişli tırmık		5/10	5/15	1/4
Tohum ekme				
Tohum saçma	3/—			
Tohumeker		3/6	3/9	1/2
Hasat				
Orak	49/—			
Kalbur		25/—		
Biçerbağlar			11/6	
Kombine				3/17
Taşıma	10/10	8/8	5/5	2/10
Harman dövme				
Harman dövme	33/—			
Harman dövücüler		10/10	8/8	
Savurma	40/—			
Çalışma saatleri	162	66	40	9
Enerji maliyeti (MJ)	145	56	32	7
Brüt gıda enerjisi getirisi	129	335	586	2.680
Net gıda enerjisi getirisi	90	270	500	2.400
Emek verimliliği (dk/kg tahıl)	7,2	2,9	1,8	0,4

İlk örnek (1800) bütün işleri sayıları bir ile dört arasında değişen erkeklerle iki öküzün gerçekleştirdiği, New England'da sık rastlanan bir tarım biçimidir. İkinci dizide (1850) Ohio'da yüzyıl ortasında atların gücüyle gerçekleştirilen tarımda girdilerin izi sürülür. Üçüncü sütunda (1875) Illinois'de daha sonra kaydedilen ilerlemeler görülür, son sütunda (1900) ABD'de California'da at gücüyle gerçekleştirilen buğday tarımının en verimli biçimi değerlendirilir. Tablodaki rakamlar bir hektar arazide buğday yetiştirirken harcanan saatlerin toplamını (insanlar/hayvanlar) gösterir. Amerikan buğdayının getirisinde on dokuzuncu yüzyılda hiçbir yükselme eğilimi gözlenmediğinden, hektar başına 1.350 kg'lık sabit bir getiri olduğunu (18,75 GJ/ha) varsayıyorum. Değerlendirmeler büyük ölçüde Rogin'in derlediği performans rakamlarına dayanmaktadır (1931).

Kutu 3.15

Amerika'nın yük atlarının beslenmesi

1910'da Amerika'da 24,2 milyon çiftlik atı ve katırı bulunuyordu (sadece 1.000 tane küçük traktör vardı); 1918'de yük hayvanı sayısı 26,7 milyonla zirveye tırmandı, traktör sayısı da 85.000'e çıktı (USBC 1975). Çalışan hayvanların günlük ortalama ihtiyacı olan 4 kg tahıl ve geri kalan hayvanlar için 2 kg konsantre yemle (Bailey 1908), yıllık yem ihtiyacı kabaca 30 Mt yulaf ve mısırdı. Tahıl getirisi 1,5 t/ha olursa bu oranlar yemlik tahıl için en az 20 Mha arazinin ekilmesi gerektiği anlamına gelir. Kaba yem söz konusu olduğunda, çalışan atların günde yaklaşık 4 kg samana ihtiyacı oluyor, geri kalan hayvanlar günde 2,5 kg samanla idare edebiliyordu, bu da yılda kabaca toplam 30 Mt saman gerektiriyordu. Ortalama saman getirisi hektar başına yaklaşık 3 ton olursa, en az 10 Mha saman kaldırılır. At yemi üretimine vakfedilen arazinin de en az 30 Mha büyüklüğünde olması gerekiyordu, her yıl hasat yapılması gerekli arazi büyüklüğüyse 125 Mha civarındaydı, bu demektir ki Amerika'da çiftlik hayvanları (çalışan ve çalışmayan hayvanların tamamı) ülkede ekilip biçilen arazinin yüzde 25'ine ihtiyaç duyuyordu. USDA'nın hesaplaması da neredeyse buna yakın bir toplamla 29,1 Mha arazi gerektiğini ortaya koyar.

mümkündü. 1910'da ülkede kişi başına neredeyse 1,5 hektar düşüyordu, bu rakam 1990'dakinin iki katı, aynı tarihlerde Çin'deki oranın on katıydı.

On dokuzuncu yüzyılın son yıllarında Amerikan tarımını bu kadar verimli kılan şey sadece akıllı tasarımlar ile büyük miktarda beygir gücünün bir bileşimi değildi. 1880'lerde Amerika'da kömür tüketimi, odun tüketimini aşmış, ham petrol önem kazanmaya başlamıştı. Aletler, uygulamalar ve makinelerin üretimi ve dağılımı, tarım ürünlerinin nakliyatı kömür ve petrol girdisine bağımlı hale gelmişti. Amerikalı çiftçiler yenilenebilir güneş enerjisi akışlarının becerikli yöneticileri olmaktan çıkmıştı, ürünleri fosil yakıtlarla sübvansede ediliyordu.

GELENEKSEL TARIMIN SINIRLARI

Çin'in ilk birleşme döneminde (MÖ 221-207), Qin hanedanlığı yıllarındaki hayat ile Qing İmparatorluğu'nun (1644-1911) son yıllarındaki hayat arasında ya da Roma Galya Keltleri dönemindeki hayat ile devrim öncesi Fransa'daki hayat arasındaki muazzam sosyoekonomik tezatlar bize asli itkilerin değişmezliğini, temel ekip biçme pratiklerinin binlerce yıllık sanayi öncesi tarihte süreklilik gösterdiğini unutturur. Sadece insanlar ve hayvanların gayretile, organik atıkların geri dönüştürülmesiyle ve baklagillerin ekilmesiyle ayakta tutulan nüfuslar, hayvan gücünün daha verimli kullanılması sayesinde, ekme biçme pratiklerinin daha büyük bir yoğunluk kazanmasıyla artmıştı.

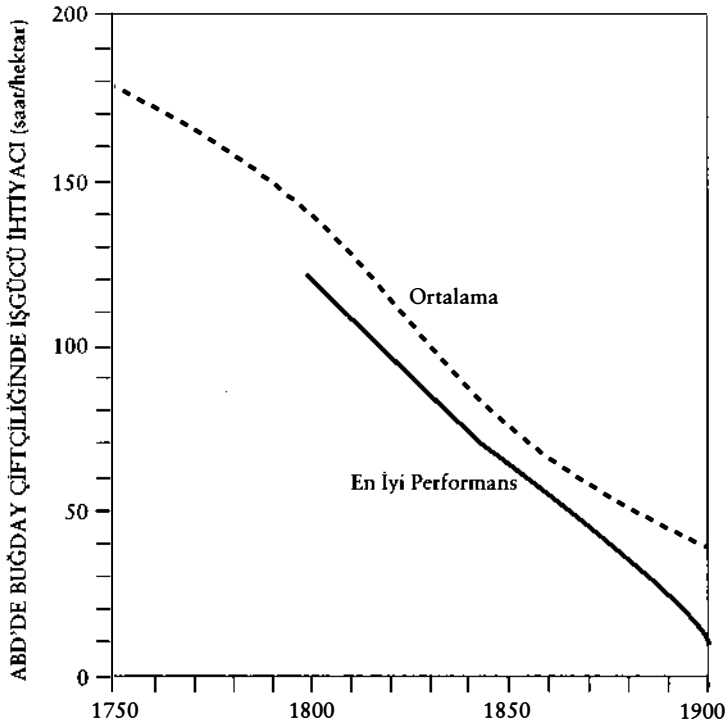
Kuzeybatı Avrupa, Japonya'nın orta bölgeleri, Çin'in sahil vilayetleri gibi son derece üretken bölgelerde, on dokuzuncu yüzyıl sonuna gelindiğinde üretim, azami mevcut enerji miktarları ve besin akışlarının dayattığı sınırlara yaklaşmıştı. Öte yandan sanayi öncesi tarımlar ortalama hasatta sadece çok sınırlı iyileşmeler sağlamıştı. Hasadın iyi olduğu yıllarda bile çoğu insan için temel geçimlik öğünden fazlasını sağlayamamış; kronik zafiyeti, tekrarlanan kıtlıkları engelleyememişti. Kalıcı, esnek ve uyarlanabilir olan üretken düzenlemeler aynı zamanda kırılğan, hassas ve artan ihtiyaçları karşılamaya yetersizdi.

Kazanımlar

Geleneksel tarımdaki ilerlemeler yavaştı, yeni yöntemlerin benimsenmesi eski pratiklerin genel olarak ortadan kaybolması anlamına gelmiyordu. Nadasa bırakılmış tarlalar, oraklar, verimsiz bir biçimde koşumlanan öküzler on dokuzuncu yüzyıl sonunda yıllık ekip biçmenin, tahıl hasat makinelerinin ve iyi at ekiplerinin gayet yaygın hale geldiği Avrupa'dan tümüyle silinip gitmiş değildi. Tarla işlerinin sadece hayvan gücünün enerjisiyle gerçekleştirildiği bir sistemde insan emeğini azaltmanın tek yolu yük hayvanlarının daha yaygın kullanılmasıydı. Bu değişiklik sadece daha iyi koşum takımlarını, yemlemeyi, besiciliği değil, insan emeğinin yerine geçecek özel işlere uygun tarla aletleri ve makinelerinin tasarımında da yenilikler yapmayı gerektiriyordu.

Bu ilerlemeler başta yavaş olsa da on sekizinci yüzyıl boyunca hızlandı. Buğday üretimiyle ilgili karşılaştırmalar herhalde bu ilerlemenin en iyi işaretidir. On dokuzuncu yüzyılın ilk yirmi-otuz yılında Avrupa ve Amerika'da bir hektar buğday yetiştirmek neredeyse 200 saat alıyordu, yani hemen hemen Ortaçağ'daki süre kadar. 1800'e gelindiğinde ABD'de bu ortalama 150 saatin altına, 1850'de 100 saatin altına düşmüştü. 1900'e gelindiğinde 40 saatten kısa bir süre gerekiyordu, en üretken pratikler (California'da çok başlı pullukla sürme ve kombine makine kullanımı) bu işi dokuz saatten kısa bir sürede gerçekleştiriyordu.

İnsan gücünün yerini yük hayvanlarının almasıyla geleneksel tarımın tedricen yoğunlaşması verimliliği artırdı, ama ortalama getiriye uzun bir süre boyunca ancak fark edilebilir düzeyde etkiledi. Mevcut bilgilerin azlığı ve yanlışlığı uzun vadeli bütün değerlendirmeleri zorlaştırıyor, ama durgunluk ve marjinal kazanımların hem Avrupa'da hem Asya'da kural olduğu açıktır. On dokuzuncu yüzyılın ilk yirmi-otuz yılına gelinceye dek elimizde güvenile-



Şekil 3.15 On dokuzuncu yüzyılda Amerika'da buğday tarımının verimliliğinin artırılması Rogin (1931) ve USDA'nın (1959) derlediği verilere dayanarak gayet doğru bir biçimde izlenebilir.

bilir ulusal ve bölgesel ortalamalar yoktur. Avrupa kaynaklarında daha eski tarihli rakamların çoğu ekilen tohumların kütleli olarak değil, genellikle hacimsel olarak görece getirisi şeklinde verilmiştir. Bu tohumlar bugünkü son derece kırma çeşitlerden daha küçük oldukları için, kütleli çevrilmeleri belirsiz sonuçlar doğurur. Ayrıca en iyi krallık ve eyalet kayıtlarında bile sıklıkla açıklara rastlanır, bu kayıtların hemen hemen hepsinde bir yıldan diğerine büyük dalgalanmalar gözlenir. Ortaçağ'da hava durumundaki aşırı rıkkalar üretimi bir sonraki ekime yetecek tohumu üretemeyecek kadar düşük bir seviyeye çekebiliyordu.

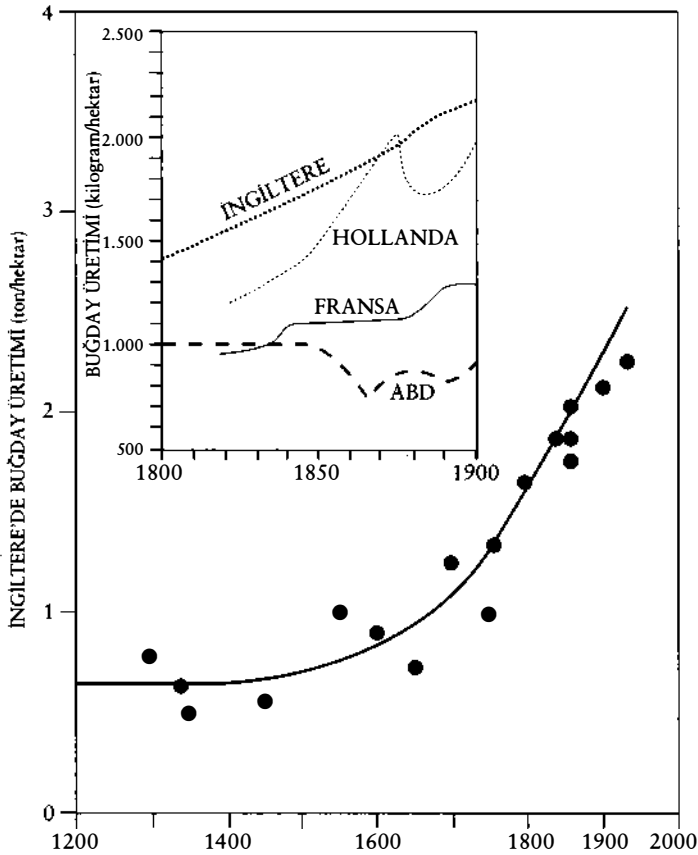
En iyi tahminler Ortaçağ'ın ilk yıllarında buğday için getirinin iki katına çıktığını göstermektedir. Geçen yedi yüzyıl içinde ulusal eğilimlerle ilgili en iyi uzun vadeli yeniden kurgu İngiltere örneğinde mevcuttur (Bennett 1935; Stanhill 1976; Clark 1991; Brunt 1999). On üçüncü yüzyılda İngiltere'de buğ-

day tohumlarının getirisi büyük ölçüde 3 ile 4 arasında değişiyordu, kayıtlı en üst seviye 5,8'di. Bu da hektar başına 500 kg'nin hemen üstünde bir ortalama anlamına gelir. Mevcut bütün İngilizce kanıtların titiz analizleri çok düşük olan bu üretimin ancak beş yüzyıl sonra iki katına çıkarıldığını göstermektedir. İngiltere'de buğday üretimi yaklaşık 1600'e kadar neredeyse Ortaçağ seviyesinde kalmış, ama bundan sonra sürekli bir yükseliş göstermiştir.

1500'de ülke çapında gözlenen ortalama buğday üretimi, büyük ölçüde kapsamlı arazi drenajının ve dönüşümlü ekimle, yoğun gübrelemenin yaygın olarak benimsenmesi sonucu 1800 öncesinde iki katına, 1900'e gelindiğinde üç katına çıkmıştı (Şekil 3.16). 1900'e gelindiğinde İngiliz tarımı iyileştirilmiş makinelerden büyük yararlar sağlamaya başlayalı çok olmuştu, kömür yakmanın artmasıyla beslenen ülke ekonomisinin kaydettiği hızlı ilerlemelerden daha da büyük yararlar sağlanmıştı. Bu fosil enerji katkılarının etkisi Hollanda üretiminde de açıkça seçilebilir; oysa tersine Fransa'da buğday üretimi on dokuzuncu yüzyılda bile ancak ılımlı bir yükselme eğilimi gösteriyordu, ayrıca Amerika'da verimli, ama geniş arazilerde yapılan buğday üretiminde aslında bir gerileme olmuştu (Şekil 3.16). Mevcut en iyi üretim ortalamaları kullanıldığında Ortaçağ'da bir saatlik emekle en fazla 3-4 kg. tahıl üretiyordu. 1800'e gelindiğinde ortalama oranlar 10 kg. civarındaydı. Bundan bir asır sonra bu rakam 40 kg'ye yaklaşmıştı, en iyi performanslarda 100 kg.'nin çok üstündeydi.

Enerji getirileri biraz daha hızlı artmıştı, on dokuzuncu yüzyıl sonunda ortalama bir saatlik bir tarla işi Ortaçağ'daki tipik çalışmadan daha az bir fiziksel gayret gerektiriyordu: Ortaçağ'da öküzlerin çektiği ahşap, ağır bir kullaklı pullukla, elle yapılan çift sürme, güçlü atların çektiği çelik bir pulluğun sürülmesinden daha büyük bir çaba gerektiriyordu. Roma'nın son, Ortaçağ'ın ilk dönemlerinde buğdayın baştan sona yetişmesi süreci, son hasatta yaklaşık 40 kat daha fazla net enerji kazanımı ağılıyordu. On dokuzuncu yüzyıl başlarında Batı Avrupa'daki iyi hasatlar, buğday örneğinde onun üretimine harcanandan 200 kat daha fazla enerji getiriyordu. Yüzyıl sonuna gelindiğinde bu oran genellikle 500 katın, en iyi getiriler de 2.500 katın üstüne çıkmıştı.

Net enerji kazanımları (tohum gereksinimleri ve depolama kayıpları çıkarıldıktan sonra) kesinlikle daha düşüktü, Ortaçağ'da yapılan olağan bir hasatta kazanım 25 kattan fazla değildi, on dokuzuncu yüzyıl başında 80-120, sonunda genelde 400-500 kat düzeyindeydi. Ama emek verimliliklerindeki bu artış, hayvan gücünün giderek daha fazla kullanılmasının, dolayısıyla hayvan besiciliğine ciddi bir enerji yatırımı yapılmasının bir sonucuydu.



Şekil 3.16 İngiltere'de buğday üretiminde, uzun süren bir durgunluk döneminin ardından 1600 sonrasında sürekli bir yükseliş gözleniyor. On dokuzuncu yüzyılda Hollanda'da çok daha etkileyici bir üretim artışı olmuş, ama Fransa'da daha az bir artış gözlenmiştir. Amerika Birleşik Devletleri'nde ise buğday çiftçiliğinin daha kuru iç bölgelere, batıya doğru genişlemesi ortalama üretimin düşmesine yol açmıştır. Tablo USDA (1955), USBC (1975), Stanhill (1976), Clark (1991), ve Palgrave Macmillan (2013) verileriyle hazırlanmıştır.

Roma örneğinde insan emeğinden elde edilen her bir birim yararlı güce sekiz birim hayvan emeği ekleniyordu. On dokuzuncu yüzyıl başında Avrupa'da tipik insan gücü / hayvan gücü oranı yaklaşık 1:15'e yükselmışti, ama en üretken Amerikan çiftliklerinde bu oran 1890'larda 1:100'ün epey üstünde olmuştu. İnsan emeği ihmal edilebilir bir mekanik enerji kaynağı haline gelmişti, çiftçilerin yaptığı işin değeri büyük ölçüde idare ve kontrole, düşük güç gerektiren, ama getirisi yüksek işlere kaymıştı.

Hayvan gücünün enerji maliyeti daha da hızlı yükseliyordu. Kaba yemle beslenen bir çift Roma öküzü tarla işlerini gerçekleştirmek için tahıla ihtiyaç duymuyordu, dolayısıyla da öküz kullanımı çiftçinin olası tahıl tedarikini azaltmıyordu. Avrupa'da on dokuzuncu yüzyıl başında orta büyüklükte bir çift at yılda 2 ton yemlik tahıl tüketiyordu, bu kişi başına tüketilen toplam yemlik tahılın yaklaşık dokuz katı kadardı. 1890'larda bir düzine güçlü Amerikan atının yılda 18 ton yulaf ve mısıra ihtiyacı oluyordu, bu da sahiplerinin gıda olarak tükettiği toplam tahılın yaklaşık 80 katıydı. Toprak bakımından zengin sadece birkaç ülke bu kadar fazla yem üretebiliyordu. 12 at beslemek yaklaşık 15 hektarlık bir tarım arazisi gerektiriyordu. 1900'de ABD'de ortalama bir çiftliğin hemen hemen 60 hektar arazisi vardı, ama bunun sadece üçte biri ekilip biçiliyordu. Açıktır ki ABD'de bile sadece büyük tahıl üreticileri bir düzine ya da daha fazla sayıda çalışan hayvan besleyebiliyordu; 1900 ortalama çiftlik başına sadece üç attı (USBC 1975).

Bütün geleneksel toplumlar tarımlarını, daha yüksek hayvan emeği girdilerine dayanarak artırabilmiş değildir. Sınırlı miktarda ekilebilir arazide daha ayrıntılı ekip biçme yöntemlerine dayalı üretim yoğunlaşması, pirinç yetiştiren Asya'da norm haline gelmişti. Bu gelişmenin en dikkat çekici örnekleri Japonya, Çin'in bazı bölgeleri, Vietnam ve Endonezya takımadalarında nüfus yerleşiminin en yoğun olduğu Java adasıdır. Geertz'in (1963) gayet yerinde bir tabirle tarımsal içe bükülme dediği bu yaklaşım, sulanan pirincin yüksek ürün potansiyeline ve sulama sistemlerinin, sulak tarlaların, terasların inşası ve bakımına yıllarca, yüzyıllarca büyük enerji yatırımları yapılmasına dayanıyordu.

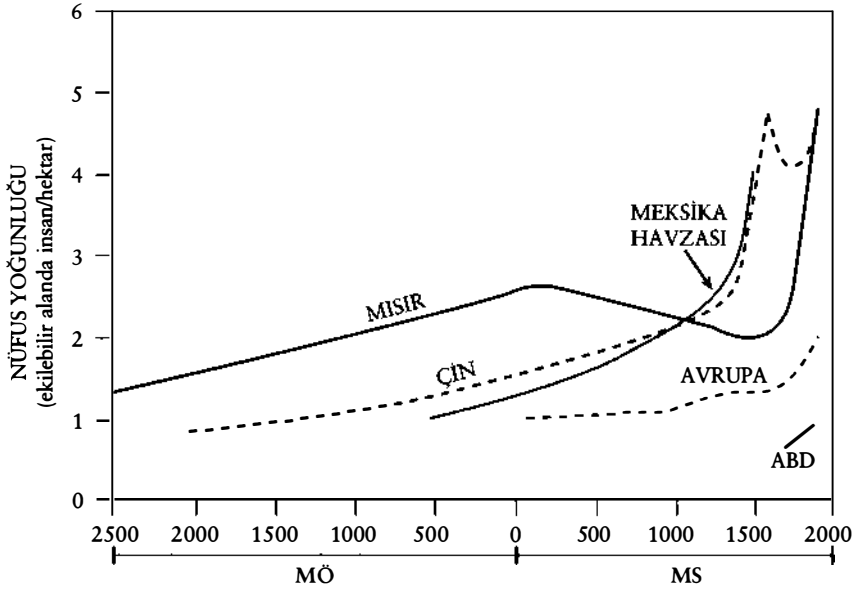
Kuru toprak tarımında üretimin yoğunlaşması kolayca çevrenin bozulmasına (her şeyden de önce toprakta erozyona ve besin kaybına) yol açabilirse de çeltik yetiştirilen agro-ekosistemler çok daha esnektir. Bu ürünün zahmetli yetiştirme süreci muazzam bir insan emeğini yutar. Bu süreç tarlaların titizlikle düzenlenmesiyle, fidelerin fideliklerde filizlendirilmesiyle başlar ve titiz aralıklarla ekim, zararlı otların elle ayıklanması, bitkilerin tek tek dikilmesi gibi mikroyönetim teknikleri içerir. Bu içe bükülme eğilimi bir kere kurulduğunda kırılması zordur. Bu süreç giderek yükselen nüfus yoğunluklarını destekler, ama nihayetinde aşırı yoksullaşmaya neden olur. Daha geniş nüfuslar giderek marjinal beslenme biçimlerine dayanmaya başladığından, emek verimliliği önce durgunlaşır, sonra gerilemeye başlar. Çin'in birçok bölgesinde Ming ve Qing hanedanlıkları döneminde tarımsal içe bükülmenin açık işaretleri gözleniyordu.

Yirminci yüzyılın ilk yarısındaki çatışmaların ardından, komünal tarımda kitlesel kırsal emeğe dayalı Maocu politikalar 1970'lerin sonuna dek bu içe bükülmeyi devam ettirdi. O tarihlerde 800 milyon köylü hâlâ Çin'in toplam nüfusunun yüzde 80'ini temsil ediyor, daha eşit bir biçimde dağıtılmış olsa da pek yeterli olmayan istihkakla geçinip gidiyordu. Bu eğilim ancak Deng Xiaoping'in 1980'lerin başında komünleri lağvedip, tarımı özelleştirmesiyle kökten tersine çevrildi. Asya'da pirinç yetiştiren birkaç ülke daha bu içe bükülme sarmalını 1950'den sonra bile devam ettirdi. Ama tersine Japonya 1868'de Meiji Restorasyonu ile bu eğilimi kırdı. 1870'lerin başı ile 1940'lar arasında Japonya'nın toplam nüfusu 2,2 kat arttı. Ortalama pirinç üretiminde gözlenen artışlar da bu orana denkti, kırsal nüfussa yarı yarıya azaldı, toplam nüfusun sadece yüzde 40'ına indi (Taeuber 1958).

Aralarındaki temel farklılıklara rağmen (biri insan emeğinin yerini hayvan gücünün almasına, diğeri köylü emeği girdilerinin azami seviyeye çekilmesine dayalı) bu iki büyük tarımsal yoğunlaşma örüntüsü tarımsal üretimi aynı yönde, nüfus yoğunluklarının yavaş yavaş artması yönünde itti. Bu süreç nüfusun giderek daha büyük bir bölümünün tarım dışı işlerle uğraşmak üzere serbest kalması açısından temel önemdedir; mesleki uzmanlaşmaya, yerleşimlerin büyümesine, kent medeniyetlerinin doğmasına ve karmaşıklıklarının artmasına neden olan bir eğilimdir bu.

Bu değişiklikler ancak yaklaşık olarak yeniden kurgulanabilir. Geçmişteki toplam nüfuslar, nispeten kapsamlı nüfus sayımlarının uzun süredir gelenek haline geldiği toplumlarda bile kesinlikten son derece uzaktır (Whitmore vd. 1990). Ama ekilebilir araziler hakkında güvenilebilir veriler bulmak, ekilebilir arazilerin ne kadarının yıllık ya da daimi ekinlere ayrıldığıyla ilgili bilgilere ulaşmak çok daha zordur. Buna bağlı olarak nüfus yoğunluklarıyla ilgili güvenilir eğilimler sunmak imkânsızdır. Güvenle yapabileceğimiz şey, erken tarımların asgari niteliklerini, daha sonraki yıllara ait (yazılı kayıtlardan alınmış) birkaç tipik performansla, sonra da en yoğun sanayi öncesi tarım biçimlerinin en büyük başarılarıyla karşılaştırmaktır (bunlar modern araştırmalarda gayet iyi belgelenmiştir).

Bütün kadim medeniyetler için ortalama nüfus yoğunluğu oranları, ekilebilir bir hektar arazi için 1 kişi ile başlıyormuş gibi görünmektedir. Ancak yüzyıllar sonra yavaş ilerlemelerle bu oran iki katına çıkmıştır. Mısır'da bu artış yaklaşık 2.000 yıl sürmüştür, öyle görünüyor ki hem Çin'de hem Avrupa'da aynı miktarda süre gerekmiştir (Şekil 3.17). 1900'e gelindiğinde



Şekil 3.17 Mısır, Çin, Meksika havzası ve Avrupa'da uzun vadede ekili hektar başına gözlenen yaklaşık nüfus yoğunluğu eğilimleri, MÖ 2500-MS 1900. Hesaplamalar Perkins (1969), Mitchell (1975), Butzer (1976), Waterbury (1979), Richards (1990), ve Whitmore ile çalışma arkadaşlarının (1990) çalışmalarında yer alan tahmin ve verilere dayanmaktadır.

en iyi ulusal ortalamalar bir hektarlık ekili arazi başına 5 kişi civarındaydı, en iyi bölgesel başarılar da bu seviyenin iki katına tırmanarak zirveye ulaşıyordu (Yirminci yüzyılda daha hızlı bir ilerleme kaydetmişlerdi: 2000'e gelindiğinde Mısır'da bu oran ekili hektar başına 25 kişi, Çin'de 12, Avrupa'da 3 kişiydi). Ama nüfus yoğunluklarının karşılaştırılmasında beslenme biçimlerinin besin yeterliliği ve çeşitliliği de dikkate alınmalıdır.

Beslenme

Sanayi öncesi toplumların nüfus yoğunluklarını veren rakamlar tipik beslenme biçimlerinin yeterliliği ve kalitesi hakkında pek az şey açıklar. Geleneksel bir toplumun ortalama gıda gereksinimlerinin hesaplanması, makul bir kesinlik olmaksızın yapılamaz: Kayıp bilgiyi doldurmak için çok fazla varsayımda bulunmak gerekir. Üretim tahminlerinin varsayım toplamalarına dayanması gerekir, fiili tüketim de yüksek, son derece değişken hasat sonrası kayıplarından etkilenir. Belgesel ve antropometrik kanıtlara dayalı yegâne kabul edilebilir genelleme herhalde, binlerce yıllık geleneksel tarım

boyunca kişi başı gıda tedarîği konusunda yukarı doğru açık bir eğilim gözlenmediğidir. Bazı erken tarım toplumları bazı yönlerden seleflerine nazaran nispeten daha iyi durumdalardı, en azından daha kötü durumda değillerdi. Örneğin Ellison'un (1981) antik Mezopotamya'da erzak listelerine ilişkin yeniden kurgusunda MÖ 3000 ile 2400 arasındaki günlük enerji tedarîğinin yirminci yüzyıl başında aynı bölgedeki ortalamanın yaklaşık yüzde 20 üstünde olduğu görülür.

Han hanedanı kayıtlarına dayalı hesaplamalar, MÖ dördüncü yüzyılda Wei eyaletinde tipik bir köylünün beş kişilik ailesinin her bir mensubuna günde yaklaşık yarım kilogram tahıl temin etmesinin beklendiğini gösterir (Yates 1990). Bu toplam 1950'lerde, pompalı sulama ve sentetik gübrelerin kullanılması öncesinde Kuzey Çin'deki ortalamaya benzer (Smil 1981a). Erken modern Avrupa'yla ilgili daha güvenilir rakamlar da gıda temini açısından ayrıcalıklı şehirlerde bile temel gıda tüketiminde bazı dikkat çekici gerilemeler olduğunu ortaya koyar. Örneğin Roma şehrinde kişi başına yıllık tahıl tedarîki on altıncı yüzyıl sonunda 290 kiloyken 1700'e gelindiğinde 200'e düşmüştür, et tüketimi imkanının kişi başına ortalaması da 40 kg'den yaklaşık 30 kg'ye gerilemiştir (Revel 1979).

Çoğu örnekte daha yakın tarihli beslenme biçimlerinin daha az çeşitlilik gösterdiği de gözlenir. Bu diyetler daha önceleri yaban hayvanları, kuşlar ve su türlerinin daha fazla tüketilmesine karşın, daha az hayvansal protein içeriyordu. Bu niteliksel gerilemenin ardındaki neden temel gıdaların daha eşit bir biçimde temin edilebilir olması değildir: tüketim konusunda hem bölgesel hem sosyoekonomik eşitsizlikler on sekizinci yüzyıl sonuna gelindiğinde yaygındı, on dokuzuncu yüzyıla dek de ısrarla varlıklarını sürdürdü. Bütün geleneksel tarım toplumlarında geniş kesimlerin, hatta tekrar tekrar karşılaştığımız üzere çoğunlukların sağlıklı ve zinde bir hayat için gerekli düzeyin altında kalan gıda miktarıyla yaşaması gerekmiştir.

Frederick Morton Eden İngiliz yoksullarının durumuyla ilgili 1797 tarihli araştırmasında ülkenin daha zengin güney bölgelerinde bile temel gıdaların sadece ekmek ve peynir olduğunu yazmış, Leicestershireli bir işçinin evini şöyle betimlemiştir:

...tereyağı ender bulunur, zaman zaman pazar günleri biraz peynir, bazen de et olur... Ancak ekmek ailenin baş desteği olsa da şimdilik yeterince yok, çocukları da neredeyse çıplak ve yarı aç (Eden 1797, 227).

Yoksul İngiliz ve Gal kırsal kesim işçilerinin gıda alımlarının yeniden kurgulanması, 1787 ile 1796 arasında yılda ortalama sadece 8,3 kg et yediklerini gösterir (Clark, Huberman ve Lindert 1995); İngiliz nüfusunun daha yoksul kesiminin et tüketimi 1860'lara gelindiğinde 10 kg'nın pek üstüne çıkamamıştı (Fogel 1991). Doğu Prusya'da kırsal nüfusun üçte biri 1847 gibi geç bir tarihte yeterince ekmek temin edemiyordu (Abel 1962).

Epey müreffeh dönemlerde bile tipik beslenme biçimleri (toplam enerji ve temel besinler açısından yeterli besinden fazlasını sağlayan öğünler) son derece tekdüze ve damağa pek uygun değildi. Avrupa'nın geniş kesimlerinde ekmek (çoğunlukla kara ekmek, kuzey bölgelerde pek az buğday unu kullanılırdı ya da hiç kullanılmazdı), kaba tahıllar (yulaf, arpa, kara buğday) şalgam, lahana ve daha sonra patates her gün tüketilen temel yiyeceklerdi. Bunlar genellikle sulu çorbalarda ve haşlamalarda bir arada pişirilirdi, akşam yemeklerinin kahvaltı ve öğle yemeklerinden pek farkı yoktu. Asya'nın kırsal kesimlerinde tipik öğünlerde herhangi bir fark görülüyorsa, o da az sayıda tahılın bu öğünlere hakim olmasıydı. Modern öncesi Çin'de darı, buğday, pirinç ve mısır bütün gıda enerjisinin beşte dördünden fazlasını temin ediyordu. Hindistan'da da durum neredeyse benzerdi.

Mevsimine göre bol bulunan sebzeler ve meyveler bu tekdüzeliği canlandırıyor. Asya'da gözde sebzeler arasında lahana, turp, soğan, sarımsak, zencefil ve ayva, şeftali ve portakal yer alıyordu. Lahanalar ve soğanlar da turplar ve havuçların yanı sıra Avrupa'daki başlıca yiyecekler arasındaydı. Mezoamerika'daki en önemli türler domates, şayot kabağı, kırmızı biber, papaya ve avokadoydu. Asya'da kırsal kesimde tipik öğünler ağırlıklı olarak vejetaryendi, köpekler bir tarafa evcilleştirilmiş büyük hayvanların bulunmadığı Mezoamerikan toplumlardaki öğünler de öyleydi. Ama Avrupa'nın bazı bölgelerinde müreffeh dönemlerde et tüketimi nispeten yüksekti. Yine de tipik öğünlerde et ancak zaman zaman, az az tüketiliyordu. Hayvansal proteinler büyük ölçüde süt ürünleriyle alınıyordu. Rostolar, şişler, bira, kekler ve şarap sadece dinsel bayramlar, düğünler ya da lonca ziyafetleri gibi törensel toplantılarda yaygındı (Smil 2013d).

Gündelik öğünler yeterince enerji ve protein verseler bile sık sık vitamin ve mineral eksikliği gözlenebiliyordu. Çok ürün veren arpanın temel gıda olduğu Mezopotamya öğünleri A ve C vitaminleri açısından yetersizdi; antik yazıtlarda körlük ve iskorbüt tarzı hastalıklara atıflarda bulunulur (Ellison 1981). Sonraki bin yıllarda bu iki eksiklik tropikal bölge dışı çoğu top-

lumda yaygın olarak görülmüştür. Çok düşük düzeyde et alımı yeşil yapraklı sebzelerin nadiren yendiği yerlerde kronik demir eksikliğine neden oluyordu. Pirincin baskın olduğu öğünlerde, özellikle çocukların büyümesini etkileyen kalsiyum eksikliği çok fazla oluyordu: güney Çin’de et alımı ortalaması gündelik tavsiye edilen miktarın yarısından azdı (Buck 1937). Tekdüze ve yetersiz öğünler, kötü beslenmenin yaygınlığı bugün nüfus yoğunluklarının, en yoğun geleneksel tarımla bile sürdürülebilir olan sınırları aştığı birçok yoksul ülkede kuraldır.

Sınırlar

Ürün getirileri ve emek verimlerindeki yavaş ilerlemelere rağmen geleneksel tarım muazzam bir evrimsel başarıdır. Yüksek nüfus yoğunluklarının daimi ekip biçmeyle desteklenmesi söz konusu olmasaydı hiçbir karmaşık kültür olmazdı. Sıradan temel tahıl hasadı, ortalama olarak bakıldığında, yer değiştiren çiftçilerin bulunduğu aynı bölgede on kat daha fazla sayıda insanı besleyebiliyordu. Fakat geleneksel tarımla erişilebilir nüfus yoğunluklarının açık sınırları vardı. Ayrıca ortalama gıda temini varoluşu mümkün kılan asgari seviyenin nadiren üstüne çıkıyordu, mevsimsel açlıklar, tekrarlanan kıtlıklar nüfus yoğunluklarının düşük olduğu, iyi toprakların, nispeten iyi tarım tekniklerinin bulunduğu toplumları bile zayıflatmıştı.

Enerji tedariki hayvan gücünün insan emeğinin yerini alması sürecinde yaşanan en yaygın sınırdı. Çalışan hayvanların ihtiyaç duyduğu konsantre yemlerin üretiminin, yeterli yemeklik tahıl hasadını tehlikeye atmasına izin verilmesi mümkün değildi. Olağandışı yem üretimi kapasitesine sahip toprak açısından zengin tarımlarda bile, hayvan gücünün insan gücünün yerini alması eğilimi Amerika’da on dokuzuncu yüzyıl sonunda elde edilen kazanımların ötesinde pek devam edememişti. Ağır çoklu pulluklar ve combine makineler hayvanların güdümündeki ekip biçmeyi pratik sınırlarına taşımıştı. Nispeten kısa dönemli tarla işleri için kullanılan çok sayıda hayvanı besleme yükünün yanı sıra hayvanların ağıllarda bakımına, temizlenmesine ve nallanmasına çok fazla emek harcanıyordu. Çok daha güçlü bir asli itici güce ihtiyaç duyulduğu açıktı, bu da çok geçmeden içten yanmalı motorlar biçiminde ortaya çıktı.

İnsan emeğinin tedricen azalan kişi başı getirileriyle geçinme becerisi, tarımsal içe bükülme yaşayan toplumlarda nüfus yoğunluğunun sınırlarını belirledi. İnsan emeğinin kazanımları nihayetinde asgari düzeyde azot geri

dönüşümü imkanlarıyla sınırlanıyordu. Geleneksel azot kaynaklarının en yoğun biçimde uygulanması (organik atıkların geri dönüşümü ve yeşil gübre ekimi) ekilen topraklarda hektar başına 12-15 kişiyi yaşatacak kadar besin sağlıyordu. Gübre üretimi, hayvan yemlerinin bulunabilirliğiyle belirlenen sınırın ötesinde artırılmıyordu. Yoğun olarak ekilip biçilen alanlarda gübreler sadece ekinlerden ve gıda işleme sonucu ortaya çıkan artıklardan elde ediliyordu. Ayrıca ağır gübreleme ve insan atıklarının kullanılması, organik maddenin toplanması, taşınması ve dağıtılması için yapılması gereken zahmetli, tekrarlanan işler nedeniyle hayli yorucuydu.

Genel olarak ulaşılabilir yegâne etkili seçenek, gübreleme gerektiren ekinleri baklagillerle dönüşümlü olarak ekip biçmektir. Ne var ki bu da sınırlı bir çözümdür. Baklagillerin sık sık ekilmesi yüksek toprak verimliliğini koruyabilirdi, ama yıllık ortalama temel tahıl üretimini kaçınılmaz olarak azaltırdı. Baklagiller büyük ölçüde dışarıdan azot tedarik edilmeksizin yetiştirilebilirdi, ama bu iki gıda sınıfı ancak içerdikleri brüt gıda enerjisi açısından birbirlerinin yerini alabilirdi. Bakliyatla yüksek miktarda protein bulunuyordu, ama bunların sindirimi zor, sıklıkla da lezzetleri azdı. Ayrıca ekmek yapımında ya da birkaç istisna dışında erişte yapımında kullanılamıyorlardı. Şaşmaz bir biçimde şuna tanık oluruz: Toplumlar zenginleşir zenginleşmez, beslenmelerinde görülen en dikkat çekici değişikliklerden biri baklagil tüketimlerinin azalmasıdır.

Tarihsel dönemleri, doğal ortamları ya da baskın ekip biçme ve yoğunlaşma yöntemleri ne olursa olsun, hiçbir tarım toplumu yaygın kötü beslenmeyi ortadan kaldırmaya yetecek düzeyde yiyeceği sürekli olarak üretememiştir. Bütün toplumlar büyük kıtlıklara karşı hassastır, ekip biçmeyle en yoğun olarak uğraşan toplumlar bile tekrar tekrar yaşanan felaketlerden etkilenmiştir, kıtlıklar ve seller en yaygın doğal tetikleyiciler olmuştur. Çin'de 1920'lerde köylüler ömürleri boyunca açlığa, kıtlığa neden olacak kadar ciddi üç ürün yetiştirme felaketi yaşadıklarını hatırlıyorlardı (Buck 1937).

Bu açlıklar ortalama on ay kadar sürmüş, etkilenen nüfusun dörtte birini ağaç kabuğu ve ot yemek zorunda bırakmıştı. İnsanların neredeyse yedide biri köylerini terk edip yiyecek aramaya çıkmıştı. Çoğu Asya ve Afrika toplumunda benzer bir örüntüye rastlanabilir. Bazı kıtlıklar o kadar istisnai düzeyde yıkıcı olmuştur ki kuşaklar boyunca toplumsal hafızada kalmış, büyük sosyal, ekonomik ve tarımsal değişikliklere yol açmıştır. Bu gibi olayların dikkat çekici örnekleri Meksika havzasında mısır hasatlarının

1450 ile 1454 arasında donma ve kıtlık nedeniyle kaldırılamaması (Davies 1987), 1845 ile 1852 arasında İrlanda'da patates üretiminin *Phytophthora* hastalığı nedeniyle çökmesi (Donnelly 2005) ve 1876-1879'da Hindistan'da kıtlık nedeniyle yaşanan büyük açlıktır (Seavoy 1986; Davis 2001).

Sanayi öncesi toplumlar kendilerini bu tür büyük gıda kıtlıklarının tekrarlanmasından neden daha iyi bir biçimde koruyamıyorlardı? Ya ekilip biçilen arazileri genişleterek ya ekip biçmeyi yoğunlaştırarak ya da her ikisini birden yaparak bunu başarabilirlerdi, sürekli de yapmaya çalışmışlardı. Ama örneklerin ezici çoğunluğunda bu adımlar gönülsüzce atılmış, genel olarak da o kadar uzun süre ertelenmiştir ki doğal felaketler tekrar tekrar büyük açlıklara neden olmuştur. Ekip biçmenin hem yaygınlaştırılması hem yoğunlaştırılması daha yüksek bir enerji yatırımı gerektiriyordu. Çok sayıda yük hayvanına gücü yeten toplumlarda bile bu ilave enerji girdisinin büyük bir bölümü insan emeğinin daha uzun saatler boyunca, daha sıkı bir çalışmayla sarf edilmesinden geliyordu.

Ayrıca yoğunlaştırılmış gıda üretiminin fayda/maliyet oranı o kadar yoğun olmayan öncüllerine nazaran sıklıkla daha düşüktü. Tahmin edileceği gibi, geleneksel tarımcılar bu daha büyük emek yükünü ertelemeye, görelî getirileri azaltmaya çalışmışlardır. Geleneksel tarımcılar ekip biçmeyi, ancak tedricen artan nüfusların temel ihtiyaçlarını karşılamak zorunda kaldıklarında genişletmiş ya da yoğunlaştırmıştır. Gönülsüzce gerçekleştirilen bu genişleme ve yoğunlaşma daha büyük nüfuslara ciddi bir destek sunabiliyordu, ama kişi başına düşen gıda temini imkanları ve ortalama öğünlerin niteliği yüzyıllar, hatta binyıllar sonrasına nazaran pek değişmemiştir.

Daha az enerji yoğun tarımsal pratiklerin büyük bir ısrarla varlığını sürdürmesi de genişleme ve yoğunlaşma konusundaki bu gönülsüzlüğü tekrar tekrar ortaya koymuştur. Yer değiştirerek ekip biçmeden daimi tarıma geçiş dönemi çok uzun sürmüştür, köylüler tarımı yeni bölgelere yaymaya ya da ekimlerini yoğunlaştırmaya gönülsüz olmuştur. Tedrici nüfus artışları yerel ya da bölgesel üretimle ayakta tutulamadığında, mevcut arazide ekip biçmeyi yoğunlaştırmak yerine ekilen arazinin genişletilmesi gibi bir çözüm yolu benimseniyordu. Buna bağlı olarak kapsamlı ve uzun süreli nadasa bırakma yerine yıllık ekip biçmenin uygulanması yüzyıllar, hatta birkaç bin yıl almıştır.

Gönülsüzce atılmış bu adımların her birini gösteren bu tarihsel örnekler bitip tükenmez. Ormanlık ortamlarda değişik yerlere ekim yapılması temel geçimlik ve orta düzeyde maddi varlık sağlıyordu, ama birçok toplum-

da daimi çiftçilerle kuşaklar boyunca ilişki içinde olunmasına rağmen tercih edilen yaşam biçimi olarak kalmıştı bu. Alüvyonlu toprakta tarım yapanlarla dağ sakinleri arasındaki keskin tezat Güney Çin eyaletlerinde, Güneydoğu Asya'nın her yerinde ve Latin Amerika ile Sahraaltı Afrika'sının birçok bölgesinde yirminci yüzyılda da gayet iyi görülebilir, ama bu pratik Avrupa'da bile şaşırtıcı derecede ısrarla varlığını sürdürmüştür.

İle-de-France'ta, Paris'in çevresindeki verimli bölgede ekim yerlerinin değiştirilmesi (tarlaların iki hasattan sonra terk edilmesi) yirminci yüzyıl başında hâlâ yaygındı (Duby 1968). Kıtanın kenarlarında, Kuzey Rusya ve Finlandiya'da on dokuzuncu yüzyılda ve bazı yerlerde yirminci yüzyılda dahi hâlâ uygulanıyordu (Darby 1956; Tvengsberg 1995) (Şekil 3.18). Ekip biçmenin genişletilmesine direniş en iyi, ova köylülerinin yakınlardaki marjinal dağlar ya da sulak topraklarda kolonileşmekten kaçınmasında gözlenir. Karolenj Avrupası'nın köylerinde nüfus aşırı düzeydeydi, tahıl tedariki de sürekli yetersizdi, ama Almanya ve Flander düzlüklerinin bazı bölgeleri dışında en kolay ekilebilir araziler dışında yeni tarlalar yaratmaya yönelik çabalar pek azdı (Duby 1968). Avrupa'nın daha sonraki tarihi, nüfusun yoğun olduğu batı bölgelerden Alman göçü dalgalarıyla doludur. Bu göç dalgaları üstün güce sahip kulaklı pulluklarıyla Bohemya, Polonya, Romanya ve Rusya'da yerli köylülerin verimsiz bulduğu bölgelerde tarım arazileri açmış, gelecek asırlarda milliyetçi çatışmalara zemin hazırlamışlardır.

Ekilip biçilen arazinin genişletilmesi, yeni tarım arazileri açmak için ilave emek de gerektiriyordu, ama çoğu örnekte bu bir seferlik enerji yatırımı, çoklu ekim, gübreleme, teraslama, sulama, hendek kazma ya da tarla yükseltme için gerekli ek girdilerin sadece bir bölümünü oluşturuyordu. Bu nedenle Asya ve Avrupa'da nüfusun nispeten yoğun olduğu bölgelerde bile kapsamlı nadastan, yıllık ekip biçmeye ve çoklu ekime geçiş binlerce yıl almıştı. Çin'de bütün hanedanlar ilk yıllarında artan nüfusu beslemenin başlıca yolu olarak ekilip biçilen arazileri genişletmek gibi bir politika izlemişlerdi. Avrupa'da arazilerin yüzde 30-50'sinin nadasa bırakılması on yedinci yüzyıl başı gibi yakın bir tarihte bile yaygın bir pratikti. İngiltere'de daha yoğun üç yıllık sistem, on ikinci yüzyıldan beri iki yıllık sistemle bir arada varlığını sürdürüyordu; genel olarak sadece on sekizinci yüzyılda baskın uygulama oldu (Titow 1969).

Tahmin edileceği üzere, yer değiştiren tarımdan daimi tarıma geçiş ve bunun sonrasında tarımsal yoğunlaşma genellikle önce toprağın kötü,



Şekil 3.18 On dokuzuncu yüzyıl sonlarında kesme-yakma ile ürün yetiştirme uygulaması. I. K. Inha'nın 1892'de Finlandiya'nın Eno kentinde çektiği bu fotoğrafta, toprağın sürülmesi ve tahıl ya da yumru ekimi öncesinde eğimli araziye yakarak temizleyen kadınlar görülüyor.

ekilebilir arazilerin sınırlı, kuraklığın yüksek, yağış durumunun eşitsiz olduğu bölgelerde gerçekleşti. Çevre baskıları ve yüksek nüfus yoğunluğu ekip biçmenin yoğunlaştığı her örneği ve bunların zamanını açıklamaz, ama arada güçlü bir ilişki olduğu su götürmez. Kuzeybatı Avrupa'daki arkeolojik bulgular mükemmel bir ilk örnek sunar. Neolitik Çağ'dan Bronz Çağı'na geçişin önce ekilebilir arazilerin sınırlı olduğu bölgelerde, bugünkü İsviçre ve Britanya'da başladığı yönünde açık kanıtlar mevcuttur (Howell 1987).

Seine-Oise-Marne kültürünün çekirdek bölgesinde olası tarım arazilerinin bol olması, ekip biçmenin yoğunlaşması ve bununla birlikte merkezileş-

me yerine, geniş alanlara ekip biçmenin yayılmasına yol açmıştır. Arkeolojik kanıtlar Maya döneminde Yucatan'daki yoğunlaşmanın önce ya ortalama yerleşimlere nazaran daha marjinal (kurak) ya da daha verimli (dolayısıyla nüfusu daha yoğun) ortamlarda başladığını gösterir (Harrison ve Turner 1978). Tarihsel kayıtlar bunu açıkça destekler: Yoğunlaşma genellikle önce ya baskı altındaki ortamlarda (kurak ve yarı kurak iklimler, kötü topraklar) ya da nüfusun yoğun olarak yerleşik olduğu bölgelerde gerçekleşmiştir.

Örneğin iyi alüvyonlu toprakların bulunduğu, genellikle bol yağış alan Hunan eyaleti, bugün Çin'in en büyük pirinç üreticisidir. On beşinci yüzyıl başında, kurak ve erozyona açık Wei He vadisinin (Çin'in kadim hanedanlık başkenti Xi'an burada bulunuyordu) yoğun tarıma dönmesinden bin yılı kadar aşkın bir süre sonra burası yine nüfusun seyrek olduğu bir sınır bölgesiydi. Nüfusun yoğun olduğu Flander düzlüklerinde çiftçiler sulak topraklara sahip çıkma, bölge topraklarını gübreleme konusunda Alman ya da Fransız çiftçilere göre bir-iki asır ilerideydiler (Abel 1962). Bu gerçeklikler köylü toplumların temel gıda tedariki ve temel mülkleri güvence altına almak için gerekli emeği asgariye indirme yönünde temel bir tercihte bulunduğu gibi bir genellemeye bağlanabilir. Kültürel farklılıklar bir yana, neredeyse bütün geleneksel köylüler kumarbaz gibi hareket ediyordu. Küçük gıda fazlası marjlarına fazlasıyla uzun süre tutunmaya çalışıyor, hava durumunun ertesi yıl bir daha iyi bir hasat getireceğine bahse giriyorlardı. Ama temel tahıl getirilerinin düşük, tohum/hasat oranlarının yüksek olduğu dikkate alındığında dahi bu toplumlar tekrar tekrar, sıklıkla da feci bir biçimde kayba uğruyorlardı.

Seavoy (1986) bu davranış biçiminin (en az düzeyde fiziksel emek sarf ederek en az düzeyde gıda güvenliği ve maddi refaha sahip olmak) geçinmeye yönelik bir taviz olduğunu söylemiştir. Ayrıca yüksek doğum oranlarını da kişi başına harcanan emeği azaltmaya yönelik bir diğer kilit strateji olarak görmüştür. Hamilelik ya da başka bir çocuk yetiştirmenin enerji maliyeti çok erken bir yaştan itibaren başlayabilecek olan emeğe katkısına kıyasla düşüktü. Seavoy'a göre (1986, 20) "Çok çocuk sahibi olmak (ortalama 4 ilâ 6) ve olabilecek en erken yaşta işi onlara aktarmak, iyi hayatın bol miktarda maddi mala sahip olmakla değil, asgari düzeyde emek harcamakla bir tutulduğu köylü toplumlarda son derece akılcı bir davranıştır."

Ama Seavoy'un köylülerin genel olarak asli bir toplumsal değer olarak tembellik pratiğini tercih ettiklerinde ısrar etmesi kabul edilemez. Aynı

şekilde, Seavoy'un varsayımından habersiz olduğu belli olan Clark (1987) da on dokuzuncu yüzyılda bir yanda ABD ve Britanya bir yanda Orta ve Doğu Avrupa arasında tarımsal verimlilikte görülen ciddi farkı neredeyse sadece İngilizce konuşulan iki ülkede çalışmanın daha hızlı olmasına dayanarak açıklama girişiminde bulunmuştur. Bu tür kapsayıcı genellemeler başka birçok kritik etkenin etkisini görmezden gelir. Çevre koşulları (toprağın niteliği, yağmur miktarı ve yağışlara güven, kişi başına düşen mevcut arazi, gübre ve gıda, yük hayvanlarına bakma yetisi) her zaman büyük fark yaratmıştır. Sosyoekonomik özellikler (arazinin gübrelenmesi, angarya, vergilendirme, kiracılık, hayvan sahipliği ve sermayeye erişim) ve teknik yenilikler de (daha iyi tarım yöntemleri, hayvan cinsleri, pulluklar, ekip biçme ve hasat uygulamaları).

Komlos (1988) Clark'ın abarttığı noktaları ikna edici bir biçimde çürütürken bu etkenlerin bazılarını değerlendirmişti. Hiç kuşku yok ki birçok kültür ekip biçmeye harcanan fiziksel emeğe düşük bir toplumsal değer veriyordu, geleneksel toplumlarda çalışma oranları arasında önemli farklar vardı. Ama bu gerçeklikler sadece bir tarafta maddi zenginlik biriktirme sâiklerinden yoksun, geçimleri için çalışan tembel köylüler ile diğer tarafta ticari zenginlik birikimi yaratma güdümünde sıkı çalışan çiftçiler arasında basite indirgenmiş farktan değil, toplumsal ve çevresel etkenlerin karmaşık bir bileşiminden kaynaklanıyordu.

Fiziksel çalışmayla ilgili çok daha az tartışmalı bir genelleme de fiziksel çalışmanın olabildiğince yayıldığını söyler. Bu, pratikte işin büyük bölümünün kadınlar ve çocuklara, yani genelde köylü toplumların daha düşük statüdeki bireylerine havale edilmesi anlamına geliyordu. Neredeyse bütün geleneksel toplumlarda tarla ve ev işlerinin büyük bir bölümünden kadınlar sorumluydu. Hamilelik ve süt emzirme ilave yiyecek açısından çok büyük bir yük olmadığından, çocuklar çalışmaya sıklıkla dört-beş yaşlarında başladıklarından, ailenin büyük olması, yetişkin emeğini asgari seviyeye çekmenin, güçten düşülen yaşlılıkta yiyeceği güvence altına almanın en az enerji yoğun biçimiydi.

Enerjisini ağırlıklı olarak insan emeğinden alan geleneksel tarımlarda, büyük ailelere sahip olarak bireysel iş yükünü asgari seviyeye çekmenin akılcı olduğu açıktı. Öte yandan bu strateji kişi başına düşen ortalama gıdayı artırmayı, tekrarlanan açlıklardan kaçınmayı daha zor kılıyordu. Yük hayvanlarının çoğu ağır işi, hatta hemen hemen hepsini gerçekleştirdiği geleneksel tarım toplumları insan emeği ile ürün verimliliği arasındaki bağı zayıfla-

tıyordu; ama bu toplumlar ancak önemli miktarda arazi (ve hasat) çalışan hayvanları beslemek için bir kenara ayrıldığında düzgün işleyebiliyordu.

Ancak fosil enerji girdileri (doğrudan yakıt ve elektrik olarak, dolaylı olarak da tarımsal kimyasal ve makine olarak) hem genişleyen bir nüfusu hem de kişi başına gıda tedarikini sürekli kılabilirdi. Melez tarımlar (ilk dolaylı fosil enerji girdileri) odun kömürü yerine kok kömürü kullanılması sayesinde eritilen metalden (önce 1709'da İngiltere'de) yapılmış demir ve çelik aletler ile makinelerin benimsenmesiyle birlikte önce Britanya'da, sonra Batı Avrupa ve ABD'de yükselmeye başladı. Ama 1850'ye gelindiğinde bile Batı tarımı hâlâ ezici bir biçimde güneş enerjisine bağımlıydı, metal aygıtlar ve makineler on dokuzuncu yüzyılın ikinci yarısında yayılmış olsa bile, fosil yakıtların desteği ancak 1910 sonrasında traktörler, kamyonlar, sentetik azotlu gübreler ve beşinci bölümde izini sürdüğüm ilerlemelerin yaygınlaşmasıyla birlikte büyük bir fark yaratmaya başladı.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

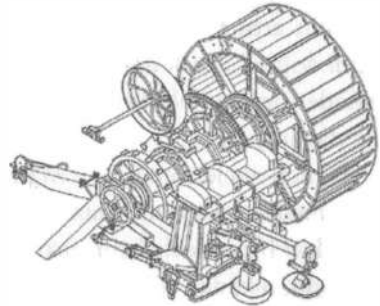
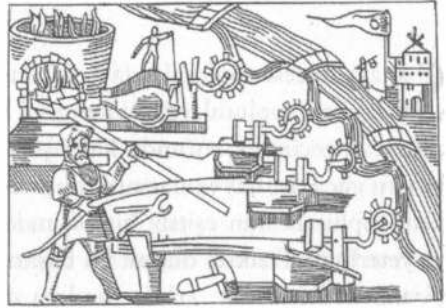
Sanayi Öncesi Dönemde Asli İtici Güçler ve Yakıtlar

Sanayi öncesi toplumlarda çoğu insan hayatlarını köylü olarak sürdürmek, bazı toplumlarda binlerce yıl boyunca değişmeden kalan biçimlerde çalışarak geçirmek zorunda kalmıştır. Az sayıda basit alet yardımıyla, kaslarının gücüyle, hayvanlarının çalışmasıyla ürettikleri düzensiz gıda fazlaları kent toplumlarının eşitsiz bir biçimde ilerleyen karmaşıklığını desteklemeye yeterliydi. Fiziksel olarak bu başarılar her şeyden önce (antik Mısır'daki piramitlerden tutun, erken modern dönemin Barok kiliselerine varıncaya dek) dikkat çekici yapıların inşa edilmesine yansımıştır, ulaşım kapasitesi ve eriminin artması (karadan tekerlekli yavaş nakliyattan tutun, gezegenin çevresini dolaşabilecek daha hızlı gemilere varıncaya dek), çok sayıda imalat tekniğinde yapılan iyileştirmeler her şeyden önce metalurji alanındaki ilerlemelere dayanıyordu.

Bu ilerlemelere enerji veren itici güçler ve yakıtlar binlerce yıl boyunca hiç değişmeden kalmıştır, ama insan dehası bunların performansını birçok dikkat çekici biçimde değiştirmiştir. Nihayetinde bu değişikliklerin bazıları o kadar güçlü, o kadar verimli bir hale gelmiştir ki modern sanayileşmenin ilk aşamalarına enerji verebilmişlerdir. Bunların ilki küçük güçlerin çoğalmasındı, bu esasen özellikle hayvansal enerjilerin uygulanmasıyla birlikte üstün bir örgütlenme meselesiydi. İkincisi yeni enerji çevrimleri başlatan ya da yerleşik süreçlerin verimliliklerini artıran teknik bir yenilikti. Pratikte bu iki yaklaşım sıklıkla kaynaşıyordu. Örneğin neredeyse bütün eski yüksek kültürlerin inşa ettiği anıtsal yapılar hem kitleselleşmiş emek, hem basit manivelalar

ve eğik düzlemlerden başlayıp makaralar, bocurgatlar, vinçler ve ayak değirmenlerine varıncaya dek iş yapmayı kolaylaştıran aygıtların yoğun bir biçimde kullanılmasını gerektiriyordu.

Belgelenen ilk mekanik enerji çeviriciler ile bunların sanayi çağının başlangıcında kullanılan halefleri arasındaki fark genelde gayet dikkat çekiciydi. Gücünü suyun akışından alan ilk şahmerdan tasarımları, sürekli çevirme hareketi yapılmasını bile gerektirmiyordu, bunlar sadece basit manivelaları tekrar tekrar harekete geçiriyordu (Şekil 4.1). Sonraları, dikey su çarkları güçle çalıştırılan çekiçleri, Asya ve Avrupa demirhanelerinde güvenilir yardımcıları haline getirdi; on dokuzuncu yüzyılda suyla çalıştırılan demir dövme çekiçlerinin bazıları etkileyici, karmaşık, yüksek performanslı makinelerdi. (Şekil. 4.1).



Şekil 4.1 Su akışı bu üç çekice güç veriyordu, ama bu aygıtların karmaşıklığı ve performansları birbirinden çok farklıydı. Çin’de on dördüncü yüzyılda kullanılan ilkel kaşık haddehane çekici akan suyla çalışan basit bir kaldıraçtı (en üstte). On altıncı yüzyılda Avrupa’daki demir dövme çekiçleriye, dönme güçleri birbirine bağlanan sopalarla aktarılan su çarklarıyla çalıştırılıyordu (ortada). İngiltere’de on dokuzuncu yüzyıldaki dökümhanelerde kullanılan şahmerdanlarsa yüksek performanslı, parça eklenip çıkarılabilen makinelerdi (en altta). Needham (1965) ve Reynolds’daki (1970) çizimlerden alınmıştır.

Gücünü su ve rüzgârdan alan bütün asli itici güç sınıfları için benzer karşılaştırmalar yapılabilir. Güçleri sadece birkaç yüz watt (bir beygir gücünden az) Ortaçağ'a özgü kabaca yontulmuş su çarkları ile on yedinci yüzyıla özgü çok daha iyi yapılmış, güçleri kolayca diğerlerinin on katına çıkan dikey makineler, tabii bir de İngiltere'nin gücü 400 kW'yi aşan, yani 600 güçlü kuvvetli beygire yakın bir güce sahip en büyük demir çarkı Lady Isabella arasında ne büyük bir fark vardır! Ya da zahmetle rüzgâra çevrilmesi gereken, o zaman da potansiyel güçlerinin yüzde 80'ininden fazlasını zayıf yelkenlere ve kaba donanımına harcayan Ortaçağ'a özgü verimsiz ve ağır "post" değirmenleri* ile brandaları yaylı olup kolayca güç aktaran, çalışmalarıyla Büyük Düzlükler'in açılmasına yardımcı olan (genellikle su pompalamakta kullanılıyorlardı), otomatik olarak çalıştırılan on dokuzuncu yüzyılda Amerika'daki değirmenler arasındaki farka ne demeli?

Bu tür karşılaştırmalar hayvan gücünün çevrimi ve fitokütleli yakıtların yakılması açısından da bir o kadar etkileyicidir. On dokuzuncu yüzyılda hafif bir arabaya bağlanmış, demir nallar ve boyundan koşum takılmış bir yük atı dik bir yamaçta, ahşap ağır bir arabaya göğsünden koşumla bağlanmış, nallanmamış daha hafif atasının çamurlu bir yolda taşıyabileceğinden 20 kat daha ağır yükleri taşıyabiliyordu. On sekizinci yüzyılda bir demir fırını bir birim sıcak metal üretimi için, Ortaçağ başındaki selefinin ihtiyaç duyduğunun onda birinden daha az kömür tüketiyordu (Smil 2016). Ne var ki insanın ağır iş görme yetisi antik dönem ile sanayileşmenin başlangıcı arasında pek az değişiklik geçirmişti. Ortalama vücut ağırlığının zaman içinde arttığı toplumlarda bile, böyle bir kazanımın azami kas kullanımı üzerinde sadece marjinal bir etkisi oluyordu, daha ağır çalışmalar, birçok bireyin güçlerini birleştirmesini gerektiriyordu her zaman.

Domenico Fontana, 327 tonluk bir Mısır obeliskinin Romalıların bıraktığı yerden (Caligula, obeliski sirkinin merkez *spinasına*, bugün San Pietro'nun hemen güneyinde bulunan yere koydurmuştu) 269 metre öteye taşınması işinde, obeliski antik kaidesinden kaldırmak (uzunlukları 15 metreye varan) amacıyla uzun ahşap manivelalar ve çekiciler kullanmış, 10 Eylül 1596'da obeliski Roma'da Aziz Peter Meydanı'nın merkezine dikerken vinçlere bağlı halatların çekilmesi, obeliskin yeni bir kaideye oturtulması için 900 adam ve 75 atın gücünden yararlanmıştı (Fontana 1590; Hemphill 1990). Bu proje 13 ayda tamamlanmış, obeliskin dikilmesi bir gün sürmüş-

(*) "Post" yel değirmenleri, bir dikey üzerine yerleştirilmiş, Avrupa'daki ilk değirmen türüdür -ç.n.

tü. Daha sonraları yeni yerlere taşınan meşhur obeliskler arasında bugün Paris'te Place de la Concorde'daki obelisk (1833'te tamamlandı), Thames kıyısındaki obelisk (1878) ve (1881'den beri) New York'ta Central Park'ta bulunan obelisk vardır (Petroski 2011).

Dünyanın en ağır sütunu (Rusya'nın Napoléon'un işgal orduları karşısında kazandığı zaferi anmak için dikilen 604 tonluk kırmızı Fin graniti) 30 Ağustos 1832'de Sen Petersburg'da dikilirken Fransız mimar Auguste de Montferrand 2.400 adam kullanmıştı (1.700 kişi çekme işiyle uğraşmıştı), sütun iki saatten kısa bir sürede dikilmişti (**Kutu 4.1**). Bu iki taşıma işi için gerekli mekanik avantajı sağlayan, insanların birçok dâhiyane hamle ve taşıma, yerleştirme işi gerçekleştirmesini mümkün kılan iki temel aygıt, eğik düzlem ve kaldıraç, sadece antik imparatorluklar zamanından beri değil, kesinlikle bundan çok daha uzun süre öncesinden beri bizimledir; yoksa Stonehenge'in 40 tonluk dış sütunları nasıl dikilebilirdi ki?

Kutu 4.1

Alexander Sütunu'nun ayağa kaldırılması

Alexander Sütunu olarak bilinen büyük granit Finlandiya'da Virolahti'de kazılıp çıkarıldı; bu amaçla inşa edilmiş, 1.100 ton taşıma kapasitesine sahip bir gemiye yüklendi (sütun yüklenme sırasında neredeyse suya düşüyordu); Sen Petersburg'da Neva'nın kıyılarına kadar 190 km taşındı, burada sağlam bir ahşap iskeleye çıkarıldıktan sonra eğik bir düzlem üzerinde 10,5 metre kaldırıldı, sonra dik açıyla bir platformun üstüne yerleştirilerek Saray Meydanı'nın merkezindeki kaidenin üstüne çıkarıldı. Kaidenin üstüne dikilen ahşap iskele 47 metre yüksekliğindeydi, meşeden yapılmış beş tane çifte kirişten makara blokları sarkıyordu. Montferrand inşaatta marangozlara kılavuz olsun diye iskelenin 1/12 ölçekli bir modelini yapmıştı (Luknatskii 1936). Sütunun kaldırılması iskelenin üstüne iki sıra halinde yerleştirilmiş 60 bocurgatla gerçekleştirildi. Mandallı çarklar ahşap bir çerçeve üstüne yerleştirilmiş demir silindirlirdi, yukarıdaki bloklar çifte meşe kirişlerden sarkıyordu, sütunun shaftına her birinin 75 kg taşıyabileceği test edilmiş (fiili yükün üç katıydı bu) 522 halat bağlanmıştı. Yekpare taş bloğun toplam kütlesi 757 tondur.

Sütun 30 Ağustos 1832'de kaldırıldı ve bu işte halatın gerilimine bağlı olarak hızı ve sürekliliği koordine eden ustabaşların gözetiminde doğrudan 1.700 asker ile 75 subay görev aldı. Montferrand'ın asistanları iskelenin dört köşesinde dikilmiş duruyordu, yanlarında blokları ve halatları gözetip onların düz durmasını sağlayan 100 denizci vardı, 60 işçi kulenin üstündeydi; marangozlar, taş ustaları ve diğer zanaatkarlar da yedekte bekliyordu. Sütunu kaldırma işinde çalışan toplam insan sayısı 2.400'dü ve bu iş sadece 105 dakikada tamamlandı. Sütunun kaideye sabitlenmeksizin dik duruşunu korumuş olması dikkat çekicidir: 24,45 metre uzunluğunda, hafifçe konik olan (alt kısımda çapı 3,6 metre, yukarıda 3,15 metre) bu kütle kaidesi üstünde durur.

Bu bölümde öncelikle bütün geleneksel asli itici güçlerin (insan ve hayvan kasları, rüzgâr ve su) türleri, kapasiteleri ve sınırlarını, ayrıca fi-to-kütle yakıtların, çoğunlukla odun ve ondan yapılan kömürün, ama or-mansız kalmış bölgelerde çok çeşitli ekin artıkları (özellikle tahıl samanı) ve otlak arazide kurumuş tezeğin yakılmasını değerlendiriyorum. Sonra asli itici güçlerin ve yakıtların geleneksel ekonomilerin kritik kesimlerindeki kul-lanımlarına biraz ayrıntılı olarak bakıyorum: yiyecek hazırlamada, ısı ve ışık temininde, kara ve su yolu taşımacılığında, inşaatta, demir dışı metalurjide ve demir metalurjisinde.

ASLI İTİCİ GÜÇLER

Hayvan emeği, su ile rüzgârın kinetik enerjilerinin (yelkenler ve değirmenler sayesinde) çevrilmesi, buhar motorlarının yaygınlaşması öncesinde gelenek-sel toplumlarda yegâne itici güçlerdi. Geleneksel asli itici güçlerin daha son-raları gerilemeleri nispeten hızlı olmuşsa da su çarkları ve rüzgâr değirmen-leri on dokuzuncu yüzyılın ilk yarısında önemlerini korudu (hatta artırdı), yelkenli gemiler ancak 1880 sonrasında okyanus taşımacılığında arka plana itildi, yük hayvanları Birinci Dünya Savaşı sonrasına varıncaya dek en ileri Batı tarımlarına bile hakimdi. Sanayileşmenin ilk evreleri, kömür madenci-liği ve demir-çelik sanayiindeki son derece ağır bazı işlerden tutun, yirminci yüzyıl başında dahi Batı ülkelerinde çocuk işçi çalıştırmanın yaygın olduğu imalat sektöründeki çok sayıda yorucu işe varıncaya dek insan emeğine olan talebi fiilen artırmıştı: 1900'de 10-15 yaşındaki erkek çocukların yüzde 26'sı çalışıyordu, tarım sektöründe istihdam edilen kız çocukların oranı yüzde 75'e varıyordu (Whaples 2005).

Ağır işler ve çocuk emeği Sahraaltı Afrika ülkelerinde kırsal kesimin büyük bölümünde ve Asya'nın en yoksul bölgelerinde hâlâ yaygındır: Afri-ka'da kadınlar yakılacak ağır odun istiflerini taşır; Hindistan'da kadınlar küçük çekiçlerle taşları kırar; Hindistan, Pakistan ve Bangladeş'te erkek-ler kızgın kumlu sahillerde devasa gemileri parçalar (Rousmaniere ve Raj 2007); Çin'de köylüler küçük kırsal madenlerden kömür çıkarır. Bugün hâlâ milyonlarca insan çeşitli biçimlerde zorla ve köle olarak çalıştırılır, insan kaçakçılığına konu olur (Üluslararası Çalışma Örgütü 2015). İnsan eme-ğine (en saldırgan biçimleri de dâhil olmak üzere) bağlılığın devam etmesi, zenginlerin dünyası ile yoksulların dünyası arasındaki büyük ayrımın en be-lirgin işaretlerinden biridir. Ama Batı'da bile ağır işler (yeraltında kömür

madenciligi, çelik yapımı, ormancılık, balıkçılık) 1960'lara kadar yaygındı, hayvan olan itici güçlerin kullanılması tarihsel bir ilginçlik olmanın ötesine geçer: Bugünkü zenginliğimizin o kadar da uzakta kalmamış olan temelidir.

Sanayi öncesi asli itici güçlerle ilgili bu anlatı, Ortaçağ'da barutun icat edilmesi, yayılması ve tarihsel önemi belirtilmese eksik kalırdı. Gökgürültüsü ve şimşek karşısındaki huşu dolu hayret, bir zamanların bütün büyük kültürlerinde görülebilir. Bunların yıkıcı gücünü taklit etme hevesi birçok anlatı ve fantezide tekrar tekrar karşımıza çıkar (Lindsay 1975). Ama binlerce yıl boyunca yegâne sönük taklit, ok başlarına yanıcı malzemeler takmak ya da bunları mancınkla fırlatmak olmuştur. Yakıcı karışımlarda sülfür, petrol, asfalt ve sönmemiş kireç kullanılıyordu. Ancak barutun icat edilmesi itme gücünü büyük bir patlayıcı ve yakıcı güçle birleştirdi.

Hayvan Gücü

Hayvanların enerjisi, yirminci yüzyıl ortasına dek, insanlığın büyük bir bölümü için en önemli asli itici güç oldu. Hayvanların insan ve hayvan bedenlerinin mekanik özellikleri ve metabolizma gereksinimleriyle sınırlı olan güçleri sanayi öncesi medeniyetlerin yayılmalarını sınırladı. Kinetik enerjilerini neredeyse sadece (yelkenli gemilerin yegâne istisna olduğu antik Mezopotamya ya da Mısır örneğinde olduğu gibi) ya da büyük ölçüde hayvan gücünden alan medeniyetler (Ortaçağ Avrupası mükemmel bir örnektir, su ve rüzgâr gücü sadece belli işlerde kullanılıyordu, Çin'in kırsal bölgelerinde de iki kuşak öncesine dek durum böyleydi) sakinlerinin çoğuna güvenilir bir gıda arzı ve maddi zenginlik sunamamıştır.

Yararlı hayvan gücünü artırmanın pratikte sadece iki yolu vardır: Kas gücünü artırmak ya da yeniden yönlendirmek için ya bireysel girdilerin yoğunlaştırılması veya mekanik aygıtların kullanılması. Birinci yaklaşım, özellikle insan kaslarının doğrudan kullanılmasıyla ilgili olarak uygulamada sınırlamalarla karşılaşır. Sınırsız bir işgücü bile nispeten küçük, ama çok ağır bir nesnenin doğrudan kavranması ve kaldırılmasında pek işe yaramaz, çünkü sadece sınırlı sayıda insan bu nesnenin çevresine yerleşebilir. Bir grup insan ağır bir nesneyi taşıyabilirse de, askılar ya da sopalar takmak için önce nesneyi kaldırmanın gerekliliği çözülmesi zor bir sorun olabilir. İnsanların yük kaldırma ve hareket ettirme yetileri kendi beden kütlelerinden ciddi biçimde küçük ağırlıklarla sınırlıdır. Eski Dünya toplumlarının çoğunda kullanılan geleneksel tahtırevanlar her biri en az 25, en fazla 40 kg kaldırabilen

iki kişi tarafından taşınıyordu; daha ağır yükler omuzlara yerleştirilen sopaların desteğiyle taşınıyordu.

Romalı *saccarii* gemiler ve arabaları yükleyip boşaltırken (kısa mesafelerde) 28 kg'lık çuvallar taşıyorlardı (Utley 1925). Daha ağır yükler ancak, genellikle daha uzun bir mesafede daha az kuvvet uygulayarak önemli bir mekanik avantajı aktaran basit aygıtlar yardımıyla idare edilebiliyordu. Antik devirlerde Eski Dünya'da bu gibi beş aygıt yaygın olarak kullanılmıştı: Philo'ya göre (MÖ üçüncü yüzyıl) bunlar tekerlek, aks, kaldıraç, bir vinç sistemi, takoz (eğik düzlem) ve sonsuz vidaydı. Bunların yaygın olan çeşitleri ve bileşimleri vidadan ayak değirmenlerine kadar uzanıyordu. Bu aygıtları ve basit makine-leri kullanarak insanlar daha uzun mesafelerde daha küçük güçler kullanabiliyor, böylece insan eyleminin ölçeğini genişletebiliyorlardı (Kutu 4.2). Mekanik yarar sağlayan en basit üç yardımcı (kaldıraç, eğik düzlem ve vinç) büyük eski kültürlerin hemen hepsinde kullanılmıştır (Lacey 1935; Usher 1954; Needham 1965; Burstall 1968; Cotterell ve Kamminga 1990; Wei 2012).

Kaldıraçlar sert, ince ahşap ya da metal parçalarıdır. Bir dayanak noktasının etrafında dönerken güç kolu ve yük kolu uzunluklarının bir kat-sayısı olarak kolayca hesaplanabilecek mekanik bir yarar aktarırlar (daya-

Kutu 4.2

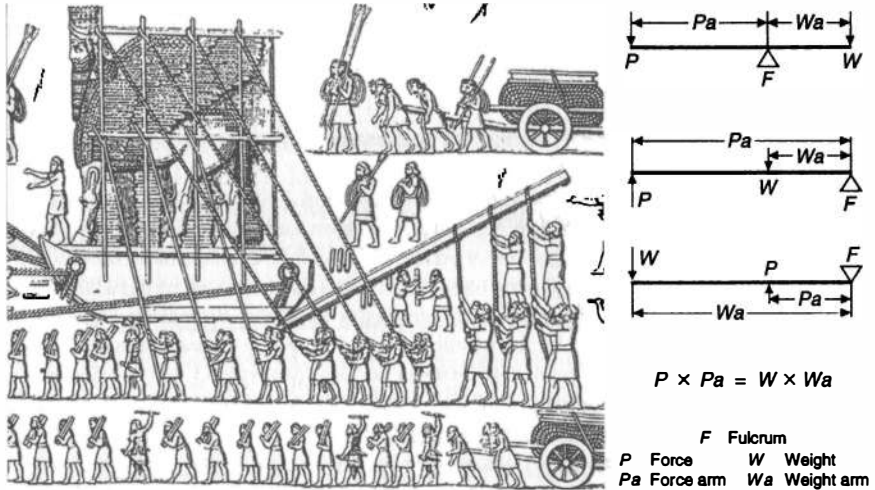
İş, kuvvet ve mesafe

İş, (ister canlı ister cansız bir asli itici güç tarafından uygulanan) bir kuvvet bir cismin hareket halini değiştirdiğinde gerçekleşir. İşin büyüklüğü uygulanan kuvvetin büyüklüğüne ve kuvvetin uygulandığı yöndeki yer değiştirmeye eşittir. Formülle ifade edersek, bir newtonluk bir kuvvet ve bir metrelik bir yer değiştirme bir jüllük bir enerji gerektirir ($J=Nm$). İlgili büyüklük kertelelerini biraz olsun hissedelim diye belirteyim: 1 kg'lık bir kitabın bir masadan (yerin 0,7 metre üstünden) kaldırılması ve bir rafın üstüne (zeminin 1,6 metre üstüne) konması 9 J'lük bir iş gerektirir. Khufu'nun piramidindeki ortalama bir taşın (yaklaşık 2,5 ton) bir basamak yukarıya (yaklaşık 75 cm) kaldırılması yaklaşık 18.000 J'lük (18 kJ) bir iş, yani kitabın rafa yerleştirilmesinden 2.000 kat daha fazla enerji gerektirir.

Doğal olarak, aynı miktarda iş daha kısa bir mesafede daha büyük bir kuvvet ya da daha uzun bir mesafede daha az bir kuvvet uygulayarak gerçekleştirilebilir: Küçük bir kuvvet girdisini daha büyük bir kuvvet girdisine çeviren her aygıt, büyüklüğü iki kuvvetin boyutsuz bir oranı olarak ölçülen mekanik bir avantaj sağlar. Bu mekanik avantaj, kaldıraçlar ve eğik düzlemler kullanarak, daha sonraları makaralardan da yararlanarak tarih öncesi çağdan beri kullanılmıştır. Bu eylemlerin, kilitlerin bir anahtarla açılmasından (bir kilidin içindeki iğneleri hareket ettiren bir çıkıntılar, yani eğik düzlemler dizisinden) tutun bir çivinin bir keskiyle bir ahşap parçasından çıkarılmasına (bir kaldıraç eylemi) varıncaya dek gündelik hayatta sayılamayacak kadar fazla örneği mevcuttur.

nak noktası başlangıç alınarak yapılır bu ölçüm; oran ne kadar büyükse iş o kadar kolay ve hızlı gerçekleşir. Antik dönemde kaldıraçların kullanımı kürekli gemilerin yürütülmesinden, ağır yüklerin hareket ettirilmesine uzanıyordu (Şekil 4.2). Kaldıraçlar dayanak noktasının konumuna göre sınıflandırılır (Şekil 4.2). İlk kaldıraç grubunda dayanak noktası yük ile uygulanan kuvvet arasındadır, uygulanan kuvvet yeri değiştirilen bir yükün tersi yönde hareket eder. İkinci kaldıraç grubunda dayanak noktası uçtadır ve kuvvet yük ile aynı yönde hareket eder. Üçüncü kaldıraç grubu hiçbir mekanik yarar sağlamaz, mancınıklar, malalar ve tırpanların işleyişinde açıkça görüldüğü üzere yükün hızını artırır.

Birinci gruptan kaldıraçların kullanıldığı yaygın el aletleri arasında levye, makas ve (iki kaldıraçlı) kargaburunlar yer alır. El arabaları ikinci grupta en sık kullanılan kaldıraçlardır (Needham 1965; Lewis 1994). Han hanedanlığından beri kullanılan Çin işi el arabalarında genellikle etrafında ahşap bir çerçeve bulunan (çapı 90 cm) büyük bir merkezi tekerlek yer alıyordu. Yükün dingilin tam üstüne yerleştirilmesi sayesinde (genellikle 150



Şekil 4.2 Kaldıraçlar kuvvetin nesneyle (nesnenin ağırlığı, her zaman aşağı doğru etki eder) ilişkili olarak uygulandığı nokta ve dayanak noktasına göre üç sınıfa ayrılır. Birinci tip kaldıraçlarda, kuvvet nesneninkine karşıt bir yönde hareket eder. İkinci tip kaldıraçlarda kuvvet nesneyle aynı yönde hareket eder, ama iki kaldıraç da aynı mekanik avantaja sahiptir: Mesafe uzadıkça güçleri artar. Üçüncü tip kaldıraçlarda kuvvet nesneden daha kısa bir mesafede hareket eder, bunun sonucunda nesnenin ivmesi artar. İlk iki tipteki kaldıraçların nesnelerin taşınması ve hareket ettirilmesinde, makine konstrüksiyonunda sayılamayacak kadar uygulama alanı vardır. Kuyunjik'te bulunan (MÖ 700 civarına ait) kısmen yeniden kurgulanmış Asur baz rölyefinde insan başlı dev bir kanatlı boğa heykelini hareket ettirmekte kullanılan büyük bir kaldıraç görülmektedir. Layard'dan yeniden basılmıştır (1853).

kg'lik) büyük yükler taşınabiliyordu; bu el arabaları köylüler tarafından ürünleri pazara taşımakta, kimi zaman da kenarlarına oturan insanları taşımakta kullanılıyordu (Hommel 1937). İtilmeyi kolaylaştırmak için küçük yelkenler dikilebiliyordu. Avrupa işi el arabaları ilk kez Ortaçağ'da (on ikinci yüzyıl sonu ve on üçüncü yüzyıl başı) ikna edici bir biçimde belgelenmiştir, sonrasında çoğu kez İngiltere ve Fransa'da, genellikle inşaat ve madencilikte kullanılmışlardır. Bu arabalarda dayanak noktası uçtaydı, bu da onları iten insanlara düşen işi artırıyordu, ama yine de bu aletler hatırı sayılır (genellikle de üç kat) mekanik yarar sağlıyordu.

Tekerlek ve aks dairesel bir kaldıraç oluşturur, uzun kol dingil ile tekerleğin dış kısmı arasındaki uzaklıktır, kısa kolsa dingilin yarıçapıdır, bu yarıçap kaba bir zeminde ağır tekerleklerde bile büyük bir mekanik yarar sağlar. İlk tekerlekler (MÖ 3000 öncesinde Mezopotamya'da kullanılan) katı, ahşap tekerleklerdi; parmaklı tekerlekler 1.000 yıl kadar sonra, önce savaş arabalarında ortaya çıktı, sürtünme demir kasnaklarla azaltılıyordu. Tekerleğin Eski Dünya'daki muazzam önemi tekerlekli araç icadının ve bu araçların mekanik yararının o zamandan beri hızla yayılmasında görülebilir. İlginçtir, Amerika kıtalarında yerli bir tekerlek yoktur, ayrıca birçok Müslüman ülkede çöl ortamı deve kervanlarını, öküzlerin çektiği tekerlekli arabalardan daha önemli kılmıştır (Bulliet 1975, 2016).

Sürtünme görmezden gelinirse eğik bir düzlemin mekanik yararı, eğimin uzunluğu ile nesnenin kaldırıldığı yüksekliğin ortak çarpanı kadardır. Sürtünme bu kazanımı ciddi bir biçimde azaltabilir, pratikte en iyi performans için düzgün yüzeylere ve bir biçimde kayganlaştırmaya (su en kolay elde edilen ve en ucuz yağlayıcıdır) ihtiyaç duyulmasının nedeni budur. Herodot'a göre eğik bir düzlem, Nil kıyısından büyük piramitlerin inşaat alanına ağır taşları taşımanın başlıca yoluydu, eğik düzlemin piramitlerin fiili inşası sırasındaki kullanımı hakkında epeyce spekülasyon yapılmıştır (bu bölümde daha sonra bu seçeneği hesaba katmamamız gerektiğini açıklayacağım). Eğik düzlemlerin en yaygın modern kullanım biçimi rampadır: karayolu araçları ve gemilere kargo yüklemeye yarayan güçlü metal levhalardan tutun acil durumlarda uçak yolcularının inişini sağlayan yumuşak plastik yüzeylere varıncaya dek karşımıza çıkar.

Takozlar kısa mesafelerde yanlara büyük güç uygulayan çift yüzölü eğik düzlemlerdir. Taşların yarıklarına yerleştirilip nemlendirilen tahta parçaları yardımıyla kayaları parçalamakta, baltaların kesici kenarları olarak

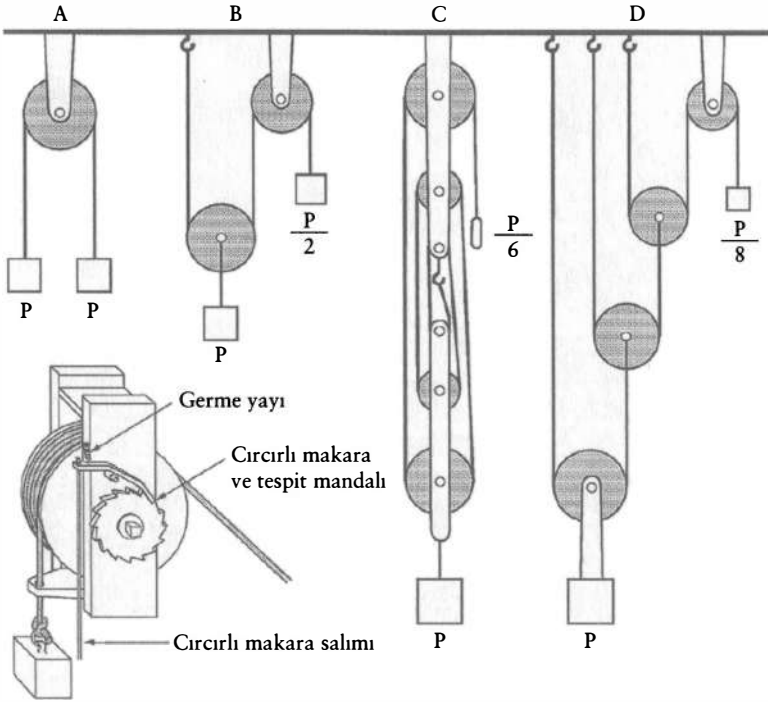
yaygın bir biçimde kullanılmışlardır. İlk kez antik Yunan'da zeytin ve üzüm preslerinde kullanılan vidalar merkezi bir silindirin etrafını saran dairesel eğik düzlemlerden başka bir şey değillerdir. Önceki bölümde belirttiğimiz üzere bir vida tasarımı sığ yerlerden su çekmekte de kullanılmıştır. Vidaların büyük mekanik yararı, işçilerin en az düzeyde çaba sarf ederek büyük bir basınç uygulayabileceği anlamına geliyordu. Birçok uygulamada küçük vidalar (artık kitlesel olarak üretilir ve saat yönünde çevrilerek sıkılaştırılır) yerinden çıkarılamaz sıkılaştırıcılar olarak kullanılır.

Bir halat ya da bir kabloyu yönlendiren yivli bir tekerlekten oluşan MÖ sekizinci yüzyılda icat edilmiş basit bir makara, gücü yeniden yönlendirerek yüklerin taşınmasını kolaylaştırır, ama hiçbir mekanik yarar aktarmaz ve kullanılması sırasında yüklerin düşmesi gibi kazalara yol açabilir. Cırcırlı makara ve tespit mandalı bu son sorunu çözer, çoklu vinçler de ilk kusura çözüm getirir, zira bir nesneyi kaldırmak için gerekli güç yaklaşık olarak kullanılan vinçlerin sayısıyla ters orantılıdır (Şekil 4.3). Aristoteles'e atfedilen, ama onun yazmadığı *Mechanica*'da (Winter 2007) bu tür aygıtların sağladığı mekanik yararın açık bir biçimde anlaşıldığı görülür.

Antik dönemde Çinliler makaraları o kadar sık kullanıyorlardı ki, saray eğlenceleri bile makarasız yapılamıyordu, bir keresinde teknelerin içinde 220 kızıdan oluşan bir bale ekibi, bir gölden bir rampa yardımıyla çekilip çıkarılmıştı (Needham 1965). Ama bileşik makaraların verimliliğine ilişkin antik dönemden en meşhur tanıklık Arşimet'in Kral Hiero'ya yaptığı, Plütarkos'un *Hayatlar*'ında bahsedilen gösteridir. Arşimet "başka bir dünya olsaydı oraya gidip bu dünyayı hareket ettirebileceğini" söyleyince Hiero bu güçleri uygun bir biçimde kanıtlamasını istemişti.

Bunun üzerine Arşimet kraliyet filosundan üç direkli bir ticaret gemisine gözünü dikti, gemi çok sayıda adamın büyük çabasıyla kıyıya çekildi, Arşimet gemiye çok sayıda yolcu bindirip her zamanki miktarda yük yükledikten sonra gemiden uzağa yerleşti, büyük bir çaba sarf etmeksizin bir bileşik makaralar sistemini eliyle sessizce çalıştırarak gemiyi suyun üstünde kaydırıyormuş gibi yumuşakça kendisine doğru çekti. (Plütarkos 1961, iv: 78-79)

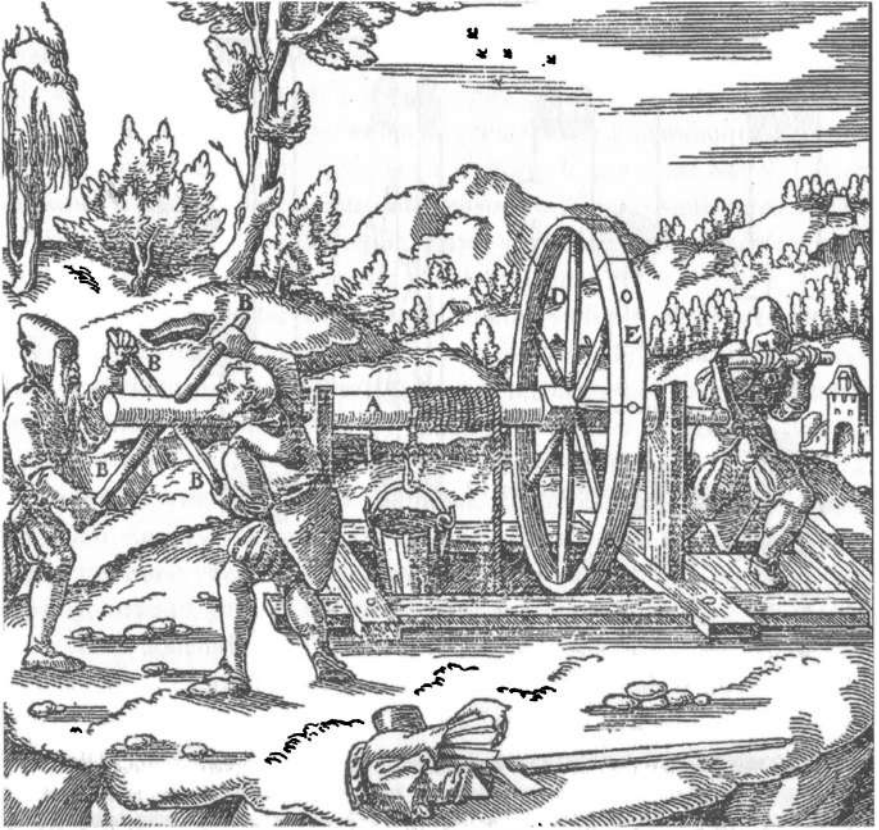
Üç mekanik aygıt grubu (bocurgat, çıkırık, ayak değirmeni ve dişli çark) kaldırma, öğütme, ezme ve dövme için gerekli sürekli insan gücünün uygulanması için kritik hale geldi (Ramelli 1976 [1588]). Bocurgatlar sadece kuyulardan su çekmek ve inşaat malzemelerinin vinçlerle yukarı kaldırılmasında değil, antik dönemin en yıkıcı durağan silahlarının, kasabalar ve kalelerin



Şekil 4.3 Makaralardaki dengeleyici kuvvetler askı bağlarının sayısı ile belirlenir. A'da mekanik avantaj yoktur. B'de P ağırlığı birbirine paralel iki kabloya asılmıştır, dolayısıyla serbest uca dengede olması için $P/2$ ağırlığının asılması gerekir, C'ye $P/6$ ve böylece devam eder. Arşimet'in potansiyel makarasıyla (D) yapı malzemelerini kaldıran bir işçi (sürtünme dikkate alınmazsa) 200 kg'lık bir taşı sadece 25 kg'lık bir kuvvetle kaldırabilir, ama 10 metreye kaldırması karşılık ağırlık bağının 80 metre çekilmesini gerektirir. Bu çabayı kesintiye uğratmak için her an bir cırcırlı makara ve tespit mandalı kullanılabilir.

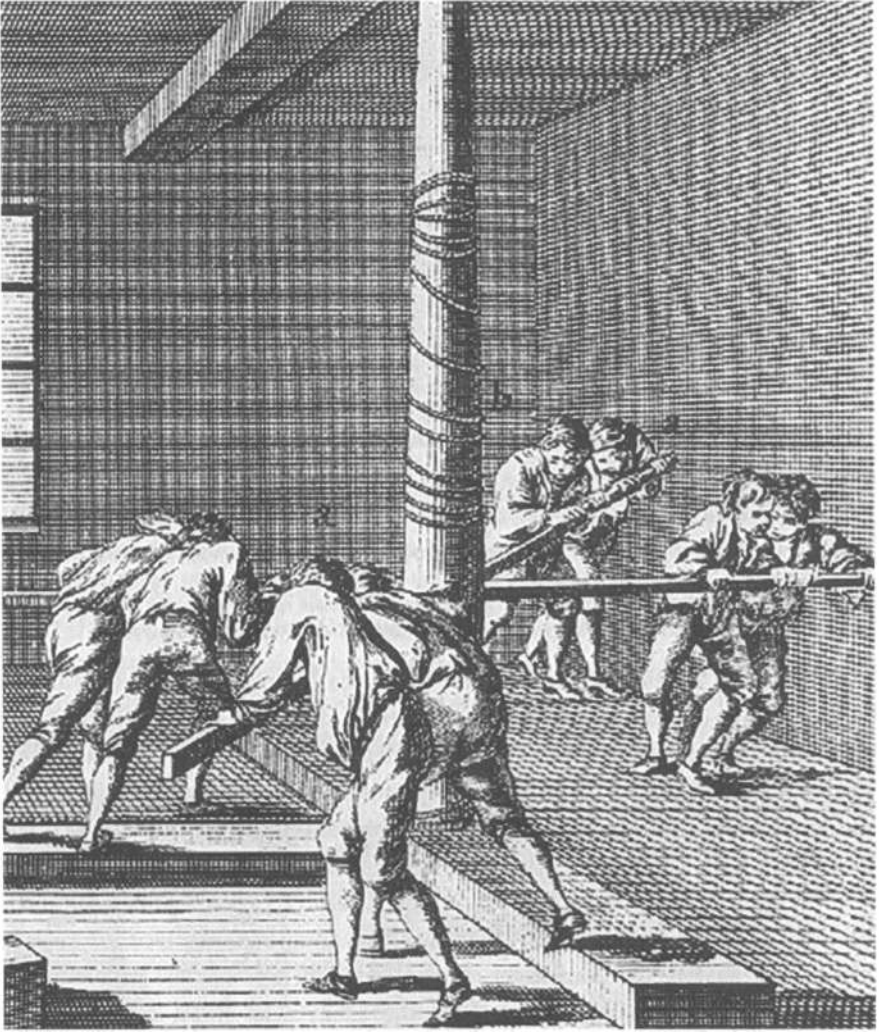
kuşatılmasında kullanılan mancınıkların döndürülmesinde de kullanılıyordu (Soedel ve Foley 1979). Her çevrimde kavrayışın dört kez yer değiştirmesini gerektiren yatay dört kollu vinçler (Şekil 4.4, solda) ve dikey bocurgatlar (Şekil 4.5) basit dönüş hareketi sayesinde halatlar ya da zincirlerle güç aktarılmasını mümkün kılmıştı. İlk kez Çin'de ikinci yüzyılda kullanılan, yedi yüzyıl sonra Avrupa'da kullanılmaya başlanan (Şekil 4.4, sağ tarafta) çıkırık kolları bu işi daha da kolaylaştırmıştı, sadece elle çevirme (ya da ayakla yürüme) hızının sürülen bir makinenin (sıklıkla bir çark) hızına eşit olması gerekiyordu.

Ağır bir dingilin üstüne yerleştirilen, dönüşü bir çark sayesinde çapraz kayışa aktarılan büyük ahşap ya da demir bir tekerleği (volan) çevirmek için



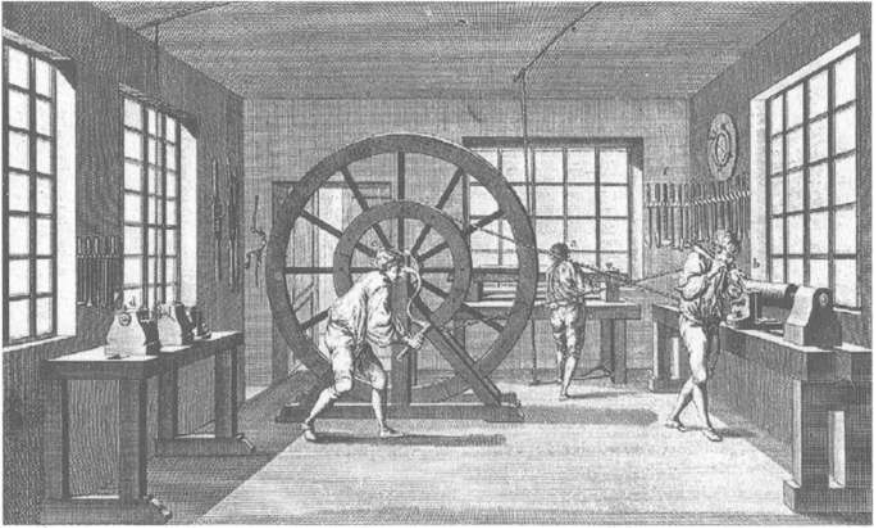
Şekil 4.4 Bir kuyudan su çekmek için hem yatay bir çıkık (solda) hem de manivela kullanan madenciler. Kimi zaman çubuklarına kurşun parçaları tespit edilen ağır ahşap bir teker, momentumun korunmasını sağlıyor ve taşımayı kolaylaştırıyordu. Agricola, *De re metallica*'dan yeniden basım (1912 [1556]).

bir kolun kullanılması sayesinde bu sınırlama ortadan kaldırılıyordu. Bu, birçok dişli oranının kullanılmasını mümkün kılıyordu, büyük bir tekerleğin momentumu kas gücü artıp ortadan kaybolurken bile dönüşlerin devam etmesini sağlıyordu. Ortaçağ'daki bu yenilik saatlerden tutun ilk buhar makinelerine varıncaya dek çok çeşitli kesin mekanizmaların inşasında kullanılan ahşap ve metal kısımların doğru bir biçimde mekanikleştirilmesini sağlamış, ama sert metalleri kesmek için gerekli zorlu çalışmayı ortadan kaldıramamıştı (Şekil 4.6). İlk buharlı lokomotifin parçalarını yapmak için büyük bir tekerlek kullanan George Stephenson'ın işçilerinin beş dakikada bir dinlenmeleri gerekmişti (Burstall 1968).



Şekil 4-5 On sekizinci yüzyılda Fransa'da bir atölyede büyük dikey bir bocurgatı çeviren sekiz adam. Bocurgat altın bir teli pres kalıbından çeken, kısıkaçlarla bağlanmış, bir kordonu çevirir. *Encyclopédie*'den yeniden basım (Diderot ve d'Alembert 1769-1772).

Bedenin en büyük kasları olan sırt ve bacak kaslarının ayak değirmenlerinde kullanılması elle çevrilen çarklardan çok daha fazla yararlı güç sağlıyordu. En büyük ayak değirmenleri (bunlara kafa karıştırıcı bir deyişle büyük tekerlekler de deniyordu) kerestelerle birleştirilen çerçeveleri üstünde insanların yürüdüğü bir kaldırım oluşturan iki tekerlekti. Haterii'nin (MÖ



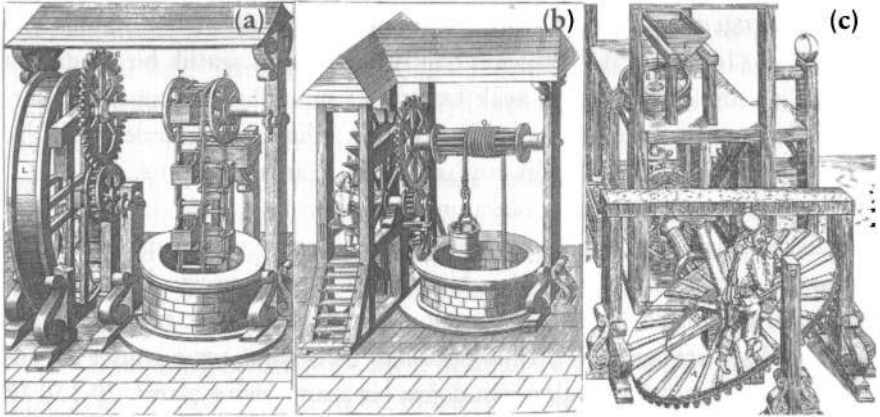
Şekil 4.6 Metal işleyen bir tornayı çevirmek için kullanılan, bir krankla çalıştırılan büyük bir teker. Daha küçük teker daha büyük çaplarla çalışmak için kullanılıyordu ya da daha büyük tekerle daha küçük çaplarda çalışılıyordu. Bu görüntünün arka planında bir adam ayakla çalıştırılan bir ahşap işleme tornasında çalışıyor. *Encyclopédie*'den yeniden basım (Diderot ve d'Alembert 1769-1772).

100) Roma işi lahdindeki kabartma iç mekânda bulunan büyük bir ayak değirmenlerinin (Yunanca *polyspaston*) bugüne ulaşan en eski görüntüsüdür. Romalıların ayak değirmenleri 6 tona kadar kaldırabiliyordu, bu kadar büyük makineler Ortaçağ ve erken modern dönem Avrupası'nda büyük inşaat merkezlerinde, rıhtımlarda, ayrıca su pompalamakta kullanıldıkları madenlerde yaygın olarak görülür olmuştur (Şekil 4.7).

Bir tekerleğin yarıçapı ile dingilli bir silindirin yarıçapı arasındaki fark bu ayak değirmenlerine büyük bir mekanik avantaj kazandırılıyordu, bu makineler kilit taşları, ağır keresteler ya da çanlar gibi ağır yükleri katedrallerin ve başka yüksek binaların tepelerine kaldırabiliyordu. Baba Pieter Bruegel 1563'te böyle bir vincin hayal gücünün ürünü olan Babil Kulesi'nin ikinci katına büyük bir taş kaldırdığını resmetmişti (Parrott 1955; Klein 1978). Bruegel'in resmettiği, iki yanında yürüme bantları bulunan bu aygıt altı ilâ sekiz adam çalıştırıyordu. Dışarıdan hareket ettirilen dikey tekerlekler o kadar yaygın değildi, bunlar silindirle aynı düzeyde yürünürken azami düzeyde döndürme momenti yaratmayı mümkün kılıyordu (Şekil 4.7). Eğimli ayak değirmenleri de vardı, işçiler bir trabzana yaslanıyordu bunları kullanırken (Şekil 4.7); İngiliz hapishanelerinde ayak değirmenleri on dokuzuncu yüzyıl başlarında yaygın bir hal almıştı (Kutu 4.3, Şekil 4.8).

Bütün yürüme bandı tipleri hayvanların çalıştıracağı şekilde de tasarlanabilir ya da değiştirilebilir. Silindir benzeri bütün aygıtlar nispeten kolay hareket etmek gibi bir avantaja sahiptir: epeyce düz bir yüzey üzerinde yuvarlanarak o işten bu işe gidebilirler. Buhar enerjisiyle çalışan demiryolu vinçleri kullanılmaya başlanıncaya dek ağır yükleri taşımanın yegâne pratik yolu bu tür aygıtlardı. Yürüme bantlarının azami enerji girdisi boyutları ve tasarımlarıyla sınırlıdır. Tek bir işçiyle, enerji çıktısı kısa süreli ağır çalışmalar sırasında 150-200 W'den fazla olamaz, yorgun kaslarla sürekli çalışıldığında da 50-80 W'yi aşamaz; sekiz kişinin çalıştırdığı en büyük yürüme bantları yaklaşık 1.500 W'de kısa süre çalışabilir.

Güç uygulama yelpazesinin bir ucunda kollar, pedallar ya da vidalar kullanan tek bir işçinin enerjisiyle görülen işler vardır. Elle ya da ayakla çalıştırılan bu makineler küçük ahşap döner tornalar ve baskı makinelerinden dikiş makinelerine uzanıyordu; dikiş makinelerinin ilk ticari modelleri 1830'larda piyasaya çıkmıştı, ama (hem elle çevrilen, hem pedallı tasarımlar) yaygın olarak 1850'lerde kullanılmaya başlamıştı (Godfrey 1982). Aynı dönemde çok sayıda erkek çocuk ve adam (makaralar kullanarak) *punkha*'yı (Hintçe *pungha*), kumaş ya da palmye yaprağından tavan yelpazelerini çırpma devam etmişlerdi; Hindistan'daki muson sıcaklarını vantilatörü çalıştıran *punkhawallah*'ya ödeme yapacak güçte olan herkes için biraz daha dayanabilir kılmanın tek yolu buydu.



Şekil 4.7 Dönme kuvvetleri farklı ayak değirmenlerinin ayrıntıları. a. İç ayak değirmeni. b. Dış ayak değirmeni (maksimum dönme kuvveti). c. Eğik ayak değirmeni. Agricola, *De re metallica*'dan yeniden basım (1912 [1556]).

Kutu 4.3

Pedallı bir değirmende çalışmak

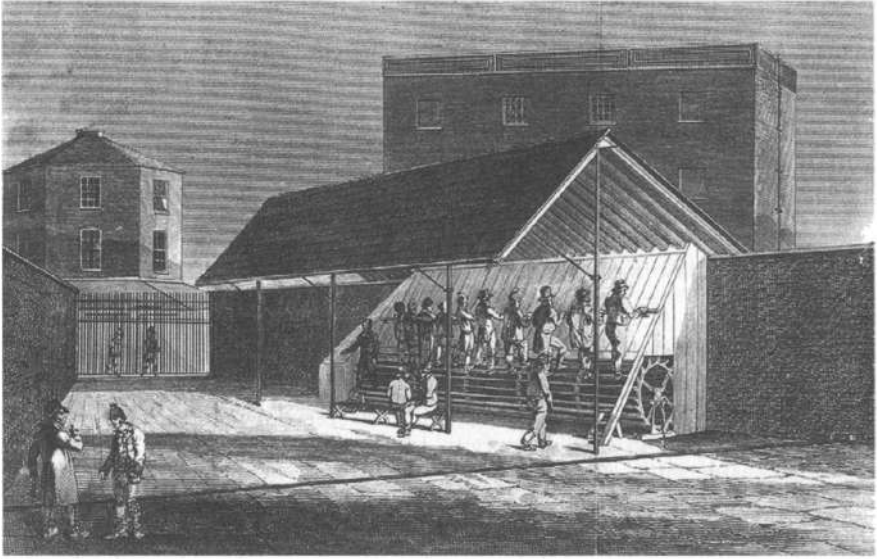
En büyük pedallı aygıtlar, on dokuzuncu yüzyılda İngiliz hapishanelerinde bulunuyordu, William Cubitt (1785-1861) bir cezalandırma biçimi olarak bunları uygulamaya sokmuştu, ama çok geçmeden bu aygıtlar tahlil öğütme ve su pompalamakta kullanılmaya başladı, kimi zaman da sadece egzersiz için kullanıldılar (Mayhew ve Binney 1862). Bu uzun eğik değirmenlerde, silindirik demir bir çerçevenin etrafına dizilmiş ahşap basamaklar vardı, 40 kadar mahkûm yan yana dizilip dengede durmak için yatay bir trabzana tutunarak aynı anda adım atmaya zorlanırdı. Ceza amaçlı değirmenlerin kullanılması ancak 1898'de yasaklandı.

Devon hapishanesi yöneticisi 1823'te bir soruyu cevaplarken "Ayak Değirmeni'nde çalışmanın mahkûmları yaralayacak nitelikte olmadığını, bilakis sağlıkları için zorunlu olduğu kanıyındayım," diye yazmıştı (Hippisley 1823, 127). Modern koşu bandını şevkle kullanan milyonlarca kişi bu görüşlere katılıyordu belki; Landels (1980, 11-12) da bu makinelerden duygusuzca bahsedemeyeceğimizi, hatta onları duygusuzca düşünemeyeceğimizi belirtse de iyi tasarlanmış bir pedallı değirmenin son derece verimli bir mekanik aygıt olmakla kalmayıp operatör açısından "süreklilik taşıyan yeknesak bir iş ne kadar rahat olabilirse o kadar rahat" aygıtlardan biri olduğunu vurgulamıştı.

Bir tek kişinin bir günde ne kadar yararlı iş çıkarabileceği sorusu uzunca bir süre boyunca cevaplanmadı, insanların bir günde yaptığı işle atların bir günde yaptığı iş arasındaki karşılaştırmalar geniş bir yelpazeye yayılıyordu, uç değerler arasında yedi kat gibi büyük bir fark gözlenebiliyordu (Ferguson 1971). Watt'ın dakikada 33.000 pound-ayağa, yani 745,7 W'ye eşit olan beygir gücü tanımı (Dickinson 1939), yaklaşık yedi işçinin çalışmasının yarattığı gücü ifade ediyordu. Güvenilir olarak ilk ölçümü Guillaume Amontons (1663-1705) yaptı; cam temizleyenlerin 10 saatlik bir vardiyada yaptığı işi, sürekli saniyede 3 ayak hızında 25 pound'luk bir ağırlık kaldırmaya denk tuttu (Amontons 1699). Modern bilimsel birimlerle bu eşitlik 102 W'lık bir güçle 3,66 MJ'lik toplam yararlı iş anlamına gelir.

İnsanlar asli itici güçler olarak ne kadar güçlüdür, ne kadar verimlidirler? İlk soru on dokuzuncu yüzyılda sistematik enerji araştırmalarının başlamasından çok önce gayet doğru bir biçimde cevaplanmıştı. İlk tahminler bir beygirin işini, iki ilâ 14 kişinin güç uygulamasıyla denk tutmaya kadar değişiyordu (Ferguson 1971). 1800 öncesinde bu oranlar, uzun saatler boyunca sürekli çalışan çoğu yetişkin için doğru bir azami seviye olarak 70-150 W civarında birbirine yaklaşıyordu. Sürekli 75 W'lık bir güçle çalışırken, tek bir standart beygirin gücüne eşit iş çıkarmak için on kişiye ihtiyaç duyuluyordu.

1798 yılında Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806), insanların gündelik işleri sırasında güçlerini kullanma biçimlerini daha sistematik



Şekil 4.8 Brixton İslahevi'nde bir ayak değirmeninde çalışan mahkûmlar (Corbis).

olarak inceledi (Coulomb 1799). Bu iş deneyimleri Kanarya Adaları'nda Tenerife'ye (2.923 m) 8 saatten kısa bir sürede tırmanmaktan tutun, odun taşıyıcıların 68 kg'lık bir yükü günde 66 kez 12 metre tırmanmalarına uzanıyordu. İlk iş 75 W gücünde 2 MJ'lik toplam bir iş çıkarıyordu, ikincisiyse 120 W güçle toplam yaklaşık 1,1 MJ'lik bir iş yaratıyordu. Bundan sonraki bütün değerlendirmeler Coulomb'un araştırmalarında yerleştirdiği güç yelpazesini doğrulamakla kaldı: Çoğu yetişkin 75-120 W gücünde sürekli çalışabilir (Smil 2008a). Yirminci yüzyıl başında Boston'da Carnegie Enstitüsü'nden Francis G. Benedict (1870-1957) başkanlığında yapılan, insanın temel metabolik hızıyla ilgili araştırmalar harcanması beklenen enerjiyle ilgili denklemler formüle etmeyi ve farklı düzeyde fiziksel faaliyetler için tipik BMR çarpanları belirlemeyi mümkün kıldı (Harris ve Benedict 1919), her ikisi de geniş bir beden tipi ve yaş yelpazesi için geçerlidir (Frankenfield, Muth ve Rowe 1998).

Daha önce belirttiğimiz üzere insanlar ve hayvanların güç uygulamalarının karşılaştırılması, geniş bir yelpazeye yayılan insan-beygir oranları ortaya çıkarmıştır. Nicholson (1825, 55), "bir beygirin gücünü kullanmanın en kötü yolu, ona yokuş yukarı yük taşımak ya da rampa çıkarmaktır, çünkü yokuş dikse, üç adam bir beygirden daha iyi iş çıkarır... Öte yandan... yatay düzlemde... bir adam... aynı amaçla kullanılan bir beygirin uyguladığı

gücün yedide birinden fazla güç uygulayamaz,” sonucuna varmıştı. Hayvanların çalıştırılması her zaman pratik sonuçlar doğurmuyordu. Coulomb’un (1799) dikkat çektiği üzere insanlar çalışmak için mekâna hayvanlar kadar fazla ihtiyaç duymuyordu, ayrıca insanların taşınmaları daha kolaydı ve çabalarını da daha kolay birleştirebiliyorlardı.

Antik dönemlerde ve Ortaçağ başlarında küçük, sıklıkla da kötü beslenen hayvanların performansları, on dokuzuncu yüzyılın güçlü yük beygirlerinin çalışmalarından çok, insanların güç kullanimlarına yakındı. Hayvanlar genellikle gözleri bağlanarak (ya da kör hayvanlar kullanılıyordu) doğrudan koşumlarından kışılara bağlanıyordu; bu kışılar dönerek (çoğu kez tahıl, ama karo için kil de) öğüten, (tohumlardan yağ, kamış ya da meyvelerden su) çıkaran ya da (su çekerken, madenlerden kömür, cevher ya da insanları çekerken) bir yüke bağlanmış bir halatın sarıldığı merkezi bir dینگile sabitlenmişti. Bazı işlerde hayvanlar dişli mekanizmalara bağlı bocurgatları da döndürüyordu.

Lucius Apuleis’in *Altın Eşek* adlı anlatısında (MÖ ikinci yüzyıl) ortaya koyduğu üzere saatlerce küçük bir çember çizerek yürümeye zorlanan bu hayvanların yetersiz beslenmesi ve kötü muamele görmesi yaygındı (burada William Adlington’ın 1566’da yaptığı klasikleşmiş bir çeviriyi sunuyoruz):

Peki yoldaşım atlardan nasıl bahsedeyim, nasıl yaşlı ve zayıf olduklarını, başlarını yemliklere soktuklarını nasıl anlatayım: boyunları hep yara bere içindeydi, hırpalanmıştı; burun delikleri sürekli öksürmekten mahvolmuştu, yanları koşumları ve çok yol almaları yüzünden yaralanmış, kaburgaları dayaktan kırılmış, toynakları durmaksızın çalışmaktan yıpranmış, derileri boylu boyunca keçeleşmişti. Bu ürkütücü görüntüye tanık olduğumda, ben de bu hale düşeceğim diye korkmaya başladım.

Atların bu biçimde kullanılması on dokuzuncu yüzyılda da devam etti: 1870’lere gelindiğinde atlar Appalache eyaletlerinde ve ABD’nin güney bölgelerinin tamamında hem çiftliklerde (tahıl öğütme, yağ çıkarma, pamuk istiflerini sıkıştırma işlerinde) hem madenlerde su pompalama ve yük taşıma işlerinde binlerce bocurgatı çalıştırıyordu (Hunter ve Bryant 1991). Genellikle çapı 6 metreden küçük çemberler çizerek yürüyorlardı (bkz. Şekil 1.3; 8-10 metre çaplı daireler daha rahattır); elektrikli arabaların benimsenmesi öncesinde Batı kentlerinde atlar yolcu ve yük arabalarına bağlanıyordu (Kutu 4.4; ayrıca bkz. Şekil 4.18).

Kutu 4.4

Kentlerde ulaşırmada kullanılan yük atları

Yük atları kentlerde (farklı büyüklüklerde arabaları çekerek) yiyecek, yakıt ve malzeme dağıtmak ve kapalı arabaları, 1834'ten itibaren de bunların modernleştirilmiş versiyonlarını, patenti Joseph Hansom'a ait olan (1803-1882) fayton diye bilinen arabaları çekerek kişisel ulaşırmada kullanılmıştır. Ama Batı'daki kentler büyüdükçe daha verimli kamusal ulaşırmaya ihtiyacı atların çektiği omnibüsleri (atlı otobüsler) beraberinde getirdi. Bu araçlar 1828'de Paris'te, bir yıl sonra Londra'da, 1833'te New York'ta, sonra da Amerika'nın doğusundaki bütün büyük kentlerde kullanılmaya başladı (McShane ve Tarr 2007). New York'ta sayıları 1853'te 683 araçla zirveye tırmadı.

Rayların üstünde giden atlı arabalar (atların çektiği vagonlar) ulaşırmayı daha verimli kılıyordu ve bu raylar 1880'lerde elektrikli arabaların kullanıma girmesi öncesinde yaygınlaştı. Sadece bir düzine yolcu taşıyan hafif omnibüsler sadece iki atla çekiliyordu, ama dört at yaygındı, 28 yolcunun içine sığıştığı arabalar genellikle aşırı kalabalık oluyordu. Bu araçlar saat başı kalkıyordu ve birçok güzergâh atlı arabaların kullandığı bilinen hatları kullanıyor, şehir merkezinden 8-10 km ötedeki istikametlerine yaklaşık bir saatte varıyorlardı. Çok çalışan atların iyi beslenmeleri gerekiyordu, McShane ve Tarr'ın (2007) topladığı veriler, hayvan başına her gün 5-8 kg yulaf ve aynı ağırlıkta saman verildiğini gösterir. Kentte çalışan atlara bu yemin verilmesi, on dokuzuncu yüzyılın bütün büyük kentlerinde önemli bir hizmetti.

Atların taşımacılık ve inşaatlarda kullanılması, çiftliklerde yük hayvanı olarak kullanılmalarını sınırlayan aynı nedenler yüzünden kısıtlanıyordu. Kurak Akdeniz ülkelerinde ya da Asya'nın nüfusu yoğun ovalarında ne iyi otlaklar bulunuyordu ne de yeterince yem; kötü koşum takımlarıysa atların gücünü verimsizce çeviriyordu. Avrasya'nın kurak bölgelerinde, Atlantik Avrupası'nda atlar ve öküzlerin yaptığı birçok işte, çok daha az talepkâr develer kullanılıyordu, ama Asya'da evcilleştirilmiş filler (ağır kerestelerin toplanmasında, inşaat ve savaşta kullanılan) de yem kaynaklarını hatırı sayılır derecede zora sokuyordu (Schmidt 1996). Hindistan'da filleri konu alan klasik bir eserde bu hayvanların verimliliği göklere çıkarılır, ama yeni yakalanmış fillerin eğitimleri sırasında beslenmelerinin pahalıya patladığı, süt ve şeker kamışı karıştırılmış haşlanmış pirinç ve muz yedirildiği betimleniyordu (Choudhury 1976). Hayvanlar sağlıklarını korurlarsa, bu gibi yüksek enerji maliyetleri onların gücüyle, dikkat çekici derecede uzun ömürlü olmalarıyla telafi edilebiliyordu.

Taşımacılıkta ve yerleşik işlerde kullanılan hayvanlar, küçük eşeklerden tutun büyük fillere uzanıyordu, bazı yerlerde köpekler mutfak ocaklarının üstündeki şişleri çeviriyor, küçük arabaları ya da el arabalarını çe-

kiyordu. Tahmin edileceği üzere, sığırların (öküzler, mandalar ve yaklar) orta düzeydeki beslenme talepleri onları hem çiftlikler hem başka yerlerde başlıca iş hayvanı haline getirmişti. Yaklar sürü hayvanı olarak, salt olağanüstü güçleri nedeniyle değil, yüksek dağlarda ve karda yürüyebilmeleri nedeniyle de paha biçilemez değerdedi. Sığırların taşımacılıktaki tipik performansı, en iyi ihtimalle orta seviyedeydi. İyi yollarda, kısa süreler zarfında, vücut ağırlıklarının üç-dört katı kadar fazla yük çekebilirlerdi, ama sürekli çalışmaları 300 W'den fazla iş sağlamıyordu. Sıklıkla bocurgat çevirmekte, sürekli dönüş gücü isteyen küçük imalathanelerde kullanılan, merkezdeki bir dingile bağlanmış bir sopayı çeviren yaşlı ve zayıf atlar fazla iş göremiyorlardı; buhar makineleri çıkmadan önce birçoğu yerlerini çok daha güçlü su çarklarına ve rüzgâr değirmenlerine bırakmıştı.

Su Gücü

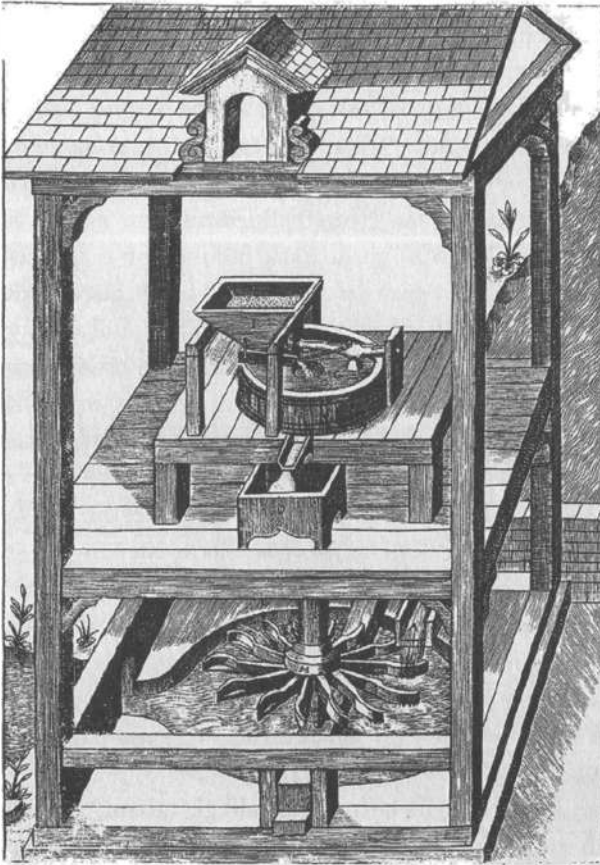
MÖ birinci yüzyılda yazan Selanikli Antipatros elde tahıl öğütmek gibi zor bir işin altından kalkan basit bir su değirmeniyle ilgili ilk edebi satırları bırakmıştı (çeviren Brunck 1776, 119):

Ellerinizi değirmenin üstüne koymayın, ey değirmen taşını çeviren kadınlar! Horozun ötüşü şafak vaktini haber verse de uykunuzu bölmeyin, zira Ceres kollarınızı çalıştıran işleri nimfelere verdi. Onlar, bir tekerleğin tepesinden inerek dingili döndürür, o da hareket eden kirişler sayesinde içi boş dört değirmenin ağırlığını hareket ettirir. İlk insanların hayatını yeniden tadarız, çünkü Ceres'in üretimini yorulmaksızın tatmayı öğrenmişizdir.

Antik dönemdeki yelkenli gemiler hariç, rüzgâr enerjisinden yararlanma çok daha sonra başladı. El-Mesudi'nin 947 tarihli raporu basit dikey rüzgâr değirmenleriyle ilgili ilk güvenilir kayıtlardan biridir (Forbes 1965; Harverson 1991). El-Mesudi (bugün Doğu İran'da bulunan) Seistan'ı rüzgârların değirmenleri çevirip derelerden su taşıyarak bahçeleri suladığı bir rüzgârlar ve kumlar ülkesi olarak betimliyordu. Bu ilk değirmenlerin pek az değişmiş halefleri (çamurdan yapılmış duvarlardaki dar açıklıkların ardına yerleştirilmiş, daha hızlı rüzgâr akışı sağlayan bükülmüş sazdan yelkenler) bu bölgede yirminci yüzyıl ortalarına dek görülebiliyordu. Her iki tür makine de Ortaçağ dünyasında epey hızlı yayılmıştı, ama su değirmenlerine çok daha sık rastlanıyordu.

Bu değirmenler her yerde bulunduğu, 1086'da yapılan Kıyamet Kitabı sayımında da tanıklık edilmişti; İngiltere'nin güneyi ve doğusunda 5.624

su değirmeni bulunuyordu, yani her 350 kişiye bir değirmen düşüyordu (Holt 1988). En eski yatay su çarklarından sıklıkla ya Yunan ya Kuzey tekerleri diye bahsedilir, ama bunların tasarımının kökenleri belli değildir. Avrupa'nın birçok bölgesinde ve Suriye'nin doğusunda her yerde yaygınlık kazanmışlardır. Sıklıkla eğimli bir tekneye sabitlenmiş tahta kürekler üstüne eğimli ahşap bir oluktan akan suyun etkisi, yukarıda dönen bir değirmen taşına doğrudan bağlanabilecek sağlam bir mili döndürüyordu (Şekil 4.9). Bu basit ve nispeten verimsiz tasarım, en fazla küçük ölçekli çarklara uygundu. Suyun eğimli bir delikten ve ahşap bir oluktan geçtiği sonraki tasarımların (Wulff 1966) verimlilikleri yüzde 50'den fazlaydı ve azami güçleri de 3,5 kW'nin üstündeydi.



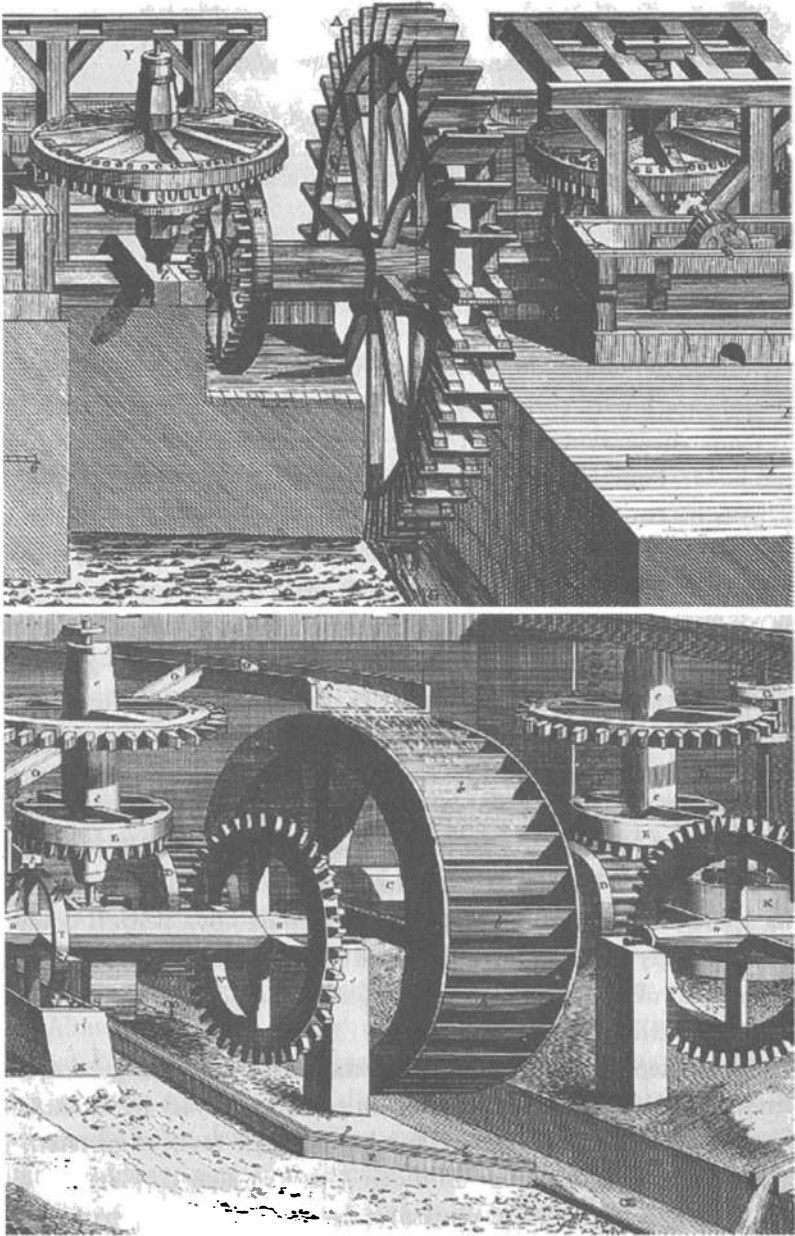
Şekil 4.9 Yunan ya da Kuzey tekeri de denilen yatay su çarkı. Bu çark akan suyun etkisiyle çalışıyordu ve doğrudan yukarıdaki çalıştırıcı taşı döndürüyordu. Ramelli'den yeniden basım (1976 [1588]).

Dikey çarklar, üstün verimlilikleri nedeniyle yatay makinelerin yerini almışlardı. Değirmen taşlarını dik açılı dişlilerle döndürüyorlardı, Batı literatüründe MÖ 27 tarihinde *hydraletae*'yi ilk kez açıkça tanımlayan Romalı yapı ustasının adıyla Vitruvius değirmenleri olarak biliniyorlardı. Ama Lewis'e (1997) göre, su çarkının kökeni MÖ üçüncü yüzyılın ilk yarısına, büyük ihtimalle Ptolemaios dönemi İskenderiyesi'ne uzanır; MS birinci yüzyılda su gücü çoktan yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Her halükârda hemen her yerde karşımıza çıkmaları ve ısrarla varlıklarını sürdürmeleri nedeniyle su çarklarının tarihleri, tasarımları, performansları ve kullanımlarını konu alan büyük bir literatür bulunuyor elimizde (Bresse 1876; Müller 1939; Moritz 1958; Forbes 1965; Hindle 1975; Meyer 1975; White 1978; Reynolds 1983; Wölfel 1987; Walton 2006; Denny 2007).

Ama yapılması imkânsız şeylerden biri, su çarklarının antik dönem ve Ortaçağ toplumlarının genel asli enerji arzına katkısı hakkında güvenilir bir tahminde bulunmaktır. Wikander (1983) su çarklarının Roma döneminde genellikle tahmin edildiğinden daha yaygın olduğunu, erken Ortaçağ döneminden sadece 20 su çarkı yeri belirlenmiş olsa da on birinci yüzyıl İngilteresi'nde yaklaşık 6.500 yerde çark bulunduğunu göstermiştir (Holt 1988). Ama benim tahminlerim su çarklarının birim gücü ve Roma İmparatorluğu'nun her yerinde benimsenmeleriyle ilgili liberal varsayımlara göre bile su gücünün insanlar ve yük hayvanlarının temin ettiği yararlı mekanik enerjinin sadece yüzde 1'ini oluşturduğunu gösteriyor (Smil 2010 c).

Dikey su çarkları etki noktasına göre sınıflandırılır. Altan geçen suyla çalışan su çarkları, hareket eden suyun kinetik enerjisinden güç alıyordu (Şekil 4.10). Bunlar yavaş, ama sürekli bir akışta iyi işliyordu, hızlı akan derelere yerleştirilmeleri özellikle istenen bir şeydi, çünkü altından su geçen çarkların kuramsal olarak azami gücü su hızının küpüyle orantılıdır: Hızın iki katına çıkarılması kapasiteyi sekiz kat artırır (Kutu 4.5). Derelerin akışından ilk kez yararlanıldığında, altından su geçen çarklar sadece 1,5 ilâ 3 metrelik alçak tepelerde kullanılıyordu. Daha sonra suyun salların üstünden aşmasını önlemek için dairesel panolar sırtlarından sabitleniyordu.

Altından su geçen çarklarının verimliliği, tabanı, su çarkı sırtından aşağıda, suyun tutulmasını artırmak için dip merkezde 30 derecelik bir açıyla iyice oturan bir çıkıntıya yerleştirilerek iyileştirilebiliyordu. 1800 civarında Jean-Victor Poncelet'nin (1788-1867) geliştirdiği en verimli tasarımda ka-



Şekil 4.10 Fransa'da kraliyete ait bir kâğıt fabrikasını çalıştıran, alttan akan suyla çalışan büyük bir su çarkını gösteren gravürler (yukarıda) ve bir demir ocağında cevherlerin yıkandığı makineyi çalıştıran, yukarıdan akan suyla çalışan bir çark (aşağıda). *Encyclopédie*'den yeniden basım (Diderot ve d'Alembert 1769-1772).

Kutu 4.5

Altından su geçen çarkların gücü

Akan suyun kinetik enerjisi (jul olarak) $0,5v^2$ 'dir, yoğunluğu ($= 1.000 \text{ kg/m}^3$) ile hızının (m/sn olarak hız) karesinin çarpımının yarısına eşittir. Bir birim zamanda su çarkı kanatlarını etkileyen su hacmi birimlerinin sayısı akış hızına eşittir, dolayısıyla akışın kuramsal gücü enerjisinin hızıyla çarpımına eşittir. Saniyede 1,5 metre hızla akan ve çapraz kesiti $0,15 \text{ m}^2$ olan (kabaca $50 \times 50 \text{ cm}$ 'lik) pervaneleri çeviren su ideal olarak 400 W 'nin biraz üzerinde güç üretebilir, ama Ortaçağ'a özgü ahşaptan, altından geçen suyla çalışan verimsiz bir çark, yararlı dönme hareketi olarak fiilen ancak bunun beşte biri kadar, yani yaklaşık 80 W güç verebiliyordu.

visli temrenler bulunuyordu, bu aygıt suyun kinetik enerjisinin yaklaşık yüzde 20'sini yararlı güce çevirebiliyordu; yüzyılın sonraki dönemlerinde en iyi performans yüzde 35-45'e çıktı. Çark çevreleri, kabaca yandan çarklıların üç katı kadar, Poncelet çarklarının iki ila üç katı kadar büyüktü.

Aks hizasından su alan su çarkları yükseklikleri 2 ila 5 metre olan derelerde su akışı ile kütleçekim düşüşünün bir bileşiminden güç alıyordu. Suyun vaktinden önce saçılmasını önleyen, iyice oturan çarklar iyi performans açısından temel önemdeydi. Suyun merkez şaft seviyesinin altından girdiği alçak tasarımların verimliliği iyi tasarlanmış, altından geçen suyla çalışan çarkların verimliliğinden daha iyi değildi. Suyun merkez şaft seviyesinin üstünde etkide bulunduğu yüksek mekanizmaların verimi üstten su alan çarklarınkine yaklaşıyordu. Güçlerini büyük ölçüde kütleçekimsel potansiyel enerjiden alan, yukarıdan akan suyla çalışan geleneksel çarklar üç metreyi aşan su irtifalarında işliyordu, çevreleri de genellikle başın dörtte üçüne eşit oluyordu (Şekil 4.10). Su oluklar ya da kanallardan saniyede 100 L/s ilâ 1.000 L/s 'yi aşan oranda, 4-12 rpm hızında kova benzeri bölümlere akıyordu. Dönüş gücünün büyük bölümü yukarıdan akan suyun ağırlığıyla üretildiği için yukarıdan su alan çarklar yavaş akan derelere yerleştirilebiliyordu (Kutu 4.6).

Sık sık depolama göletleri ve yatakları inşa edilmesini gerektiren, iyi yönlendirilmiş ve titizlikle düzenlenen su tedariki ihtiyacı bu avantajı kısmen ortadan kaldırmıştır. Aşırı taşıma kapasitesiyle faaliyet gösteren, yani kovalardan dökülme oranının azaltıldığı üstten su alan çarklar tam akışla çalışan makineler kadar güçlü olmasalar da, onlardan daha verimli olabiliyorlardı. On sekizinci yüzyılın ilk yıllarına dek, üstten su alan çarklar altından su geçen çarklar kadar verimli görülmüyordu (Reynolds 1979). Bu hata

Kutu 4.6

Üstten su alan çarkların gücü

Suyun potansiyel enerjisi (jul olarak mgh 'ye, yani kütlesi (kg), kütleçekimsel ivmesi ($9,8 \text{ m/s}^2$) ve debisinin (m olarak yükseklik) çarpımına eşittir. Buna bağlı olarak boşaltım kanalının 3 metre üstünde duran, $0,2 \text{ m}^3$ (200 kg) su taşıyan bir kovanın potansiyel enerjisi kabaca 6 kJ'dir. 400 kg/sn'lik bir su akış hızıyla çarkın gücü kuramsal olarak yaklaşık 12 kW olacaktır. Böyle bir makinenin yararlı mekanik gücü ağır ahşap bir çark için 4 kW'nin altı ile titizlikle üretilmiş, gereği gibi yağlanmış on dokuzuncu yüzyıla ait metal bir makine için 9 kW'nin hayli üstü arasında değişiyordu.

1750'lerde Antoine de Parcieux'nün, Johann Albrecht Euler'in yazılarında, hepsinden de önce su çarkı kapasitelerini diğer aslı iticilerin kapasiteleriyle karşılaştıran John Smeaton'ın (1724-1792) ölçek modelleriyle gerçekleştirdiği titiz deneylerle ortaya kondu (Smeaton 1759).

Smeaton'ın bunun sonrasında, üstten su alan verimli çarkları teşvik etmesi buhar makinelerinin yayılmasının yavaşlamasına katkıda bulundu, Smeaton'ın deneyleri (bir çarkın gücünün suyun ivmesinin küpü kadar artacağı gibi doğru bir sonuca varması) üstten su alan çarklar için yüzde 52-76'lık (ortalama yüzde 66) bir verimlilik aralığını yerleştirdi; oysa altından su geçen en iyi çarklarda bu oran yüzde 32'ydı (Smeaton 1759). Denny'nin su çarkı verimliliğine ilişkin modern kuramsal analizi de benzer sonuçlar verdi: Üstten su alan çarklarda yüzde 71, alttan su alan çarklarda yüzde 30 (Poncelet tekerleri için yaklaşık yüzde 50). Pratikte gereği gibi tasarlanmış, bakımı iyi yapılmış, üstten su alan yirminci yüzyıl çarkları yaklaşık yüzde 90'lık potansiyel şaft verimliliğine sahipti ve suyun kinetik enerjisinin yüzde 85'ini yararlı işe çeviriyordu (Muller ve Kauppert 2004), ama genelde ulaşılabilir oran yüzde 60-70'ti, 1930'larda tasarlanmış ve yapılmış, her yeri metal, Alman işi, altından su geçen en iyi çarklar yüzde 76 verimli olabiliyordu (Müller 1939).

Altından su geçen çarklar doğrudan bir dereye yerleştirilebiliyordu, ama böyle bir yer sel hasarı ihtimalini doğal olarak artırıyordu. Aks hizasından ve üstten su alan çarklar düzenli bir su tedariki gerektiriyordu. Suyun geçidi genellikle bir derenin üstüne yerleştirilen bir set ile akışı çarka yönelten bir kanaldan oluşuyordu. Yağmurun az ya da düzensiz yağdığı bölgelerde göletlerde ya da alçak barajlarda su toplamak yaygındı. Suyun dereye geri verilmesine de bir o kadar dikkat etmek gerekir. Yedeklenen su çarkın dönmelerini engelleyebilirdi, ayrıca kanalın kumlanması önlemek için de düzgün çıkış kanallarına ihtiyaç vardı. İngiltere'de bile çarklar, şaftlar ve dişliler on

sekizinci yüzyıl başına kadar neredeyse tümüyle ahşaptı. Sonrasında tekneler ve şaftlar için dökme demir kullanımı arttı. Tümüyle demirden ilk çark on dokuzuncu yüzyıl başında yapıldı (Crossley 1990). Sabitlenen dere çarklarının yanı sıra o kadar yaygın olmayan, mavnalara yerleştirilen yüzen değirmenler ve gelgit değirmenleri de mevcuttu. Yüzen tahıl değirmenleri ilk kez 537 yılında Roma Gotlar tarafından kuşatıldığında, Gotların değirmen tekerlerini döndüren su kemeri suyunu kesmesi üzerine Tiber üzerinde kullanılmıştı.

Yüzen su değirmenlerine Ortaçağ Avrupası'nda şehirler ve kasabaların yakınında sık sık rastlanıyordu, birçoğu on sekizinci yüzyıl ortasına dek varlığını korudu. Denizden gelen kesintisiz güç kullanımı ilk kez onuncu yüzyılda Basra'da belgelendi. Ortaçağ'da İngiltere, Hollanda, Brötanya ve İber Yarımadası'nın Atlantik sahilinde küçük gelgit değirmenleri inşa edildi; daha sonraları Kuzey Amerika ve Karayipler'de bu tür değirmenler yapıldı (Minchinton ve Meigs 1980). Gelgit dalgalarından güç alan, herhalde en önemli ve uzun ömürlü mekanizma Londra'ya içme suyu sağlıyordu. 1582 sonrasında yapılmış ilk büyük dikey gelgit değirmenleri 1666 yangınında harap olmuştu, ama onların yerini alan değirmenler 1822'ye dek faaliyet göstermişti (Jenkins 1936). Eski Londra Köprüsü'nün daraltılmış kemerlerinden geçen suyun çevirdiği üç çark her iki yöne de dönüyor (diğer çarklar genellikle sadece yükselen dalgayla çalışıyordu) ve 36 metrelik bir yüksekliğe 600.000 litre su çıkaran 52 su pompasını çalıştırıyordu.

Tahıl öğütülen değirmenler, su gücünün ağırlıklı olarak kullanıldığı yerler olarak kaldı: Ortaçağ İngilteresi'nde bu değirmenler, bütün değirmencilik faaliyetlerinin yüzde 90'ını oluşturunuyordu; geri kalanların çoğu hallaçlık için (yünlerin kabartılması), sadece yüzde 1'i diğer sanayi faaliyetleri için kullanılıyordu (Lucas 2005). Geç Ortaçağ'da su gücünün cevherlerin parçalanıp eritilmesi (yüksek fırın körükleri), taş ve ağaç kesimi, ağaç çevirme, yağ çıkarma, kâğıt yapımı, tabaklama, tel çekme, baskı, kesme, metal zımparalama, nalbantlık, çini perdahlama ve cilalamada yaygın olarak kullanıldığına tanık olundu. İngiltere'de su değirmenleri yer altı madenlerinde döndürme ve su pompalama işlerinde de kullanılıyordu (Woodall 1982; Clavering 1995).

Bütün bu işler insanlar ya da hayvanların sağlayabileceğinden daha yüksek verimliliğe sahip su çarklarında, dolayısıyla artmış bir iş verimliliğiyle yapılıyordu. Dahası su çarklarının sağladığı gücün görülmemiş büyüklüğü, sürekliliği ve güvenilirliği yeni üretken olasılıklar yaratmıştı. Bu özellikle

madencilik ve metalurji açısından geçerliydi. Aslına bakılırsa Batı sanayileşmesinin enerji temelleri önemli bir ölçüde, su çarklarının bu özel kullanımlarına dayanıyordu. İnsan ve hayvanların kasları, asla böyle yüksek, konsantre, sürekli ve güvenilir hızlarda enerji dönüştüremez; ama sadece bu tür işler sayılamayacak kadar çok gıda işleme ve sanayi işlerinin ölçeğini, hızını ve kalitesini artırabiliyordu. Ne var ki tipik su çarklarının, koşuma bağlanmış büyük hayvan gruplarının gücünü aşacak yetiye ulaşmaları uzun zaman aldı.

Büyük enerji üretimine ulaşmanın yegâne yolu asırlar boyunca, uygun bir yere bir dizi daha küçük birim yerleştirmek oldu. Bu yoğunlaşmanın en iyi bilinen örneği Arles yakınlarında, Barbegal'da bulunan meşhur Roma değirmeni idi; bu değirmende her biri 2 kW kapasiteli 16 çark bulunuyordu; çarkların toplam kapasitesi 30 kW'nin biraz üstündeydi (Sellin 1983). Greene (2000, 39) buna "antik dünyada mekanik gücün bilinen en büyük yoğunlaşması" demiş, Hodge (1990, 106) da "bütün ders kitaplarına göre, hiçbir zaman var olmamış bir şey, enerjiyle çalışan, kitlesel üretim yapılan, antik Roma'ya özgü gerçek bir montaj hattı fabrikası" diye betimlemişti. Daha yakından bakıldığında o kadar da etkileyici olmayan bir gerçekle karşılaşılır (Kutu 4.7).

Kutu 4.7 Barbegal su çarkları

Barbegal'da (çok büyük ihtimalle MÖ ikinci yüzyıl başında inşa edilmiş) 16 tane üstten su alan çarkın suyu yakınlardaki bir su kemerinden 30° eğimli iki paralel kanalla geliyordu (Benoit 1940). Sagui (1948) son derece gerçek dışı varsayımlara dayanarak (1,000 L/sn'lik bir su akışı, 2.5 m/sn'lik bir hız, günde ortalama 24 ton un üretimi) tesiste yaklaşık 80.000 kişi için ekmek üretmeye yetecek kadar un üretildiği sonucuna varmıştı. Ama Sellin (1983) daha gerçekçi rakamlar kullanarak (300 L/sn'lik bir su akışı, 1 m/sn civarında bir hız), her bir çarkın yaklaşık 2 kW yararlı enerji ürettiği, dolayısıyla toplam 32 kW yararlı enerji (yüzde 50 kapasite etkeniyle) ve günde 4,5 ton un üretildiği tahmininde bulunmuştu.

Ama Sellin Sagui'nin suyun kinetik enerjisinin yüzde 65'inin dönen değirmen taşının kinetik enerjisine çevrildiği varsayımını kullanmıştı, Smeaton'ın (1759) titiz hesaplamalarıysa on sekizinci yüzyılda çok daha iyi tasarlanmış, üstten su alan çarkların azami verimlilik yüzde 63 olduğunu gösteriyordu. Daha düşük bir akış –Leveau (2006) 240 ya da 260 L/sn'lik bir akışı savunmuştur– ile daha düşük bir verimliliğin (söz gelimi yüzde 55) birim başına 1,5 kW enerji anlamına gelecektir. Bu da bir bocurgata bağlanmış üç (ya da dört sayılı) Roma atının birleşik gücüne eşit olur ve günde 11.000 kişiyi besleyecek 3,4 ton un üretmeye yeterdi. Bunun da MÖ ikinci yüzyıldaki değirmenlerin performansından çok daha yüksek olduğuna, ama bir kitlesel üretim prototipinin gerisinde kaldığına kuşku yoktur.

Her halûkârda büyük su çarkları, sonraki asırlar boyunca rastlamasından ender bir şey oldu. On sekizinci yüzyılın ilk yıllarında bile, Avrupa'daki su çarkları ortalama 4 kW'den az enerji ürettiyordu. Sadece birkaç makine 7 kW'yi aşıyordu, kaba perdah ve kötü (yüksek sürtünmeli) çarklar enerji çevrim verimliliğinin düşük olmasına neden oluyordu. Dönemin en takdir edilen makineleri bile (1680 ile 1688 arasında Marly'de Seine üzerine inşa edilmiş çevresi 12 metre olan 14 tane büyük su çarkı) Versailles'daki 1.400 çeşme ve şelaleye su pompalama işini yerine getiremiyordu. Buranın potansiyeli yaklaşık 750 kW'ydi, ama dönüş hareketinin (uzun karşılıklı çubuklar sayesinde) verimsiz aktarımı yararlı üretimi sadece 52 kW seviyelerine indiriyordu; bu da bütün çeşmelere yetmiyordu (Brandstetter 2005).

Ama küçük su çarklarının bile büyük bir ekonomik etkisi vardı. Unun ortalama bir insanın günlük gıda enerjisi alımının yarısını sağladığı varsayıl-sa bile, çalışan sayısı 10'u bile bulmayan küçük bir su çarkı bir günde (10 saatlik değirmen işi) 3.500 kişiyi, yani orta büyüklükte bir Ortaçağ kasabasını besleyecek kadar tahıl öğütebiliyordu, el değirmenciligi ise en az 250 işçi gerektiriyordu. Yenilikçi makine tasarımıyla birlikte on sekizinci yüzyıl sonlarının su çarkları verimlilikte muazzam bir fark yarattı. Mükemmel bir örnek, günde 200.000 çivinin kesilmesi ve çakılması amacıyla, su enerjisiyle çalışan, patenti 1795'te ABD'de alınmış makinedir (Rosenberg 1975). Bu makinelerin yaygın olarak kullanılması çivi fiyatlarını sonraki 50 yıl içinde yaklaşık yüzde 90 azalttı.

Su çarkları, enerji çevrimi yapan en verimli geleneksel mekanizmalardı. Verimlilikleri, 1780'de kömürün yüzde 2'sinden azını yararlı güce çeviren en iyi buhar makinelerine nazaran bile yüksekti, on dokuzuncu yüzyıl sonuna gelindiğinde bile genelde yüzde 15'i aşamamış haldeydi (Smil 2005). Başka hiçbir geleneksel asli itici güç bu kadar fazla sürekli güç sağlayamı-yordu. Su çarkları hem Avrupa'da hem Kuzey Amerika'da sanayileşmenin ilk evrelerinde vazgeçilmezdi. Su çarkları (gerek bireysel ya da toplam kapasiteleri gerek tasarım verimliliği açısından) zirveye on dokuzuncu yüzyılda çıktı, buhar makinelerinin yeni sabit işler ve nakliyat işleri için benimsendiği dönemlerdi; yeni asli itici gücün yükselişi ve nihayet başat olması su gücünün önemini gölgeledi.

On dokuzuncu yüzyılın ilk altmış yılında çok daha fazla su gücü kapasitesi eklendi, bu makinelerin çoğu, buhar gücü, daha sonra da elektrik asli itici güç piyasalarını fethettiğinde dahi faaliyetini sürdürdü. Daugherty (1927)

1849'da ABD'de su çarklarının toplam kapasitesinin yaklaşık 500 MW olduğu (insan emeği hariç, ama iş hayvanları dâhil bütün aslı itici güçlerin yüzde 7'sinden az), buhar makinelerinin içkin kapasitesinin ise 920 MW olduğu tahmininde bulunmuştu. Gerçekleştirilen fiili işin karşılaştırılması daha da aydınlatıcıdır: Schurr ve Netschert (1960) 1850'de ABD'deki su çarklarının yaklaşık 2,4 PJ, yani kömür gücüyle çalışan buhar makinelerinin yaptığı toplam işin 2,25 katı kadar iş yaptığını, 1860'ta hâlâ yaklaşık yüzde 30 önde olduklarını, ürettikleri yararlı iş miktarının ancak 1860'ların sonunda buhar makinesinin gerisinde kaldığını hesaplamışlardı. 1925 gibi yakın bir tarihte Almanya'da 33.500 su çarkı faaliyet gösteriyordu (Muller ve Kauppert 2004), Avrupa'daki bazı su çarkları 1950 sonrasında bile faaliyetlerini sürdürdü.

On dokuzuncu yüzyılın yeni büyük tekstil fabrikaları özellikle su gücüne bağımlıydı. Örneğin 1823'te Massachusetts'te Lowell'da açılan ABD'nin ilk tam entegre kumaş (ağırlıklı olarak basma) üreticisi Merrimack İmalat Şirketi, Merrimack Nehri'ndeki büyük bir şelaleden (10 metre) temin edilen yaklaşık 2 MW enerjiye dayanıyordu. 1840'a gelindiğinde Britanya'nın en büyük tesisinde (Clyde'da, Glasgow yakınlarında Greenock'ta Shaw su işlerinin 1,5 MW'lik tesisi) dik bir yamaca inşa edilmiş, büyük bir rezervuardan su alan iki sıra halinde 30 çark bulunuyordu. En büyük su çarklarının çevreleri 20 metre, genişlikleri 4-6 metre, kapasiteleri 50 kW'nin epey üstündeydi (Woodall 1982).

Dünyanın en büyük su çarkı Robert Casement'ın tasarladığı, Great Laxey Madencilik Şirketi'nin 1854'te Man Adası'na Laxey madenlerinden su pompalamak için inşa ettirdiği Lady Isabella'ydı. Bu çark çevresi 21,9 metre, genişliği 1,85 metre olan, üstten su alan bir mekanizmaydı (2,5 rpm); (9,75 metre uzunluğundaki) çark parmakları ahşaptı, ama aks ve köşegen çekme çubukları dökme demirden yapılmıştı (Reynolds 1970). Çarkın yukarıdaki yamaçta bulunan bütün dereler su toplama tanklarına kanalizasyonla ediliyor, su daha sonra taş kulenin zemin katına borularla indiriliyor, ardından ahşap bir olukta yükseliyordu. Güç daha sonra ana aks kolu ve 180 metre uzunluğunda keresteden bağlantı çubuklarıyla kurşun-çinko şaftın dibine, 451 metre aşağıya pompa çubuğuna aktarılıyordu. Tekerin kuramsal olarak en yüksek güç seviyesi yaklaşık 427 kW'ydi. Normal faaliyet halinde yaklaşık 200 kW yararlı güç üretiyordu. Teker 1926'ya kadar faaliyet gösterdi ve 1965 sonrasında restore edildi (Manş Ulusal Mirası 2015) (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 Büyük Laxey su çarkının restorasyon sonrası hali (Corbis).

Ama devasa su çarklarının devri kısa sürdü. On dokuzuncu yüzyılın ilk yarısında bu makinelerin inşası sürerken, su türbinlerinin geliştirilmesi, asırlar önce dikey çarkların ortaya çıkmasından beri su gücüyle çalışan asli iticilerde gözlenen ilk radikal iyileşmeyi ortaya çıkardı. Benoît Fourneyron'un dışarı dairesel akışlı ilk tepkime türbini 1832'de Fraisans'ta demir döven çekiçlere güç vermek üzere inşa edildi. Sadece 1,3 metrelik çok alçak bir başı olmasına, rotor çevresinin 2,4 metre olmasına rağmen bu makinenin kapasitesi 38 kW'dı. Bundan beş yıl sonra Saint Blaisien iplik fabrikasında çalışan, iyileştirilmiş iki makine 108 ve 114 metrelik başlarıyla yaklaşık 45 kW kapasiteye sahipti (Smith 1980).

Yenilikçi bir tasarım olan içe akışlı türbin, Fourneyron'un makinesinin performansını çok geçmeden geride bıraktı, Layton'ın (1979) prototip bir sanayi araştırması ürünü dediği bir üründü bu, ama artık genel olarak Britanya kökenli Amerikalı mühendis James B. Francis'in (1815-1892) adıyla Francis türbini olarak bilinir. Daha sonraları Lester A. Pelton'ın (patenti 1889'da alınan) jet itişli türbinleri ile Viktor Kaplan tipi eksenel akış türbinleri (1920'de) ortaya çıktı. Yeni türbin tasarımları birçok sektörde su çarklarının yerini aldı. Örneğin Massachusetts'te 1875'te tesis edilen güç

ünitelerinin yüzde 80'ini bunlar oluştıruyordu. Devir aynı zamanda hızla sanayileşen bir toplumda su gücüyle çalışan makinelerin en fazla öneme sahip olduğu devirdi.

Örneğin, Massachusetts ve New Hampshire'ın güneyinde aşağı Merimack Nehri üzerinde, Lowell, Lawrence ve Manchester'da bulunan önde gelen üç tekstil fabrikasının her birinde toplam yaklaşık 7,2 MW'lık su makineleri vardı. Nehir havzasının toplamında yaklaşık 60 MW'lık tesis edilmiş kapasite bulunuyordu, her imalat tesisine ortalama yaklaşık 66 kW düşüyordu (Hunter 1975). 1850'lerin ortalarında dahi buhar, New England'da suya nazaran üç kat daha pahalı bir aslı itici güçtü. Dişli ve kayışlı şaftları döndüren doğrudan aslı itici güçler olarak su türbinlerinin devri biraz ani bir biçimde son buldu. 1880'e gelindiğinde büyük ölçekli kömür madenciliği ve daha verimli motorlar ABD'nin neredeyse her yerinde buharı su gücünden daha ucuz hale getirmişlerdi. On dokuzuncu yüzyıl son bulmadan evvel, çoğu su türbini doğrudan güç sağlamaya son vermiş, elektrik üreticilerini çalıştırmaya başlamıştı.

Rüzgâr Gücü

Hareketsiz güç olarak rüzgârdan yararlanmanın tarihi (yelkenlerin akıllıca kullanımı sayesinde rüzgârın harekete çevrilmesinin daha uzun tarihine karşılık) ve yel değirmeni tasarımlarının erken sanayi çağının karmaşık ve güçlü makinelerine doğru evrilmesi hem genel hem özel ulusal değerlendirmelerde gayet kapsamlı bir biçimde ele alınmıştır. Genel değerlendirmeler grubundaki dikkat çekici katkılar arasında Freese (1957), Needham (1965), Reynolds (1970), Minchinton (1980) ve Denny (2007) de yer alır. Önemli ulusal araştırmalarsa şunlardır: Britanya'daki değirmenler hakkında Skilton (1947) ve Wailes'in (1975), hakkında çok konuşulan Hollanda tasarımları hakkında Boonenburg (1952), Stockhuyzen (1963) ve Husslage'ın (1965) Amerika'nın batısının açılmasında kilit, ama yeterince takdir edilmemiş bir rol oynamış Amerikan yapımı makineler hakkında Wolff (1900), Torrey (1976), Baker (2006) ve Righter'ın (2008) çalışmaları. Sanayi öncesi devirde, su düşümünün neredeyse hiç bulunmaması nedeniyle küçük su çarklarının inşa edilemediği düz arazilerde (Hollanda, Danimarka ve İngiltere'nin bazı bölgeleri), Asya ve Avrupa'da mevsimsel olarak güçlü rüzgârlar alan bazı kurak bölgelerde yel değirmenleri en güçlü aslı iticiler haline geldi.

Yel değirmenlerinin dünya çapında ekonomik yoğunlaşmaya katkısı, su çarklarının katkısı kadar belirleyici olmadı, bunun nedeni ağırlıklı olarak kullanımlarının sadece Avrupa'nın bazı bölgelerinde yaygınlık kazanmış olmasıydı. Avrupa'daki yel değirmenleriyle ilgili ilk açık kayıtlar, on ikinci yüzyılın son yirmi-otuz yılına aittir. Lewis'e göre (1993) yel değirmenlerinin kullanılması önce Pers ülkesinden Bizans topraklarına yayıldı, burada Haçlılar'ın karşısına çıkan dikey makinelerle dönüştürüldüler. Yelkenleri dikey eksende yatay bir düzlemde dönen Doğu'daki makinelerin tersine bu değirmenler yatay bir eksene dikey olarak yerleştirilmiş halde dönüyordu, şaftları rüzgârla dönebiliyordu. İber yarımadasında, (Doğu Akdeniz'den ithal edilmiş) üçgen bezin kullanıldığı sekizgen yelkenli değirmenler dışında, Avrupa'daki ilk yel değirmenlerinin hepsi de "post" değirmenlerdi. Ahşap yapıları, dişli yuvası ve değirmen taşları, köşegen yerleştirilmiş dört sopayla desteklenen büyük bir merkezi gövdeye sabitlenmişti (Şekil 4.12). Rüzgârın yönü değiştiğinde duruşlarını değiştiremediklerinden rüzgâra bakacak şekilde döndürülmeleri gerekiyordu. Ayrıca şiddetli rüzgârlarda istikrarsızlardı ve fırtınada hasar görmeye açıktı, nispeten alçak olmaları en yüksek düzeyde performans göstermelerini engelliyor, bir sınırlılık yaratıyordu (Kutu 4.8).

"Post" değirmenler yirminci yüzyıla dek Doğu Avrupa'nın çeşitli bölgelerinde faaliyet göstermeye devam etseler de Batı Avrupa'da bunların yerini yavaş yavaş kule değirmenler ve "smock"*** yel değirmenleri almaya başladı. Bu tasarımların ikisinde de yalnızca değirmenin tepesindeki başlık ya zeminden ya da yüksek kulelerle birlikte galerilerden rüzgâra doğru dönüyordu. "Smock" değirmenlerin genellikle sekizgen, kaplama tahtaları ya da kiremitlerle kaplanan ahşap bir çerçevesi vardı. Kule değirmenler genellikle yuvarlak, yukarı doğru incelen taş yapılarıydı. İngiltere'de ancak 1745 sonrasında bir dişliyi döndürmek için ek bir yelkenin takılması, yelkenleri otomatikman rüzgâra doğru çevirmeye başladı. İlginçtir, Avrupa'da en fazla sayıda yel değirmenine sahip olan Hollandalılar bu yeniliği ancak on dokuzuncu yüzyıl başında benimsediler.

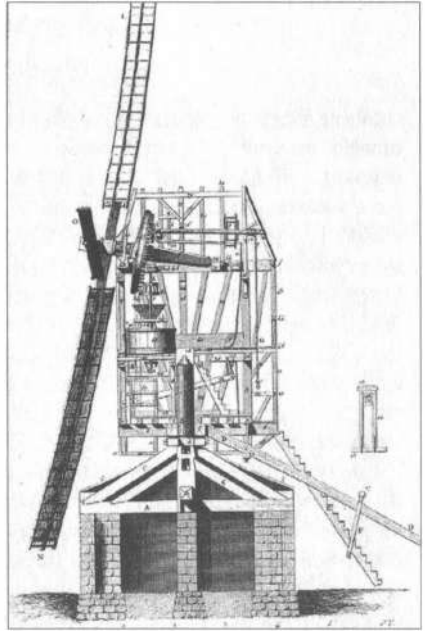
Ama Hollandalı değirmenciler daha etkili temren tasarımları geliştirmekte ilk oldular. Önceden düz olan temrenlere 1600 civarında eğik ön kenar panelleri eklemeye başladılar. Bunun sonucunda ortaya çıkan bombe, temrenlerin direncini azaltırken onlara daha fazla çekiş gücü kazandırdı. Daha

(**) Bu tür yel değirmenleri altıgen ya da sekizgen olur, rüzgâra bakan tarafları eğimlidir ve tepelerinde genellikle bir çatı bulunur. Köylülerin o dönem gündelik kıyafetleri önlük olduğundan, bunlara da önlük anlamına gelen "smock" adı verilmiştir -ç.n.

sonraki yenilikler arasında, yelkenlerin takılması, dökme metal dişli çark sistemleri ve bir merkezkaç düzenleyiciyle ilgili iyileştirmeler de vardı. Bu aygıt, sıklıkla zor ve tehlikeli olan, yelken bezinin farklı rüzgâr hızlarına göre değiştirilmesi işine bir son verdi. On dokuzuncu yüzyıl sonuna gelindiğinde İngilizler gerçek kanatlar, ön kenarları kalın aerodinamik temrenler takmaya başlamışlardı. Tahıl öğütme ve su pompalama (küçük taşınabilir makinelerle gemilerde de yapılıyordu bu iş) en yaygın uygulama alanlarıydı. Rüzgâr değirmenleri hem Avrupa'da hem İslam dünyasında (tebeşir, şeker kamışı, hardal, kakao) öğütmek ve ezmekte, kâğıt yapımında, kerestecilikte ve metal işlerinde de kullanılıyordu (Hill 1984).

Hollanda'da bütün bu işlerde kullanılıyorlardı, ama en büyük katkıları ülkenin alçak arazilerini kurutmaya ve ekin tarlaları için denizden toprak kazanma alanında görülüyordu. Hollanda'daki ilk drenaj değirmenleri on beşinci yüzyıl başına aittir, ama bunlar ancak on altıncı yüzyılda yaygınlık kazandı. İçi oyuk dikey *wipmolen* ahşap tekerleri kepçelerle çeviriyordu, daha küçük, taşınabilir *tjasker* Arşimet burgularını döndürüyordu, ama sadece verimli "smock" değirmenleri denizin kurutulup geniş topraklar kazanılması için gerekli gücü sağlayabiliyordu. Kuzey Hollanda'da Zaanse Schans'ta 1574 sonrasında yapılmış 600 yel değirmeni bulunuyordu, bunların birkaçı korunmuştur (Zaanse Schans 2015). Hollanda'daki en uzun yel değirmenleri (33 metre) Schiedam'da bulunuyor (orijinal 30 değirmenin beşi hâlâ durmaktadır), Jenever (Hollanda cini) üretimi için tahıl ürettiyordu.

Massachusetts sahilinde bulunanlara benzer eski Amerikan yel değirmenleri sıklıkla tuz çıkarmakta kullanılıyordu, ama sayıları az oldu hep.



Şekil 4.12 "Post" yel değirmeni. Üstünde bütün yapının dengelendiği ana ahşap, neredeyse her zaman meşeden yapılan direk, büyük gurdetalara (ana direği destekleyen yan parçalara) bağlanmış dört tane köşe parçasıyla dengelenir. Yel değirmeninin dönüşleri değirmen taşına bir fener ve taç donanımıyla aktarılır, tek erişim de merdivenle sağlanır. *Encyclopédie*'den yeniden basım (Diderot ve d'Alembert 1769-1772).

Kutu 4.8

Rüzgâr enerjisi ve gücü

Ortalama rüzgâr hızı kabaca yükseklik gücünün yedide biri oranında artar. Bu demektir ki örneğin, hız yerin 20 metre üstünde, 5 metre üstünde olduğundan yüzde 22 daha fazla olacaktır. 1 m^3 havanın (jul olarak) kinetik enerjisi $0,5v^2$ 'ye eşittir, burada hava yoğunluğu (yere yakinken $0,12 \text{ kg/m}^3$) ve v ortalama rüzgâr hızıdır (m/sn olarak). Rüzgâr gücü (watt olarak) rüzgâr enerjisi, rüzgâr yönüne dik olarak makinenin kanatlarının kapladığı alan (A , m^2 olarak) ve rüzgâr hızının küpünün çarpımına eşittir: $0,5AV^3$. Rüzgâr gücü ortalama hızın küpüyle birlikte yükselirken, hızın iki katına çıkması mevcut gücü sekiz kat artırır. İlk (nispeten ağır ve kötü dişli) yel değirmenleri de öğütmenin ya da pompalamanın başlaması için en az 25 km/s (7 m/sn) rüzgâra ihtiyaç duyardı; daha düşük hızlarda ağır ağır dönerlerdi, ama rüzgâr hızı 10 m/sn 'nin üstüne çıktığında yelkenlerin dürülmesi (12 m/sn 'nin üstüne çıktığında açılması) gerekirdi, bu da yararlı iş için ancak dar bir aralık bırakırdı (günlük 5-7 saatlik bir dönüş) (Denny 2007).

Açıktır ki bu gerçeklikler sürekli canlı rüzgârların estiği yerlerin lehineydi. Daha sonraları daha verimli, dişlileri düzgün işleyen, gereği gibi yağlanmış tasarımlar hızı 4 m/sn 'nin üstüne çıkan rüzgârlarda gayet iyi çalışacak, günde 10-12 saat yararlı iş sağlayacaktı. Sanayi öncesi toplumlar ancak yere yakın eser rüzgârlardan yararlanabiliyordu, çoğu yel değirmeninin kanat genişliği 10 metreden azdı. Rüzgâr akışları büyük zamansal ve uzamsal değişiklikler de gösterir. Rüzgârlı yerlerde bile yıllık rüzgâr hızı, yüzde 30'lara varan bir dalgalanma anlamına gelir ve makinenin yerinin sadece 30-50 metre değiştirilmesi ortalama hızı kolayca yarı yarıya azaltabilir ya da artırabilir. Sanayi öncesi dönemde kara ulaşımının sınırlı bir kapasiteye sahip olması, en rüzgârlı yerlere yel değirmeni kurulmasını engelliyordu ve değirmenler sıklıkla hareketsizdi. Hiçbir rüzgâr makinesi, mevcut rüzgâr gücünün tamamından yararlanamaz: Bu hava akışının tam anlamıyla durdurulmasını gerektirirdi! Elde edilebilecek azami güç, kinetik enerji akışının $16/27$ 'sine ya da yaklaşık yüzde 60'ına eşitti (Betz 1926). Fiili performans ise sanayi öncesi yel değirmenlerinin yüzde 20-30'u kadardı. Dolayısıyla on sekizinci yüzyıldaki kanat eni 20 metre olan bir kule değirmeninin kuramsal olarak gücü yaklaşık 189 kW, hızı 10 m/sn olurdu, ama 50 kW 'den az güç veriyordu.

Yeni Amerikan yel değirmenleri on dokuzuncu yüzyıl ortasından hemen sonra, küçük derelerin ve yağmurların azlığı nedeniyle küçük su çarklarının kullanılmadığı, ama doğal pınarların az olması nedeniyle kuyulardan su çekmenin gerektiği Büyük Düzlükler'de batıya doğru yayılma sırasında ortaya çıktı. Amerikan yel değirmenleri gücü ağır (ve pahalı) Hollanda değirmenleri gibi (birkaç büyük ve geniş yelken kullanarak) elde etmek yerine, tek tek demiryolu istasyonları ve çiftliklere hizmet eden daha küçük, basit, keseye uygun, ama etkili makinelerdi.

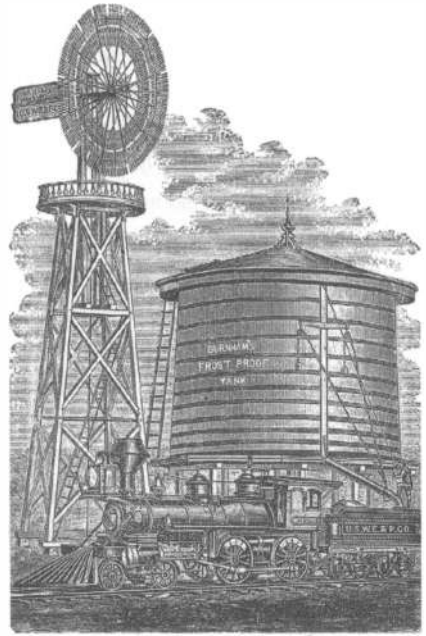
Genellikle, tek parça ya da parçalara ayrılabilir çarklara sabitlenmiş çok sayıda gayet dar temren ya da suntadan oluşuyorlardı; ayrıca ya merkezkaç ya yan pervane düzenleyicisi ve bağımsız dümenler de donanımları

arasındaydı. 6-25 metre yüksekliğindeki kafes kulelerin tepesine yerleştirilen bu değirmenler, evler, sığırlar ya da buharlı lokomotifler için su pompalamakta kullanılıyordu (Şekil 4.13). Bu yel değirmenleri, dikenli tel ve demiryolları Büyük Düzlükler'in açılmasına katkıda bulunan, ikonlaşmış icatlardı (Wilson 1999). Daugherty'nin tahminlerine göre ABD'de ülke çapında yel değirmenlerinin kapasitesi 1849'da yaklaşık 320 MW iken 1899'da 500 MW'ye yükselmiş, 1919'da 625 MW ile zirveye tırmanmıştı.

İlk yel değirmenlerinin kapasitesiyle ilgili bilgiye sahip değiliz. İlk güvenilir deneysel ölçümlerin tarihi 1750'ler sonudur, John Smeaton yelkenleri 9 metre olan sıradan bir Hollanda değirmeninin gücünü on adam ya da iki beygirin gücüne eşit saymıştır (Smeaton 1759). Küçük bir modelle yapılmış ölçümlere dayalı bu

hesaplama, yağlık tohum preslemedeki fiili performansla da doğrulanmıştı. Rüzgâr gücüyle çalışan değirmenler dakikada yedi kez dönerken, iki beygir aynı süre zarfında zar zor 3,5 kez dönüyordu. 30 metrelik bir yelkeni olan, on sekizinci yüzyıla ait tipik büyük bir Hollanda değirmeni yaklaşık 7,5 kW üretebiliyordu (Forbes 1958). 8-9 m/s'lik rüzgârlarla 35 m³ çekme yetisine sahip, 1648'den kalma iyi korunmuş bir Hollanda drenaj değirmeninde yapılmış modern ölçümlere göre rüzgâr shaftının gücü yaklaşık 30 kW'ydi, ama büyük aktarım kayıpları nedeniyle yararlı üretim 12 kW'den az oluyordu.

Bütün bu sonuçlar, Rankine'in geleneksel aslı itici güçlerle ilgili karşılaştırmalarını doğrular. Rankine "post" yel değirmenlerinin 1,5-6 kW, kule değirmenlerinin 4,5-10,5 kW yararlı güç ürettiğini ileri sürmüştü (Rankine 1866). Amerikan yel değirmenlerinde yapılan ölçümler bunların yararlı gücünün 2,5 metrelik değirmenlerde sadece 30 W olduğunu, 7,6 metrelik me-



Şekil 4.13 Halladay yel değirmeni. On dokuzuncu yüzyılın son on yılında Halladay yel değirmenleri en popüler Amerikan markasıydı. Batı'da demiryolu istasyonlarında sık sık rastlanan bu değirmenler buharlı lokomotifler için su pompalardı. Wolff'tan yeniden basım (1900).

kanizmalardaysa 1.000 W'ye çıkabildiğini gösterir (Wolff 1900). Yararlı güç bakımından tipik oranlar şöyleydi: On dokuzuncu yüzyıla ait Amerikan tasarımlarında 0,1-1 kW, küçük "post" değirmenlerde 1-2 kW, büyük "post" değirmenlerde 2-5 kW, sıradan "smock" ve kule değirmenlerde 4-8 kW, on dokuzuncu yüzyılın en büyük makinelerinde 8-12 kW. Bu da Ortaçağ'a özgü tipik yel değirmenlerinin dönemin su çarkları kadar güçlü olduğu, ama on dokuzuncu yüzyıl başında birçok su çarkının, en büyük kule değirmenden beş kat daha güçlü olduğu, bu farkın ancak sonraları su türbinlerinin gelişmesiyle birlikte açıldığı anlamına gelir.

Su çarkları örneğinde olduğu gibi, yel değirmenlerinin hareketsiz güç sağlayan mekanizmalar olarak katkısı on dokuzuncu yüzyılda zirveye tırmandı. Britanya'da yel değirmenlerinin toplam sayısı 1800'de 10.000'i bulmuştu, on dokuzuncu yüzyıl sonunda Hollanda'da 12.000, Almanya'da 18.000 yel değirmeni bulunuyordu; 1900'e gelindiğinde Kuzey Denizi çevresindeki ülkelere (toplam kapasitesi 100 MW olan) yaklaşık 30.000 değirmen yerleştirilmişti (De Zeeuw 1978). ABD'de ülkenin batıya yayılması sırasında 1860 ile 1900 arasında birkaç milyon yel değirmeni dikilmişti ve bu sayı ancak 1920'lerin başından itibaren azalmaya başladı. 1889'a gelindiğinde Halladay, Adams, Buchanan gibi markaların başı çektiği 77 imalatçı bulunuyordu (Baker 2006). Avustralya, Güney Afrika ve Arjantin'de yirminci yüzyılda çok sayıda Amerikan tipi su pompalayan yel değirmeni kullanıldı.

BIYOKÜTLE YAKITLARI

Hemen hemen bütün geleneksel toplumlar sadece biyokütle yakıtları yakarak ısı ve ışık üretebiliyordu. Odunsu fitokütle, bundan elde edilen odun kömürü, ekin artıkları, kurutulmuş tezcek evlerin ısınması, yemek pişirmek, ışıklandırma ve küçük ölçekli zanaat imalatı için gerekli bütün enerjiyi ürettiyordu; daha sonraları daha geniş ölçekli sanayi öncesi girişimlerde bu yakıtlar nispeten çok miktarda tuğla ve seramiğin pişirilmesinde, cam yapımında, metallerin eritilip şekillendirilmesinde kullanıldı. Dikkate değer yegâne istisnalara sadece Ortaçağ İngilteresi (Nef 1932) ve Çin'de rastlanmıştır; Çin'in kuzeyinde kömür demir yapımında kullanılıyordu, Sichuan'daysa deniz suyunu buharlaştırıp tuz üretmek için doğal gaz yakılıyordu (Adshead 1997).

Biyokütle yakıtlarının temin edilmesi, her gün düşmüş dalları toplamak, kurumuş dalları kırmak, kurumuş ot yolmak, tahıl hasadı sonrasında kuru saman toplayıp evin mahzeninde depolamak için yakındaki ormana,

koruya ya da dağ eteğine kısa bir gezi yapmak kadar kolay olabiliyordu. Ama sıklıkla çoğu kez, kadın ve çocuklar uzun yürüyüşler yaparak yakılabilir biyokütle topluyor, zahmetli ağaç kesme, yorucu odun kömürü yapma işini gerçekleştiriyor, ayrıca öküzlerin çektiği arabalarla ya da deve kervanlarıyla ormanların uzun zaman önce yok edildiği düzlüklerin ortasından veya çöllük bölgelerden geçerek yakıtı uzak yerlere taşıyorlardı. Yakıtın bolluğu ya da azlığı ev tasarımlarının yanı sıra giyim kuşam ve yemek pişirme pratiklerini de etkilemişti. Bu enerjilerin temin edilmesi, ormanların geleneksel olarak yok edilmesinin başlıca gerekçelerinden biriydi.

Batı Avrupa ülkelerinde bu bağımlılık 1850 sonrasında hızla ortadan kalktı. Aslı enerji kaynaklarının en iyi yeniden kurguları, Fransa'da kömürün 1870'lerin ortasında bütün yakıt enerjisinin yarısından fazlasını temin etmeye başladığını, ABD'de kömür ve petrolün (ve bir de az miktarda doğal gazın) 1884'e gelindiğinde yakacak odunun enerji içeriğini geride bıraktığını gösterir (Smil 2010a). Ama başka yerlerde fitokütleyle bağımlılık yirminci yüzyılın ortalarına dek sürdü: Asya'da nüfusun en kalabalık olduğu ülkelerde 1960'lara, 1970'lere kadar başat enerji olarak kaldı, Afrika'da Sahraaltı bölgede hâlâ tek büyük aslı enerji kaynağıdır.

Bu süregiden kullanım geleneksel yakıtların verimsiz yakılmasındaki değişiklikleri ve bunun sonuçlarını, bu durumun sağlık açısından yaygın etkilerini incelememizi mümkün kılmış, son yıllarda gerçekleştirilen gözlemler ve analizler (Earl 1973; Smil 1983; RWEDP 2000; Tomaselli 2007; Smith 2013) de böylece sanayi öncesi biyokütle yakmanın uzun tarihini anlamamıza katkıda bulunmuştur. Son dönemdeki bu bulguların birçoğu sanayi öncesi ortamlara son derece uygundur, zira temel ihtiyaçlar değişmemiştir; geleneksel toplumlardaki çoğu kişi için enerji ihtiyaçları her zaman günde iki-üç öğün yemek pişirmek, soğuk iklimlerde en az bir odayı ısıtmak ve bazı bölgelerde hayvanlar için yem hazırlayıp yiyecek kurutmaktan ibaret olmuştur.

Odun ve Odun Kömürü

Odun, bulunabilen herhangi bir biçimde kullanılıyordu: Düşmüş, kırılmış, kesilmiş dallar, budaklar, ağaç kabukları ve kökler. Ama kesilmiş gövdeden elde edilen odun ancak iyi kesici aletlerin (baltalar, daha sonra da testereler) yaygın olduğu yerlerde bulunuyordu. Odun çeşitleri şaşırtıcı derecede az bir fark yaratıyordu. Binlerce odunsu bitki vardı, bunlar arasında ciddi fiziksel farklar bulunsan da (bazı meşelerin özgül ağırlığı, bazı kayınların özgül ağır-

lığının iki katı kadardı) kimyasal bileşimleri dikkat çekici derecede tekti (Smil 2013a). Odunun yaklaşık beşte ikisi selüloz, kabaca üçte biri yarı selüloz, geri kalanı da linyindir (odun özü); temel öğeler açısından karbon toplam kütleinin yüzde 45-56'sını, oksijen yüzde 40-42'sini oluşturur. Odunun enerji içeriği linyin ve reçine miktarıyla birlikte artar (bunlar sırasında 26,5 MJ/kg ve 35 MJ/kg içerebilir, selüloz ise 17,5 MJ/kg'yi bulur), ama sıradan odun türleri arasındaki farklar gayet azdır, çoğunlukla sert odunlarda 17,5-20 MJ/kg, yumuşak odunlardaysa reçine içerikleri daha fazla olduğu için 19-21 MJ/kg'dir (Kutu 4.9).

Odunun enerji yoğunluğu her zaman mutlaka kuru maddeyi ifade etmelidir, ama geleneksel toplumlarda yakılan odunun gayet büyük farklılıklar gösteren bir nem içeriği de vardı. Yeni kesilmiş olgun sert odunların (yapraklı ağaçlar) genelde yüzde 30'u, yumuşak odunlarınsa (kozalaklı ağaçlar) yüzde 40'ından fazlası sudur. Bu tür odunlar verimsiz bir biçimde yanar, zira ortaya çıkan ısının önemli bir bölümü bir tencereyi ya da odayı ısıtmaktan ziyade salınan nemi buharlaştırmaya gider. Odunun yüzde 67'sinden fazlası nemse, tutuşmayacaktır. İşte bu nedenle düşmüş kuru dallar ya da ölü ağaçların parçaları taze oduna tercih ediliyor ve odun yakılmadan önce genellikle açık havada kurutuluyordu. Kesilmiş odunlar istifleniyor, bir korunağa yerleştiriliyor, en az birkaç ay kurutuluyordu, ama kuru iklimlerde bile nemin yaklaşık yüzde 15'ini koruyordu. Oysa tersine odun kömürü sadece bir nem izi içeriyordu, fiyatını ödeyebilecek olanların her zaman tercih ettiği bir biyokütle yakıtıydı.

Kutu 4.9
Biyokütle yakıtların enerji içeriği

Biyokütle yakıt	Su içeriği (%)	Kuru maddenin enerji içeriği (MJ/kg)
Sert odunlar	15-50	16-19
Yumuşak odunlar	15-50	21-23
Odun kömürü	<1	28-30
Ekin artıkları	5-60	15-19
Kuru saman	7-15	17-18
Kurutulmuş tezek	10-20	8-14

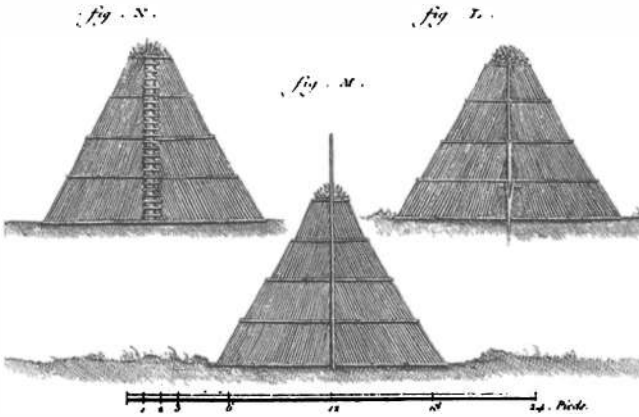
Kaynak: Smil (1983) ve Jenkins (1993).

Kalitesi yüksek olan bu yakıtın neredeyse hiç dumanı yoktur, iyi bitümin kömürününkine eşit olan enerji içeriği de açık havada kurutulmuş oduna göre kabaca yüzde 50 yüksektir. Odun kömürünün diğer büyük avantajı saflığının yüksek olmasıdır. Neredeyse saf karbon olduğundan pek sülfür ya da fosfor içermez. Bu da onu sadece ev içinde değil, tuğla, kiremit, kireç üretilen ocaklarda, cevherlerin eritilmesinde kullanılabilecek en iyi yakıt yapar. Eritme açısından önemli bir diğer avantajsa odun kömürünün gayet gözenekli olması (özgül ağırlığı sadece 0,13-0,20 g/cm³tür), ocaklarda indirgeyici gazların yükselmesini kolaylaştırmasıdır (Sexton 1897). Ama bu mükemmel yakıtın geleneksel üretimi çok mürşifçeydi.

İstiflenen odunun ilkel toprak ya da çukur ocaklarda kısmen yakılması karbonlaşma için gerekli ısıyı üretir. Bunun sonucunda ilave yakıta gerek kalmaz, ama nihai ürünlerin hem niteliğini hem niceliğini kontrol etmek zordur. Bu tür ocaklarda odun kömürünün tipik getirileri sadece açık havada kurutulmuş odunların yüzde 15'i ile yüzde 25'i arasındaydı. Bu demektir ki baştaki enerjinin yaklaşık yüzde 60'ı, odun kömürü yapımı sırasında kayboluyordu, hacim açısından değerlendirildiğinde 1 ton odun kömürü yapmak için 24 m³ (en az 9-10 m³) odun gerekir (Şekil 4.14). Ama getiri yakıtın niteliğindedir: Yakılması 900 derecelik ısı oluşturabilir, en iyisi körük kullanımıyla sağlanan ilave havayla birlikte bu ısı 2.000 dereceye çıkarılabilir, ki bu da demir cevherini eritmeye yeter de artar (Smil 2013a).

Odunun yakıt (ayrıca konut ve gemi inşası) için toplanması ormanların yaygın bir biçimde ortadan kaybolmasına neden olmuştu, bunun birikimsel etkisi önceden ormanların yoğun olduğu bölgelerde kaygılandırıcı düzeye ulaşmıştı. On sekizinci yüzyıl başında Massachusetts'in yaklaşık yüzde 85'i ormanlarla kaplıydı, ama 1870'e gelindiğinde eyaletin sadece yüzde 30 kadarı ağaçlarla kaplıydı (Foster ve Aber 2004). Bekleneceği üzere, Henry David Thoreau (1817-1862) 6 Mart 1855'te *Journals*'ta şu satırları yazmıştı:

Ormanlarımız o kadar azaldı ki bu kış odun kesme işi bizi can evimizden vurdu. En azından biz yürüyüşçüler öyle hissettik. Bu mevsimde oduncunun baltasının işitildiği, dişe dokunur ağaçlık bir yer kalmamış gibi. Beyaz Göl, Fair Haven Gölü kıyılarındakiler ölümcül bir tecavüze uğramışlar, Yarlar'ın, Colburn çiftliği, Beck Stow vs. vs. en tepelerindekiler traşlanmış (Thoreau 1906, 231).



Şekil 4.14 Odun kömürü üretimi zeminin düzlenmesi ve merkezi direğin yerleştirilmesiyle başlıyordu; kesilmiş odunlar onun etrafına yerleştiriliyor, kille kaplandıktan sonra yakılıyordu. *Encyclopédie*'den yeniden basım (Diderot ve d'Alembert 1769-1772).

Yirminci yüzyılın ikinci yarısına kadar biyokütle yakıtlarına bağımlı kalan geleneksel toplumlar hakkındaki araştırmalar, tropikal bölgelerin en yoksul köylerinde yıllık yakıt ihtiyacının kişi başına 500 kg'den az olduğunu gösterir. Kışların ağır geçtiği, tuğla, cam, kiremit ve metallerin oduna dayalı olarak üretilip deniz suyunun odun yakarak kurutulduğu enlemlerde beş kat

daha fazla biyokütle kullanılıyordu. Almanya’da 1 ton cam üretmek için 2 tonu bulacak kadar odun yakılıyordu (bunun neredeyse tamamı ısı üretmek yerine potasyum elde etmek için yakılıyordu), deniz suyunun odunla ısıtılan büyük demir tavalarda buharlaştırılmasıysa 1 kg tuz için 40 kg odun tüketilmesini gerektiriyordu (Sieferle 2001).

Antik dönemlerde tipik biyokütle yakıt tüketimine ilişkin hiçbir kayıt bulunmaz, bazı ortaçağ toplumları için sadece birkaç güvenilir nicelik kaydedilmiştir. Benim tahminlerime göre MÖ 200 civarında Roma İmparatorluğu’nda yıllık ortalama enerji ihtiyacı kişi başına toplam 650 kg’ydı, yani kabaca 10 GJ, başka bir deyişle günde 1,8 kg’ydı (Kutu 4.10). Mevcut en iyi yeniden kurguya göre Ortaçağ (1300 civarı) Londrası’nda yakacak odun talebi yıllık ortalama yaklaşık 1,75 ton oduna, yani kabaca kişi başına 30 GJ’ye eşitti (Galloway, Keene ve Murphy 1996). Kömüre geçmelerinden hemen önce Batı Avrupa ve Kuzey Amerika’ya ilişkin tahminler ortalama ihtiyaçların çok daha yüksek olduğunu gösterir.

On dokuzuncu yüzyılda sadece odunla ısınan ve pişiren Kuzey Avrupa, New England, Orta Batı ve Kanada toplulukları kişi başına yılda ortalama

Kutu 4.10

Roma İmparatorluğu’nda odun tüketimi

İhtiyatlı tahminler başlıca odun tüketim alanlarının hepsini kapsamaktadır (Smil 2010c). Ekmek ve yahniler Roma’nın temel yemeğiydi, kentlerdeki pistrinae ve tabernae’de her gün kişi başı en az 1 kg oduna ihtiyaç olurdu. Mekân ısıtma için yılda en az 500 kg odun gerekirdi, imparatorluk nüfusunun sıcak Akdeniz’in ötesinde ılıman iklim kuşağında yaşayan, kabaca nüfusunun üçte birini oluşturan kesim için gerekliydi bu miktar. Buna her yıl kişi başı ortalama 2 kg metal tüketildiğini de eklemek gerekir, bu da metalin kilogramı başına 60 kg odun gerektiriyordu. Bütün bunların toplamı kişi başı 650 kg yapar (kabaca 10 GJ, günde yaklaşık 1,8 kg), ama Roma’da odun yakma verimi genelde düşük olduğundan (yüzde 15’in altında) bu odunun yakılmasından elde edilen enerji, ancak 1,5 GJ/yıl seviyesindeydi, 50 L yani bir tank dolusu benzine eşitti.

Karşılaştırmak amacıyla belirtelim: Allen’in kurguladığı (2007) Roma döneminde iki hane tüketilenlerle dolu iki sepetten, saygın seçenek dediği sepette günde kişi başına ortalama yaklaşık 1 kg odun tüketildiği varsayılmıştı; “kıt kanaat geçinme” sepetindeyse bu oran kişi başına 0,4 kg’ydı. Ama Allen’in verdiği oranlar metalurji ve zanaat üretiminde kullanılan yakıtı dikkate almıyordu. Malanima (2013a) Roma İmparatorluğu’nun ilk dönemlerinde kişi başına ortalama odun tüketiminin yılda 4,6-9,2 GJ olarak tahmin eder, toplam enerji kullanımının yarısına eşittir bu rakam, diğer yarısıysa gıda ve yem enerjisi arasında kabaca 2:1 oranında bölünmüştü. Malanima’ya göre daha yüksek toplam kişi başına 16,8 GJ’dir, benim gıda, yem ve odun için tahminlerim kişi başına 18-19 GJ’dir (Smil 2010c).

ma 3 ilâ 6 ton yakıt tüketiyordu. On sekizinci yüzyılda Alman hanelerinde tüketim oranı bu aralıktaydı (Sieferle 2001). Avusturya ortalaması 1830'da kişi başı 5 tona yakındı (Krausmann ve Haberl 2002), on dokuzuncu yüzyılda Amerika'da ülke çapındaki ortalama da (Schurr ve Netschert 1960). Bu rakam giderek artmakta olan sanayi (ağırlıklı olarak metalurjik odun kömürü) ve ulaştırma alanındaki kullanımları içerse de evlerdeki tüketim 1850'lerde Amerikan odunlarının başlıca talibiydi.

Ekin Artıkları ve Tezek

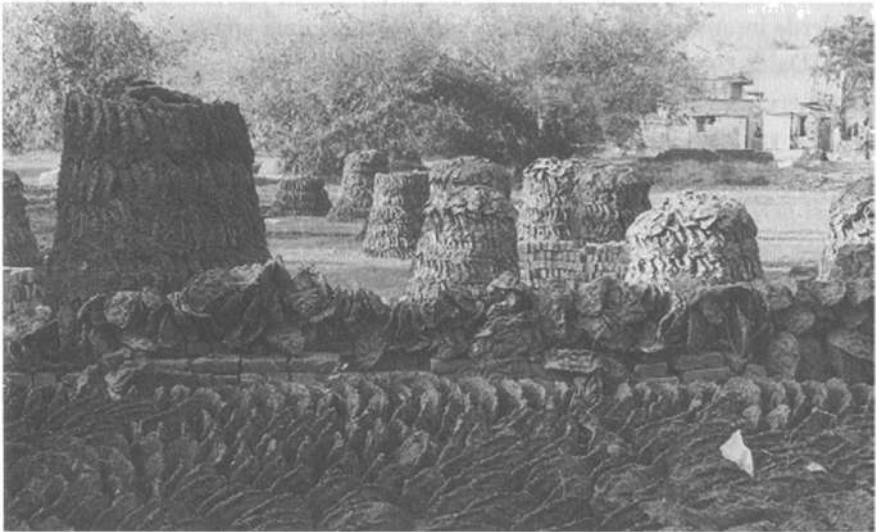
Ekin artıkları ormanları kesilmiş, yerleşimin yoğun olduğu tarımsal düzlükler ve kurak, ağaçların seyrek olduğu bölgelerde vazgeçilmez yakıtlardır. Tahıl sapları ve samanları genellikle en fazla bulunan artıklardır, ama yerel ve bölgesel olarak önemli başka kalıntılar da vardır. Bunlar arasında baklagil sapları, yumru yaprakları, pamuk sapları ve kökleri, keten sapları, şeker kamışı yaprakları, meyve ağaçlarının dalları ve filizleri yer alır. Bazı ekin artıklarının yakılma öncesinde kurutulması gerekir. Olgun sapların sadece yüzde 7 ilâ 15'i sudur, enerji içerikleri de sert ağaçlarınkine benzer.

Ama özgül ağırlıkları besbelli ki çok daha düşüktür, dolayısıyla kışı çıkaracak kadar saman depolamak hiçbir zaman kesilmiş odun istiflemek kadar kolay bir iş olmamıştır. Ekin artıklarının düşük yoğunluklu olması açık havadaki yangınlar ve basit ocakların da neredeyse sürekli söndürülmesi gerektiği anlamına geliyordu. Birbirine rakip, enerjiyle ilgili olmayan birkaç kullanım nedeniyle ekin artıkları genellikle az bulunuyordu. Baklagil kalıntıları yüksek proteinli mükemmel bir yem ve gübreydi. Tahıl samanları iyi bir geviş getiren hayvan yemi ve hayvan yatağıdır; İngiltere ve Japonya dâhil birçok toplum tahıl samanlarını evlerin damlarını örtmek için kullanmıştır, bu malzeme basit alet ve ev içi alet imalinde de kullanılan bir hammaddeydi.

Buna bağlı olarak yakılabilir fitokütlenin her bir parçası sıklıkla evde kullanılmak üzere toplanıyordu. Ortadoğu'nun her yerinde dikenli çalılar sıklıkla yakılıyordu, hurma çekirdekleri de odun kömürü yapmakta kullanılıyordu. Kuzey Çin Ovası'nda tırmıklı, oraklı, sepetli, çantalı kadınlar düşmüş sürgünleri, yaprakları ve kuru otları topluyorlardı (King 1927). Asya'nın iç kesimlerinde, ayrıca Hint alt kıtasında, Ortadoğu, Afrika ve Amerika kıtalarının bazı bölgelerinde kurutulmuş tezek pişirmede kullanılan önemli enerji kaynağıydı. Açık havada kurutulmuş tezeğin ısı değeri ekin artıkları ya da otlarinkine benzer (Kutu 4.9).

Pek o kadar takdir edilmeyen bir gerçeklik, tezeğin Amerika'nın Batı'ya doğru yayılmasına temel bir katkıda bulunmuş olmasıdır (Welsch 1980). Yabani bufalo ve sığır tezeği kıtanın bir ucundan diğerine ilk kez kat edilmesini, sonrasında on dokuzuncu yüzyılda Büyük Düzlükler'in sömürgeleştirilmesini mümkün kıldı. Oregon ve Mormon Yolları'nı kullanan seyyahlar "bufalo odunu" toplamışlardı, ilk yerleşimciler de kış erzaklarını iglo şeklinde ya da ev duvarlarına dayayarak istiflemişlerdi. İnek odunu ya da Nebraska meşesi diye bilinen bu yakıt eşit yanıyor, pek az koku ve duman çıkarıyordu, ama hızla yanması ateşin neredeyse sürekli beslenmesini gerektiriyordu. Güney Amerika'da lama tezeği Andlar'ın yüksek düzlüklerinde, Güney Peru, Doğu Bolivya, Kuzey Şili ve Arjantin'de İnka İmparatorluğu'nun kalbinde başlıca yakıttı (Winterhalder, Larsen ve Thomas 1974). Afrika'da Mısır köylerinin yanı sıra Sahil bölgesinde de deve ve sığır tezeği kullanılmıştı. Sığır tezeği Aşya'da hem kurak hem musonların gözlendiği bölgelerde büyük miktarlarda toplanıyordu, Tibetliler de her zaman yak tezeği kullanıyorlardı. Genel olarak sadece koyun tezeğinden kaçınılıyordu, çünkü yakılması keskin bir dumana neden oluyordu.

Tezeğin birçok kırsal bölgede hâlâ yaygın olduğu Hindistan'da hem inek hem manda dışkıları çoğunlukla *harijan* (dokunulmazlar) kastından çocuklar ve kadınlar tarafından hem evde kullanılmak hem satılmak için



Şekil 4.15 Hindistan'da Uttar Pradeş'te Varanasi'de kurumaya bırakılmış inek dışkısı istifleri (Corbis).

düzenli olarak toplanır (Patwardhan 1973). Tezek ya kuru parçalar ya da taze biyokütle halinde toplanıyordu (ve hâlâ toplanır). Taze dışkı saman ya da tahıl kabuklarıyla karıştırılır, elle yassılaştırılıp şekillendirilir ve ev duvarlarına yapıştırılarak ya da istiflenerek diziler halinde güneşte kurutulur (Şekil 4.15). Güney Asya’da kırsal enerji kullanımı hakkında kısa süre önce yapılan bir araştırmada Hindistan’da hanelerin yüzde 75’inin, Nepal’de yüzde 50’sinin ve Bangladeş’te yüzde 47’sinin pişirme amacıyla hâlâ tezek kullandığı ortaya konmuştu (Behera vd. 2015).

HANE İHTİYAÇLARI

Kadim bir Çin atasözünde insanların onlarsız bir gün bile geçiremeyecekleri şeyler doğru sıralamayla verilir: Yakacak odun, pirinç, yağ, tuz, salça, sirke ve çay. Tahılların gıda enerjisinin büyük bölümünü temin ettiği geleneksel tarım toplumlarında, (buharda, haşlayarak ya da fırınlayarak) pişirme sert tohumları yenabilir kılmak için gerekliydi. Ama (sepetler, kavanozlar ya da küplerde saklanan) tahılların pişirilmeden önce öğütülmeleri gerekiyordu, tahılların öğütülmesi işlenmelerinin neredeyse genel, tarihsel olarak da hemen her zaman ilk adımıydı; çeşitli tohumlar, meyveler ve kuru yemişlerin preslenerek yağlarının çıkarılmasına sonradan geçildi. Besleyici olmayan etkenlerin ortadan kaldırılması ya da uzun süre depolanmalarını sağlamak için yumrular da işleniyordu, şeker kamışı ezilip tatlı suyu çıkarılıyordu. Bütün bu işlerde insan enerjisi ancak tedricen hayvanların da emeğiyle pekiştirildi.

Daha önce belirttiğimiz üzere, tahılların öğütülmesinde hayvansı olmayan gücün ilk kullanımı (küçük değirmen taşlarını döndüren yatay su çarkları) yaklaşık iki bin yıllıktır.

Doğu Asya’da yüksek ateşte pişirme ve buğulama nispeten az bir ısı enerjisi gerektiriyordu. Oysa tersine Eski Dünya’nın geri kalanında demirbaş yiyecek olan ekmeğin pişirilmesi, Ortadoğu, Avrupa ve Afrika’da yaygın olarak icra edilen çevirerek pişirme için hatırı sayılır yakıt girdilerine ihtiyaç vardı. Bazı toplumlarda evcil hayvanlar, her şeyden önce domuzlar için yem hazırlamakta da yakıtı ihtiyaç duyuluyordu. Orta enlemlerde mevsime bağlı olarak ısıtma bir ihtiyaçtı, ama (kutup altı bölgeler dışında) sanayi öncesi evler genellikle kısa süreli, nispeten de düşük ısılarda ısıtılıyordu.

Yakıtın az olduğu bazı bölgelerde bazı aylarda havanın soğuk olmasına rağmen kışları evler hiç ısıtılmıyordu: Yangzi’nin güneyinde Ming ve Qing hanedanları döneminde ormansızlaştırılmış alçak düzlüklerde ısıtma

işlemi yapılmıyordu. Ama (Yangzi'nin güneyinde kalan) Jiangnan'ın kuzey kesimlerinde ocak ve şubat ayları sert geçiyor, ısı 2 ila 4 dereceye düşüyor, minimum düzeyin -10 derecenin altına indiği oluyordu. İngiltere'de iç kesimlerin ayazı, kömür mangalları ortaya çıktıktan sonra bile atasözlerine konu olmuştu. Doğu Asya ya da Ortadoğu toplumlarında hanelerin toplam enerji ihtiyaçları çok düşüktü. Bazı Kuzey Avrupa ve sömürgeleştirilmiş Kuzey Amerika toplumlarının mutlak yakıt talebi biraz yüksekti, ama düşük yakma verimliliği yararlı ısıdan nispeten düşük pay alınmasına neden oluyordu. Buna bağlı olarak, bol miktarda yakacak odunla dolu on dokuzuncu yüzyıl Amerikası'nda bile ortalama bir hane, ülkede yirminci yüzyılda ortaya çıkan yararlı enerji akışlarının sadece bir bölümünden yararlanabiliyordu.

Yiyeceklerin Hazırlanması

Bütün yüksek kültürlerin beslenmesinde tahılların baskın olduğu dikkate alınırsa tahıl öğütmenin, tarihte en önemli gıda işleme ihtiyacı olduğu su götürmez. Tam tahıl damağa pek uygun değildi, hazmedilmesi zordu, açıktır ki fırında pişirmede kullanılamıyordu. Değirmenle öğütme son derece sindirilebilir yiyeceklerin, her şeyden önce de ekmekler ve eriştelerin hazırlanmasında kullanılabilecek çeşitli inceliklerde unlar üretir. Tahıl öğütmenin evrimsel gelişimi, ortası biraz oyulmuş dibek taşları, taş tokmaklar ve havanlarla başlamıştır. Diz çökerek çalışılan bir dikkörtgen, oval dibek taşı antik Ortadoğu toplumlarının yanı sıra klasik dönem öncesi Avrupa'da da yaygındı.

Huniler ve sabit oluklu değirmen taşlarından oluşan iteklemeli değirmenler ilk büyük yenilik olmuştu. Yunan kum saati değirmeninin huni şeklinde bir tokmağı ve koni şeklinde bir öğütücüsü vardı. Kas gücüyle işleminin üretkenliği çok düşüktü (Moritz 1958). Taşları sürterek, havanlarla ve tokmaklarla zahmetli çalışma saatte 2-3 kg kabaca öğütülmüş undan fazlasını getirmiyordu. Çevrilen (MÖ üçüncü yüzyıldan beri kullanılan) *mola manualis*'le çalışan iki Romalı köle saat başına 7 kg kaba undan fazlasını üretemiyordu. En verimli *mola asinalis* (şehirler ve kasabalarda kullanılan Pompei değirmeni olarak bilinir) kaba volkanik kayalardan yapılmıştı, *meta* (alttaki silindirik kısım) kum saati *catillus*'la kaplanmıştı ve bu kısım küçük bir çember çizerek yürüyen koşumlu bir eşek tarafından çevriliyordu; ama bazı kapalı yerlerde genellikle köleler kullanılıyordu, köleler büyük fırınlar da hamur yoğurma makinelerini de çalıştırıyordu; imparatorluğun demirbaş yiyeceklerinin bedeli çok ağır bir eziyetti (Kutu 4.11).

Kutu 4.11

**Lucius Apuleius'un (Başkalaşım IX, 12, 3.4)
Romalı değirmen köleleri hakkında sözleri**

Ey tanrılar, öyle bir insan topluluğu gördüm ki! Derileri tepeden tırnağa kırbaç izleriyle kaplanmıştı, yaralı sırtları lime lime giysilerle kaplı olmak yerine soluklaşmıştı. Bazıları sadece önlük takmıştı, hepsi de o kadar kötü giyinmişlerdi ki paçavralarındaki deliklerden tenleri görünüyordu! Alınlarında harfler vardı, başları yarı kazınmıştı. Bacakları zincirliydi. Çok feci solgunlardı. Fırınlardan dumanından gözleri kızarmış, yara bere içinde ve perişanlardı. Atletler nasıl tozla kaplıysa, onlar da unla kaplanmıştı! (J. A. Hanson'ın çevirisi)

Eşeklerin çalıştırdığı bir değirmen (enerji girdisi 300 W) 10-25 kg/saat (Forbes 1965) un üretiyordu, küçük bir su çarkının (1,5 kW) çalıştırdığı değirmen taşlarıysa 80-100 kg/saat un öğütüyordu. Un ekmek yapımında kullanılıyor, ortalama günlük beslenme sayesinde alınan toplam gıda enerjisinin en az yarısını karşılıyordu (ama ekmeğin payı genellikle yüzde 70'ten fazlaydı). Buna bağlı olarak tek bir değirmen 10 saatlik bir vardiyada 2.500-3.000 kişiyi, orta büyüklükte bir Ortaçağ kasabasını beslemeye yetecek kadar un üretebilirdi. Değirmen taşları yatay su çarklarıyla doğrudan çevrilebiliyordu, ama dikey su çarkları ve bütün rüzgâr değirmenleri dönme gücünün ahşap dişlilerle makul düzeyde verimli aktarımını gerektiriyordu. Hiçbir değirmen doğru düzgün yerleştirilmiş, iyi ayarlanmış değirmen taşları, tepe çarkı ve sabit yatak taşı olmaksızın iyi un üretmiyordu (Freese 1957). On sekizinci yüzyıla gelindiğinde taşların çevresi genellikle 1-1,5 metreyi, kalınlıkları 30 cm'yi buluyordu, ağırlıkları yaklaşık 1 tondur ve dakikada 125-150 kez çevriliyorlardı. Tahıl, besleme hunisinden çarkın ağızına dökülüyor, taşların düz yüzeyleri arasında ezilip öğütülüyordu.

Büyük taşların kesin bir biçimde dengelenmesi gerekiyordu. Eğer birbirlerine sürterlerse büyük hasar görebilirler, bir yangının başlamasına neden olabilirlerdi. Birbirlerine çok uzak olurlarsa ince un yerine kaba tahıl üretirlerdi. İzin verilebilir koşullara göre ağızda taşlar arasındaki açıklık en fazla ağır kahverengi kâğıdın kalınlığı, kenardaysa tuvalet kâğıdının kalınlığı kadar olabilir. Öğütülmüş un ve öğütme yan ürünleri kazılmış oluklardan dışarı akıtılıyordu. Becerikli zanaatkarlar keskin aletler (değirmen kesikleri) kullanarak bu oyukları derinleştiriyordu (taşı yontuyordu). Taşın kalitesi ve öğütme oranının belirlediği düzenli aralıklarla yapıyorlardı bunu, genellikle iki-üç haftada bir. Birlikte karılıp çimento yapılan, demir çemberlere asılan

sert granitler veya sert kum taşları ya da gözenekli kuvars parçaları en yaygın değirmen taşı seçeneğiydi, hiçbiri tek seferde mükemmel bir iş çıkaramıyordu. Kaba kabuklar ince undan ayrıldıktan sonra orta kalınlıktaki parçaları öğütmek gerekiyordu. Bütün bu süreç, birkaç kez tekrarlanabiliyordu. En son kalburdan geçirme sonrasında un kepekten ayrılıyor, farklı incelikte unlar ayrılıyordu.

Su ve rüzgâr gücüyle değirmencilik asırlar boyunca çok ağır emek sarf edilmesini gerektirdi. Tahılın boşaltılması, makaralarla hunilere taşınması, taze öğütülmüş unun tırmıkla soğutulması, elemeyle ayıklanması ve paketlenmesi gerekti. Tam otomatik bir un değirmeni ilk kez 1785'te Amerikalı mühendis Oliver Evans tarafından tasarlandı, Evans tahılı taşımak için sonu gelmez kovalı kayışlar, tahılı yatay olarak aktarmak, taze öğütülmüş unu soğuması için yere sermek için burgular (Arşimet burguları) kullanılmasını önermişti. Evans'ın icadı derhal ticari bir başarı kazanmadı, ama değirmencilik hakkında kendisinin yayımladığı kitap bu türde bir klasik haline geldi (Evans 1795).

Pişirmenin tarihi, sanayi çağının başlangıcına kadar dikkat çekici dercede az ilerleme olduğunu gösterir. Çevirerek pişirme (ateşte ya da şişte, ızgarada), haşlama, kızartma ve buğulama için açık ocaklar ve şömineler kullanılıyordu. Su kaynatmak ve ızgara yapmak için mangallar, fırında pişirmek için basit kil ya da taş ocaklar kullanılıyordu. Yassı ekmekler kil fırınların kenarlarına yapıştırılıyor (düzgün Hint ekmeği yapmanın tek yolu budur hâlâ), yufka ekmekler düz yüzeylere yerleştiriliyordu. Yakıt eksiklikleri düşük enerjili pişirme yöntemlerinin ortaya çıkmasına katkıda bulunmuştu. Çinliler içi boş üç bacağın üstüne yerleştirilmiş pişirme tencerelerini (*li*) MÖ 1500'den önce kullanmaya başlamışlardı. Eğimli yatay tavalar (Hindistan ve Güneydoğu Asya'da *kuali*, Çin'de *kuo*, Batı'da daha çok Kantonca *wok* diye bilinen tavalar) kızartma, kendi suyunda pişirme ve buğulama işlemlerini hızlandırıyordu (E. N. Anderson 1988).

Mutfak ocaklarının kökeni hâlâ belirsizdir, ama yaygın kabul görmeleri açıktır ki baca inşa edilmesini gerektirmişti. Avrupa'nın en zengin bölgelerinde bile on beşinci yüzyıl öncesinde bu ocaklara sık rastlanmıyordu, zira insanlar dumanlı, verimsiz şöminelerden yararlanmayı sürdürüyorlardı (Edgerton 1961). Çin işi birçok kil ve tuğla ocakta yirminci yüzyılın ilk yirmi-otuz yılında baca yoktu (Hommel 1937). Ateşi tümüyle çevreleyen demir ocaklar, ancak on sekizinci yüzyılda pişirme ve ısıtma işleri için açık

şöminelerin yerini almaya başladı. Benjamin Franklin'in 1740'ta tasarladığı meşhur ocağı, kendi başına bir aygıt değil, bir şömine yuvasının içinde yer alan, çok daha yüksek bir verimlilikle pişirip ısıtılabilen bir ocaktı (Cohen 1990). Benjamin Thompson (Kont Rumford, 1753-1814) 1798'de üst kısmında tencereleri ve silindirik bir fırını yerleştirmek için açıklıklar bulunan bir tuğla dizisi tasarladı; bu dizim ilk olarak büyük mutfaklarda benimsendi (Brown 1999).

Isı ve Işık

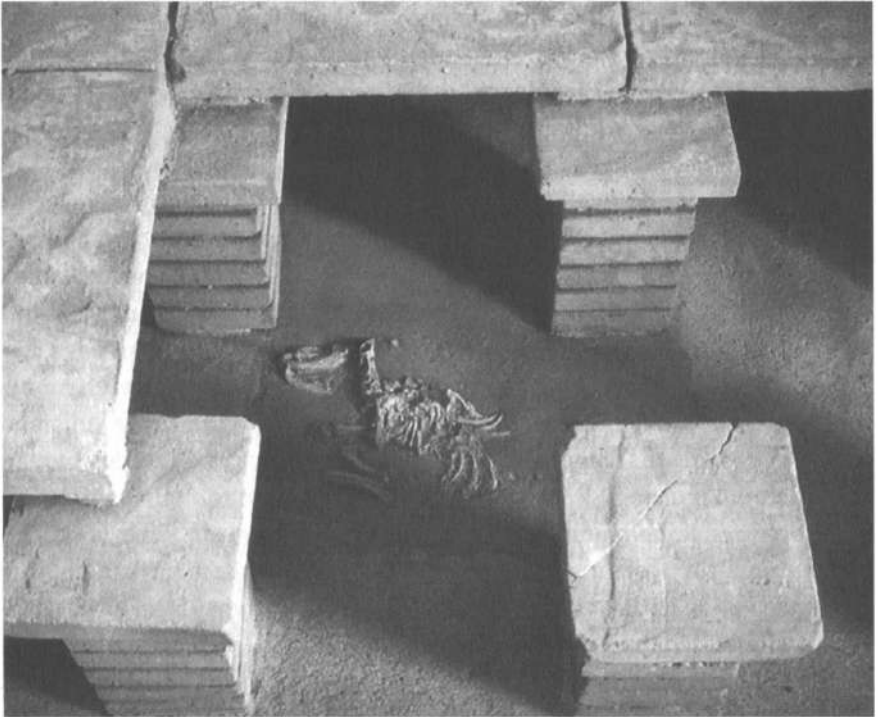
Geleneksel ısınma ve aydınlatmanın ilköllüğü ve verimsizliği, antik medeniyetlerin genellikle etkileyici mekanik icatlarıyla karşılaştırıldığında özellikle dikkat çeker. Bu tezat, Rönesans sonrası Avrupa'da gözlenen geniş teknik ilerlemeler yelpazesi bağlamında daha da büyüktür. Açık ateşler ve basit şömineler erken modern çağın büyük bölümünde (1500-1800) genellikle yetersiz ısı üretmiştir. Ateş ve kıvılcımların ısıltısı, gazyağı lambalarının ve (çoğunlukla pahalı) kandillerin zayıf (genellikle dumanlı) alevleri sanayi öncesinde binlerce yıllık evrilme sürecinde zayıf bir aydınlatma sağlamışlardır.

Isınma alanında israfa neden olan, düzensiz açık ateşlerden, daha verimli düzenlemelere doğru çok ihtiyaç duyulan geçiş süreci çok yavaş gerçekleşti. Açık ateşin üç kenarlı bir şömineye taşınması, ancak marjinal bir verimlilik kazandırdı. İyi beslenen şömineler, başı beklenmeyen bir ateşi gece boyunca yanık tutabiliyordu, ama ısıtma verimlilikleri düşüktü. En iyi oranlar yüzde 10'a yakındı, ama daha tipik performanslar yüzde 5 civarında kalıyordu. Yakın çevresini saçtığı ısıyla ısıtan, ama içerdeki sıcak havayı dışarı veren bir şömine genellikle aslında odada genel bir ısı kaybına neden oluyordu. Bu hava akışı engellendiğinde yanma tehlikeli, hatta öldürücü düzeylerde karbonmonoksit üretebiliyordu.

Geleneksel tuğla ya da kil ocakların verimlilikleri sadece (genellikle pişirme tercihleriyle belirlenen) tasarıma değil, kullanılan başlıca yakıtla bağlı olarak da farklılık gösteriyordu. Asya'da kırsal kesimde tasarımları asırlardır değişmemiş ocaklarda yapılan modern ölçümler, en yüksek pratik verimliliklerin belirlenmesini mümkün kılmıştır. Bacaları uzun, üst kısımları sıkı sıkıya oturan, kesilmiş odunla beslenen ızgaralı büyük tuğla ocakların verimlilikleri çoğunlukla yüzde 20 civarındaydı. Bacaları kısa, saman ya da otlarla beslenen, o kadar büyük olmayan, soğuk hava akımlı ocaklarda tipik performans yüzde 15'e yakındı, hatta sadece yüzde 10'du. Ama bütün gele-

neksel ısınma düzenekleri israfa yol açmıyordu. En az üç tane mekân ısıtma düzeneğinde, dâhiyane denecek kadar verimli biçimlerde odun ve ekin artıkları kullanılarak büyük bir rahatlık yaratılıyordu.

Bu üç ısınma sistemi Romalıların *hypocaust*'u, Korelilerin *ondol*'u, Çinlilerin *kang*'ıydı. İlk iki tasarım sıcak yanıcı gazları yükseltilmiş oda zeminlerinden kaldırıp bir bacadan dışarı veriyordu. *Hypocaust* Yunanlıların bir icadıydı; en eski kalıntıları Yunanistan ve Magna Graecia'da, İtalya'nın güney sahillerinde Yunanların yerleşik olduğu bölgelerde bulunmuş, MÖ üçüncü yüzyıla ait olduğu belirlenmiştir (Ginouves 1962); Romalılar bu sistemi ilk kez halk hamamlarının (*thermae*) sıcak odalarında (*caldaria*), sonra da imparatorluğun soğuk eyaletlerinde taş evleri ısıtmak için kullanmışlardı (Şekil 4.16). Bugüne ulaşmış bir *hypocaust* ile yapılan denemeler dışarıda ısı 0 dereceyken, saat başı sadece 1 kg kömürle 5 x 4 x 3 metrelik bir odada



Şekil 4.16 Saarland'da Homburg-Schwarzenacker Roma Müzesi'nde sergilenen bir Roma yer altı ısıtma tertibatının bir bölümü (alevlerin öldürdüğü bir köpeğin iskeletiyle birlikte). Barbara F. McManus'tan fotoğraf için izin alınmıştır.

22 derecelik bir ısıнын korunabileceğini göstermiştir (Forbes 1966). Üçüncü geleneksel ısıtma düzeneği Kuzey Çin’de hâlâ görülebilir. Büyük tuğla bir platform olan *kang* (en az 2 x 2 metre ve 75 cm uzunluğundadır) bitişiğindeki ocaktan gelen ısıyla ısınır; geceleri yatak, gün içinde de dinlenme yeri olarak iş görür (Hommel 1937).

Yates bu geleneksel yatak-ocağın (ya da ısı takasçısının) ayrıntılı bir mühendislik analizini yapmış, verimliliğini artırmaya yönelik önerilerde bulunmuştu. Bu düzenlemeler ısıyı nispeten geniş bölgelerde yavaşça iletirdi. Oysa tersine çoğu Eski Dünya toplumunda yaygın olan mangal ısıtıcılar, sadece sınırlı ısı noktaları yaratıyor, ama yüksek karbonmonoksit yoğunlaşmalarına neden oluyordu. Çin ve Kore icatlarından kendi çıkarları için çok yararlanan Japonlar *ondol* ya da *kang*’ı kendi dayanıksız ahşap evlerine sokamamışlardı. Onun yerine kömür mangalları (*hibachi*) ve ayak ısıtıcıları (*kotatsu*) kullanmışlardı. Zemine yerleştirilip üstü sıkıştırılmış kumaşla örtülen bu küçük kömür kutuları yirminci yüzyıl ortalarına dek kullanılmıştır. Bugün bile, alçak bir masaya yerleştirilmiş küçük bir ısıtıcıdan oluşan elektrikli *kotatsu* biçiminde varlıklarını sürdürürler. Britanya’da Avam Kamarası bile 1791’e dek büyük kömür kazanlarıyla ısıtılmıştır.

Biyokütle yakıtları, sanayi öncesi toplumların hepsinde geleneksel aydınlatmanın da başlıca kaynağı olmuştur. Ateşin ısıltısı, reçineli ağaçtan yapılan meşaleler ve yakılan çakmak taşları en basit, ama en az verimli ve en az uygun çözümlerdi. Yağ yakılan ilk lambalar Avrupa’da Yukarı Paleolitik döneminde, yaklaşık 40.000 yıl önce ortaya çıkmıştı (de Beaune ve White 1993). Kandiller Ortadoğu’da ancak MÖ 800 sonrasında kullanılmaya başlamıştı. Hem yağ lambaları hem kandiller verimsiz, zayıf ve dumanlı bir aydınlatma sağlıyordu, ama en azından kolayca taşınabiliyorlardı ve kullanımları daha güvenliydi. Lambalarda çeşitli hayvan ve bitki yağları ile mumları yakılıyordu: zeytinyağı, kunduz yağı, kolza yağı, keten tohumu yağı, balina yağı, donyağı ve balmumu ile papirüs, hasır, keten ya da kenevir sapları. On sekizinci yüzyıl sonuna dek yapay iç aydınlatma sadece bir kandil birim alınarak yapıldı. Parlak aydınlatma ancak bu küçük kaynakların kitlesel olarak kullanılmasıyla mümkün oldu.

Kandiller kimyasal enerjilerinin sadece yüzde 0,01’ini ışığa çevirir. Alevlerindeki parlak noktanın ısınım yeğlinliği (birim alana düşen enerji oranı), açık bir gökyüzününkinden ortalama yüzde 20 yüksektir. Çin’de altıncı yüzyıl sonlarında kibritin icat edilmesi, ateşlerin tazelenmesini ve lambaların

yakılmasını, kav tutuşturmaktan daha kolay bir hale getirdi. İlk kibritler sülfür kaplanmış ince çam ağacı çubuklarıydı, Avrupa'ya ancak on altıncı yüzyıl başında ulaşmışlardı. Çakılan yüzeyde kırmızı fosforun kullanıldığı modern güvenli kibritler ilk kez 1844'te çıkmış, çok geçmeden piyasanın büyük bölümünü ele geçirmiştir (Taylor 1972). Aime Argand 1794'te fitil tutucuların kullanılması sayesinde azami düzeyde aydınlatması ayarlanabilecek, merkezi bir hava girişi ve havayı içeri alacak bacaların bulunduğu lambalar çıkardı (McCloy 1952).

Bundan kısa süre sonra kömürden ilk aydınlatma gazı elde edildi. Büyük şehirlerin dışında, dünya çapında milyonlarca hane ışıkları için, on dokuzuncu yüzyılın yarısını aşkın bir süre boyunca egzotik bir biyokütle yakıtına, ispermeçet balinalarından çıkarılan yağa bağlı olmayı sürdürdü. Herman Melville'in muhteşem kitabı *Moby Dick*'te (1851) unutulmaz biçimde resmettiği gibi, bu devasa memelilerin düşük ücretler karşılığında, zahmetli ve tehlikeli avı 1850'den hemen önce zirveye tırmandı (Francis 1990). Dünyanın açık ara en büyük filosu olan Amerikan balina avı filosu, 1846'da toplam 700'den fazla kayıtlı gemiye sahipti. 1840'ların ilk yarısında, her yıl New England limanlarına 160.000 varil ispermeçet balinası yağı getiriliyordu (Starbuck 1878). Sonraki yıllarda ispermeçet balinası sayısının azalması, kömür gazı ve kerosenin rekabet yaratması balina avının hızla gerilemesine neden oldu.

ULAŞTIRMA VE İNŞAAT

Ulaştırma ve inşaatın sanayi öncesi evrimi, son derece eşitsiz bir ilerleme ve durgunluk, hatta gerileme örüntüsü gösterir. On sekizinci yüzyıl sonundaki sıradan yelkenli gemiler hem hızları hem de rüzgâra daha yakın yol alma becerileri nedeniyle klasik antik devirlerin en iyi gemilerinden çok daha üstünlerdi. Aynı şekilde iyi yaylar üstüne oturan, verimli bir biçimde koşuma bağlanmış atların çektiği iyi döşenmiş arabalar at sırtında ya da yaysız arabalarda gitmekten daha rahattı. Ama aynı zamanda, en zengin Avrupa ülkelerinde bile yollar genellikle, Roma İmparatorluğu'nun son yüzyıllarında olduğu kadar iyi değildi pek, hatta çok daha kötüydü. Parthenon'u tasarlamış olan Atinalı mimarların ya da Pantheon'u bitirmiş Romalı duvar ustalarının becerileri, geç Barok saraylar ve kiliseleri inşa eden haleflerinin becerilerinden aşağı kalmıyordu. Sırf çok daha güçlü bir asli itici gücün ve üstün bir inşa malzemesinin yayılmasıyla birlikte her şey değişmişti, hatta

biraz hızlı değişmişti. Buhar makinesi ve ucuz dökme demir ile çelik, inşaat kadar ulaştırmada da devrim yaratmıştı.

Karada Hareket Etmek

Yürümek ve koşmak, insan hareketinin bu iki doğal biçimi, bütün sanayi öncesi toplumlarda kişisel hareketlerin büyük bölümünü açıklıyordu. Enerji maliyetleri, ortalama hızlar ve azami günlük mesafeler her zaman en başta bireysel zindeliğe ve ağırlıklı olarak gözlenen yer şekillerine bağlı olmuştu (Smil 2008a). Yürümenin fırsat maliyeti optimum hız olan 5-6 km/saat'in hem altındaki hem üstündeki hızlarda artar; düzgün olmayan yüzeyler, çamur ya da derin kar yürümenin maliyetini yüzde 25-35 artırır. Yokuş yukarı yürümenin maliyeti hem eğime hem hıza bağlıdır, ayrıntılı araştırmalar, geniş bir hız ve eğim yelpazesinde enerji ihtiyacının neredeyse çizgisel olarak arttığını gösterir (Minetti vd. 2002).

Koşmak çoğunlukla temel metabolizma hızının 10-20 katına denk, 700 ilâ 1.400 MW güç çıktısı gerektirir. Yavaş koşan 70 kg ağırlığında bir adam 800 W üretecektir; yarışı (32.195 km) 2,5 saatte koşan yetkin bir maraton koşucusunun gücü ortalama 1.300 W'dir; Usain Bolt 100 metre dünya rekorunu 9,58 saniye ile kırdığında azami gücü (başlama noktasından birkaç saniye sonra hızı, azami hızın sadece yarısına eşitken) 2.619,5 W'ydı, yani 3,5 beygir gücüne eşitti (Gómez, Marquina ve Gómez 2013). İnsanlar için koşmanın enerji maliyeti nispeten yüksektir, ama daha önce (2. bölümde) belirttiğimiz üzere insanların bu maliyeti hızdan neredeyse ayırmak gibi benzersiz bir becerileri vardır (Carrier 1984). Arellano ve Kram (2014) vücut ağırlığı desteği ve ileri itilimin koşmanın toplam maliyetinin yaklaşık yüzde 80'ini oluşturduğunu göstermiştir; bacakların sallanması yüzde 7'sini, yanal dengenin sağlanması yüzde 2'sini oluşturur; ama kolların sallanması genel maliyeti yaklaşık yüzde 3 azaltır.

Modern dönemde koşu rekorları yirminci yüzyılda sürekli bir iyileşme göstermiştir (Ryder, Carr ve Herget 1976), en iyi tarihsel başarıların epey üzerinde olduklarına hiç kuşku yoktur. Ama birçok geleneksel toplumda uzun mesafeli koşunun dikkat çekici örnekleri hiç de az değildir. Pheidippides'in MÖ 490'daki Maraton Savaşı'ndan hemen önce Atina'dan Sparta'ya yaptığı verimsiz koşu, elbette ki büyük bir koşu dayanıklılığının tipik bir örneğidir. Pheidippides 240 km'yi sadece iki günde koşmuştu (ortalama güç çıktısı, 70 kg ağırlığında olduğunu varsayarsak 800 W, yani 1 beygir gü-

cünden biraz daha fazla olsa gerekti), ama sonunda Spartalıların yardıma gelmeyeceklerini öğrenmişti.

Atların evcilleştirilmesi kişisel ulaşımın yeni, daha güçlü ve daha hızlı bir biçimini ortaya çıkarmakla kalmamış, Hint-Avrupa dillerinin yayılması, bronz metalurjisi ve yeni savaşma biçimlerinin yayılmasıyla da ilişkili olmuştur (Anthony 2007). Atlara, ilk kez koşum takılmadan uzun süre önce binilmeye başlanmıştı, at sürmenin başlangıcı Asya steplerinde MÖ ikinci binyılın ortaları olarak görülür. Ama Anthony, Telegin ve Brown (1991) bunun daha önce, MÖ 4000 civarında, bugün Ukrayna'da bulunan Sredni Stog kültürü insanları arasında başlamış olabileceği sonucuna varmıştır.

Bu yazarlar iddialarını yabani ve evcil hayvanların küçük azı dişleri arasında görülen, hâlâ kesinleşmemiş kanıtlara dayandırıyor: Gemlenen hayvanların dişlerinin mikrograflarında ayıksı kırılmalar ve bükülmeler gözleniyordu. Aynı şekilde Outram ve çalışma arkadaşları da (2009) gemlemenin neden olduğu hasar emarelerine (ve başka kanıtlara) dayanarak atların ilk kez Botai kültürü insanları arasında evcilleştirildiği, bu hayvanların bazılarının dizginlendiği ve herhalde binek olarak kullanıldığı sonucuna varmıştı. Gemlenen hayvanlar yürürken insanlar kadar hızlı değillerdi, ama tırıs (12 km/saat) ve eşkin (27 km/saat) hızları büyük bir insan çabası gerektirecek mesafeleri kolayca aşıyordu. Dört nala giden atların büyük bir mekanik avantajı vardır: Elastik gerilim enerjisinin atların yay benzeri kasları ve tendonlarında depolanması ve bunlara geri döndürülmesi kaslarının yaptığı işi yarıya indirir (Wilson vd. 2001).

Zinde bir hayvana binmiş deneyimli sürücüler günde 50-60 km yol almakta zorlanmazlar, acil durumlarda at değiştirerek günde 100 km'den fazla yol alabilirler. Ortaçağ'da bir günde rutin olarak alınan en uzak mesafeleri, Moğollar'da *yam* hizmeti (habercilik) gören atlılar (Marshall 1993) aşıyordu; modern dönemde William F. Cody (1846-1917) yedek bineğinin öldürülmesi sonrasında Pony Express'ten genç bir atlıyla 21 at kullanarak 21 saat 40 dakikada 515 km aştığını ileri sürmüştü (Carter 2000). Minetti (2003) uzun mesafe hizmetlerinde tipik performansların titizlikle en iyi seviyeye getirildiğini göstermişti. Vardiyalı posta sistemleri atların zarar görmesi riskini en az düzeye indirmek için ortalama 13-16 km/saatlik ortalama bir hızı, bir hayvanın günde 18-25 km yol almasını tercih ediyordu, bu optimum performans aralığına Keyhüsrev'in MÖ 550'de Susa ile Sardis arasında kurduğu posta servisinin atlıları, on üçüncü yüzyılda *yam* atlıları, telgraf ve

demiryolu hatlarının inşası öncesinde California'ya hizmet eden Overland Pony Express atlıları da uymuşlardı.

Ama at sürmek her zaman büyük bir fiziksel zorluk olmuştur. Atın arka kısmı vücut ağırlığının beşte üçünü oluşturduğundan, binicinin ve hayvanın ağırlık merkezini kesen dikey düzlemlerin buluşmasının tek yolu, binicinin öne doğru oturmasıdır. Ama dik ileri bir duruş binicinin ağırlık merkezini atından çok daha yüksekte bırakır. Bu durum, at ileri hareket ettiğinde, atladığında ya da aniden durduğunda binicinin sırtının hızla kaldırılmasına girmesine neden olabilir. Buna bağlı olarak en etkili duruş binicinin ağırlık merkezini sadece ileri değil, aynı zamanda alçağa yerleştirmesini gerektirir. Jokey çömelmesi ("sopadaki maymun") bunu yapmanın en iyi yoludur. İlginçtir, bu en uygun oturuş biçimi ancak on dokuzuncu yüzyıl sonu öncesinde Federico Caprilli tarafından çürütülemez bir biçimde yerleştirilmişti (Thomson 1987).

Pfau ile çalışma arkadaşları, büyük at yarışı süreleri ve rekorlarının 1900 civarında çömelme duruşunun ilk kez benimsenmesi sonrasında iyileştğini ortaya çıkarmıştır (2009). Bu duruş biniciyi bineğinin hareketinden yalıttır: Kaçınılmaz olarak at binicinin beden ağırlığını destekler, ama her dönüşlü yolda jokeyi hareket ettirmesi gerekmez. Bu duruşun korunması ciddi bir güç uygulamayı gerektirir, yarışlar sırasında jokeylerin nabızlarının azami düzeye yaklaşması da bunu gösterir. Modern gösteri atlayışlarının en abartılı versiyonlarında kullanılan ileri-alçak duruş tarihsel heykeller ve resimlerde görülen biniş stillerinden kökten ayrılır. Çok çeşitli nedenlerle biniciler, en verimli hareketi mümkün kılamayacak kadar geriye ve fazla uzanarak oturuyorlardı. Klasik dönem binicileri daha da dezavantajlıydı, çünkü üzüngileri yoktu. Üzünginin erken Ortaçağ Avrupası'nda genel olarak benimsenmesi, silahlı biniciliği, savaşmayı ve mızrak dövüşlerini mümkün kıldı.

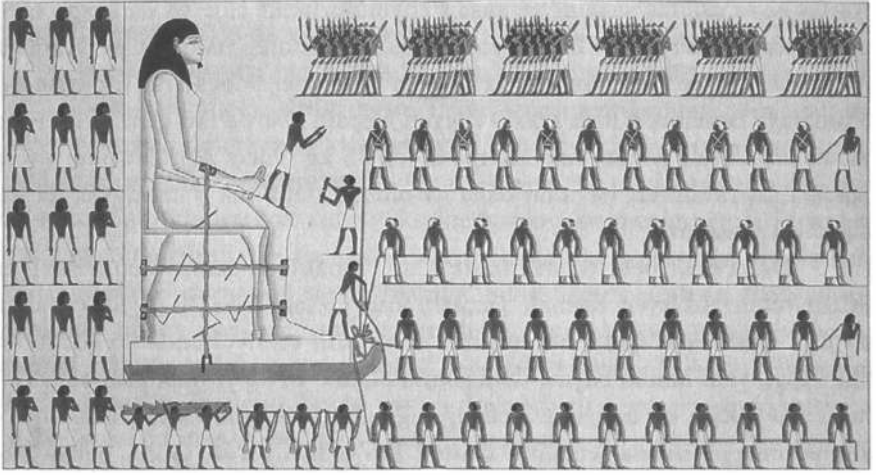
Yükleri nakletmenin en basit yolu onları taşımaktır. Yolların olmadığı yerlerde insanlar hayvanlardan daha iyi iş çıkarabiliyordu: Performansın daha düşük olması genellikle yükleme, boşaltma, dar yollarda hareket etme ve yokuş yukarı tırmanmada esneklikle telafi ediliyordu. Aynı şekilde küfeli eşekler ve katırlar genellikle atlara tercih ediliyordu: Dar yollarda daha hızlı yol alan, toynakları daha sert, su ihtiyaçları daha az olan bu hayvanlar daha dayanıklılardı. En etkili taşıma yöntemi, yükün ağırlık merkezini taşıyıcının ağırlık merkezinin üstüne yerleştirmekti, ama bir yükün dengelenmesi her zaman uygulanabilir değildi. Omuzların üstüne yerleştirilen, uçlarına yük

ya da kova asılmış sırtıklar ve ahşap boyunduruklar elde ya da kolda taşımaya tercih ediliyordu. Bozuk yollarda uzun mesafeli nakliyat en iyi omuz ya da başa iyice bağlanmış sırtta taşınan küfelerle, bohçalarla yapılıyordu. Himalaya tırmanışlarında erzakı taşıyan Nepalli *Sherpa*'lar, genellikle en iyi hamallar olarak bilinir. Ana kampa 30 ila 35 kg (vücut ağırlıklarının yarısı kadar) taşıyabilirler, havanın daha az olduğu daha dik yamaçlarda da 20 kg'den az taşırlar.

Daha önce belirttiğimiz üzere, Ostia limanında gemilerden barkalara Mısır tahılı yükleyen Romalı *saccarii*, kısa mesafelerde 28 kg'lık çuvallar taşırdı. Geleneksel Çin tahtirevanının daha hafif versiyonunda iki adam tek bir kişiyi, yani hamal başına dönüşümlü olarak 40 kg'yi bulabilen bir yükü taşır. Bu yükler, bir hamalın vücut ağırlığının üçte ikisine tekabül edebiliyordu, yürüme hızları da genellikle saatte 5 km'yi aşmıyordu. Göreli olarak bakıldığında insanlar hayvanlardan daha iyi hamallardı. Genellikle yükler düzde bir hayvanın ağırlığının yaklaşık yüzde 30'u (yani çoğu kez sadece 50-120 kg), tepelerde yüzde 25'i kadardı. İnsanlar vücut ağırlıklarını aşan yükleri bir tekerlek yardımıyla hareket ettirebiliyorlardı. Zirveye çıktığı kaydedilmiş performanslar, yükün tekerleğin aksının tam üstüne ortalanarak yerleştirildiği Çin el arabalarında 150 kg'den fazlaydı. Ön tekerleği dış merkezli Avrupa tipi el arabalarıysa genellikle en fazla 60-100 kg yükleniyordu.

İnsan emeğinin basit mekanik aygıtların yardımıyla kitlesel olarak uygulanması, hayret verici derecede zor işleri başarabilir. Geleneksel toplumlarda hiç kuşkusuz en zorlayıcı nakliyat işleri büyük boyutlu yapı taşlarının ya da bitmiş parçaların inşaat merkezlerine taşınmasıydı. Bütün eski büyük kültürler taş ocaklarından büyük taşlar çıkarmış, taşımış ve yerleştirmiştir (Heizer 1966). Birkaç eski resim bu işin nasıl başarıldığını ilk elden gösterir. En etkileyici görüntülerden biri hiç kuşkusuz, daha önce bahsettiğimiz, el-Berşa'da Cehutihotep'in mezarında bulunan, MÖ 1880 tarihli resimdir (Osirisnet 2015). Bu sahnede 166 adamın bir sütunu bayır yukarı çektiği, bir adamın bir kaptan döktüğü sıvıyla yolu kayganlaştırdığı görülür (Şekil 4.17). Kayganlaştırmamanın sürtünmeyi yarı yarıya azaltması sayesinde, adamların yoğunlaşan ve 30 kW'yi aşarak zirveye tırmanan emekleri 50 tonluk bir yükü hareket ettirmişti. Ne var ki bu tür büyük çabalar bile birkaç sanayi öncesi toplumda fersah fersah geride bırakılmıştır.

İnkalı inşaatçılar muazzam büyüklükte düzensiz taş çokgenler kullanıyordu, bunların düzgünleştirilmiş kenarları inanılmaz bir kesinlikle birbi-



Şekil 4.17 Hare Nome Büyük Şefi Cehutihotep'in su mermerinden yapılmış (6,75 m uzunluğunda, 50 tondan ağır) devasa bir heykelinin hareket ettirilmesi (Osirisnet 2015). Bu çizimde Mısır'da el-Berşa'da Cehutihotep'in mezarındaki hasar görmüş duvar resmi yeniden kurgulanmıştır (Corbis).

rine oturuyordu. Güney Peru'da Ollantaytambo'da bulunan 140 tonluk en ağır bloğun bayır yukarı çekilmesi yaklaşık 2.400 kişinin güçlerinin koordine edilmesini gerektirmişti (Protzen 1993). Bu insan grubunun kısa süreli zirve gücü yaklaşık 600 kW olsa gerekti, ama böyle bir girişimin lojistiğiyle ilgili hiçbir şey bilmiyoruz. 2.000'i aşkın kişi uyumlu bir biçimde çekmek için nasıl bir donanımına sahipti? Dar (6-8 metre) İnka bayırlarının içine sığmaları nasıl sağlandı? Antik Brötanya'daki insanlar Büyük Dikilitaş'ı (Niel 1961), Avrupalı bir megalitik toplumun diktiği 340 tonluk en büyük taş nasıl taşıdı?

Atların üstünlüğü, ancak at nalları ve etkili koşum takımlarının bir bileşimiyle sağlanabiliyordu. Karayoluyla nakliyatla performans sürtünmenin azaltılması ve daha yüksek hızların mümkün kılınmasındaki başarıya da bağlıydı. Bu nedenle yolların durumu ve araçların tasarımı iki belirleyici etkendi. Bir yükü düz, sert, kuru bir yolda taşımak ile gevşek, taşlı bir yüzeyde taşımanın enerji talepleri arasındaki farklar muazzamdı. İlk örnekte 1 tonluk bir yükü çekmek için sadece yaklaşık 30 kg'lık bir güce ihtiyaç duyuluyordu, ikinci örnekte yükün beş katı büyüklükte bir çekiş gücü gerekiyordu, kumlu ya da çamurlu yollarda ihtiyaç duyulan çekiş gücü yükün yedi ilâ on katı fazla olabiliyordu. Dingil kayganlaştırıcılar (don yağı ve bitki yağları) MÖ ikinci bin yıldan beri kullanılmaktadır. Birinci yüzyılda, Kelt

işi bronz rulmanların içlerinde, ahşap silindirler içeren oluklar vardı(Dowson 1973). Çin işi rulmanlar daha da eski devirlere ait olabilir, ama bilyeli rulmanlar ilk kez on yedinci yüzyıl başı Avrupası'nda kesin olarak belgelenmiştir. Antik toplumlarda yollar çoğu kez mevsimlik olarak çamur içinde ya da toz üstünde tekerlek izleri halini alan yumuşak izlerdi. Romalılar MÖ 312'de (Roma'dan Capua'ya uzanan) Via Appia'dan başlayarak kapsamlı, sert örtülü bir yol ağına muazzam bir emek ve örgütlenme vakfetmişlerdi (Sitwell 1981). İyi inşa edilmiş Roma yollarının (*viae*) üstüne çakıl taşları, çakıl beton ya da harç sıvanmış levhalar yerleştiriliyordu. Diocletus'un hükümdarlığı sırasında (285-305) Romalıların anayol sistemi, *cursus publicus* 85.000 kilometreyi bulmuştu. Bu girişimin toplam enerji maliyeti en az bir milyar iş gününe eşitti. Bu büyük toplam, yüzyıllarca süreden inşaat sırasında kolayca idare edilebilir kısımlara ayrılıyordu (Kutu 4.12). Batı Avrupa'da Romalıların yol inşasında gösterdikleri başarılar, ancak on dokuzuncu yüzyılda aşılabiliyordu, kıtanın doğu bölgelerindeyse ancak yirminci yüzyılda.

Müslüman dünyada Romalıların *cursus publicus*'una benzer bir yol ağı yoktu, ama yoğun bir iletişim vardı (Hill 1984). Bu dünyanın en uzak kısımları çok geçilen kervan yollarıyla bağlanıyordu, ki bu yollar aslında patikadan ibaretti. Bu da Fas ile Afganistan arasındaki kurak bölgede yük develerinin tekerlekli araçların yerini almasının sonucuydu. Müslümanların fetihleri öncesindeki bu gelişmenin itici gücü büyük ölçüde ekonomik zorunluluklar olmuştu (Bulliet 1975). Öküzlerle karşılaştırıldığında yük develeri daha güçlü ve hızlı olmakla kalmıyorlardı, daha dayanıklı ve uzun ömürlüydüler aynı zamanda. Daha sert zeminde hareket edebiliyor, daha niteliksiz

Kutu 4.12

Roma yollarının enerji maliyeti

Ortalama bir Roma yolunun sadece 5 metre genişliğinde, 1 metre derinliğinde olduğunu varsayarsanız 85.000 km'lik anayol yapmak, önce yol yatağı, kenarları ve hendekler için en az 800 Mm³ toprak ve kaya çıkarılmasını, sonra 425 Mm³ kum, çakıl, beton ve taş yerleştirilmesini gerektiriyordu. Bir işçinin günde sadece 1 m³ inşaat malzemesiyle uğraştığı varsayılırsa ocaktan taş çıkarma, kesme, parçalama ve taşıma, temeller, hendekler ve yol yatakları için kum kazma ve çıkarma, beton ve harç hazırlama, yolu döşeme işleri toplam yaklaşık 1,2 milyar iş günü yapar. Yolların bakım ve onarım işleri bu gerekliliği nihayetinde üç katına çıkarsa da bu büyük toplamın 600 yıllık inşaat sürecine yayılması, yıllık ortalama altı milyon iş günü sonucunu verir ki bu da tam zamanlı çalışan 20.000 inşaat işçisinin emeğine eşittir. O da yıllık yaklaşık 12 Tj'lik bir enerji yatırımı (günde 2 MJ) anlamına gelir.

yemlerle beslenebiliyor ve uzun süreli yem kıtlığına ve kuraklığa dayanabiliyorlardı. MÖ 500 ile 100 arasında Kuzey Arabistan eyerinin kullanılmaya başlamasıyla birlikte bu ekonomik yararlar güçlendi. Eyer mükemmel bir biniş ve taşıma düzenlemesi sundu, Arapların yayılması öncesinde kervanların Eski Dünya'nın kurak bölgelerinde arabaların yerini almasını sağladı.

On üçüncü ve on dördüncü yüzyıllar arasında imparatorluklarını sağlamlaştıran İnkalar angarya işçileri sayesinde etkileyici bir yol ağı inşa etmişlerdi. Bu yolun uzunluğu toplam 40.000 km'ydi, menfezler ve köprüleri aşan, mesafe levhalarıyla donanmış, bütün mevsimlerde kullanılabilecek 25.000 km'lik yol da bu toplama dâhildi. İki ana kraliyet yolundan And Dağları'ndan geçenin yüzeyi taştan yapılmıştı. Genişliği nehir teraslarında 6 metreden başlıyor, sert kayaların içinden geçerken sadece 1,5 metreye kadar inebiliyordu (Kendall 1973). Yüzeyi olmayan sahil bağlantısı yaklaşık 5 metre genişliğindeydi. Bu yolların hiçbirinde tekerlekli araç kullanılması gerekmiyordu, sadece hayvan başına 30-50 kg taşınan, günde 20 km'den az yol alan insan ve yük laması kervanları bu yollardan geçiyordu.

Qin ve Han hanedanları döneminde Çinliler toplam 40.000 kilometreyi bulan kapsamlı bir yol sistemi kurmuşlardı (Needham vd. 1971). Aynı dönemin Roma *cursus*'u daha kapsamlıydı; hem toplam uzunluğuyla hem de birim alan başına düşen yol yoğunluğuyla; aynı zamanda daha dayanıklı inşa edilmişti. Statius (Mozley 1928, 220) MÖ 90'da Via Domitiana'nın inşa edilmesini *Silvae*'de şöyle betimlemiştir:

İlk iş saban izlerini hazırlamak, yolun sınırlarını işaretlemek, zeminde derinden kazarak oluklar açmaktır; sonra kazılan hendek başka malzemelerle doldurulur, yolun kavisli çıkıntısı için zemin hazırlanır ki toprak bel vermesin, kaypak yatak aşırı yük binmiş taşlar için güvensiz bir dayanak oluşturmaz; sonra hendek yolun iki yakasının yakınına yerleştirilen bloklarla ve sık takozlarla bağlanır. Ah, burada ne kadar da fazla grup birlikte çalışır! Bazıları ormanı keser, dağ yamaçlarını çıplak bırakır, bazıları kalaslar ve büyük kayaları demirlerle düzleştirir; bazıları taşları birbirine bağlar, pişirilmiş kum ve kirli sünger taşıyla taşları örer; bazıları zahmetle açtıkları çukurda susuz havuzları kurutur, daha küçük dereleri çok uzaklara götürür.

Çinlilerin yolları moloz ve çakıl taşlarının metal tokmaklarla dövülmesi suretiyle inşa ediliyordu. Bu en iyi Roma yollarından daha elastik, ama o kadar dayanıklı olmayan bir yüzey yaratıyordu. Han hanedanlığının düşüşünden geriye mükemmel bir ulak hizmeti kalmıştı, ama mallar ve insanların

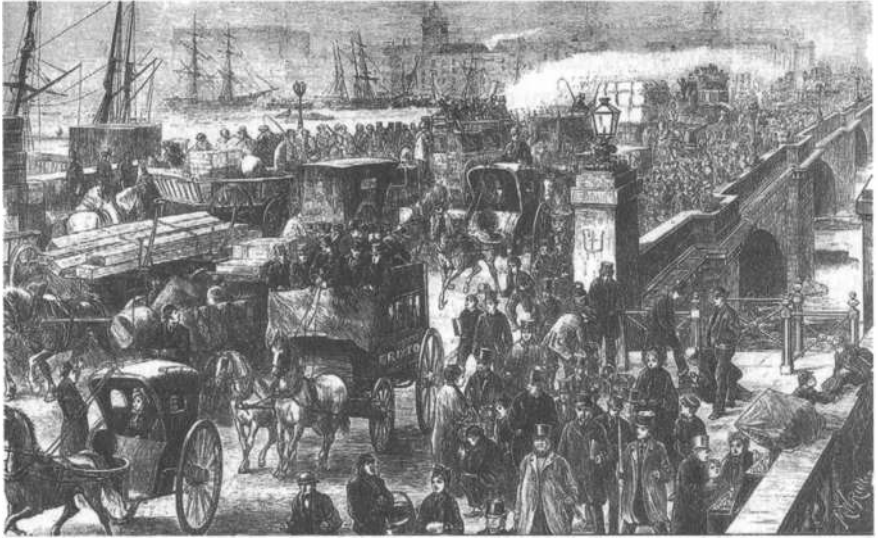
karayoluyla taşınması genel olarak kötüleşmişti. Bu gerileme ülkenin ancak bazı bölgelerinde verimli kanal nakliyatının gelişmesiyle telafi edildi. Öküzlerin çektiği arabalar ve el arabaları malların çoğunu taşıyordu. İnsanlar iki tekerlekli arabalar ve tahtirevanlarla yirminci yüzyıl ortasına dek geldi. Belgelenmiş ilk araçlar Uruk'ta, MÖ 3200 yılı civarına aittir. Bunların dübelle sabitlenmiş, zıvana-delik yöntemiyle birleştirilmiş kerestelerden yapılmış, çapı 1 metrelik ağır disk tekerlekleri vardı. Farklı Avrupa kültürlerinde yayılmaları dikkat çekici bir hızla gerçekleşti (Piggott 1983). Erken döneme ait bazı tekerlekler sabit bir dingil etrafında, bazılarıysa dingille birlikte dönüyordu. Bundan sonra daha hafif, serbest dönen çubuklu tekerlekler (MÖ ikinci binyıl başlarında) ve dört tekerlekli araçlarda, keskin dönüşler yapılabilmesi için milli ön şaft kullanılması yönünde gelişmeler oldu.

Kötü yollarda kullanılan, koşum takımları verimsiz atlar, nispeten hafif yükler çektiklerinde bile yavaşlardı. Dördüncü yüzyılda Roma yollarında azami koşullar, atların çektiği yükü 326 kg, daha yavaş öküzlerin çektiği posta arabalarının yükünüyse 490 kg ile sınırlıyordu (Hyland 1990). Bu nakliyat yönteminde hızın düşük olması gün içinde alınan yolu, iyi yollarda yolcu taşıyan at arabaları için 50-70 km, atların çektiği daha ağır arabalar için 30-40 km ile sınırlıyordu, öküzler bu mesafelerin ancak yarısını alabiliyordu. El arabalı insanlar günde 10-15 km yol alabiliyordu. Elbette ki hızlı atlara binen ulaklar çok daha uzun mesafeler kat edebiliyordu. Roma yollarında kayıt altına alınan azami değer günde 380 km'dir. Karadan nakliyatta hızın ve kapasitenin düşük olması, Diocletus'un *edictum de pretiis*'indeki rakamların da gösterdiği üzere maliyetlerin aşırı düzeylerde olması anlamına gelir. MÖ 301'de tahıl yükünü karadan 120 km uzağa göndermek, Mısır'dan Roma limanı Ostia'ya göndermekten daha pahalıya mal oluyordu. Mısırlıların tahılı Roma'nın sadece 20 km uzağındaki Ostia'ya vardığında, öküzlerin çektiği arabalara yüklenmek yerine, barkalara yeniden yükleniyor ve Tiber'in akıntısıyla yol alıyordu.

Çoğu toplumda benzer sınırlamalar on sekizinci yüzyıl ortalarına dek varlığını sürdürdü. Başlangıçta Avrupa'dan İngiltere'ye deniz yoluyla birçok mal ithal etmek, bunları yük hayvanlarıyla ülkenin iç kesimlerinden taşımaktan daha zordu. Yolcular İngiltere'deki yolların durumunu barbarca, çok berbat, tiksindirici ve cehennemden farksız diye betimliyorlardı (Savage 1959). Yağmur ve kar kötü bir biçimde yayılmış yumuşak toprak ya da çakıl yolları geçilemez hale getiriyordu, birçok örnekte bu yolların sınırlı genişliği

sadece yük hayvanlarının gelip geçmesini mümkün kılıyordu. Kıta Avrupası'ndaki yollar da aynı şekilde kötü durumdaydı, dört ya da altılık gruplar halinde koşuma vurulan araba atları ortalama üç yıldan kısa bir süre dayanıyordu. Temel iyileştirmeler ancak 1750 sonrasında yapıldı (Ville 1990). Bu iyileştirmeler arasında başta yolların genişletilmesi ve daha iyi akaçlanması yer alıyordu, daha sonra kalıcı malzemelerle (çakıl, asfalt, beton) yüzey inşasına da geçildi. Son olarak ağır Avrupa atları taşıma sırasında büyük bir performans gösteriyorlardı. On dokuzuncu yüzyıl ortasına gelindiğinde Fransa'da izin verilen azami yük yaklaşık 1,4 tonla, Roma'daki sınırın dört katına ulaşmıştı.

Atlar kent içi nakliyatta da önemlerinin zirvesine ancak demiryolu çağına, 1820'ler ile on dokuzuncu yüzyıl sonu arasında ulaştı (Dent 1974). Demiryolları uzun mesafeli nakliyat ve seyahatte daha sık kullanılırken, mal ve insanların atların çektiği arabalarla nakliyatı Avrupa ve Kuzey Amerika'nın hızla büyüyen bütün şehirlerine hakim oldu. Buhar makinesi aslında atların kullanım alanlarını fiilen genişletmişti (Greene, 2008). Çoğu demiryolu nakliyatının atların çektiği arabalarla toplanması ve dağıtılması gerekiyordu. Bu araçlar, yakındaki kırsal bölgelerden gelen yiyecek ve hammadde de dağıtıyordu. Kentlerde zenginliğin daha fazla olması, çok daha



Şekil 4.18 16 Kasım 1872 tarihli *Illustrated London News*'de yayımlanmış bu gravür, on dokuzuncu yüzyıl sonu Avrupası'nda hızla sanayileşen kentlerde atların çektiği trafiğin (at arabaları, omnibüsler, ağır arabalar) yoğunluğunu gayet mükemmel yansıtır.

fazla sayıda özel araba, iki atlı fayton, tek atlı araba ve omnibüs (ilk olarak 1829'da Londra'da) ile nakliye arabası (Şekil 4.18) ortaya çıkarmıştı.

Hayvanların ahırlarda bakılması, sap ve samanın tedarik edilip depolanması, kentlerde mekân konusunda büyük bir talep yaratıyordu (McShane ve Tarr 2007). Kraliçe Victoria'nın hükümrancılığının sonlarına doğru Londra'da 300.000 kadar at bulunuyordu. New York'ta şehir planlamacılar, ulaştırma saatlerinin zirveye çıktığı işe gidiş ve dönüş saatleri arasında at sürülerinin salındığı, banliyö otlakları kuşağı düzenlemeyi düşünüyordu. Kentlerde atlara dayalı nakliyatın doğrudan ve dolaylı enerji maliyeti (tahıl ve samanın yetiştirilmesi, hayvanların beslenmesi ve ahırlarda bakımı, tımar, nallama, koşum takımı kullanma, sürme ve atıkların kent çevresindeki pazar bahçelerine taşınması) on dokuzuncu yüzyıl sonu şehirlerinin enerji dengesindeki en büyük kalemlerdi. Atların hakimiyetindeki bu durum biraz ani bir şekilde son buldu. Kentlerdeki atların sayısı 1890'larda rekor seviyelere yükselirken elektrik ve içten yanmalı motorlar kullanışlı hale geliyordu. Bir kuşaktan daha kısa bir süre zarfında, atların çektiği şehir trafiği yerini büyük ölçüde elektrikli arabalara, otomobiller ve otobüslere bıraktı.

İlginçtir, Avrupalı ve Amerikalı mucitler ancak bu dönemlerde insan gücüyle çalışan en verimli hareketli aracın pratik bir biçimini, modern bisikleti geliştirdi. Bisiklet kuşaklar boyunca uygun bir kişisel taşıma aracı olarak kitlelerce benimsenme şansı olmayan hantal, hatta tehlikeli bir düzenek olmuştu. Hızlı ilerlemeler ancak 1880'lerde sağlandı. John Kemp Starley ve William Sutton, tekerlekleri eşit büyüklükte, direksiyonu doğrudan yönlendirilen, kutu profili elmas şeklinde çerçeveli bisikletler çıkardı (Herlihy 2004; Wilson 2004; Hadland ve Lessing 2014); bu tasarımlar yirminci yüzyıl makinelerinin neredeyse hepsinde yakından takip edildi (Şekil 4.19). Modern bisikletin evrimi, havalı lastikler ve arka pedal freninin takılmasıyla 1889'da büyük ölçüde tamamına erdi.

Işıklar, yük taşımaya yönelik çeşitli aksam ve ardışık oturak donanımıyla iyileştirilmiş bisikletler birkaç Avrupa ülkesinde, özellikle de Hollanda ve Danimarka'da işe gidip gelme, alışveriş ve eğlence için yaygın olarak tercih edilir bir seçenek haline geldi. Daha sonraları bisikletin yoksulların dünyasında yaygınlaşması sayesinde Avrupa'daki toplam sayı katlanarak arttı. Komünist Çin'in tarihi, bisikletin kitlesel kullanımıyla özellikle yakından bağlantılıdır. 1980'lerin başına dek Çin'de hiç özel araba yoktu, 1990'ların sonlarına dek de ülkenin büyük şehirlerinde bile çoğu kişi işe gelip giderken



1816



1879



1868



1889

Şekil 4.19 Bisikletin gelişimi şaşırtıcı derecede geç başlamış, **biraz yavaş** ilerlemiştir. Sürücülerin Baron von Drais'nin 1816 tarihli hantal drezini üstünde kendilerini itmeleri gerekiyordu. Pedallar önce 1855'te yönlendirici tekerin dingiline eklendi, 1860'ların velespitlerini getiren bir ilerlemeydi bu. Bundan sonraki tasarımlarda gerileme ön tekerlerin devasa olmasına, çok sayıda kaza yaşanmasına neden oldu. Modern bisikletlerin güvenliği, verimliliği ve yalınlığı ancak 1880'lerin sonunda ortaya çıktı. Byrn'den uyarlama (1900).

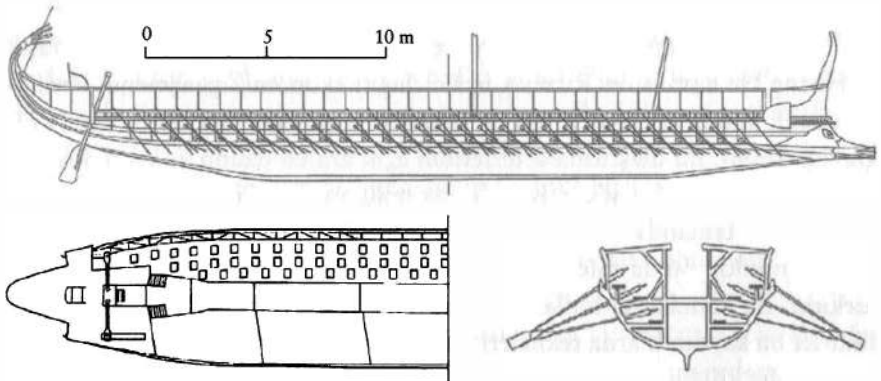
bisiklet kullanıyordu. Sonrasında ülkenin bütün büyük şehirlerinde otoyolların inşa edilmesi ve otomobil sahibi olanların sayısının artması şehirlerde bisiklet kullanımını azalttı (bu ancak, elektrikli bisikletlerin giderek popülerleşmesiyle birlikte kısmen dengelenen bir değişikliktir), ama kırsal kesimde bisiklete talep hâlâ güçlüdür ve Çin hâlâ dünyanın en büyük bisiklet üreticisidir, yılda 80 milyondan fazla bisiklet üretilir, bunun yüzde 60'ından fazlası da ihraç edilir (IBIS Dünya 2015).

Kürekli Gemiler ile Yelkenli Gemiler

Su üstünde insan gücüne dayalı hareketlilik karada hayvanlı nakliyattan çok daha yüksek düzeyde güç verimine ulaştı. Kürekli gemiler onlarca, hatta yüz-

lerce kürekçinin çabalarını bütünleştiren dâhiyane bir tasarıma sahipti. Ağır küreklerin uzun süreler boyunca zahmetle çekilmesi doğal olarak çok sıkı çalışmayı gerektiriyordu ve bu iş güverte altında kapalı yerlerde yapıldığında son derece yorucu oluyordu. Büyük kürekli gemilerin karmaşık tasarımını ve örgütlenmelerindeki ustalığı takdirimizi, bunların hızlı hareket etmeleri için insanların ne kadar eziyet çektiklerini düşünerek dengelememiz gerekir. Antik Yunanda kürekli gemiler özellikle iyi incelenmiştir (Anderson 1962; Morrison ve Gardiner 1995; Morrison, Coates ve Rankov 2000). Yunan askerlerini Troya'ya götüren gemiler, 50 kürekçinin çalıştığı *penteconteres* 7 kW'ye çıkan, kısa süreli olarak yararlı güç girdileri alabiliyordu.

Klasik dönemin en iyi performans gösteren savaş gemileri, üç sıralı *trieres* (Roma triremleri) 170 kürekçinin gücüyle çalışıyordu (Şekil 4.20). Güçlü kürekçiler 20 kW'yi aşan bir güçle bunları hareket ettiriyordu, saatte 20 km gibi azami bir hıza ulaşmalarına yetecek bir gücü bu. Manevra kabiliyeti son derece yüksek olan triremler 10-15 km/s gibi daha olağan yüksek hızlarda hareket ederlerken bile güçlü savaş makineleriydi. Bronz koçbaşları düşman gemilerinin teknelerini yıkıcı bir etkiyle delip geçebiliyordu. Batı tarihindeki en belirleyici savaşlardan birinde, küçük bir Yunan kuvvetinin Salamis'te daha büyük bir Pers filosunu yenilgiye uğrattığı savaş, bu şekilde triremler sayesinde kazanılmıştı. Bu gemiler cumhuriyet döneminde Roma'nın da en önemli savaş gemileriydi. Tam ölçekli bir yeniden kurgu nihayet 1980'lerde tamamlanmıştır (Morrison ve Coates 1986; Morrison, Coates ve Rankov 2000).



Şekil 4.20 Yeniden kurgulanan Yunan triremi *Olympias*'ın yan görünümü, kısmi planı ve kesiti. V şeklinde düzenlenmiş altı sırada 170 kürekçi bulunur, en üstteki küreklerin dayanakları dirsekli iskarmozların üstündedir. Coates (1989) kaynak olarak alınmıştır

İskender'in MÖ 323'te ölmesi sonrasında daha büyük gemiler (kuadriremler, kuinkuremler vs.) çıktı. Bu gemilerin üçten fazla sırası olduğunu gösteren hiçbir kanıt olmadığından muhtemelen iki-üç adamın tek bir kürek çektiğini söyleyebiliriz. Bu ilerlemenin son noktasına Ptolemaios Philopator'un hükümdarlığı sırasında (MÖ 222-204) *tessarakonteres*'in inşa edilmesiyle ulaşıldı. 126 metre uzunluğundaki gemi 4.000'i aşkın kürekçi, yaklaşık 3.000 asker taşıyacaktı; kuramsal olarak 5 MW'yi aşan bir güçle hareket edebiliyordu. Ama ağır mancınıklar da içeren ağırlığı onu neredeyse hareket ettiremez kılmıştı, gemi inşası konusunda yapılan, bedeli yüksek bir yanlış hesaptı bu.

Akdeniz'de büyük kürekli gemiler önemlerini on yedinci yüzyıl ortasına dek korudular: O sıralarda en büyük Venedik kalyonlarında her biri beş adam tarafından çekilen 56 kürek bulunuyordu (Bamford 1974; Capulli 2003). Maorilerin büyük oyma kanalarında neredeyse bir o kadar savaşçı kürek çekiyordu (200'e kadar çıkabiliyordu bu sayı). Toplanmış insan gücünün sürekli kürek çekmeye uygulanmasının genel sınırları 12 ile 20 kW arasındadır. Pedalla ya da ayak değirmenlerinde yürüyerek çalıştırılan gemiler de vardı. Sung hanedanı döneminde Çinliler 200'e kadar çıkabilen sayıda adamın pedal çevirerek hareket ettirdiği, giderek daha büyük pedallı/kürekli gemiler inşa etmişlerdi (Needham 1965). Avrupa'da dokuzuncu yüzyıl ortalarında 40 kişinin bocurgat ya da ayak değirmenleri çevirerek hareket ettirdiği daha küçük gemiler ortaya çıkmıştı. Hayvan gücü de mallar ve insanların kanal tekneleri ve barkalarla taşınmasında etkili olan başlıca asli itici gücü (**Kutu 4.13**).

Han hanedanlığından başlayarak Çin devletinin kilit bölgesinde (aşağı Huang He havzası ve Kuzey Çin Düzluğu) ekonomik gelişmenin özellikle önemli katalizörlerinden biri de kanallar olmuştur (Needham vd. 1971; Davids 2006). Bu ulaştırma arterlerinin açık ara en uzununu ve en ünlüsünü *da yunhe*'dir, Büyük Kanal'dır. Kanalın ilk bölümü yedinci yüzyıl başında açıldı, 1327'de tamamlanması Hangzhou'dan Beijing'e barkaların taşınmasını mümkün kıldı. Bu da fiilen 1.800 km'ye denk gelen 10 derecelik bir enlem farkıdır. İlk kanallarda kullanışlı olmayan çiftte kaydıraklar kullanılıyordu, öküzler bu kaydıraklarda tekneleri daha yüksek bir düzeye taşıyordu. 983'te kanal-gölet kilidinin keşfedilmesi teknelerin güvenle ve su israf edilmeksizin yükseltilmesini mümkün kıldı. Kilit düzeneklerindeki ilerleme, Büyük Kanal'ın en yüksek noktasını deniz seviyesinin sadece 40 metre üstüne çıkardı.

Kutu 4.13**Antik kanallarda ulaşım**

Antik kanallarda salyangoz gibi ilerlendiğine ilişkin ilk betimleme Horace (Quintus Horatius Flaccus, 65-8 M.Ö) tarafından Satires'de (Buckley 1855, 160) kaleme alınmıştır:

Bol bol koyu şaraba iyiden iyiye yatırılmış kürekçi ve yolcu yanlarında olmayan sevgilerine övgü dolu şarkılar söylemekte birbirleriyle yarışırken; sonunda yorgunluktan içi geçmiş yolcu uyuyakalır; ve tembel kürekçi otlamaya başlamış katırın yularını bir taşla bağlar, sırt üstü devriliyor horlar. Gün doğarken, teknenin hiç yol almadığını görürüz; fevri bir adam, yolculardan biri teknedeki atlar, hem katırın hem kanalcının başını ve yanlarını saz bir değnekle döver. Sonunda dört saat sonra zar zor kıydan ayrılırız.

Çin'deki kanal tekneleri, işçi toplulukları veya öküzler ya da mandalar tarafından çekiliyordu.

Avrupa'da kanalların en önemli oldukları dönem, on sekizinci ve on dokuzuncu yüzyıllar oldu. Birbirine bitişik çekme yollarında hareket eden atlar ya da katırlar, barkaları yüklü olduklarında saatte yaklaşık 3 km, boş olduklarında 5 km hızla çekiyorlardı. Bu biçimdeki ulaştırmanın mekanik avantajları açıktır. İyi tasarlanmış bir kanalda tek bir yük beygiri 30-50 tonluk bir yük çekebilir, en iyi sert yüzeyli yolda bir atın çekebileceğinden bir büyüklük kertesini daha büyük bir ağırlıktır bu. Buhar makineleri yavaş yavaş barka çeken hayvanların yerini almıştı, ama 1890'larda birçok at hâlâ daha küçük kanallarda çalışıyordu.

Avrupa'da, Çin'den ithal edildiği tartışmasız olan ulaştırma kanallarının inşası on altıncı yüzyılda Kuzey İtalya'da başladı. Fransa'da 240 metre uzunluğundaki Canal du Midi 1681'de tamamlandı. Kıtadaki ve Britanya'daki en uzun bağlantılar 1750 sonrasında kuruldu, Alman kanal sistemi de aslında demiryolu ağı sonrasında kuruldu (Ville 1990). Kanal barkaları büyük miktarlarda hammaddeyi başka yerlere götürüyor, genişleyen sanayiler ve büyüyen şehirler için mal ithal ediyor, ayrıca buraların atıklarını dışarı taşıyordu. Kanallar, demiryollarının inşa edilmesinin hemen öncesinde ve yirmi-otuz yıl sonrasında da Avrupa'da trafiğin büyük bölümünü üstlendi (Hadfield 1969).

Kanallardaki gemilerin ve savaş gemilerinin tersine, mallar ve insanların uzun mesafede deniz yoluyla taşınmasına büyük medeniyetlerin başlangıcından beri yelkenli gemiler hâkim oldu. Yelkenli gemilerin tarihi esasen, rüzgârın kinetik enerjisinin gemilerin verimli hareketine daha iyi bir biçimde

çevrilmesi yönünde bir arayış olarak anlaşılabilir. Yelkenler tek başına bunu yapamıyordu, ama açıktır ki denizcilik başarısının kilit noktasıydılar. Yelkenler temelde çekiş gücünü en üst düzeye çıkarmak, sürüklenmeyi en aza indirmek üzere tasarlanmış, kumaştan yapılmış kanatlardır (rüzgârla dolduklarında bir kanat şekli oluştururlar) (Kutu 4.14). Ama yelkenin kanat şeklinden gelen bu gücünün dümenin dengeleyici gücüyle birleşmesi gerekir, aksi takdirde gemi rüzgâra kapılıp sürüklenebilir (Anderson 2003).

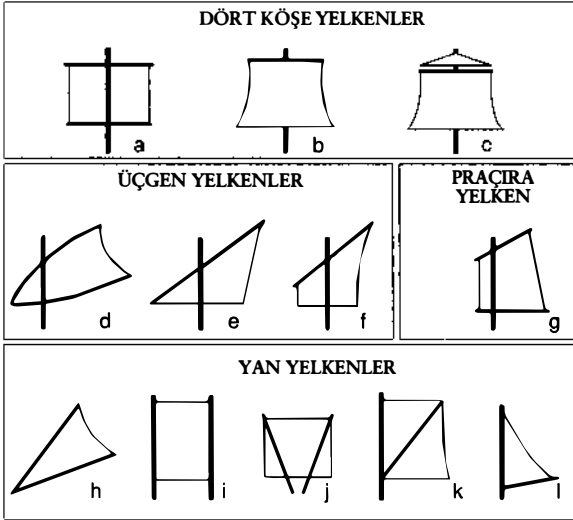
Geminin uzun eksenini boyunca doğru açılara yerleştirilmiş kare yelkenler ancak rüzgârın arkaya alınması (pupa) hâlinde verimli bir enerji çevrimi sağlar. Kuzeybatı rüzgârlarını arkalarına alan Roma gemileri Messina-İskenderiye hattını sadece 6-8 günde aşabiliyordu, ama geri dönüşleri 40-70 günü bulabiliyordu. Deniz yolculuklarının belli tarihlerde değil, düzensiz olması, mevsimler arasında ciddi farklılıklar gözlenmesi, kışın bütün seyahatlerin kesilmesi (İspanya ile İtalya arasında deniz yolculukları kasım ile nisan arasında kesiliyordu) genelde hangi hızlarda yol alındığını söylemeyi imkânsız kılar (Duncan-Jones 1990). Rüzgâra karşı yapılan daha uzun

Kutu 4.14

Yelkenler ve rüzgâra yakın yelken açmak

Rüzgâr bir yelkene vurduğunda, basınç farklılığı iki kuvvet yaratır: Kaldırma kuvvetinin yönü yelkene dik açıdır, çekme kuvvetiyse yelken boyunca iş görür. Rüzgâr arkadan geldiğinde, kaldırma kuvveti besbelli ki sürüklenme kuvvetinden fazla olacaktır ve gemi iyi yol alacaktır. Rüzgâr kirişe geldiğinde ya da onun biraz önünde olduğunda, gemiyi yanlara iten kuvvet açıktır ki öne iten kuvvetten daha güçlü olacaktır. Gemi rüzgâra daha yakın seyretmeyi denerse çekme kuvveti kaldırma kuvvetini aşar ve gemi geriye doğru itilir. Rüzgâra yakın seyretme konusunda azami kapasite, yelken açmanın başlangıcından bu yana 100°'nin üstünde artmıştır. Mısır'da ilk dönemlerdeki kare yelkenli gemiler ancak 150°'lik bir açıyı idare edebiliyordu, Ortaçağ'daki yelkenler rüzgârı kirişlerine alarak (90°) yavaşça ilerleyebiliyordu, Rönesans sonrası yelkenlerse yaklaşık 80° bir açıyla rüzgârın içine ilerleyebiliyordu. Ancak ve ancak geminin uzun eksenine daha uygun yerleştirilmiş, direkler etrafında dönme becerisine sahip asimetric yelkenler kullanılması rüzgâra yakın seyretmeyi mümkün kıldı.

Kare yelkenlerle üçgen yelkenlerin birlikte kullanıldığı gemiler 60°'lik bir açıyı idare edebiliyorlardı, valena donanımı (üçgen, çarmık ayağı, seren ve giz yelkenleri) rüzgâra 45° yaklaşabiliyordu. Modern yatlar, aerodinamik maksimum olan 30°'ye çok yaklaşabiliyordu. İlk sınırlamaları aşmanın yegâne yolu idare edilebilir en iyi açıda ilerlemek ve yolu değiştirmeye devam etmektir. Kare yelkenli gemilerin boca alabanda edip dönmeye, yani tam bir rüzgâr altı dönüş yapmaya başvurmaları gerekiyordu. Valena donanımlı gemiler, teknelerini rüzgâra çevirerek, nihayetinde yelkenin karşı tarafında rüzgârı yakalayarak gemiyi çevirmeyi deniyorlardı.



Şekil 4.21 Başlıca yelken tipleri. Dört köşe yelkenler, düz (a) ya da klos (b), en eski tiplerdir. Üçgen yelkenler arasında Pasifik sereni (d) ve larmo yakası olan ya da olmayan (e, f) Latinler yer alır. Yan yelkenler (h) Polinezya, Melanezya (i), Hint Okyanusu (j) ve Avrupa'da (k, l) yaygındır. Yelken direkleri ile bütün destekleyici yapılar (serenler, yan yelkenler ve giz yelkenler) kalın çizgilerle çizilmiştir, yelkenler bire bir aynı ölçüde gösterilmemiştir. Needham ve çalışma arkadaşları (1971) ile White (1984).

yolculuklar esasen uzun yol değişikliklerinin sonucuydu. Bütün antik gemilerde kare yelken kullanılıyordu, kökten farklı tasarımların kullanılmaya başlaması ile iyice yayılması arasında uzun bir zaman geçmişti (Şekil 4.21).

Pruva-pupa hattı donanımına sahip gemilerde geminin uzun eksenine hizalı yelkenler bulunuyordu, bu yelkenlerin direkleri yelkenlerin dönüp rüzgârı yakalamasını sağlayan millerdi. Basitçe rüzgâra dönüp zikzak bir yolda ilerleyerek yönlerini çok daha kolayca değiştirebiliyorlardı. İlk pruva-pupa donanımı büyük ihtimalle dikdörtgen eğik yelkenler biçiminde Güneydoğu Asya'dan gelmişti. Bu antik tasarımda yapılan değişiklikler nihayetinde hem Çin'de hem Hindistan üzerinden Avrupa'da kabul edilmişti. Çinlilerin tirizlerle sağlamlaştırılmış tipik çekiş yelkenleri, MÖ ikinci yüzyıldan beri kullanılıyordu. Eğik kare yelken MÖ üçüncü yüzyılda Hint Okyanusu'nda yaygınlık kazanmıştı, yedinci yüzyıl sonrasında Arap dünyasında yaygın olarak görülen üçgen (Latin) yelkenlerin açık bir habercisiydi bu.

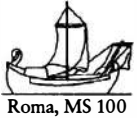
Vikinglerin yayılması (nihayetinde Grönland ve Newfoundland kadar batıya ulaşmışlardı) çok sayıda büyük dikdörtgen ya da kare yün yelkenlerin kullanılmasıyla mümkün olmuştu. Bu büyük yelkenlerin üretimi çok emek yoğun bir işti (90 metre karelik tek bir eğik yelkenin üretilmesi, dikey çözgü, yatay atkı kullanan bir zanaatkar tarafından beş yılı bulabiliyordu), arazilerin otlağa çevrilmesi, büyük Kuzey filolarına yetecek kadar yün üretmek için geniş koyun sürülerinin beslenmesi muhtemelen köle emeğine dayanıyordu

(Lawler 2016). Vikinglerin deniz yolculuklarının son bulması sonrasında, büyük yün yelkenler Kuzeydoğu Atlantik'te (İzlanda ile İskandinavya arasında, Hebrid ve Shetland adaları da dâhil olmak üzere) on dokuzuncu yüzyıla dek kullanıldı (Vikingskibs Museet 2016).

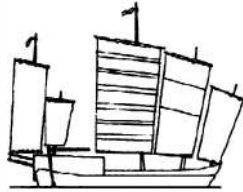
Avrupa'da ancak geç Ortaçağ'da kare donanım ile üçgen yelkenlerin birleştirilmesi rüzgâra yakın yol almayı mümkün kıldı. Tedricen bu gemiler daha fazla sayıda daha yüksek ve daha iyi ayarlanabilir yelkenlerle donanır oldu (Şekil 4.22). Daha iyi ve derin tekne tasarımları, bir pupa direği dümeni (MS birinci yüzyıldan beri Çin'de kullanılmış olup Avrupa'da ancak bin yıl sonra kullanılmaya başlamıştır) ve bir manyetik pusula (Çin'de 850 sonrası, Avrupa'da 1200 civarı) yelkenleri rüzgâr enerjisi çevrimini benzersiz bir verimlilikle gerçekleştiren mekanizmalar haline getirdi. Bu bileşim, hedefi şaşırmayan ağır silahların eklenmesiyle birlikte neredeyse karşı konamaya-



Mısır, MÖ 1600



Roma, MS 100



Çin, 1400



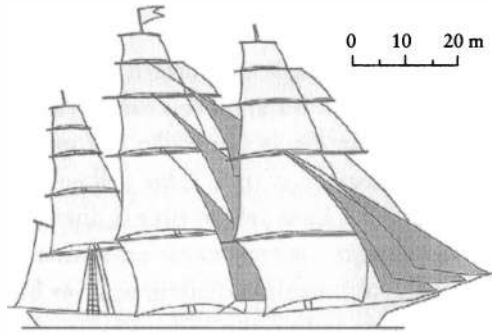
Santa Maria, 1492



Arap, 800



Venedik, 1250



Flying Cloud, 1851

0 10 20 m

Şekil 4.22 Yelkenli gemilerin evrimi. Antik Akdeniz toplumları kare yelkenler kullanırdı. Avrupalıların bu yelkenleri benimsemesi öncesinde Hint Okyanusu'nda üçgen yelkenler baskındı. Jiangsu'dan büyük bir Çin yelkenlisi etkili Çin tasarımlarına bir örnektir. Kolomb'un *Santa Maria*'sında kare yelkenler, bir pruva yelkeni, mizana direğinde bir Latin yelken ve cıvadranın altında bir yan yelken bulunuyordu. On dokuzuncu yüzyıl ortasında rekor kıran meşhur Amerikan sürat teknesi *Flying Cloud*, üçgen seren pruva, bir randa yelkeni ve afili bir ana yelken ile üst yelkenlere sahipti. Basitleştirilmiş ana hatlar Armstrong (1969), Daumas (1969) ile Needham ve çalışma arkadaşlarının (1971) kitaplarındaki resimlere dayanır, aynı ölçekte çizilmiştir.

cak derecede güçlü bir hal aldı. Batı Avrupa'da on dördüncü ve on beşinci yüzyıllarda geliştirilen silahlı gemi, hiç olmadığı kadar uzak yerlere yayılma çağını başlattı. Cipolla'nın özlü nitelemesine göre (1965, 137) gemi,

esasen nispeten küçük bir mürettebatın hareket ve yıkım için görülmemiş büyüklükte atıl enerji kitlelerine hükmetmesini mümkün kılan bileşik bir aytıdır. Avrupa'nın birden ve hızla yükselmesinin sırrı, tümüyle burada yatar.

Bu gemiler on sekizinci yüzyılda ve on dokuzuncu yüzyıl başında en büyük boyutlarına ulaştılar ve giderek artan sayıda silahla donanmış bir hal aldılar. Fransa-Britanya donanmalarının rekabeti nihayet Britanya'nın denizlerde açık üstünlüğüyle son buldu, ama yelkenli gemi buhar gücüyle çalışan gemilere yerini bırakmadan önce, orijinal bir Fransız tasarımı olan iki güverteli (silah güvertesi yaklaşık 54 metre uzunluğundaydı, 74 topu, 750 kişilik bir mürettebatı vardı) bir savaş gemisi başat model haline geldi. Britanya Kraliyet Donanması bu büyük gemilerden yaklaşık 150 tane sipariş etti (Watts 1905; Curtis 1919), bu gemiler Napoléon devri öncesinde ve sonrasında ülkenin donanma üstünlüğüne sahip olmasını sağladı. On beşinci yüzyıl başından itibaren bu yenilikçi tasarımla yapılmış en basit gemiler bile daha uzun yolculuklarda gözüpük Portekizli denizcileri taşıyordu (Kutu 4.15).

1492'de Kristof Kolomb kaptanlığında üç gemi Atlantik'i aşip Amerika'ya gitti (1451-1506). 1519'da Ferdinand Macellan (1480-1521) Pasifik'i aştı, onun Filipinler'de ölmesinden sonra Juan Sebastian Elcano (1476-1526) kaptanlık yaptığı *Victoria*'yla dünyanın çevresindeki ilk deniz yolculuğunu tamamladı. Zengin tarihsel kayıtlar, sömürgeci yayılma sırasında kullanılan hem tipik hem en iyi yelkenli gemilerin tonaj ve hızlarındaki ilerlemeleri, deniz ticaretinin hacim artışını izlememizi mümkün kılar (Chatterton 1914; Anderson 1926; Cipolla 1965; Morton 1975; Casson 1994; Gardiner 2000). Romalılar kapasitesi 1.000 tonu aşan gemiler inşa etmiş olsalar da standart yük gemileri 100 tondan daha az yük taşıyordu.

Avrupalılar bin yılı aşkın bir süre sonra, neredeyse bu kadar küçük gemilerle keşif seferlerine başladı. 1492'de Kolomb'un *Santa Maria* adlı gemisinin kapasitesi 165 tondur, Macellan'ın gemisi *Trinidad* ise sadece 85 tonluktur. Bundan bir yüzyıl sonra İspanyol Büyük Armadası'nın (1599'da denize açılan) gemileri ortalama 515 ton kapasiteye sahipti. 1800'e gelindiğinde Hindistan filosunda Britanya gemilerinin kapasitesi yaklaşık 1.200 tondur. Roma kargo gemileri saniyede 2-2,5 metreden hızlı gidemiyordu, on

Kutu 4.15

Portekizlilerin keşif seferleri

Portekizli denizciler önce güneye doğru, Afrika'nın batı sahili boyunca ilerlediler: 1444'te Senegal nehrinin ağzına ulaşıldı, 1472'de ekvator aşıldı, bugünkü Angola 1486'da görüldü, 1497'de Vasco da Gama (1460-1524) Ümit Burnu'nu dolandı, Hint Okyanusu'nu aşarak Hindistan'a vardı (Boxer 1969; Newitt 2005). Luís de Camões (1525-1580) 1572'de yayımlanan ve burada Richard Burton'un çevirisiyle (Burton 1880, 11) alıntılanan şiiri Os Lusíadas'ta ilerlemelerini anlatmıştır:

Suyun engin maviliğinde yürüdüler,
yollarına çıkan huzursuz dalgaları yararak;
elverişli güzel meltemler yumuşak ve hakikatli,
şişkin keten kabarr onların oyunuyla:
Denizler krem rengi bir köpükle saçılmış,
parıldıyor gemilerin burunları
kutsal alanlarını açıyor okyanus düzlüğünün,
burası ki Proteus'un hükümrânlığı sığırınının açtığı.

dokuzuncu yüzyıl ortasının en iyi sürat tekneleri saniyede 9 metre aşabiliyordu. 1853'te Boston'da inşa edilmiş, mürettebatı Britanyalı *Lightning* seyir defterine en uzun günlük seyri kaydetti: saniyede ortalama 9,3 metreyle 803 km kat etmişti (Wood 1922). 1890'da herhalde en meşhur nehir hızlı teknesi *Cutty Sark*, peş peşe 13 gün boyunca, ortalama 5,3 m/s hızla 6.000 km yol aldı (Armstrong 1969).

Gerek uzun seyahatlere çıkan tekneleri gerek her yıl bir ülkenin ticaret ya da askeri filosuna katılan gemileri hareket ettirmek için gerekli toplam enerjiyi hesaplamak için, sorgulanabilir çok fazla varsayımda bulunmak gerekirdi. Unger'a göre (1984) yelkenli gemilerin Hollanda Altın Çağı'nda ülke çapında enerji kullanımına katkısı Hollanda'daki bütün rüzgâr değirmenlerinin çıktısına hemen hemen eşitti; ama bu da ülkenin muazzam boyutlardaki turba kömürü tüketiminin yüzde 5'inden az bir miktara denk geliyordu (Kutu 4.16). Denizcilikteki toplam enerjileri nicelik haline getirmek mümkün olmasa da nakliyatın yayılmasının (bir bütün olarak ekonominin genişlemesi öncesinde) ve verimliliğinin yükselmesinin 1350 ile 1850 arasında Avrupa'nın ekonomik büyümesine kritik katkılarda bulunduğu kuşku yoktur (Lucassen ve Unger 2011).

Kutu 4.16

Yelkenli gemilerin Hollanda'nın enerji kullanımına katkısı

Tek tek gemilerin uzun deniz yolculuklarında hareket etmesini sağlamak için gerekli enerjiyi hesaplamamızı veya ticari ya da askeri filoların yararlandığı yıllık rüzgâr gücü katkısını ortaya çıkarmamızı mümkün kılacak tonaj ve hız bilgisi yeterli değildir. Kritik değişkenler (tekne tasarımları, yelken alanları ve kesimleri, kargo ağırlıkları ve kullanım oranları) anlamlı ortalamalara ilişkin tahminler geliştirmemize izin vermeyecek kadar farklıdır. Yine de Unger (1984) Hollanda'nın Altın Çağı sırasında yelkenli gemilerin Hollanda ulusunun enerji kullanımına katkısını hesaplamak üzere bir dizi tahmin geliştirmiş ve sonunda on yedinci yüzyılda yıllık toplam yaklaşık 6,2 MW sonucuna varmıştır. Karşılaştırmak amacıyla belirtelim, bu toplam De Zeeuw'un (1978) tahminlerine göre Hollanda'daki yel değirmenlerinin toplam gücüne neredeyse tamamen eşittir; ama ülkenin devasa boyutlardaki turba kömürü tüketiminin ancak küçük bir bölümünü oluşturur (yüzde 5'ten az).

Oysa bu tür niceliksel karşılaştırmalar yanıltıcıdır: Miktarı ne olursa olsun turba kömürü Doğu Hint Adaları'na seyahat etmeye yetmezdi; turba kömüründen elde edilen yararlı enerji çok büyük ihtimalle brüt ısı değerinin dörtte birinden azdı; tabii bir de genç bir fosil yakıtın sınırlı ve yenilenemez (ya da tarihsel bir zaman ölçeğinde yenilenebilir olmayan) rezervleri ile atmosferik basınçta sürekli yenilenen bol miktarda ve yenilenebilir bir kaynağı karşılaştırmakta temel bir tezat söz konusudur. Dolayısıyla toplam güçle ilgili karşılaştırmalar, özel çevrim verimlilikleriyle ilgili karşılaştırmalardan (bu örnekte bir yelkenin verimliliğinin bir turba kömürü ocağının performansı ile karşılaştırılması) daha anlamlı değildir.

Binalar ve Yapılar

Bina tarzları ve süslemelerin muazzam çeşitliliği, sadece dört temel yapısal öğeye indirgenebilir: duvarlar, sütunlar, kirişler ve kemerler. Sanayi öncesi dünyanın üç temel bina malzemesi olan kereste, taş veya güneşte kurutulmuş **ya** ocakta pişirilmiş tuğladan bunları yaratmak için birkaç basit aletin yardımcı olduğu insan emeğine ihtiyaç vardı. Ağaçlar testere ve keserle kesilip kabaca şekillendirilebiliyordu. **Taş** sadece çekiçler ve takozlarla çıkarılıyor, keskilerle **şekillendiriliyordu**. Güneşte kurutulmuş tuğlalar kolayca bulunabilen **alüvyonlu kille** yapılabiliyordu. Büyük ağaçların az bulunması, birçok bölgede **kereste** kullanımını sınırlıyordu, taş nakliyatının pahalı olması da yerel çeşitler karşısında tercih edilmesini büyük ölçüde kısıtlıyordu. Kereste ve taşın bunun sonrasında, sıklıkla da çok incelikle şekillendirilmesi ve yüzeylerinin ayrıntılandırılması bu bina malzemelerinin kullanımının enerji maliyetini büyük ölçüde artırabiliyordu.

Ortadoğu'da ve Akdeniz Avrupası'nda yaygın olan, güneşte kurutulmuş çamur tuğlalar, en az enerji yoğun bina malzemesiydi. Bunların üretimi, ilk yerleşik toplumlarda **bile** olağanüstü miktarlara ulaşmıştı. Sümer başken-

ti Uruk, MÖ 2500 yılı öncesinden bugüne ulaşan en eski edebi belgelerden biri olan Sümer destanı *Gilgameş*'ta şöyle betimlenir (Gardner 2011): "Bir kısmı şehir, bir kısmı meyve bahçesi, bir kısmı da kil çukurlarıdır. Kil çukurları dâhil üç kısım Uruk'u oluşturur." Tuğlalar samanlı balçık ya da kil, su ve saman tozu ya da kesilmiş samandan, kimi zaman tezек ve kum eklenerek yapılıyordu; bu karışım sıkıştırılıyor, tahta kalıplarda hızla şekillendiriliyordu (saatte 250 parçaya çıkılabiliyordu), sonra da güneşte kurumaya bırakılıyordu. Tuğlaların boyutları büyük kare Babil parçaları (40 x 40 x 10 cm) ile ince, dikdörtgen (45 x 30 x 3,75 cm) Roma tuğlaları arasında değişiyordu. Çamur tuğlaların ısı iletkenliği zayıftı, sıcak kuru iklimlerde binaların serin tutulmasını sağlıyordu. Önemli bir mekanik avantajları da vardı: Çamur tuğladan bir tonoz inşa ederken destek için ahşap kirişе ihtiyaç duyulmuyordu (Van Beek 1987). Uygun kil bulunduğu, gerekli emek harcandığında muazzam miktarda çamur tuğla üretilebiliyordu.

Yakılmış tuğla antik Mezopotamya'da kullanılmış, sonra hem Roma İmparatorluğu'nda hem Han hanedanı döneminde Çin'de yaygınlaşmıştı. Pişirme yüzyıllar boyunca çoğu kez kapalı olmayan istifler ya da çukurlarda yapılmış, bu da büyük bir yakıt israfına, tuğlaların eşit derecede pişmemesine yol açmıştı. Daha sonra düzenli höyükler ya da istifler halinde pişirme sırasında 800 santigrat derece gibi ısılara çıkılabiliyor, daha yüksek verimliliğe sahip daha tek tip bir ürün elde edilebiliyordu. Tümüyle kapalı yatay ocaklar daha iyi bir tutarlılık ve daha yüksek bir yakma verimliliği sağlıyordu. Bu ocaklarda düzenli aralıklarla yerleştirilmiş bacalar vardı, yükselen sıcak gazlar kubbeli çatılardan aşağı doğru yansıyor, ama ocakların çalışması için odun ya da odun kömürüne ihtiyaç vardı. Avrupa'da bu ihtiyaçlar, on altıncı yüzyılda tuğlalar dal örgü ya da kereste direklerin yerini almaya, duvarların yanı sıra temeller için de yaygın olarak kullanılmaya başladıklarında arttı.

Ana malzemeleri ne olursa olsun sanayi öncesi yapılar çok sayıda insanın (bazı deneyimli inşaatçılar da dâhil), ya da insanlar ve hayvanların hünерli bir biçimde bütünleşerek bugün makineleşmiş dünyanın standartlarına göre bile olağanüstü derecede zorlu görünen işleri başardıklarını ortaya koyar. Taş çıkarma işi tümüyle elle yapılıyordu. Hayvan grupları ocaktan çıkarılan taşı inşaat yerine taşıyordu ve kimi zaman ağır parçaları daha yüksek bir seviyeye çıkarmakta kullanılan makineleri çalıştırırken de hayvan gücünden yararlanılıyordu, ama bunun dışında geleneksel inşaatçılık sadece insan emeğine dayanıyordu. Zanaatkârlar testereler, baltalar, çekiciler, kes-

kiler, düzlemler, delgiler, malalar kullanıyor, kereste, taş ve cam kaldırmak için bileşik makaralar, vinçler ya da ayak değirmenlerinden yararlanıyorlardı (Wilson 1990).

İnsan gücüyle çalışan, bocurgatları, çıkırıkları ya da silindirleri çeviren vinçler bu işi yavaş da olsa kolayca yapabiliyordu ve bazı makineler –Filippo Brunelleschi’nin (1377-1446) Floransa’daki Santa Maria del Fiore Katedrali’nin seyre değer kubbesinin inşasında kullanılan yapı malzemelerini kaldırmakta kullanılan ve öküz gücüyle çalışan kaldıraç ve kubbe tepeliğini yerleştirmek için kullanılan döner vinç de dâhil– belli zor işler için tasarlanmıştı (Kutu 4.17). Bazı projeler hızlı tamamlanıyordu: Parthenon sadece on beş yılda (MÖ 447-432), Pantheon yaklaşık sekiz yılda (118-125) ve İstanbul’da bulunan, daha sonra camiye çevrilen yüksek tonozlu Bizans kilisesi Ayasofya beş yıldan kısa sürede inşa edilmişti (527-532).

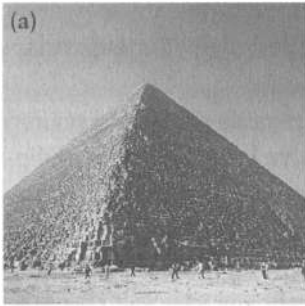
Birkaç tipte büyük inşaat projeleri dikkat çeker. En iyi bilinenler açık arayla çeşitli tören yapılarıdır, en başta da ölümler için yapılmış anıtlar ve ibadet yerleri gelir. Birinci gruptaki en dikkat çekici yapılar, piramitler ve türbeler heybetleriyle diğerlerinden ayrılır, tapınaklar ve katedraller ise anıtsallığı karmaşıklık ve güzellikle birleştiren yapılardır. Sanayi öncesi dönemin

Kutu 4.17

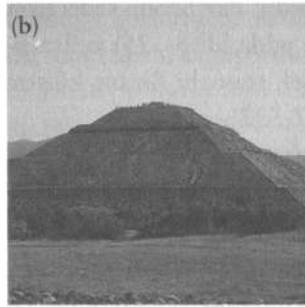
Brunelleschi’nin dâhiyane makineleri

Filippo Brunelleschi’nin Santa Maria del Fiore Katedrali’nde yaptığı çalışma, gerekli miktarda enerjilerin uygun bir biçimde kullanılmasına yönelik dâhiyane icatlarda oynanan rollerin mükemmel bir örneğidir. Yük hayvanları ve işçiler gerekli gücü sağlamaya hazırdı, ama katedralin rekor büyüklükteki kubbesi (iç çapı 41,5 metreydi) ve o zamana dek görülmemiş bir biçimde (zemine yerleştirilmiş bir iskele olmaksızın) inşa edilmesi Brunelleschi’nin yeni dâhiyane makineleri olmaksızın gerçekleştirilemezdi (Prager ve Scaglia 1970; King 2000; Ricci 2014). İnşaat bittikten sonra bu makineler söküldü, ama şükürler olsun ki çizimleri Buonaccorso Ghiberti’nin Zibaldone’sinde saklandı.

Bunlar arasında zemine yaslanan ve yükseltilebilen vinçler ile ters çevrilebilen bir yük kaldırma makarası, fenerin inşasında kullanılan dönebilir bir vinç, incelikli vinçler vardı; içlerindeki en dâhiyane makine de herhalde bir yük konumlandırıcıydı (ille de Brunelleschi’nin orijinal icadı değildi, ama bu fikrin mükemmel bir icrası olduğuna kuşku yoktu). Kubbede kullanılan malzemeler (öküzlerin çektiği) merkezi bir yük kaldırma makarası ile kaldırılmıştı. Tuğlalar yükselen kavisli yapıyı inşa eden taş ustalarına kolayca ulaştırılıyordu, ama (yapının herhangi bir biçimde yayılmasını durdurmak için gerekli) bağlama halkaları için kullanılan taş bloklar yükseltilmiş merkezi yerden, tam olarak yerleştirilmeleri gereken önceden belirlenmiş yere iterek ya da çekerek götürüleliyordu: Bu iş dikey bir direğin üstüne yerleştirilmiş, vidayla hareket ettirilen iki yatay kaydıraçla bir karşıt ağırlık kullanılarak halledilmişti.



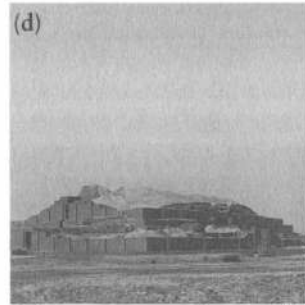
GIZA



TEOTIHUACAN



ANURADHAPURA



ELAM

yararlı yapıları arasında su kemerlerini uzunlukları nedeniyle; kanallar, tüneller, köprüler ve içe dönük sifonları birleştirmeleri nedeniyle ayrı bir yere koyarım. Antik yapıların inşasına harcanan enerjiyle ilgili kesin bir hesaplama yapılamaz, Ortaçağ'daki projelerin inşasının enerji maliyetini tahmin etmek bile kolay değildir. Ama yaklaşık hesaplamalar toplam enerji gereksinimleri açısından ciddi farklılıklar gözlemlendiğini, hatta ortalama güç akışında daha büyük farklar olduğunu ortaya koyar.

Muazzam ve sürekli enerji akışları (uzun vadeli planlama, dikkat çekici örgütlenme, geniş ölçekli bir işgücü örgütlenmesi) gerektiren etkileyici mezar anıtları ya da dinsel yapılar sanayi öncesi dönemde bütün büyük kültürlerce inşa edilmiştir (Ching, Jarzombek ve Prakash 2011). Bu mezarlar ve tapınaklar insanın kalıcılık, mükemmellik ve aşkınlığa duyduğu evrensel özlemi ifade eder (Şekil 4.23). Mısır piramitlerinin, antik dünyanın bu en büyük yapılarının inşaat süreci ve enerji gereksinimleri hakkında biraz kesin bir şeyler söylemeyi çok isterdim. Piramitlerin inşasının uzun vadeli planlama, etkili büyük ölçekli lojistik, etkili bir denetim ve hizmet, neredeyse tümüyle karanlıkta kalmış olsa da hayran olunası teknik becerilerin bir bileşimini gerektirdiğini biliyoruz.

En büyük piramit, Dördüncü Handedan'dan Khufu'nun firavun mezarı bütün bu nitelikleri gösterir. Ortalama 2,5 ton ağırlı-

Şekil 4.23 (a) Khufu'nun Gize'deki piramidi, (b) Teotihuacan'da Güneş Piramidi, (c) Anuradhapura'da Jetavana stupası, (d) Elam'da Choga Zanbil zigguratu. Bu yapılarla ilgili ayrıntılı bilgi Bandaranayke (1974), Tompkins (1976) ile Ching, Jarzombek ve Prakash'ta (2011) bulunabilir.

ğında yaklaşık 2,5 milyon taştan yapılmış, 2,5 milyon metreküp hacimli, 6 milyon tonluk bu kütle, dikkat çekici bir kesinlikle, hayran olunası bir hızla bir araya getirilmiştir. Büyük Piramit'in yöneliminden hareketle (iki batmayan yıldızın, Mizar ve Kochab'ın hizalarını kullanarak) inşaatın başlangıç tarihi aralığını MÖ 2485 ile 2475 arası olarak daraltabiliyor (Spence 2000), yapının 15-20 yılda tamamlandığını biliyoruz. Mısır uzmanları kilit taşlarının Gize'deki inşaat alanından çıkarıldığını, kaplama taşlarının Nil'in karşı yakasında Tura'daki ocaklardan getirildiğini, en ağır granit blokların, piramidin içindeki bindirme çatıyı oluşturan blokların (en ağırları yaklaşık 80 tondur) Güney Mısır'dan getirilmek zorunda kaldığı sonucuna varmıştır (Lepre 1990; Lehner 1997).

Bunların hepsi de gayet anlaşılır görünüyor. Antik Mısırlılar, hem benzer büyüklükte blokların kitlesel üretimi hem de büyük yekpare taşlar çıkarılması açısından taş çıkarma zanaatinde ustalaşmıştı. Ayrıca ağır nesneleri karada ve teknelerde taşıyabiliyorlardı. İyi bilinen bir resimde el-Berşa yakınlarındaki bir mağaradan (MÖ 1880) 50 tonluk bir sütunun 127 kişi tarafından, bir işçinin bir kaptan döktüğü su sayesinde sürtünmesi azaltılmış bir kızak üzerinde çekilerek çıkarıldığı görülür. Bu çok büyük taşların teknelerle nakledildiğini, Deir el-Bahari'de bulunmuş benzersiz bir resimden öğreniriz: 30,7 metre uzunluğundaki iki Karnak obeliski, 900 kürekçinin çalıştığı 30 teknenin çektiği 63 metre uzunluğunda bir gemiyle taşınmıştır (Naville 1908).

Ama taş çıkarma ve taşları inşaat yerine götürmenin ötesinde her şey tahminlere, varsayımlara dayanır; en büyük piramitlerin aslında nasıl yapıldığını hâlâ bilmiyoruz (Tompkins 1971; Mendelssohn 1974; Hodges 1989; Grimal 1992; Wier 1996; Lehner 1997; Edwards 2003). Başka birçok açıdan çok zengin olan Mısır hiyeroglif ve resim kayıtları o döneme ait resimler ya da betimlemeler sunmaz. En yaygın modern varsayımlarda, kil, tuğla ve taş rampaların kullanılması tanımlanır, ama bunların biçimi (tek bir eğik düzlem mi, çok sayıda düzlem mi, çevreleyici bir rampa mı?) ya da eğimi (1:3 gibi yüksek, 1:10 kadar düşük oranlar ileri sürülmüştür) hakkında hiçbir görüş birliği yoktur. Ama bu tür anlaşmazlıkların önemi yoktur, zira bir inşaat rampasının kullanılmış olması son derece ihtimal dışıdır (Hodges 1989).

Tek bir eğik düzlem olsa, taş işçiliğinin her katmanı sonrasında, bunun tümüyle yeni baştan inşa edilmesi gerekirdi. 10:1 oranında idare edilebilir bir eğimle, bu eğik düzlemin hacmi, piramidin kendisini epeyce geride

bırakırdı. Piramidi çevreleyen rampalar olsa, bunların dar olması gerekirdi; inşa edilmeleri, korunmaları, yoğun kullanılmaya dayanıklı olmalarının sağlanması gayet zor olurdu; müzakere edilmesi de tehlikeli, hatta imkânsız olurdu. Çözüm olarak köşe direklerinin çevresine dik açılarla halatlar bağlanması önerilmiştir, ama Mısırlıların bunu yapabildiği ya da bunun aslında işe yaradığı yönünde elimizde hiçbir kanıt bulunmuyor. Her halûkârda Gize Platosu'nda büyük hacimlerde rampa binası enkazına rastlanmamıştır.

Piramit inşaatıyla ilgili ilk betimleme, tamamlanmalarından iki bin yıl sonra Herodot (MÖ 484-425) tarafından kaleme alınmıştır. Mısır seyahati sırasında Herodot'a şöyle denmiştir:

Piramidin inşası için yirmi yıllık bir süre geçti; piramit karedir, her kenarı sekiz yüz ayaktır, yüksekliği de aynıdır... Bu piramit basamaklar gibi yapıldı, kimileri “sıra”, kimileri de “kaide” der bunlara; böyle ilk sırayı yaptıklarında, geri kalan taşları, küçük kereste parçalarından yapılmış makinelerle kaldırdılar, önce zeminden basamakların birinci aşamasına çıkardılar, taş buraya gelince, birinci sıradaki başka bir makineye yerleştirildi, buradan ikinci sıraya çıkarılıp başka bir makineye alındı; çünkü basamak sayısı kadar makine de vardı ya da belki de aynı makineyi, kolayca taşınabilecek şekilde yapıldığından, taşları taşıyabilmek için peş peşe her aşamaya taşıyorlardı. Nasıl olduysa, piramidin en yüksek kısımları en önce tamamlanmıştır, bundan sonra, ondan sonraki kısmı tamamlayarak ilerlemişlerdir, son olarak da zemine yakın ve en alçak kısımları tamamlamışlardır.

Fiili inşaat yönteminin betimlemesi olabilir mi bu? Taşımayı savunanlar bu fikirdedir, kaldıraçların ya da basit ama dâhiyane makinelerin yardımıyla bu işin nasıl yapılabilmesine ilişkin birçok çözüm önermişlerdir. Hodges (1989) en basit yöntemi, taş blokların kaldırılması için ahşap kaldıraçlar, yerleştirilmesi için de silindirler kullanıldığını savunmuştur. Bu sürece getirilen itirazların başında, her şeyden önce her bloğun daha yüksek sıralara yerleştirilmesi için çok sayıda dikey aktarma yapmanın gerekmesi gelir, ayrıca 2-2,5 ton ağırlığında taşların hareket ettirilmesi sırasında kaza sonucu düşmeleri önlemek için sürekli tetikte olmak ve yanlış hareket etmemek de gerekirdi.

İnşayla ilgili belli süreçleri bir kenara bırakırsak, ilk ilkeler Büyük Piramit'in inşası için gerekli toplam enerjiyi hesaplamamızı, dolayısıyla gerekli iş gücünü tahmin etmemizi mümkün kılar: Benim hesaplamalarım (kuramsal olarak minimumları varsaymak yerine, cömert tahminlerle hata yapmış olabilirim) en az 10.000 kişinin çalıştığını gösteriyor (Kutu 4.18). Piramitlerin inşasıyla ilgili kesin olan birkaç noktadan biri, gerekli iş gücü hakkında bir

kerte daha büyük tahminlerin savunulamaz abartılar olduğudur. Çoğu Gize Platosu'nda bulunan çok sayıda işçinin beslenmesi, taşların kaldırılması ve yerleştirilmesi kadar, hatta ondan da fazla sınırlayıcı bir etken olabilirdi.

İşgücünün uzun vadeli olarak bağlanmasını gerektiren diğer antik yapılar arasında Mezopotamya'da bulunan, MÖ 2200 sonrasında inşa edilmiş basamaklı tapınak kuleleri (*zigguratlar*) ile *stupalar* (*dagobalar*), Buda'nın şerefine dikilmiş, genellikle kutsal eşyaların saklandığı tapınaklar bulunur (Ranaweera 2004). Falkenstein (1939), Irak'ta Varka yakınlarındaki Anu zigguratının inşasının 1.500 kişinin beş yıl boyunca günde 10 saat çalışmasını gerektirdiğini, bunun da toplam yaklaşık 1 TJ enerjiye denk düştüğünü hesaplamıştı. Leach (1959) en büyük Anuradhapura stupasının (yaklaşık 93

Kutu 4.18

Büyük Piramit'in enerji maliyeti

Büyük Piramit'in potansiyel enerjisi ($2,5 \text{ Mm}^3$ 'lük taş kütesini kaldırmak için gerekli enerji) yaklaşık $2,5 \text{ TJ}$ 'dir. Wier (1996) bu toplamı doğru bulmuştu, ama günde ortalama 240 kJ yararlı iş gerektiği yönündeki tahmini çok düşüktü. $2,5 \text{ Mm}^3$ taşın 20 yılda kesilmesi (Khufu'nun hükümdarlığı bu kadar sürmüştü) 1.500 taş işçisinin yılın 300 günü çalışmasını, bakır keskinler ve dölerit tokmaklar kullanarak kişi başına $0,25 \text{ m}^3$ taş üretmelerini gerektirir. Taşların kare haline getirilmesi ve yontulması (gerçi iç kısımdaki blokların birçoğu ancak kabaca yontulmuştu) ve inşaat yerine taşınmaları iç üç kat daha fazla sayıda taş ustasına ihtiyaç olduğu varsayılrsa da inşaat malzemelerinin tedarik edilmesi için gerekli toplam işçi sayısı 5.000 kadar olacaktır.

Gündelik net yararlı enerji girdisi kişi başına 400 kJ olursa, taşların kaldırılması yaklaşık 6,25 milyon iş günü gerektirirdi; bu iş 20 yıl içinde, yılda 300 gün çalışarak yaklaşık 1.000 işçiyle tamamlanırdı. Yükselen yapıda taşların yerleştirilmesi için aynı sayıda işçiye ihtiyaç olsaydı, ulaştırma, aletlerin onarımı, yiyecek dağıtımı ve pişirilmesi, giysilerin yıkanması gibi işlerde çalışanlar, örgütleyiciler ve denetleyiciler hesaba katılarak bu rakam ikiye katlansaydı bile ana toplam 10.000'den bayağı az olurdu. Çalışmanın en yoğun olduğu dönemlerde Gize'deki piramit işçileri toplu olarak her saat en az 4 GJ yararlı mekanik enerji, yani genel olarak $1,1 \text{ MW}$ 'lık bir güç üretiyordu; bu çabayı sürekli kılmak için de her gün 20 GJ gıda enerjisi tüketiyorlardı, bu da yaklaşık 1.500 ton buğdaya eşitti.

Wier (1996) 20 yıllık dönem için en fazla 13.000 piramit işçisi çalıştığı tahmininde bulunmuştur. Hodges (1989) 17 yıllık çalışma sırasında 125 ekibin bütün taşları yerlerine yerleştirmiş olabileceği, taş taşıma işi için bu rakamların toplam ancak 1.000 daimi işçiye yaklaşacağı tahmininde bulunmuştur; en tepeden başlayarak kaplama taşların yerlerine döşenmesine üç yıl vermiştir. Herodot'a ise 100.000 kişinin 20 yıl boyunca, yılda 3 ay çalıştığı söylenmiştir, Mendelssohn (1974) toplam 70.000 mevsimlik işçinin, muhtemelen de 10.000 daimi taş ustasının çalıştığı tahmininde bulunmuştur. Bunların ikisi de savunulamaz abartılı tahminlerdir.

milyon pişirilmiş tuğlanın kabaca yerleştirilmesiyle inşa edilmiş 122 metre yüksekliğindeki stupa) inşası için 600 işçinin 50 yıl boyunca yılda 100 gün çalışmasının gerektiği, yani stupanın 1TJ'yi aşkın yararlı enerjiyle inşa edildiği tahmininde bulunmuştu (bkz. Şekil 4.23).

Mezoamerikan piramitler, özellikle de (MS ikinci yüzyılda inşa edilmiş) Teotihuacan ve Cholula da gayet heybetlidir. Teotihuacan'ın düz tepeli Güney Piramidi muhtemelen 70 metrenin üstüne çıkan yüksekliğiyle, tapınak da dâhil olmak üzere en yüksek piramittir (bkz. Şekil 4.23). Buranın inşası Gize'deki üç taş yapının inşasından çok daha kolay olmuştur. Piramidin en iç kısmı toprak, moloz ve kerpiç tuğladan yapılmıştı, sadece dış kısmına kesilmiş taşlar döşenmişti, bunlar da çıkıntılı kancalarla tutturulmuş, kireç harcıyla alçılanmıştı (Baldwin 1977). Yine de binanın tamamlanması, 10.000'den fazla işçinin 20 yılı aşkın bir süre boyunca çalışmasını gerektirmiştir.

En büyük piramitlerin inşasıyla ilgili sadece tahminlerde bulunabilmemizin tersine, Parthenon ya da Pantheon gibi klasik dönem yapılarının nasıl inşa edildiği konusunda gizemli bir şey pek yoktur (Coulton 1977; Adam 1994; Marder ve Jones 2015). Pantheon'un dikkat çekici tasarımı genellikle betonun dâhiyane kullanımı olarak anılır, ama Romalıların bu malzemeyi kullanan ilk inşaatçılar olduğu yönünde sık tekrarlanan iddia asılsızdır. Beton çimento, topaklı malzeme (kum ve çakıl taşı) ve sudan oluşan bir karışımdır; çimento ise formülü titizlikle hazırlanmış, ince öğütülmüş bir kireç, kil ve metalik oksit karışımının eğik döner bir ocakta yüksek ısıda işlenmesiyle üretilir; Roma'nın *opus caementicium*'unda, Pantheon'un ya da 1820'lere dek başka bir binanın inşasında çimento kullanılmamıştır (Kutu 4.19).

Büyük arkitravların (Parthenon'dakiler gibi, neredeyse 10 ton çekenlerin) bir vinçle kaldırılmaları gerektiğini (inşaat yerine dairesel çerçeveler içinde yuvarlandıklarını) biliyoruz, yaklaşık 2.000 yıl sonra katedrallerin, Ortaçağ Avrupası'nın en incelikli yapılarının inşasında çok benzer vinç tasarımları kullanılmıştır. Bu binaları inşa edenler arasında deneyimli zanaatkarlar bulunuyordu ve inşaat süreci birçok özel aletin kullanılmasını gerektiriyordu (Wilson 1990; Erlande-Brandenburg 1994; Recht 2008; Scott 2011). İşgücünün büyük bir bölümü mevsimlikti, ama genel olarak 10 ya da 20 yıl boyunca tam zamanlı olarak çalışan yüzlerce işçiye (keresteci, taş çıkarıcı, araba sürücüsü, marangoz, taş ustası, cam işçisi) ihtiyaç duyulmuştur. Dolayısıyla toplam enerji yatırımı piramit inşasında olduğundan iki kerte daha küçüktü, enerji akışlarının zirve noktası sadece birkaç yüz kilowatt'tı.

Kutu 4.19 Roma'daki Pantheon

Roma'nın opus caementicium'u bir parçacık (kum, çakıl, taş, sıklıkla da kırık tuğla ve kiremit parçaları) ve su karışımıydı, ama bağlayıcı madde (betonda olduğu gibi) çimento değil, kireçli harçtı (Adam 1994). Bu karışım inşaat yerinde hazırlanırdı, sönmüş kireç ile volkanik toprağın benzersiz karışımı –Puteoli (Vezüv Dağı'nın sadece birkaç kilometre batısında bulunan bugünkü Pozzuoli) yakınında kazılmıştır ve pulvere puteolano (daha sonra pozzolana) diye bilinir– su altında bile sertleşebilen sağlam bir malzeme ortaya çıkarıyordu. Bugünkü betonlara kıyasla daha düşük kalite olsa da bu pozzolana karışımı ve yüksek kalite kireç sadece büyük ve kalıcı duvarlar için değil, büyük tonozlar ve kubbeler için de yeterince kuvvetli bir malzeme yaratıyordu (Lancaster 2005).

Romalıların opus caementicium kullanımı, tasarım açısından zirve noktasına, inşası MÖ 126'da Adrianus döneminde tamamlanan Pantheon'da ulaştı. Sanayi öncesi yapılarda, Pantheon'un çapı 43,3 metre olan büyük kubbesini (yapının iç kısmı aynı çapta bir kürenin içine sığabiliyordu) geride bırakan bir kubbe daha yoktur; gerçi Saint Peter katedralinin Michelangelo'nun tasarladığı ve 1590'da tamamlanan kubbesi 41,75 metre çapla ona yaklaşmıştı (Lucchini 1966; Marder ve Jones 2015). Apaçık görsel cazibesi dışında kubbenin en dikkat çekici özelliği, özgül kütlelerinin düşey olarak azalmasıydı: Beş sıra kare kaset döşeme tavanın boyutları küçülerek merkezi gözde birleşiyordu, ama en altta travertenden en üstte ponza taşına daha hafif parçalar kullanarak giderek incelen taş katmanları halinde inşa edilmişlerdi (MacDonald 1976). Kubbenin toplam ağırlığı yaklaşık 4.500 tondur.

Bazı katedraller hızla tamamlanmış olsa da (Chartres sadece 27 yılda, orijinal Notre-Dame de Paris 37 yılda tamamlanmıştır) inşaat sık sık salgın hastalıklar, işçiler arasındaki anlaşmazlıklar, rejim değişiklikleri, para azlığı, ülke içindeki ya da uluslararası çatışmalarla kesintiye uğruyordu. Bunun sonucunda bir katedralin inşası genellikle birkaç kuşak sürüyordu, hatta bazı örneklerde inşaatın tamamlanması için aradan yüzyıllar geçtiği oluyordu: Prag'da Saint Vitus katedralinin 1344'te IV. Charles döneminde başlayan inşa süreci on beşinci yüzyıl başında yarıda kesilmiş, tamamlanmayan (ve geçici olarak duvarlarla çevrelenen) yapı ancak 1929'da (iki Gotik kulenin dikilmesiyle) bitirilmişti (Kuthan ve Royt 2011).

Kudüs, Mezopotamya ve Yunanistan'da bulunan büyük su yapıları, barajlar, kanallar ve köprüler dâhil olmak üzere gayet iyi belgelenmiştir. Ama Romalıların başarıları, kentlerin su temin etme sorununa getirilen cesur mühendislik çözümlerinin en iyi bilinmiş örneklerini oluşturur. Bu başarı, ancak sanayileşen Avrupa'nın geride bıraktığı bir başarıdır. Roma su kemerleri, özellikle çok etkileyici yapılardır (Şekil 4.24). Plinius *Historia Naturalis*'de bu yapılar hakkında “dünyanın hiçbir yerinde rastlanmayan dikkat çekici bir başarı” diyordu.

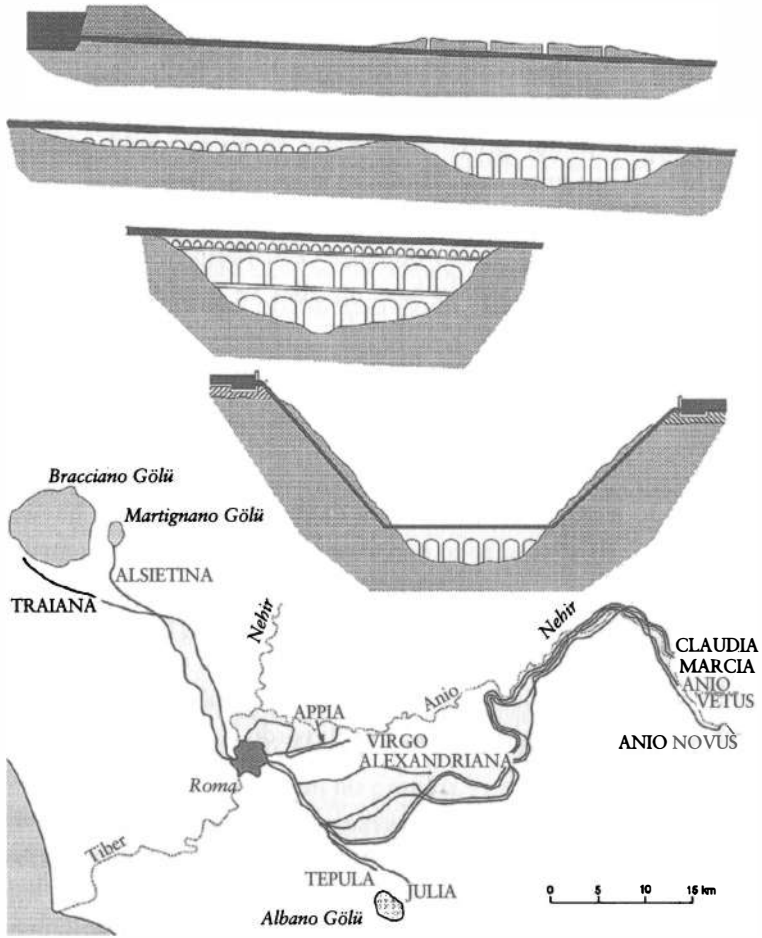
MÖ 312'de Aqua Appia'dan başlayarak su temin sistemi, nihayetinde toplamı 500 km'yi bulan 11 hattan oluşuyordu (Ashby 1935; Hodge 2001). MS birinci yüzyılın sonuna gelindiğinde toplam günlük su arzı günlük 1 Mm³'ün biraz üstündeydi, ortalama kişi başı 1.500 litreydi, yirminci yüzyıl sonu (nüfusu yaklaşık 3,5 milyonu bulan) Roması'nda ise (bütün sanayi kullanımı dâhil) kullanım ortalama kişi başı 500 litreydi (Bono ve Boni 1996). Roma'nın yer altı kanalizasyon kanalı sistemi de bir o kadar etkileyicidir, *cloaca maxima* kemerlerinin çevresi yaklaşık 5 metreyi bulur.

Roma İmparatorluğu'nun her yerinde su kemerleri, birkaç ortak yapısal unsurdan oluşuyordu (Şekil 4.24). Kaynaklar, göller ya da yapay göletlerden başlayan su kanallarının dikdörtgen bir kesiti vardı ve taş parçalar ya da kenarı ince çimento geçilmiş betonla yapılmışlardı. Genellikle eğimleri 1:200'den az olmayan kanallar, mümkün olduğunda tüneller oluşmasın diye eğimleri takip ediyordu. Yer altına inen bir yol kaçınılmaz olduğunda kanala yukarıdan dingillerle erişilebiliyordu. Romalılar sadece kenarından geçilemeyecek kadar uzun ya da basit bentlerin kurulamayacağı kadar derin vadilerde köprülere başvurmuştu. Roma su kemerlerinin sadece 65 km kadarı kemerler üzerinde taşınıyordu (bazen de ortak kemerlerdi bunlar). Gard (50 metreden yüksek), Merida ve Taragona'daki August köprüleri bu sanatın en ince örnekleriydi. Sık sık erozyon tehdidi altında kalan kanallar, tüneller ve köprülerin temizlenmesi ve onarımı süreklilik gösteren bir işti.

Bir vadinin aşılması 50-60 metreden yüksek bir sifon gerektiriyorsa, Romalı mühendisler içe dönük bir sifon kullanmayı tercih ediyordu. Sifonun boruları, vadinin bir kenarında bulunan bir baş tankını, karşı tarafta biraz daha aşağıda bulunan alıcı tankla birleştiriyordu (Hodge 1985; Schram 2014). Vadinin tabanında derenin aşılması, yine de bir köprü yapılmasını gerektiriyordu. Bu yapıların enerji maliyetinin yüksek olması, esasen yüksek basınçlı borular için çok büyük miktarda kurşuna gereksinim olmasından (1,82 MPa –18 atmosfer– kadar isteyebiliyorlardı) ve bir de metalin eritme merkezlerinden genellikle hatırı sayılır derecede uzak mesafelere aktarılmasının maliyetinden kaynaklanır. Örneğin Lyon su tedarik ünitesindeki dokuz sifon için ihtiyaç duyulan toplam kurşun miktarı 15.000 ton kadardı.

METALURJİ

Bütün büyük kültürlerin başlangıcına renkli (demir dışı) malzemelerin kullanımı damga vurmuştur. İlk metalurjistler bakırın yanı sıra kalay (bakırla



Şekil 4.24 Roma su kemerleri aşağıdaki yapıların en az iki ya da üç tanesini birleştirerek nehirler, dereler, göller ya da rezervuarlardan su taşıyordu: Bir temel üzerinden geçen sık dikkdörtgen kanallar, kuyularla erişilebilen tüneller, içinden kemerler geçen toprak setler, tek ya da iki katlı kemerli köprüler, derin vadilerden su çeken ters çevrilmiş kurşun borulu sifonlar. Günde 1 mm^3 su temin eden Roma su kemerleri 500 yılı aşkın bir süre zarfında inşa edilmiş etkileyici bir sistem oluşturuyordu. Bu bilgiler Ashby (1935) ve Smith'ten (1978) alınmıştır. Su kemeri eğimi abartılmıştır.

karıştırılarak bronz yapıyordu), demir, kurşun, cıva ile iki değerli element gümüş ve altını taniyorlardı. Cıva oda sıcaklığında sıvıdır, altının nispeten az olması ve yumuşaklığı sikke basma ve süs eşyaları dışında kullanılmasını engelliyordu. Çok daha bol olmakla birlikte gümüş de kitlesel üretime el vermeyecek kadar azdı. Kurşun ve kalayın yumuşaklığı, alaşım olmayan hal-

lerinin kullanımını büyük ölçüde borular ve yiyecek kaplarıyla sınırlıyordu. Sadece bakır ve demir nispeten boldu, özellikle de alaşım haline getirildiklerinde büyük bir dokunsal güç ve sertliğe sahipti. Bollukları ile özellikleri bir araya geldiğinde kitlesel üretimi yapılacak dayanıklı malzemeler için iki kullanışlı seçenek haline geliyorlardı. Bakır ve bronz kayıtlı tarihin ilk iki binyılına damgasını vurmuştu, demir ve alaşımları (muazzam çeşitlikte çelikler) ise bugün hiç olmadığı kadar baskındı.

Odun kömürü hem demir olmayan cevherlerin hem demir cevherinin eritilmesinde, ayrıca sonrasında ham metaller ve metalik nesnelerin rafine hale getirilip rötuşlanmasında kullanılan yakıttı. Bütün maden çıkarma, parçalama, ağaç kesme ve odun kömürü yapma, ocak kurma ve yükleme, metal dökme, inceltme ve tekrar tekrar dövme işleri yoğun insan emeğiyle yapılıyordu. Sahraaltı Afrika'dan tutun Japonya'ya birçok toplumda metalurji, modern sanayi yöntemlerinin başlangıcına dek sadece el emeğine dayalı olarak kaldı. Avrupa'da, daha sonra da Kuzey Amerika'da hayvanlar ve her şeyden önce su gücü maden parçalama, madenlerden su pompalama ve metal dövme gibi tekrarlanan, yorucu işlerde yoğun olarak kullanılır oldu. Dolayısıyla diyebiliriz ki metalurjik ilerlemede belirleyici olan kilit önemde etkenler odunun erişilebilir olması, daha sonralarıysa su gücü kaynaklarının erişilebilir ve güvenilir olmasıydı, çünkü büyük körükler ve çekiçleri çalıştırmak için bunların enerjisine ihtiyaç duyuluyordu.

Demir Dışı Metaller

Bakır aletler ve silahlar insanın evriminde Taş Çağı ile Demir Çağı arasında köprü oluşturdu. Bakırın tespit edilebildiği kadarıyla MÖ altıncı binyıldan itibaren ilk kullanımlarında, herhangi bir eritme işlemi uygulanmamıştır. Doğal olarak saf halde bulunan bu metalin parçaları basit aletler halinde şekillendirilmiş, tavlama yoluyla, bir ısıtarak bir döverek işlenmiştir (Cradock 1995). Doğal metali kullanmanın ilk kanıtları (Güneydoğu Türkiye'de malahit boncuklar ve bakır biçiminde) MÖ 7250 gibi erken bir tarihe uzanır (Scott 2002). Metalin eritilmesi ve dövülmesi MÖ dördüncü binyılın ortasından itibaren zengin ve nispeten erişilebilir oksit ve karbon cevherlerine sahip birkaç bölgede yaygın hale gelmiştir (Forbes 1972). İlk Mezopotamya toplumları (MÖ 4000 öncesi), hanedan öncesi Mısır (MÖ 3200 öncesi), İndüs Vadisi'nde Mohenjodaro kültürü (MÖ 2500) ve antik Çin toplumların-

dan (MÖ 1500 sonrası) çok sayıda bakır nesne (yüzükler, keskiler, baltalar, bıçaklar ve mızraklar) geride kalmıştır.

Antik dönemde bakır madenciliği merkezleri arasında en başta Mısır'ın Sina yarımadası, Kuzey Afrika, Kıbrıs, bugünkü Suriye, İran ve Afganistan, Kafkasya bölgesi ve Orta Asya yer alıyordu. İtalya, Portekiz ve İspanya daha sonra üretim merkezleri haline geldi. Bu metalin erime noktasının (1083 derece) nispeten yüksek olması nedeniyle saf bakır üretimi epey enerji yoğun bir süreçti. Cevher indirgemesi odun ya da odun kömürüyle, önce kil kaplı çukurlarda, sonraları basit, doğal olarak hava akımı alan alçak bacalı kil ocaklarda gerçekleşmişti. Körük kullanımına ilişkin ilk açık kanıt MÖ on altıncı yüzyıl Mısır'ından gelir; ama körüklerin kullanımının bundan daha eskiye uzandığı neredeyse kesindir. Saf olmayan metaller küçük potalarda ısıtılarak rafine hale getiriliyordu, bundan sonra metal taş, kil ya da kum kalıplara dökülüyordu. Dökümden çıkan parçalar çekiçle dövülerek, sürtülerek, parçalanarak ya da cilalanarak yararlı nesnelere ya da süs eşyalarına dönüştürülüyordu.

Bol miktarda bulunan sülfürlü cevherden metal üretmek için çok daha yüksek teknik becerilere gerek vardı (Forbes 1972). Metallerin özelliklerini değiştiren sülfürü ve saflığı bozan diğer maddeleri (antimon, arsenik, demir, kurşun, kalay ve çinko) ortadan kaldırmak için cevherlerin öncelikle istifler halinde ya da ocaklarda parçalanması ve pişirilmesi gerekiyordu. Binlerce yıl boyunca cevherler elle çekiçleyerek parçalandı, bu Asya ve Afrika'da yirminci yüzyıl ortalarına dek yaygın bir pratikti. Avrupa'da su değirmenleri ve bocurgatlara bağlanan atlar yavaş yavaş bu işi üstlenmeye başladılar. Parçalanmış cevherlerin peletlenmesi nispeten az yakıt gerektiriyordu. Peletlenen cevherler alçak bacalı ocaklarda eritildikten sonra, (sadece yüzde 65-75'i bakır olan) ham metal eritiliyor, sonra yeniden eritmeyle neredeyse saf bakır (yüzde 95-97) üretiliyordu. Bakır daha sonra oksitlenmeyle, cüruflaşmayla ve buharlaşmayla daha rafine hale getirilebiliyordu. Bu işlem dizisi yüksek yakıt ihtiyacını artırıyordu.

Antik dönemdeki ergitme işlemlerinin yıllık ve birikimsel yakıt taleplerinin hesaplanması, doğal olarak kesinlikten yoksun, toplam cüruf kütle tahminlerinden, çıkarmanın uzunluğu ve ergitmenin enerji yoğunluğuyla ilgili varsayımlardan etkilenen bir işlemdir. Bütün bu belirsizlikler, antik dünyanın en büyük ergitme merkezinde, Güneybatı İspanya'da, Sevilla'nın 100 km batısında bulunan Rio Tinto'da mükemmel bir biçimde resmedilir (Kutu 4.20). Her halükârda Roma'da ergitme işlemlerinin büyüklüğü 1.500

Kutu 4.20

Romalıların Rio Tinto'da bakır ve gümüş eritmek için ihtiyaç duydukları yakacak odun miktarı

Rio Tinto'daki muazzam cüruf yığınlarının haritası ilk çıkarıldığında, kurşun ve gümüş madencilikinden 15,3 Mt, bakır madencilikinden 1 Mt cüruf kaldığı tahmin edilmişti; bu tahminler Salkield'i (1970) Romalıların her yıl maden eritme işinde yakıt olarak kullanılmak üzere 600.000 olgun ağacı kesmek zorunda olduğu sonucuna götürmüştür, İspanya'nın güneyi için imkânsız bir toplamdır bu. Kapsamlı sondajlara dayalı yeni bir haritalandırma sonrasında toplam cüruf miktarının yaklaşık 6 Mt olduğu tahmin edilmişti, Roma devrinin başlıca ürünü bakır olsa da Roma öncesi dönemde bol miktarda gümüş eritiliyordu (Rothenberg ve Palomero 1986). Cüruf-odun kömürü oranının 1'e 1, odun-odun kömürü oranının 5'e 1 olduğu varsayılırsa 6 Mt cüruf üretmek için 30 Mt oduna ihtiyaç olurdu, yani 400 yıllık geniş çaplı faaliyet boyunca yılda 75.000 ton odun gerekirdi.

Bu yakıtın doğal ormanın kesilmesiyle elde edilmesi (en fazla 100 t / ha ayrılması) yılda 750 hektar ormanın kesilmesini gerektirirdi, bu da yarıçapı 1,5 km olan bir daireydi. Bu büyük, ama gerçekleştirilebilir ve büyük bir ormansızlaşmaya yol açan bir iş olurdu. Aynı şekilde Kıbrıs'ta yüzyıllarca bakır eritilmesi (yaklaşık olarak MÖ 2600'den itibaren) ardında 4 Mt cüruf bırakmıştı. Açık ki antik devirde maden eritme, Transkafkasya ve Afganistan'ın yanı sıra Akdeniz bölgesinde de ormansızlaşmanın başlıca nedenlerinden biriydi, yöresel odun kıtlığı nihayetinde maden eritmenin çapını sınırlamıştı.

yıl daha aşılamadı. Geç Ortaçağ'daki metalurji uzmanlığına ilişkin özetler (Agricola 1912 [1556]; Biringuccio 1959 [1540]) bakır ergitmeyi Rio Tinto'daki pratiklerden pek de farklı olmayan biçimlerde betimler.

Bakır ergitmenin başlangıcından beri metalin bir kısmı bronzla katılmıştır; bronz ilk kullanışlı alaşımdır, Christian Thomson insanın evrimini artık klasikleşmiş bir biçimde Taş, Bronz ve Demir Çağı olarak bölümlere ayırmıştır (Thomsen 1836). Bu son derece genelleşmiş bir bölümlemedir. Bazı toplumlar, en başta MÖ 2000 öncesi Mısır'ı bir saf Bakır Çağı yaşamıştır; başta Sahraaltı Afrika olmak üzere bazı toplumlarsa Taş Çağı'ndan doğrudan Demir Çağı'na geçmişti. İlk bronzlar kalay içeren bakır cevherlerinin geri alınamaz bir biçimde ergitilmesiyle ortaya çıkmıştı. Bronz daha sonraları iki cevherin birlikte ergitilmesiyle, ancak MÖ 1500 sonrasında iki metalin birlikte eritilmesiyle üretilmişti. Ergime derecesi sadece 231,97 santigrat derece olan kalay, parçalanmış oksitli cevherlerin nispeten daha az odun kömürüyle ısıtılmasıyla üretiliyordu. Dolayısıyla bronzun toplam enerji maliyeti saf bakırınkinden daha düşüktü, ama daha üstün özelliklere sahip bir alaşımdı.

Kalay oranı yüzde 5 ile yüzde 30 arasında değiştiğinden (buna bağlı olarak ergime noktaları da 750 derece ile 900 derece arasında olduğundan)

Kutu 4.21
Sık bulunan metaller ve alaşımların çekme mukavemeti ve sertliği

Metal ya da alaşım	Çekme mukavemeti (MPa)	Sertlik (Brinell ölçeği)
Bakır		
Tavlanmış	220	40
Soğuk çekilmiş	300	90
Bronz (90% bakır, 10% kalay)	840	240
Pirinç (70% bakır, 30% çinko)	520	150
Dökme demir	130-310	190-270
Çelik	650->2.000	280->500

Kaynak: Oberg ve çalışma arkadaşları (2012).

tipik bir bronzdan bahsetmek imkânsızdır. Tüfeklerin dökülmesi için tercih edilen yüzde 90 bakır, yüzde 10 kalaydan oluşan alaşım en iyi soğuk bakır-dan 2,7 kat daha yüksek bir çekme mukavemeti ve sertliğine sahiptir (Oberg vd. 2012; **Kutu 4.21**). Dolayısıyla bronzun bulanabilir olması, ilk iyi metal baltalar, keskiler, bıçaklar ve donanımları, ayrıca hem kesici hem dürtücü tipte ilk güvenilir kılıçları ortaya çıkarmıştır. Bronz çanların genellikle yüzde 25'i kalaydır.

Pirinç tarihsel olarak önemli bir diğer bakır alaşımıdır, bakırın (toplam alaşımdaki oranı yüzde 50 ile yüzde 85 arasındadır) çinko ile karıştırılmasıyla elde edilir. Bronzda olduğu gibi pirincin üretimi de saf bakırın ergitilmesinden daha az enerji gerektirir (çinkonun ergime noktası sadece 419 derecedir). Çinko içeriğinin daha yüksek olması alaşımın çekme mukavemeti ve sertliğini iyileştirir. Tipik bir pirinç alaşımının çekme mukavemeti ve sertliği soğuk çekim bakırından 1,7 kat daha yüksektir, ama karışımın şekillendirilebilirliği ve sürtünme direncinde hiçbir azalma yoktur. Pirincin ilk kullanımlarının tarihi MÖ birinci yüzyıla uzanır. Bu alaşım Avrupa'da ancak on birinci yüzyılda yaygın olarak kullanılabilir hale gelmiş, ancak 1500 sonrasında yaygınlaşmıştır.

Demir ve Çelik

Bakır ve bronzun yerini demirin alması yavaş yavaş olmuştur. Mezopotamya'da MÖ üçüncü binyılın birinci yarısında küçük demir nesneler üretiliyordu, ama süsler ve tören silahları ancak MÖ 1900 sonrasında yaygınlık kazandı. Demirin yoğun kullanımı ancak MÖ 1400 sonrasında gerçekleşmiştir ve bu metal ancak MÖ 100 sonrasında gerçekten bol bulunur olmuştur. Mısır'da Demir Çağı MÖ yedinci yüzyılda başlar, Çin'de MÖ altıncı yüzyılda. Afrika'da da demir yapımı antik devirlere uzanır, ama bu metal Yeni Dünya toplumlarının hiçbirinde ergitilmemiştir. Demir ergitme zorunlu olarak geniş ölçekli odun kömürü üretimiyle bağlantılıydı. Demir 1.535 derecede egrir, hiçbir destek olmaksızın odun kömürü ateşi 900 dereceye ulaşabilir, ama güçlü bir hava tedariki bu ısıyı 2.000 dereceye yaklaştırır. Dolayısıyla Çin dışında (ki orada da Han hanedanlığından itibaren kömür kullanılmıştır) bütün geleneksel toplumlarda demir cevheri ergitme işinde yakıt olarak odun kömürü kullanılmıştır, ama odun kömürü üretiminin verimliliği ve odun kömürünün metalurjik kullanımı yavaş yavaş iyileşmiştir.

Demir yapımının gelişimi sıg, genellikle kil ya da taş kaplı çukurlarda yakılan ateşlerle başladı, bu ateşlerde parçalanmış demir odun kömürüyle birlikte eritiliyordu. Bu ilkel ocaklar doğal hava akımının en üst seviyede olması için genellikle tepelere kurulurdu. Daha sonraları ocağa hava basmak için birkaç dar kil tüp kullanıldı, önce elle çalıştırılan küçük deri körüklerden, sonraları da bir pedalla ya da sallanan çubukla çalışan büyük körüklerden hava basıldı; daha sonraları Avrupa'nın tamamında körükler su tekerleriyle çalıştırıldı. Ergitme işinin kapalı ortamda gerçekleşmesi için basit kil duvarlar dikildi; bunların yüksekliği birkaç desimetreden başlıyor, bir metreden biraz uzun olabiliyordu, ama Eski Dünya'nın bazı yerlerinde (Orta Afrika dâhil) bu duvarların yüksekliği nihayetinde 2 metreyi aşmıştır (van Noten ve Raymaekers 1988).

Arkeologlar İber Yarımadası'ndan Kore'ye, Kuzey Avrupa'dan Orta Afrika'ya Eski Dünya'nın her yerinde bu geçici yapıların binlercesini gün ışığına çıkarmışlardır (Haaland ve Shinnie 1985; Olsson 2007; Juleff 2009; Park ve Rehren 2011; Sasada ve Chunag 2014). Odun kömürünün yakıldığı bu küçük ocakların içindeki ısı 1.100-1.200 dereceyi geçmiyordu, demir oksiti ayırmaya yeterdi, ama demirin ergime noktasının epey altındaydı (saf demir 1.535 derecede sıvılaşır); ocakların nihai ürünü ham demirdi (Ortaçağ'da bu ham demirin kütlesi genellikle sadece 5-15 kg olurdu, sonraları

30-50 kg olmuş, hatta 100 kg'yi aşmıştır). Süngersi bir demir kütlesiydi bu, metal olmayan maddelerle dolu, demir bakımından zengin bir cürufu (Bayley, Dungworth ve Paynter 2001).

Bu ham demir yüzde 0,3-0,6 düzeyinde karbon içeriyordu ve yüzde 0,1'den az karbon içeren, sert, şekillendirilebilir dövme demir külçesi elde etmek için tekrar tekrar ısıtılıp dövülmesi gerekiyordu. Dövme demir çividen tutun baltaya varıncaya dek nesne ve alet yapımında kullanılıyordu. Avrupa'nın ham demir talebi, demirden zincir zırhın benimsenmesi, elde taşınan silahlar ve miğferlerin yanı sıra oraktan çapaya, kasnaktan at nalına gündelik aletlerin üretiminin artmasıyla birlikte on birinci yüzyılda yükselmeye başladı. Katedrallerin yapımında da metal şeritler kullanılıyordu, Avignon'da bulunan, inşaatına 1252'de başlanan yeni Papalık Sarayı Palais des Papes'ın yapımında 12 ton inşaat metaline ihtiyaç duyulmuştu (Caron 2013).

Han hanedanlığı döneminde Çinliler (MÖ 207-MS 220) sıvı demir üreten ilk zanaatkarlar oldu. Çinlilerin dayanıklı kilden yaptıkları, genellikle asma dalları ya da ağır kerestelerle güçlendirdikleri ocaklarının yüksekliği nihayetinde 5 metreyi bulmuştu. Bu ocaklarda yaklaşık 1 ton demir cevheri hallediliyor, günde iki dökümle dökme demir üretiliyordu. Demirin ergime noktasını alçaltan yüksek fosfor içeriği ve güçlü bir biçimde hava basılmasını sağlayan çift etkili körüklerin icat edilmesi, bu erken başarının kilit bileşenleri olmuştu (Needham 1964). Daha sonraları, kömür cevher içeren tüp benzeri potalar etrafına istiflenmeye, daha büyük körükler su tekerleriyle çalıştırılmaya başlandı. Şekil değiştirebilir kalıplara döküm yapma işlemi Han hanedanı son bulmadan önce, genellikle kitlesel olarak demir aletler, ince kenarlı tencere ve tavalar, heykeller üretmek için kullanılır oldu (Hua 1983). Bunların ardından birkaç küçük ciddi iyileşme oldu, ama Çin'deki küçük maden eritme ocakları, bugünkü devasa yapıların atası sayılmaz.

Bugünkü devasa yapılar Avrupa'daki dikeç fırınların, basit Katalan demirci ocağından İskandinav'daki taş çeperli *osmund**** ocaklarına, Styria'daki *Stuckofen*'lara varıncaya dek geçirdiği yavaş evrimle ortaya çıkmıştır. Daha yüksek istifler, daha iyi şekiller yakıt tüketimini azaltmıştır. Daha yüksek ısılar ve cevher ile yakıt arasında daha uzun süre temas olması sıvı demir üretiliyordu. Avrupa'daki dikeç ocaklar büyük ihtimalle 1400'ün hemen öncesinde aşağı Rhine vadisinde ortaya çıkmıştır. Dikeç ocaklarda dökme demir, doğrudan dövülemeyecek ya da silindire ezilemeyecek, yüzde

(***) İsveç'te imal edilen, üstün özelliklere sahip demir -ç.n.

1,5-5'i karbon olan bir alaşım üretiliyordu. Bu demirin çekme mukavemeti, bakırinkinden yüksek değildi (ve yüzde 55 daha zayıf olabiliyordu), ama ondan iki-üç kat daha sertti (Oberge vd. 2012; Kutu 4.22).

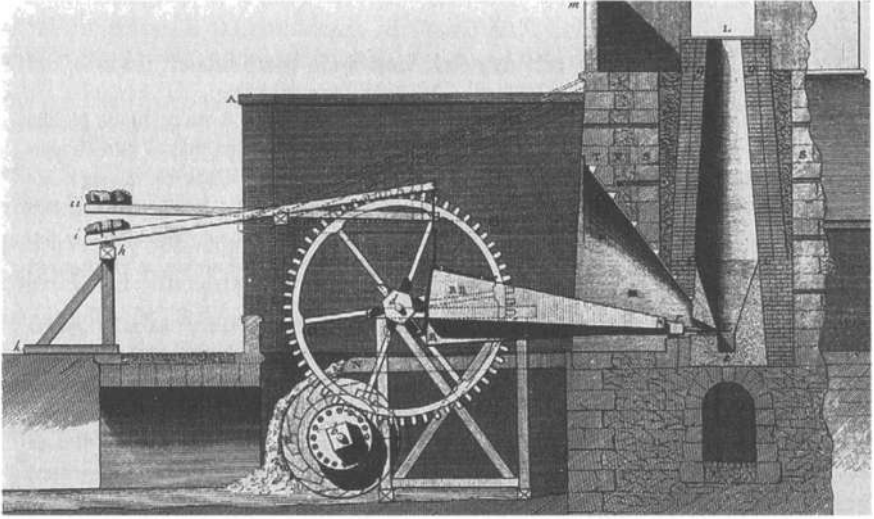
Dikeç ocakların sayısı on altıncı ve on yedinci yüzyılda hızla arttı. Bu tarihlerdeki en dikkat çekici iyileşme herhalde daha büyük deri körüklerin kullanılmaya başlamasıydı. Bu körüklerin tepeleri ve alt kısımları ahşaptan yapılmıştı, yan kısımları ise boğa postuydu. 1620 sonrasında su tekerinin dingiline yerleştirilmiş dirsekli makaralarla münavebeli olarak çalıştırılan çiftte körükler çıktı, ayrıca baca yavaş yavaş uzamaya başladı. Her iki eğilim de su tekerlerinin azami gücünün ve odun kömürünün fiziksel özelliklerinin dayattığı sınırlamalarla karşı karşıya kaldı. 1750'ye gelindiğinde en büyük su tekerleri 7 kW yararlı enerji veriyordu. Ama yazları demir ergitme işleri sırasında genellikle azami enerji üretimini sağlayacak kadar su olmuyordu. Odun kömürünün başlıca dezavantajı kolayca ufalanmasıdır: Odun kömürü ağır yükler altında parçalanır, odun kömürü kullanılması yüklenen cevher ve kireçtaşı kitlesini sınırlıyor, bu nedenle dikeç ocakların baca yüksekliklerinin 8 metreden az olması gerekiyordu (Smil 2016; Şekil 4.25). 1800 öncesinde her iki sınır da ortadan kalktı, birincisini Watt'ın buhar makinesi, ikincisini kok kömürü kullanımı ortadan kaldırdı.

Ortaçağ'daki ham demir ocaklarında yüklenen cevherin kütlesinden 3,6-8,8 kat daha fazla yakıtı ihtiyaç oluyordu (Johannsen 1953). Yaklaşık yüzde 60 demir içeren cevherler söz konusu olduğunda bile, ham demirin sıcak metalin her kilogramı için en az 8, en fazla 20 kg odun kömürüne ih-

Kutu 4.22

On sekizinci yüzyılda İngiltere'de bir maden eritme ocağının yakıt ihtiyacı

On sekizinci yüzyıl başında İngiltere'deki maden eritme ocakları sadece ekim ile mayıs arasında çalışırdı, bu süre zarfında da ortalama üretimleri sadece 300 ton pik demirdi (Hyde 1977). Bir kilo demir başına 8 kg kadar odun kömürü ya da bir kilo odun kömürü için 5 kg odun gibi düşük varsayımlar, tek bir ocakta yıllık 12.000 ton odun gerektiği anlamına gelir. 1700 sonrasında bütün erişilebilir doğal ormanlar gitmişti, odun çalı tarzi sert ağaçlardan 10 ilâ 20 yıllık döngülerle kesilebiliyordu; bu ağaçların kesilebilir yıllık toplamı 5 ile 10 t/ha arasında oluyordu. 7,5 t/ha'lık orta düzeyde bir verimlilik, daimi işleyiş için yaklaşık 1.600 hektar çalı benzeri sert ağaç gerektiriyordu. Karşılaştırmak açısından belirtelim, Dean Ormanı'nda bulunan, on yedinci yüzyıla ait çok daha az verimli büyük maden eritme ocağına 5.300 hektar çalı benzeri ağaç gerekiyordu, daha küçük olan Wealden demir ocağı ise her ocak-örs bileşkesi için yaklaşık 2.000 hektar orman gerektiriyordu (Crossley 1990).



Şekil 4.25 On sekizinci yüzyıl ortasına özgü, odun kömürü yakılan yüksek ocak; körükler suyu yukarıdan akan bir su çarkıyla çalıştırılıyordu. *Encyclopédie*'den yeniden basım. (Diderot ve d'Alembert 1769-1772).

tiyacı olacaktı. On sekizinci yüzyıl sonuna gelindiğinde tipik odun kömürü/metal oranları 8:1 civarındaydı; 1900'e gelindiğinde 1,2 civarına gerilediler ve İsveç odun kömürü ocaklarında 0,77'ye indiler (Campbell 1907; Greenwood 1907). On dokuzuncu yüzyıl sonuna ait, odun kömürünün kullanıldığı iyi bir ocak, Ortaçağ'daki benzerinin kullandığı enerjinin sadece onda biri kadarını gereksiniyordu. 1800 öncesinde odun kömürünün yakıt olarak kullanıldığı eritme faaliyetinin yüksek enerji ihtiyacı kaçınılmaz olarak, ocakların civarında geniş ormanlık arazilerin ortadan kaybolmasına neden olmuştu. İngiltere'de on sekizinci yüzyıla ait tipik bir ocakta, sürdürülebilir bir tedarik için yaklaşık 1.600 hektar ağaca ihtiyaç vardı (Kutu 4.22).

Sanayinin kok kömürüyle demir ergitmeyi benimsemesi öncesinde, 1700'lerin başında İngiltere'de odun kömürüne dayalı demir üretimi için ülke çapındaki toplam odun ihtiyacı hakkında gayet doğru tahminlerde bulunulabilir: Sürdürülebilir bir tedarik 1.100 km² koruluk ya da ormandan ağaç kesilmesini gerektiriyordu (Kutu 4.22). Bundan bir yüzyıl sonra ABD kendi demir cevheri eritme faaliyetlerinin enerjisini zengin doğal ormanlarındaki ağaçlardan yapılmış odun kömürüyle temin etmekte hiç sorun yaşamadı, ama yirminci yüzyıl başında bu imkânsız bir hal alacak ve ancak kok

Kutu 4.23

Britanya ve Amerika'da demir üretiminde enerji ihtiyacı

1720'de, Britanya'da bulunan 60 ocak yaklaşık 17.000 ton pik demir üretiyor, bu da bir kilo metal başına 40 kg odun hesabıyla yaklaşık 680.000 ton odun tüketilmesini gerektiriyordu. Metalin dövülmesiyle 12.000 ton külçe elde ediliyordu, bir kilo külçe için 2,5 kg odun kömürü hesabıyla 150.000 ton daha odun kömürüne ihtiyaç olurdu, bu da yılda toplam 830.000 odunun odun kömürü haline getirildiği anlamına gelir. Ortalama verimliliğin 7,5 t/ha olduğu düşünülürse bu da kesimin sürdürülebilmesi için 1.100 km² orman ve çalı benzeri ağaç gerektirir.

ABD için bulunabilen en erken pik demir toplamı 1810 yılına aittir, o yıl yaklaşık 49.000 ton metal için (bir kg sıcak metal için 5 kg odun kömürü ya da en azından 20 kg odun harcadığı varsayılırsa) yaklaşık 1 Mt odun gerekmiştir. O tarihlerde bu odunun tamamı doğal olarak yetişmiş, eskiden beri var olan sert ağaçlı ormanların, hektar başına yaklaşık 250 ton odun veren zengin ekosistemlerin kesilmesini gerektiriyordu (Brown, Schroeder ve Birdsey 1997); yerin üstündeki fitokütlenin tamamı odun kömürü yapımında kullanılmış olsaydı, her yıl bu üretim seviyesini korumak için yaklaşık 4.000 hektarlık bir alanın (bir kenarı 6,3 km olan bir kare) temizlenmesi gerekirdi. ABD'nin zengin ormanları çok daha yüksek bir oranı destekleyebiliyordu, 1840'ta ABD'de üretilen demirin tamamı odun kömürü kullanarak eritiliyordu, ama bunun sonrasında hızla geçilen kok kömürü, 1880'e gelindiğinde demir üretiminin neredeyse yüzde 90'ının enerjisini sağlıyordu; bunun sonrasında demir üretimindeki artışların odun kömürüne dayandırılması mümkün olmadı: 1910'da (25 Mt'lik bir demir üretimiyle, bir kilogram sıcak metal için gerekli miktar 1,2 kg odun kömürü ve 5 kg odun gibi çok daha düşük seviyeye inmiş olsa da ülkenin her yıl 125 Mt oduna ihtiyacı oluyordu.

kömürü kullanılması ülkenin dünyanın en büyük pik demir üreticisi haline gelmesini mümkün kılacaktı (**Kutu 4.23**).

İkincil ormanlarda hektar başına 7 ton gibi yüksek bir ortalama toplam varsayılrsa bile bu odun arzının sürdürülebilir olması her yıl yaklaşık 180.000 km² ormanın kesilmesini gerektirirdi, bu da Missouri'ye yakın bir alandı; ya da bir kenarı Philadelphia'dan Boston'a ya da Paris'ten Frankfurt'a uzanan bir kareyle temsil edilen bir alandı. Açıktır ki zengin ormanlara sahip Amerika bile demir cevheri eritme işinin enerjisini odun kömüründen elde etme yükünü kaldıramıyordu.

Odun çağında, geleneksel demir imalathaneleriyle çevrili toplulukların kendilerini ümitsiz bir durumda bulması hiç şaşırtıcı değildir. Sussex'in sıkıntı içindeki sakinleri 1548'den beri, ocaklar çalışmaya devam ederse kaç kasabanın çürüyüp gideceğini merak ediyordu: Ev, su değirmeni, teker, varil, mendirek ve daha yüzlerce gereksinimlerini karşılamak için odunları olmayacaktı; kraldan birçok demir imalathanesinin kapatılmasını istediler (Straker 1969; ayrıca bkz. Smil 2016). Dolayısıyla diyebiliriz ki geleneksel demir eritmede

enerjinin rolünün sınırlı olduğu su götürmezdi. Tek bir ocak her yıl yarıçapı 4 km olan bir orman çemberini ortadan kaldırırken, onlarca yılda çok sayıda ocağın nasıl bir birikimsel etki yarattığını takdir etmek zor değildir.

Bu etki, zorunlu olarak ormanlık dağlık bölgelerde yoğunlaşmıştı. Buralarda hayvanların çalıştırıldığı odun kömürü nakliyesinin yarıçapı asgari seviyede tutulabiliyordu (bu yakıtın kırılğanlığının daha da ağırlaştırdığı bir kısıtlamaydı bu), ocağın enerjisi sağlama ve körükleri çalıştırma ihtiyacı su çarkları kurarak gideriliyordu. Madene yakın olmak da önemliydi, ama cevher yükü odun kömürü ağırlığının bir bölümüne eşit olduğundan taşınması kolaydı. Çiviler, baltalar ve at nalları, ayrıca zincirli zırhlar, süngüler, tüfekler ve toplar yapmak için, çevre açısından ödenmesi gereken kaçınılmaz bedel ormanların yok olmasıydı. Demir imalatının ilk yayılması ve ülke içinde odun kaynaklarının sınırlı olması, Britanya’da on yedinci yüzyılda bariz bir enerji krizine yol açtı. Ülkenin gelişmekte olan gemi inşa sanayiinin büyük kereste talebi bu durumu daha da ağırlaştırdı.

Demir, sanayi öncesi birçok toplumda nispeten bol bulunsa da çelik ancak özel kullanımlar için mevcuttu. Dökme demir gibi çelik de bir alaşımdı, ama sadece yüzde 0,15 ile 1,5 arasında karbon içeren bir alaşımdı, genellikle az miktarda başka metaller de (en başta da nikel, mangan ve krom) içerirdi. Bu çelik, dökme demirden ya da bakır alaşımlarından üstündü: En iyi aletlerin çelikleri bakırdan ya da demirden bir kerte daha büyük bir çekme mukavemetine sahipti (Oberger vd. 2012; Kutu 4.21). Bazı basit antik eritme teknikleri, doğrudan nispeten yüksek kalite çelik üretebiliyordu, ama ancak küçük miktarlarda. Doğu Afrikalı geleneksel çelik üreticileri alçak (2 metreden kısa), dairesel, koni şekilli, odun kömürü yakılan, otları yakılmış bir çukur üzerine yapılmış, cüruf ve çamur ocakları kullanırdı. Seramik borulara bağlı keçi derisinden körükler kullanan sekiz kişi ocağı 1.800 derecenin üstünde ısıtabiliyordu (Schmidt ve Avery 1978). Besbelli ki Hristiyanlık Çağı’nın ilk yüzyıllarından beri bilinen bu yöntem, az miktarda iyi kalite orta karbonlu çeliği doğrudan üretmeyi mümkün kılıyordu.

Ama sanayi öncesi toplumlar, çeliğe doğru giden etkili iki antik yoldan birini izliyordu genellikle: ya dövme demiri karbonla karıştırıyor ya da dökme demirden karbonu çıkarıyorlardı. Daha eski bir teknik olan birincisi, metalin odun kömüründe uzun süre ısıtılmasını gerektiriyor, karbonun yavaş yavaş metalin içine dağılmasıyla sonuçlanıyordu. Daha fazla dövme olmaksızın bu yöntem, daha yumuşak bir demir çekirdeğinin üstünde sert bir çelik katmanı yaratıyordu. Bu, saban demiri için mükemmel bir mal-

zemeydi ya da vücuda giyilen zırhlar için. Metalin tekrar tekrar dövülmesi emilen karbonu gayet eşit bir biçimde dağıtıyor, mükemmel kılıç temrenleri yaratıyordu. Karbonun çıkarılması, karbonun oksijenleme yoluyla dökme demirden alınması Çin'de Han hanedanlığı döneminde uygulanıyor, asma köprülerin zincirleri gibi kesinlik isteyen uygulamalara metal üretiminde kullanılıyordu.

Demir ve çeliğin bulunabilir hale gelmesi, derinden yaşanan birkaç toplumsal değişikliğe yol açtı. Demir testereler, baltalar, çekiçler ve çiviler ev inşaatlarını hızlandırdı ve evlerin kalitesini iyileştirdi. Demir kap kakak, çeşitli mutfak eşyaları ve halkalardan tutun fırın taraklarına, ızgaralardan rendelere kadar başka nesneler yemek pişirmeyi, bir evi çekip çevirmeyi kolaylaştırıyordu. Demir at nalları ve saban demirleri, ekme-biçmenin yoğunlaşmasının ilerletilmesinde araçsal bir rol oynadı. Yıkıcı yönden bakıldığında, savaşlarda ilk devrim esnek zincir zırhlar, miğferler, ağır kılıçlar, sonraları tüfekler, demir toplar ve daha güvenilir ateşli silahlar oldu. Bu eğilimler kok kömürüne dayalı demir eritme ve buhar makinesinin ortaya çıkmasıyla birlikte büyük bir hız kazandı.

SAVAŞLAR

Silahlı çatışmaların tarihte hemen her zaman şekillendirici bir etkisi olmuştur: Çatışmalar enerji kaynaklarının (ister basit silahlarla donanmış piyade kitlelerine komuta ederek ister son derece yıkıcı patlayıcılar ve makineler imal edip uzun süreli savaşların mühimmatını hazır ederek, sıklıkla olağanüstü ölçekte) seferber edilmesini gerektirir ve silahlı çatışmalar tekrar tekrar yıkıcı gücün en yoğun ve en yıkıcı bir biçimde ortaya salınmasıyla sonuçlanmıştır. Ayrıca silahlı çatışmalara maruz kalan nüfusların gerek gıda gerek yakıt biçiminde temel enerji kaynakları, sadece çatışma süresince değil (harekete geçen ordulara yiyecek alınması, ekinlerin mahvolması, genç erkeklerin seferber edilmesi nedeniyle normal ekonomik faaliyetlerin kesintiye uğraması, yerleşimler ve altyapının gördüğü hasar nedeniyle) bitmelerinden yıllar sonra da etkilerini sürdürür.

Bütün tarihsel çatışmalarda silah kullanılarak mücadele edilmiştir, ama silahlar savaşın başlıca itici gücü değildir: Barutun icadına kadar savaşların yegâne itici güçleri insan ve hayvan kasları olmuştur, ama bunun iki istisnası vardır. Birinci istisna yanıcı maddelerin kullanılmasıdır, ikincisi ise tabii ki donanma manevralarını hızlandırmak ve kolaylaştırmak üzere

rüzgâr gücüne dayanan yelkenler kullanmaktır. Geleneksel mekanik silahlar –elde tutulanlar (hançerler, kılıçlar, süngüler) ve fırlatılanlar (mızraklar, oklar, katapult ve trebüşelerin fırlattığı ağırlıklar)– kinetik enerjinin aniden serbest bırakılması sayesinde fiziksel hasarı en üst seviyeye çıkarmak için tasarlanmıştır. Ancak ve ancak barutun icat edilmesi yeni ve çok daha güçlü bir asli iticinin sahneye çıkmasını sağlamıştır. Kimyasalların patlayıcı bir tepkimeye girmesi, fırlatılan silahları daha hızlı, daha uzaklara gönderebiliyor, yıkıcı etkilerini artırabiliyordu. Bu etki yüzyıllar boyunca kişisel silahların hantal tasarımlarıyla (önden ve kuyruktan yüklenen silahlar) sınırlı oldu, ama barut top mermilerinin itici gücünü sağladığı için daha büyük bir önem kazandı.

Hayvansal Enerjiler

Tarih öncesinde karadaki bütün çatışmalar, antik dönemde ve erken Ortaçağ'da bütün çatışmalar sadece insan ve hayvan kaslarının gücüyle gerçekleştirilmiştir. Savaşçılar yakın savaşta piyade olarak ya da at sırtında hançerler, baltalar ya da kılıçlar taşıyordu. Mızraklar ve süngüler kullanıyor, 100-200 metre ötedeki korumasız düşmanları yaralayıp öldürebilecek oklar atmak için yaylarını ve arbaletlerini çekiyorlardı (hem Yunanlar hem Çinliler MÖ dördüncü yüzyıldan beri bunları kullanıyordu). Mısır hiyeroglif yazısında askerin, sol dizinin üstüne yere çökmüş, sağ koluyla bir yayı geren, sağ omzunda bir ok torbası olan bir adamla ifade edilmesi oklu savaşın antik dönemde var olduğuna kanıttır (Budge 1920). Hayvanların enerjileri de büyük mancınıkların vinçlerini çeviriyor, kent duvarlarını ve kale tahkimlerini yıkmak için trebüşelerle kütleçekimden yararlanarak büyük ağırlıklar fırlatıyordu.

Elde taşınan silahlar ağır yaralanmalara neden olabiliyordu, iyi nişan alınmış kesikler ya da dürtmeler rakibi anında öldürebiliyordu, ama bunun için savaşan kuvvetlerin iç içe geçmesi gerekiyordu ve bu silahların güçleri besbelli ki savaşçının kaslarının yetisiyle sınırlıydı. Yaylar ve oklar savaşan kuvvetlerin birbirlerinden ayrılmasını mümkün kılıyordu, usta okçular nispeten uzun mesafelerde takdire şayan bir keskin nişancılık sergiliyordu, ama okçuların savaşlarında hatalı hedef tutturma ve hafif okların nispeten düşük bir kinetik enerjiye sahip olması (Kutu 4.24) nedeniyle çok fazla ok heba oluyordu, ayrıca peş peşe fırlatmalar arasında okları yerleştirmekle geçen süre bu silahların verebileceği yaraların büyüklüğünü ve sıklığını sınırlıyor-

Kutu 4.24

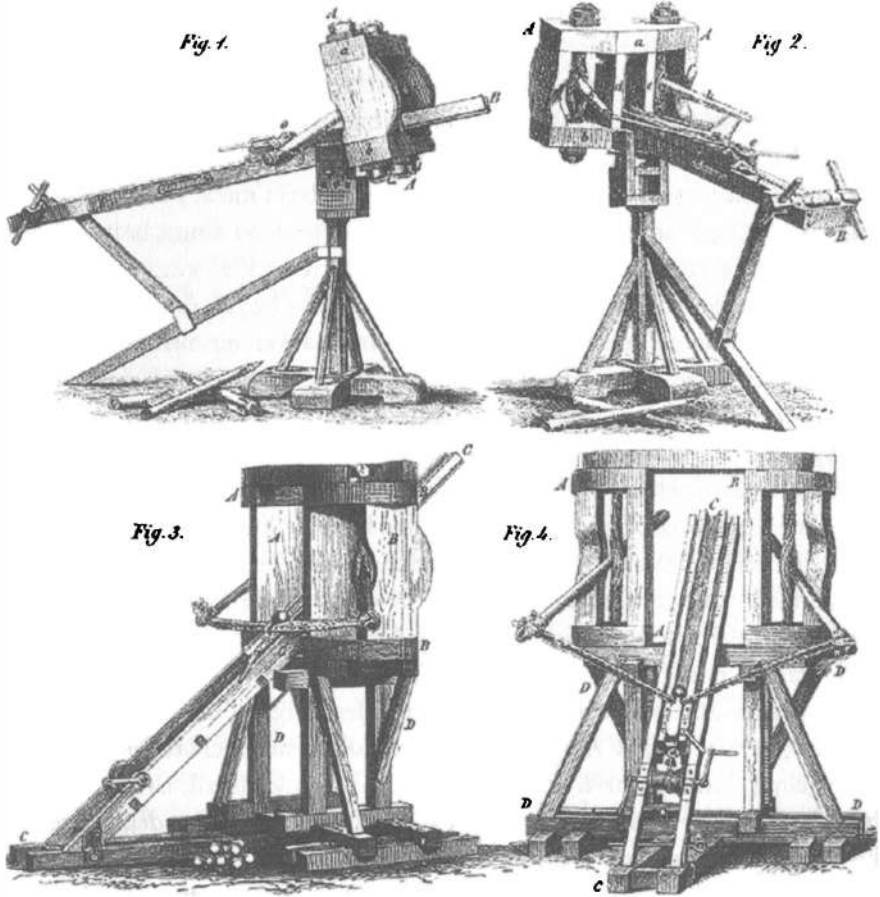
Kılıçlar ve okların kinetik enerjisi

Ortaçağ'daki ağır kılıçlar bile en fazla 2 kg çekiyordu, genellikle 1,5 kg'den hafiflerdi. Kinetik enerji hız değerinin karesi kadar artar. Yani sadece 3 m / sn hızla hantalca çekilmiş 2 kg'lık bir kılıcın enerjisi sadece 9 J'dir, bir kılıç ustasının 10 m/sn hızla çektiği 1,5 kg ağırlığındaki bir Japon katanası (tek kenarı keskin, 60-70 cm uzunluğunda, kavisli, ince geleneksel Japon kılıcı içinse 75 J. Bu biraz düşük görünüyor, ama biçici bir kesğin etkisi son derece yoğundur, bedeninin bir tek kısmını hedef alır (boyun, omuz, kol); delici dürtmeyse yumuşak beden dokularının derinlerine gömülür. İyi bir okçunun bileşik bir yaydan fırlattığı sadece 20 g ağırlığındaki hafif bir ok 40 m / sn hızıyla uçabilir (Pope 1923) ve kinetik enerjisi de 16 J olur. Yine bu da bu düşük görünebilir, ama fırlatılan nesnelerin etkisi temelde delicidir, bu nedenle de derinden nüfuz eder: çakmak taşlı ya da metal uçlu oklar 40-50 m uzaktan atıldıklarında bir zırhı kolayca delebilirler ve iyi nişan alındığında 200 metreyi aşkın bir uzaklıktan korunmasız insanları öldürebilirler.

du. İnsanların performanslarının sınırları, orduların her gün ne kadar ilerleyebileceklerini de belirliyordu; iyi dinlenmiş ve iyi beslenmiş adamlar hızlı hareket edebilseler de ordunun ilerlemesi sıklıkla, yavaş hareket eden hayvanlardan oluşan tedarik bataryasının hızıyla sınırlı oluyordu.

Antik dönemlerin ve erken Ortaçağ'ın en güçlü askeri makineleri kaldıraçların mekanik avantajlarına dayanıyordu. Mancınıklar, esnetilerek şekli değiştirilmiş bükülmüş halatlar ya da kirişlerin aniden serbest bırakılmasından güç alan, büyük ölçekli mekanik yaylardı (Şekil 4.26). MÖ dördüncü yüzyıldan beri kullanılıyorlardı (Soedel ve Foley 1979; Cuomo 2004). Oklar ya da nesneler fırlatabiliyorlardı, kent kuşatmalarında kullanılan mangonel mancınıkları üçüncü dereceden kaldıraçlardı; kaideleri bir dayanak noktasıydı, güç gerilim bantlarıyla sağlanıyordu ve yük insan kaslarının doğrudan kullanılmasıyla ulaşılamayacak bir hızla fırlatılıyordu. Ne var ki 15-30 kg'lık taşlar fırlatan tipik Ortaçağ mancınıkları kent surlarına ancak sınırlı düzeyde hasar verebiliyordu.

Oysa tersine MÖ üçüncü yüzyıl öncesinde Çin'de icat edilmiş trebüşeler, bir dingilin etrafında pivot eden kirişler ile kısa kolun dört ila altı katı uzunluktaki fırlatma kolunun ucunda bulunan fırlatıcıdan oluşan birinci sınıf kaldıraçlardı (Hansen 1992; Chevedden vd. 1995). Daha küçük olan ilk trebüşeler kısa kola bağlı halatları çeken adamlar tarafından çalıştırılıyordu; daha sonraları büyük makinelerde büyük karşıt ağırlıklar kullanıldı, bunlar yüzlerce kilo ağırlığındaki (1 ton civarında ya da daha ağır, rekor ağırlıkta) nesneleri erken Ortaçağ toplarının menzilinden daha uzaklara fırlatabiliyor-



Şekil 4.26 Roma mancınıkları (Corbis).

du. Kuşatmalara karşı savunma amacıyla da kullanılıyorlardı. Trebüşeler şatolar ya da kent surlarının yüksek burçlarına yerleştiriliyor, menzillerindeki kuşatma inşaatlarına büyük taşlar fırlatmaya hazır oluyorlardı.

Sanayi öncesi savaşlarda hayvanların birbirinden ayrı iki rolü vardı: Hızlı ve uzun mesafeli çıkışlar hayvanlar sayesinde yapılıyordu, ayrıca hayvanlar vazgeçilmez nakliyat araçlarıydı, savaş meydanına daha büyük orduların gitmesini mümkün kılıyorlardı, orduların tedarik malzemelerini yük hayvanları taşıyordu. En eski kayıtlı resimlere göre atlar, (ilk olarak MÖ 2000 civarında kullanılmış) tekerleri çubuklu hafif arabalara bağlanıyordu. Barutun kullanılmaya başlaması öncesinde, hiçbir geleneksel askeri yenilik,

hız ve hızlı taktik değişiklikler yapma imkanının bir bileşimi sayesinde, at sırtındaki atlılar kadar büyük sonuçlar doğurmamıştır. Küçük atlara binen, güçlü bileşik yaylarla ok fırlatan okçular (önce Asuriler ve Partlar, sonra Makedonlar ve Yunanlar) üzengi öncesinde asırlar boyunca sağlam ve son derece hareketli bir savaşçı güç olmuşlardı (Drews 2004).

Binicinin ayaklarını koymasını sağlayan bu basit metal parçalar, ilk kez Çin’de MÖ üçüncü yüzyıl başlarında kullanıldı ve daha sonra batıya yayıldı, binicilere eyer üstünde görülmemiş bir destek ve istikrar kazandırdı (Dien 2000). Üzengiler olmasa, zırh giymiş savaşçılar daha büyük (kimi zaman kısmen zırh giydirilmiş) atlara binemezlerdi; at sırtındayken bir mızrak ya da ağır bir kılıçla etkili bir biçimde mücadele etmeyi başaramazlardı. Bu, üzengi kullanılan savaşçıların savaşlarda kolayca üstünlük kazandıkları anlamına gelmez. Zırh giymeyen, küçük ama olağanüstü derecede güçlü kuvvetli atlar kullanan Asyalı biniciler özellikle etkili savaşçı birimler oluşturmuşlardı: Yüksek hızlı hareket edebiliyorlardı ve üstün bir manevra kabiliyetine sahiptiler.

Bu bileşim Doğu Asyalı Moğol atlıları 1223 ile 1241 arasında Avrupa’nın merkezine getirmişti (Sinor 1999; Atwood 2004; May 2013) ve Orta Asya’da steplerdeki birkaç imparatorluğun erken modern döneme kadar hayatta kalmasını sağlamıştı (Grousset 1938; Hildinger 1997; Amitai ve Biran 2005; Perdue 2005). Zırhlı binicilerin gerçekleştirdiği en dikkat çekici uzun mesafeli akınla, birçok Avrupa ülkesinden toplanan Haçlılar Doğu Akdeniz’e gelmiş, burada (1096 ile 1291 arasında) bugünkü İsrail, Ürdün’ün bazı bölgeleri, Suriye ve Türkiye’nin kıyı ve iç kesimlerinde sınırları değişen geçici bir yönetim kurmuşlardı (Grousset 1970; Holt 2014).

Hem süvari birimlerinde kullanılan, hem ağır arabalara ve savaş meydanında toplara bağlanan atlar, erken modern dönemde (1500-1800) Batı’daki bütün büyük çatışmaların yanı sıra, çığır açan Napolyon Savaşları’nda önemlerini korudu. Memleketlerinden uzakta bulunan büyük ordular, tedarik malzemelerini taşıyabilmek için atlara ihtiyaç duyuyordu: binek hayvanları (eşekler, katırlar, atlar, develer, lamalar) bozuk yollarda kullanılıyordu; yük hayvanları (çoğunlukla öküz, Asya’da aynı zamanda filler) ağır tedarik arabalarını ve giderek daha da ağırlaşan savaş meydanı toplarını çekiyordu. Yük hayvanlarının gücüne dayalı bu büyük askeri seferberliklerde söz konusu olan kitlesel ihtiyaçlar, işgal altındaki Prusya’nın Napoléon ordularının 1812’de Rusya’yı işgali için temin etmeyi kabul ettiği tedarik malzemesi ve hayvan listesiyle gayet iyi örneklenir (Kutu 4.25). Tedarik arabalarını çeken öküzler (44.000 adet) olmasaydı, ordu ilerleyemezdi.

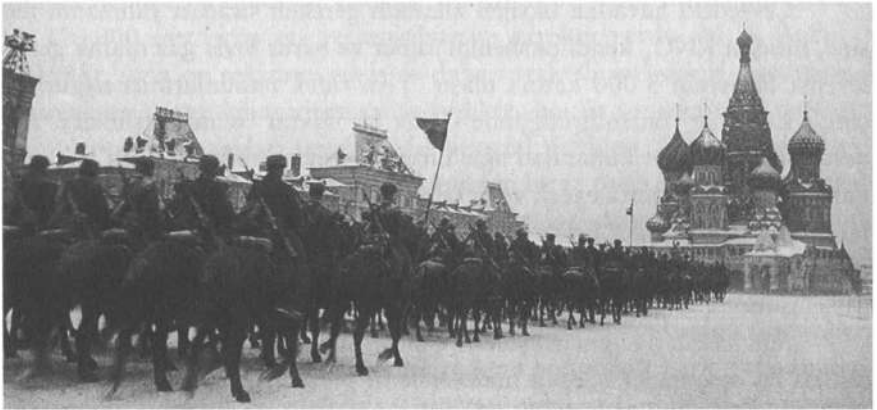
Kutu 4.25**Rusların işgali için Prusya erzakı ve hayvanları**

Rusya'ya giden yolun Napoléon'a açılması: Napoléon'un genç generallerinden biri olan, muhtemelen felaketle sonuçlanan Rusya işgalinin en meşhur vakanüvisi Philip Paul, comte de Ségur (1780-1873) Prusya'nın katkısını böyle betimlemişti:

Prusya bu antlaşmayla birlikte iki yüz bin kental (100 kg) çavdar, yirmi dört bin kental pirinç, iki milyon şişe bira, dört yüz bin kental buğday, altı yüz elli bin kental sap, üç yüz elli bin kental saman, altı milyon kile (36,5 kg) yulaf, kırk dört bin öküz, on beş bin at, koşumları ve sürücülerıyla birlikte bin beş yüz balya taşıyan üç bin altı yüz araba, son olarak yirmi bin hasta için gerekli her şeyin bulunduğu hastaneler sunmayı kabul etmiştir (Séгур 1825, 17).

1840 sonrasında Batı'da yaşanan silahlı çatışmalarda, birlikleri ve hayvanları seferber etmek, onları trenlerle ön cepheye (ya da başka kıtalar-daki sömürge savaşlarına gönderilen askerler söz konusu olduğunda, onları buharlı gemilere binecekleri limanlara) taşımak için ilk modern cansız asli itici güç, buhar makinesi kullanılacaktı, ama savaş meydanında hareket yine sadece insan ve hayvan kaslarına bağlıydı. Birinci Dünya Savaşı sırasında savaş bölgelerinde ya da yakınlarında yeni cansız mekanik asli iticiler (kamyonlar, tanklar, ambulanslar ve uçakları çalıştıran içten yanmalı motorlar) ilk kez kullanılsa da atlar vazgeçilmez olmaya devam etmişti.

1917 sonuna gelindiğinde Batı cephesindeki Britanya orduları 368.000 ata dayanıyordu (bunların üçte ikisi tedarik malzemelerinin nak-



Şekil 4.27 Moskova'da Kızıl Meydan'da 7 Kasım 1941'de, Moskova'ya ulaşacak Alman saldırısının başlangıcından bir hafta önce (Corbis).

ledilmesiyle uğraşıyordu, geri kalanlar ise süvari birliklerindeydi), Wehrmacht'ın Fransa (1940 baharı) ve Rusya'daki (1941 yazı) ilerlemesi sık sık ders kitaplarında hızlı mekanize tanklar öncülüğündeki savaşın ders kitaplarına girmiş örnekleri olarak anılsa da, Almanya Rusya'nın işgali için 625.000 at seferber etti, savaşın sonu geldiğinde Wehrmacht'ın yaklaşık 1,25 milyon hayvanı bulunuyordu (Edgerton 2007). Aynı şekilde Sovyet orduları Moskova ve Stalingrad'dan Berlin'e ilerlemeleri sırasında yüz binlerce at kullandı (Şekil 4.27). Dolayısıyla saman ve yulaf da İkinci Dünya Savaşı sonuna dek stratejik malzeme sınıfında olmayı sürdürdü.

Patlayıcılar ve Tüfekler

Barut öncesi savaşlarda kullanılan yegâne cansız enerjiler sülfür, asfalt, petrol ve sönmemiş kireci birleştirerek hazırlanan, ya ok başlarına takılan ya da mancınıklar ve trebüşelerle surlar ve hendeklerin ötesindeki hedeflere fırlatılan yanıcı malzemelerdi. Barutun kökeni hiç kuşkusuz Çinli simyacılar ve metalurgıların uzun deneyimine uzanır (Needham vd. 1986; Buchanan 2006). Bu insanlar üç bileşenle (potasyum nitrat – KNO_3 , güherçile–, sülfür ve odun kömürü) çalışmaya, onları birleştirmeden çok önce başlamışlardı. İlk barut formülü dokuzuncu yüzyıl ortasına aittir, barut hazırlamaya ilişkin açık direktifler 1040'ta yayımlandı. İlk karışımların sadece yüzde 50 kadarı güherçileden oluşuyordu ve gerçekten patlayıcı değildi. Sonunda patlama özelliğine sahip karışımlar yüzde 75 güherçile, yüzde 15 odun kömürü, yüzde 10 sülfür olarak oturdu.

Çevredeki havadan oksijen alınması gereken sıradan yanmanın tersine, tutuşan KNO_3 kendi oksijenini sağlar ve barut hızla gaz olarak genişleyerek hacminin 3.000 katına ulaşır. Yivli tüfek namlularında uygun biçimde kapatılıp yönlendirildiğinde küçük bir miktar barut kurşunlara, ağır nesneleri itmek için kullanılan ağır bir arbaletin verebileceğinden bir kerte daha büyük bir kinetik enerji verir ve daha büyük yüklemeler saha bataryalarından ağır mermiler fırlatabilir. Tahmin edileceği üzere, ateşli silahlar ve topların yaygınlaşması ve mükemmelleşmesi, bu ilk başlangıçtan sonra hızla gelişmiştir.

Ağır silahlarla ilgili gelişmeler Çinlilerin onuncu yüzyıldaki ateşli mızrakları ile başlamıştır. Çeşitli malzemelerin parçalarını fırlatan bu bambu, daha sonraları metal tüpler önce gevşek bir biçimde oturan taşları kesin hedef gözetmeksizin fırlatan basit bronz toplara dönüşmüştür. İlk gerçek

tüfekler Çin’de on üçüncü yüzyıl sonundan önce dökülmüş, Avrupa sadece yirmi-otuz yıl kadar sonra Çin’i izlemiştir (Wang 1991; Norris 2003). Sık sık yaşanan silahlı çatışmaların yarattığı baskılar yeniliklerin hız kazanmasına yol açmış, sonuçta daha güçlü ve hedefi daha kesin tutturan tüfekler ortaya çıkmıştır. 1400’e gelindiğinde en uzun tüfeklerin uzunluğu 3,6 metre, kalibreleri 35 cm’ydi; Fransa’da 1499’da yapılan, İskoçya’ya bağışlanan Mons Meg topu yaklaşık 4,06 metre uzunluğundaydı, 175 kg fırlatabiliyordu ve ağırlığı da 6,6 tondur (Gaier 1967). Taş topların yerini genel olarak demir topların alması silahın yıkıcı gücünü artırdı.

Barut gücüne dayalı savaşların stratejik sonuçları hem karada hem denizde muazzam oldu. Ele geçirilemezmiş gibi görünen şatoları almak için uzun süreli ve genellikle de sonuç vermeyen kuşatmalar düzenlemeye artık gerek kalmamıştı. Yoğunluklarının yüksek olması nedeniyle kendilerinden önceki taş toplardan çok daha yıkıcı bir hal alan demir toplar ile hedefi hatasız tutturan fırlatıcıların bir araya gelmesi onları direnilemez bir hale getirmişti. Okçuların menzilinın çok ötesinden ağır taş yapıları yıkabilen saldırganlar, geleneksel olarak inşa edilmiş şatolar ve surlu şehirlerin savunma değerine son verdi, Ortaçağ’daki kalın taş duvarlı nispeten derli toplu kaleler yapma pratiği yerini, büyük su hendekleri ve büyük toprak bentlerle desteklenen, yüksekliği fazla olmayan yıldız şekilli poligonlara bıraktı.

Bu projeler muazzam miktarda malzeme ve enerji tüketiyordu. Kuzeybatı Fransa’da Longwy’deki tahkimat, Fransız askeri mühendisi Sebastian Vauban’ın (1633-1707) en büyük projesi 640.000 metreküp kaya ve toprağın (Khufu piramidinin yaklaşık dörtte birine eşitti bu miktar) çıkarılıp 120.000 metreküp taş yerleştirilmesini gerektiriyordu (M. S. Anderson 1988). Ama on sekizinci yüzyılda daha hareketli savaşların yaşanması, kuşatmaların yaygınlığını yitirmesiyle birlikte, bu tür projelerin de modası geçti. Napolyon Savaşları sırasında Gribeauval tüfekleri (5,4 kg toplar fırlatıyordu, arabasıyla birlikte ağırlığı 2 tondan biraz daha azdı, Britanya tüfeklerinin ağırlığıysa yaklaşık 3 tondur) manevraları daha kolaylaştırıyordu (Chartrand 2003).

Denizlerde (Çinlilerin diğer iki yeniliğiyle, pusula ve iyi dümenlerle donanmış) toplu gemiler Avrupa’nın teknik üstünlüğünün başlıca taşıyıcıları haline geldi, yayılmacı sömürgecilik çağının son yılları hariç tamamdanda uzak yerlere saldırganca yayılmanın araçları oldular: Gemilerin hakimiyeti ancak buhar makinelerinin donanmada kullanılmaya başlamasıyla son bul-

du, ancak 1820'lerde başlamış bir süreçti bu. Avrupa sularında uzun menzilli tüfekler İngiliz kaptanlara 1588'de İspanyol Armadası karşısında belirleyici bir üstünlük kazandırdı (Fernandez-Armesto 1988; Hanson 2011). Bundan bir asır sonra büyük savaş gemilerine, sayıları 100'e kadar çıkabilecek toplar yükleniyordu, 1692'de La Hogue savaşı sırasında çarpışan gemiler toplam 6.756 top taşıyordu (M. S. Anderson 1988). Yoğunlaştırılmış yıkıcı enerji salımlarının ulaştığı düzeyler, ancak on dokuzuncu yüzyıl ortasında (1860'larda), nitroselülöz bazlı tozların ve (patenti 1867'de Alfred Nobel'e verilen) dinamitin çıkmasıyla geride bırakıldı.

BEŞİNCİ BÖLÜM

Fosil Yakıtlar, Asli Elektrik ve Yenilenebilir Enerjiler

Temelde, dünyadaki hiçbir medeniyet, yaşanabilir bir biyosfere enerji veren, bütün yiyeceklerimizi, hayvan yemlerini ve ağaçları üreten Güneş'in ışınlarına bağımlı bir güneş toplumundan başka bir şey olamaz. Sanayi öncesi toplumlar bu güneş enerjisi akışını hem doğrudan, gelen bir ışıma (insolasyon) olarak (bütün evler her zaman, edilgin bir biçimde ısıtılan güneş evleri olmuştur) hem dolaylı biçimde kullanmışlardır. Dolaylı kullanımlar sadece ekinler ile (meyve, yemiş, yağ, odun ya da yakıt için) ağaçların yetiştirilmesini ve doğal odunsu, otsu, suda yaşayan fitokütlenin hasat edilmesini değil, rüzgâr ve su akışlarının yararlı mekanik enerjiye çevrilmesini de içerir.

Rüzgâr ve su akışları, güneş ışınlarının neredeyse anında gerçekleşen dönüşümleridir: Dünya'nın yüzeylerinin farklı düzeylerde ısınmasından ötürü atmosferik basınç basamakları hızla yükselir, buharlaşma ve terleme yoluyla buharlaşma küresel su döngüsünün sürekli itici gücüdür. Güneşin ışıması gıdaya, yeme ve birkaç gün (hayvan dışkısı için) ile birkaç ay (ekin kalıntıları için genellikle 90-180 gün) arasında değişen gecikmelerle biyokütle yakıtlarına çevrilir. Evcilleştirilmiş hayvanların çalışma yaşına ulaşması sadece bir-iki yıl sürer, geleneksel toplumlardaki çocuklarsa beş-altı yaşına bastıklarında yetişkinlerin işlerine yardımcı olmaya başlıyordu. Ancak olgun ağaçlar kesilip odunları yakıldığında ya da odun kömürüne dönüştürüldüğünde güneş ışınlarının kullanılması elli-altmış yıl ertelenmiş oluyordu (Daha sonraları büyük testereleler eskiden kalma yağmur ormanlarındaki dev ağaçları kesmeyi mümkün kıldığında, güneş ışınlarının kullanımı birkaç yüz-yıl boyunca ertelenmiş oldu).

Fosil yakıtların kökenleri de, güneş ışımasının dönüşümünde yatar: turba ve kömürler ölü bitkilerin (fitokütle) yavaş yavaş dönüşmesiyle oluştu; hidrokarbonlarsa deniz ve göllerde bulunan tek hücreli fitoplankton (çoğunlukla siyanobakteri ve diyatomlar), (çoğunlukla foraminifera) zooplankton, bazı algler, omurgasızlar ve balıkların daha karmaşık dönüşümleri sonucu meydana geldi (Smil 2008a). Basınç ve ısı başat dönüştürücü süreçlerdi; en yeni turba için en az bir-iki bin yıl, en sert kömürler içinse yüz milyonlarca yıl etkili olmuşlardı. Bu köken, fosil yakıtların yüksek karbon içeriğine sahip olmasını zorunlu kılar, suyun ve diğer yanmaz malzemelerin düşük karbon içeriğiyle birleştiğinde bu da yüksek enerji yoğunluğuna sahip oldukları anlamına gelir (**Kutu 5.1**).

Ama başta çökemiş biyokütle karbonun ancak küçük bir bölümü fosil yakıtlara dönüşmüştür (Dukes 2003). Kömürün oluşumu sırasında bitki karbonunun yüzde 15'i turba haline gelir, bunun yüzde 90'ı kömür halinde korunabilir, açık madenlerde bulunan kömürün yüzde 95'i, kalın damarlardan çıkarılır. Sonuçta orijinal antik bitki karbonunun en fazla yüzde 13'ü kömür olarak çıkarılabilir; tersinden okunduğunda bu antik karbonun kabaca sekiz biriminin piyasadaki kömür halinde bulunduğu anlamına gelir (aralık çoğunlukla 5-20 birimdir). Oysa tersine genel karbon geri kazanım etkeni, ham petrol ve doğal gazda çok daha düşüktür. Bu yakıtlar deniz ve göllerdeki çökeltilerde gömülü organizmalardan kaynaklanır, fosil hidrokarbon üretimi, dönüşerek petrol ve gaz haline gelen antik biyokütleden başta var olan karbonun en fazla yüzde 1'ini, ama genelde sadece yüzde 0,01'ini geri kazanır. Yüzde 0,01'lik geri kazanım oranı, ham petrol ya da doğal gaz olarak satılan bir birim karbonu üretmek için 10.000 birim antik karbona gereksinim olduğu anlamına gelir.

Ama fosil yakıtları, fitokütlenin geleneksel kullanım biçimlerinin yerine kullanan (yani onları sırf ısı ve ışık üretmek için verimsizce yakan) bir toplum on sekizinci yüzyıl Avrupası ya da Çini'nin daha zengin bir versiyonu gibi görünürdü. Fosil yakıtlara geçiş iki temel niteliksel iyileştirme sağlamıştır ve ancak bunların birikmesi ile birleşmesi modern dünyanın enerji temellerini ortaya çıkarmıştır. Bu ilerlemelerin ilk grubu fosil yakıtları dönüştürmenin yeni biçimlerinin icat edilmesi, geliştirilmesi ve nihayetinde kitlesel ölçekte yaygınlaşmasıdır: Yeni asli itici güçlerin ortaya çıkması (buhar makinelerinden başlayıp içten yanmalı motorlara, buhar türbinlerine ve gaz türbinlerine) ve ham yakıtları dönüştürmeye yönelik yeni süreçlerin keşfe-

dilmesi, ki kömürden metalurjik kok kömürü üretimi, ham petrolün rafine edilip geniş bir yelpazeye yayılan sıvılar ile yakıt olmayan malzemeler elde edilmesi, kömür ve hidrokarbonların yeni kimyasal sentezlerde hammadde olarak kullanılmaları.

Kutu 5.1 Fosil yakıtlar

Bitki kütlesi yüzde 45-55 karbondur, antrasit neredeyse yüzde 100 karbondur, iyi bitümen kömürlerde karbon oranı yüzde 85'in üstündedir, ham petrolerde karbon miktarı çoğunlukla yüzde 82 ile yüzde 84 arasındadır, doğalgazın başlıca bileşeni olan metan (CH_4) yüzde 75 karbondur. Bitümen (siyah) kömürler küresel çapta çıkarılan katı yakıtın büyük bölümünü oluşturur. Hemen her zaman kül ve sülfür içerdiklerinden yakılmaları uçuşan kül ve SO_2 üretir. İkinci Dünya Savaşı'na kadar bunlar sanayi ve kentsel hava kirliliğinin yaygın nedenleriydi, görülebilir miktarda parçacık madde birikimine, kuru asit birikimine ve yağışların asitlenmesine neden oluyorlardı (Smil 2008a). Ham petroler rafine etme süreçleriyle ulaştırma için benzin, jet ve dizel yakıtı; ısınma ve buhar üretimi için fuel oil, ayrıca yağlayıcı ve döşeme malzemeleri üretilen karmaşık hidrokarbon karışımlarıdır. Doğalgazlar, en temiz fosil yakıtlar, en hafif hidrokarbonlardır. Hidrokarbonlar kömürden de üretilebilir. "Şehir gazı" on dokuzuncu yüzyılda yaygın olarak aydınlatma için kullanılıyordu, modern kömür gazlaştırması doğal gazlarınkine benzer sentetik gaz üretir. Sentetik sıvı yakıtlar geniş ölçekte ilk kez İkinci Dünya Savaşı sırasında Almanya'da üretilmiştir.

Enerji yoğunlukları kömürlerde büyük bir farklılık gösterir, ama hidrokarbonlar için nispeten tektir. Ham petroler her zaman üstün enerji kaynaklarıdır: Olağan bitümen kömürler gibi birim kütle başına yaklaşık iki kat daha fazla enerji içerirler. Uluslararası enerji istatistiklerinde üç ortak paydadan biri kullanılır: standart kömür eşdeğeri (29,3 MJ/kg içeren yakıt), petrol eşdeğeri (42 MJ/kg değerinde) ya da standart enerji birimlerinde (jul olarak değerler ya da iki geleneksel birim kalori (cal) ve Britanya termal birimi (Btu/British thermal unit)).

Yakıt	Enerji yoğunluğu	
	MJ/kg	MJ/m ³
Kömürler		
Antrasitler	31-33	
Bitümen kömürler	20-29	
Linyitler	8-20	
Turba kömürleri	6-8	
Ham petroler	42-44	
Doğal gazlar		29-39

İkinci grup yeniliklerse, yepyeni bir ticari enerji olan elektriği üretmek için fosil yakıtları kullanıyordu. Herhangi bir katı, sıvı ya da gaz yakıt yakılabiliyordu, ortaya çıkardığı ısı suyu buharlaştırmakta kullanılıyordu, buharsa turbojeneratörleri çalıştırıp elektrik üretmekte. Ama elektrik kuşağının en başından beri, genişleyen buharın kinetik enerjisi yerine suyun kinetik enerjisini de elektrik üretmekte kullandık. Dolayısıyla hidroelektrik asli elektriğin bir biçimi olarak sınıflandırılır (yakıtların yakılmasıyla elde edilen elektriğin tersine); daha sonraları bu gruba yapılan eklemeler arasında jeotermal tesislerde üretilen, nükleer fizyonla üretilen, daha yakın dönemde büyük rüzgâr türbinleri ya da fotovoltaiik hücreler, yani yoğunlaştırılmış güneş ışımasıyla üretilen elektrik de yer alır.

Uzun vadeli eğilim açıktır: Fosil yakıtların giderek artan bir bölümünü termal elektriğe çeviriyoruz, asli elektrik üretiminin kapasitesini de genişletiyoruz, çünkü elektrik en uygun, en değişken, kullanım anında en temiz modern enerji biçimidir. Bu bölümün birinci kısmında fitokütle yakıtlar ve canlı enerjilerden fosil yakıtlara ve cansız asli itici güçlere büyük dönüşümdeki birçok kilit gelişmeyi betimledim; ikinci kısımda modern yüksek enerjili toplumların tipik özelliği olan verimlilik, güvenilirlik ve bütçeye uygunluğu yaratan önemli teknik yeniliklerin izini süreceğim.

BÜYÜK DÖNÜŞÜM

Bazı ülkelerde fosil yakıtlar, biyokütle yakıtlar ve canlı emeğin hızla yerinden edilmeye başlamasından yüzyıllar önce nispeten küçük miktarlarda da olsa kullanılıyordu. Çin'de kömür ve doğal gaz, İngiltere'de kömür en iyi bilinen örneklerdir. Çinliler Han hanedanlığı döneminde (MÖ 206-220) küçük sanayi ölçeğinde olsa da kömür kullanmışlardı; İngiltere, Galler ve İskoçya'da da kömürün dışarı çıktığı ve bazısı Roma yönetimi döneminde, büyük bölümü Ortaçağ'da kolayca kazıldığı birçok yer bulunuyordu. Ama Nef'in (1932, 12) belirttiği üzere;

On altıncı yüzyıla dek kömür gerek aile ocağında gerek mutfakta, dışarı çıktığı yerlerin bir-iki milden uzağında, pek yakılmadı; sınırları bu şekilde çizilmiş bölgelerde dahi ancak odun almaya parası yetmeyen köylüler tarafından kullanıldı.

Kömür, Avrupa'daki geçiş döneminde genellikle baskın fosil yakıttı. En dikkat çekici istisna, erken modern dönemde kıtanın en etkili ekonomilerinden birinin enerjisini temin ediyordu: On yedinci ve on sekizinci yüz-

yıllarda, Hollanda Altın Çağı'nın yakıtı büyük ölçüde ülke sınırları içindeki turba kömürü oldu. Turba kömürünün kullanım çapı De Zeeuw'un (1978) tahminiyle açıklık kazanır, buna göre Hollanda'da turba kömürü bulunan 175.000 hektarlık yüksek araziden sadece yaklaşık 5.000 hektarı az çok bozulmadan kalmıştır. ABD ve Kanada'nın dönüşümü de kömürle başladı, ama Avrupa'nın tersine bu iki ekonomi petrol ve doğal gazı daha erken ve daha hızlı geçiş yaptı (Smil 2010a). Aynı şekilde Rusya geniş ölçekli ticari petrol üretiminin öncülerinden biri oldu ve daha sonra muazzam büyüklükteki doğal gaz kaynaklarından da yararlandı.

Avrupa'nın büyük bölümü on dokuzuncu yüzyılda biyokütle yakıtlarına bağımlılığını azaltmışsa da fitokütle yakıtlardan uzaklaşma düşük gelirli birçok ülkede hâlâ devam eden bir süreçtir. Alışkanlıklar arasında fark varsa, yakıtlar arasında da fark vardır. Yakıtların çeşitliliğini vurgulamak için çoğul kullanmamız gerekir. Kömürler, ham petroller ve doğal gazların çok geniş bir yelpazeye yayılan özellikleri vardır (bkz. Kutu 5.1). Bunların yanmasıyla salınan ısı doğrudan pişirme, ısıtma, metalleri eritme ve dolaylı olarak çeşitli asli itici güçlerin enerjisini sağlama amacıyla kullanılabilir. Buhar makinesi on dokuzuncu yüzyılda başlıca cansız itici güç haline geldi. İçten yanmalı motorlar ve buhar türbinleri 1890'larda ticari açılımlar yapmaya başladı. 1950 öncesinde benzin ve dizel motorları ulaştırmada başlıca itici güç haline geldi, buhar türbinleri de geniş ölçekli elektrik üretiminde (Smil 2005); gaz türbinlerinin yaygın kullanımı (elektrik üretimi ya da jetlerin ve gemilerin enerjisini sağlamak için durağan halde) ancak 1960 sonrasında gerçekleşti (Smil 2010a).

Enerji geçiş süreçleriyle ilgili yakın dönemde yapılan araştırmalar, bu tedrici değişimlere hâkim olan birçok ortak özellik olduğunu gösterir ve bu süreci teşvik eden ya da engelleyen başlıca etkenleri tanımlar (Malanima 2006; Fouquet 2010; Smil 2010a; Pearson ve Foxon 2012; Wrigley 2010, 2013). Bu etkenler, uzun süren deney süreçleri sonrasında zirveye tırmanan büyüme aşaması ve ölçek büyütme şeklinde ilerlemenin teknik zorunluluk olmasından tutun (Wilson 2012) küçük enerji tüketicilerinin bazılarının hatırı sayılır bir süre önce ve daha hızlı geçiş dönemleri yaşamış olmalarına uzanır (Rubio ve Folchi 2012). Ayrıca daha küçük bazı ülkeler, büyük kömür rezervlerine sahip olanlar bile kömür aşamasını atlamış, hızla ülke içinde çıkarılan, ya da daha büyük bir sıklıkla, ithal ham petrole bağımlı hale gelmişlerdir. Ama her halûkârda nihai sonuç, daha önceden fitokütle yakıtların toplanması ve cansız enerjilerin kullanılmasıyla sınırlı olan ülkeler

fosil yakıt arzının çeşitlilik gösterdiği ve mekanik asli iticilerin kitlesel ölçekte kullanıldığı yeni bir çağa girerken, kişi başına asli enerji tüketiminde ciddi bir artış gözlenmesi olmuştur.

Kömür Çıkarmanın Başlangıcı ve Yaygınlık Kazanması

Kömür kullanımının başlangıcı antik devirlere kadar uzanır, bu yakıtın en önemli kullanım yeri Çin’de Han Hanedanlığı döneminde demir üretimi olmuştur (Needham 1964). Avrupa’yla ilgili kayıtlar kömürün ilk kez 1113’te Belçika’da çıkarıldığını, Londra’ya ilk nakliyatın 1228’de yapıldığını, Fransa’da Tynemouth bölgesinden ilk ihracatın 1325’te yapıldığını, İngiltere’nin on altıncı ve on yedinci yüzyıllarda bitkisel yakıtlardan kömüre geçişi tamamlayan ilk ülke olduğunu gösterir (Nef 1932). 1500 sonrasında bu ülkede ciddi boyutlarda gözlenen bölgesel odun kıtlıkları yakacak odun, odun kömürü ve kereste maliyetlerinin artmasına yol açtı. Bu kıtlıklar on yedinci yüzyılda, demire talebin artması ve gemi yapımında büyük miktarda keresteye ihtiyaç duyulması nedeniyle daha da ağır bir hal aldı. Bu kıtlıklar ancak daha yüksek miktarda külçe demir ve kereste ithalatıyla geçici olarak hafifletildi (Thomas 1986). Ülke içinde kömür çıkarmanın artması apaçık çözümdü: Ülkedeki kömür alanlarının hemen hepsi 1540 ile 1640 arasında açıldı.

1650’ye gelindiğinde İngiltere’nin kömür üretimi 2 Mt’yi geçmişti, on sekizinci yüzyıl başında yılda 3 Mt, sonuna gelindiğindeyse yılda 10 Mt çıkarılıyordu. Kömür kullanımının artması, kömür madenciliği, nakliyatı ve yakılmasıyla bağlantılı birçok teknik ve örgütsel sorunun çözülmesini gerektiriyordu. Dışarı çıkan kömür damarlarının azalması daha derin çukurların geliştirilmesine yol açtı. Bu çukurların derinliği, on yedinci yüzyıl sonunda nadiren 50 metreyi aşmış olsa da en derin miller 1700’den kısa süre sonra 100 metreyi geçmiş, 1765’te 200 metreyi, 1830 sonrasında da 300 metreyi aşmıştı. O zamana gelindiğinde günlük kömür üretimi maden başına 20 ton ile 40 ton arasındaydı, oysa bir asır önce sadece birkaç tondur. Daha derin çukurlar daha fazla su pompalamayı gerektiriyordu, madenlerin havalandırılması, daha derin madenlerden kömür çıkarılması ve kömürün dağıtılması için de daha fazla enerjiye gerek vardı. Su tekerleri, rüzgâr değirmenleri ve atlar bu ihtiyaçlar için gerekli gücü sağlıyordu. Kömür madenciliğinin enjisi ağır insan emeğiyle karşılanıyordu.

Baltacılar, kazmacılar, yarmacılar ve çekiççiler kâh dik durarak kâh dar tünellerde sürünerek çeşitli pozisyonlarda maden damarlarından kömür

çıkartıyordu. Toplayıcılar örgü sepetleri kömürle dolduruyor, bu sepetleri ahşap kızaklar üstünde çukurun dibine sürüklüyorlardı, burada yerleştiriciler sepetleri hatlara asıyordu. Rüzgârcılar sepetleri topluyor, vinç operatörleri kömürleri istiflere atıyordu. Kömür çıkarma işinin çok büyük bir bölümünü yetişkin erkekler yapıyordu, ama yaşları altı ile sekiz arasında değişen oğlan çocukları da daha hafif işlerde kullanılıyordu. Birçok çukurda en ağır işlerin bazıları kadınlar ya da genç kızlar tarafından görülüyordu. Kadınlar



Şekil 5.1 On dokuzuncu yüzyıl başında İskoçya'da bir madende kömür taşıyıcıları (Corbis).

ve genç kızların, sırtlarında alınlarına bağlanmış ağır sepetlerle dik merdivenleri tırmanarak yüzeye kömür taşıması gerekiyordu (Şekil 5.1). 1812'de İskoç inşaat mühendisi ve mineral araştırmacısı Robert Bald bu kadınların hayatlarıyla ilgili bir araştırma yayımladı; sadece katlanılan zorlukları acılı bir dille betimlediği için değil, fiilen çekilen fiziksel zorlukları doğrulukla değerlendirdiği için de onun bu satırlarından kapsamlı alıntılar yapmaya değer (Kutu 5.2).

Bald'un canlı betimlemesi, enerjiyle ilgili temel bir olgunun mükemmel bir resmidir aynı zamanda, yeni bir enerji tedarik biçimine her geçişin mevcut enerjiler ve aslı iticilerin yoğun bir biçimde kullanılmasından güç alması gerektiğinin de etkileyici bir örneğidir: Odundan kömüre geçiş insan kaslarından enerji alması gerekmişti, kömürün yakılması petrolün geliştirilmesine enerji vermişti ve son bölümde vurguladığım üzere bugün güneş enerjisiyle çalışan fotovoltaiik hücreler ile rüzgâr türbinleri için gerekli metalleri eritmek, ihtiyaç duyulan plastikleri sentezlemek ve yüksek enerji girdisi gerektiren diğer malzemeleri işlemek için gerekli fosil enerjilerin somut halleri oldu.

Daha derin çukurlarda, kömürü yukarı çeken ya da su pompalayan bocurgatları döndürmek için atlar kullanılıyordu. 1650 sonrasında atlar ve eşekler yer altında da kullanıldı. Daha kısa mesafelerde kömür dağıtmak ve kanal teknelerine ya da gemilere yüklemek için nehirler ya da limanlara

Kutu 5.2

**İskoçya’da “Taşıyıcılar” Adıyla Bilinen,
Yeraltında Kömür Taşıyan Kadınların Durumu Hakkında Soruşturma**

1812’de yayımlanan İskoçya’da Kömür Ticaretinin Genel Görünümü’nün eki bu başlığı taşıyor-
du: Kilit bulgular şöyleydi (Bald 1812, 131-132, 134):

Anne... büyük kızlarıyla birlikte çukura iner, kızlar yanlarındaki uygun sepeti yere bırakır, sepetin içine büyük kömürler konur; yük taşınırken sırta yüklenmesi için sıklıkla iki kadının birden sepeti kaldırması gerekir... Önce dişleri arasında yanan bir kandil taşıyarak anne çıkar, ardından... yorgun adımlarla kızlar basamakları ağır ağır çıkar, zaman zaman nefes almak için dururlar... Çukuru tırmanırken, yükleri son derece ağır olduğu için acı acı ağladıklarını görmek alışılmadık bir şey değildir... İşin bu biçimde gerçekleştirilmesi... akla hayale sığacak gibi değildir... Bir kadının bir günde bu şekilde çukurun tepesine çıkardığı kömürlerin ağırlığı 1774 kg’ye eşittir, sık sık iki ton kömür taşındığı da olur.

Vücut ağırlığı 60 kg olarak kabul edilse, her gün 35 metre derinden 1,5 ton kömür çıkarmak 1 MJ gerektirirdi; kömürü yatay ya da hafif eğik bir düzlemde (yeraltında çukurun dibinden yer üstünde dağıtım noktasına) taşımının maliyeti ve dönüş yolunun maliyeti gündelik toplamı 1,8 MJ’ye yaklaştırr. Emek verimliliğinin yüzde 15 olduğu varsayılırsa, yetişkin bir kadın taşıyıcı yaklaşık 12 MJ enerji harcayacak, on saatlik bir çalışma gününde yaklaşık 330 W güç sarf edecektir. Ağır işlerde harcanan enerjiyle ilgili modern ölçümler, 350 W gücünde çalışmanın sekiz saatlik bir vardiyada sürdürülebilir olduğunu, ama ancak nadiren bunun üstüne çıkılabildiğini doğrulamıştır (Smil 2008a). Açıktır ki taşıyıcılar her gün, yıllarca çalışmışlardı; bu işe yedi yaşındayken girmiş, sıklıkla da 50 yaşına varıncaya, insan kapasitesinin azami seviyesine dek devam etmişlerdi.

aktarmak için atların kimi zaman raylar üzerinde çektiği arabalar kullanılıyordu. On yedinci yüzyıl başlarında kömür genellikle evlerde, örsleri ısıtmak, tuğla, kiremit, toprak kap kacak pişirmek, nişasta ve sabun yapmak ve tuz çıkarmak için kullanılıyordu. Ama saf olmayan maddelerin nihai ürüne aktarılması, kömürün cam yapımında, malt kurutmada ve en önemlisi demir eritmede doğrudan kullanılmasını imkânsız hale getirmişti. İlk olarak, 1610 civarında, hammaddelerin kapalı kaplarda ısıtıldığı geniş yüzeyli (ısı yansıtıcı) ocakların kullanılmaya başlamasıyla cam yapımı sorunu çözüldü. Ancak ve ancak kömürün elde edilebilir olması diğer ihtiyaçları karşıladı (bir sonraki bölüme bakınız).

Kömürün bir diğer önemli dolaylı kullanım alanı da bitümin kömürün karbonlaşması yoluyla, yani yakıtın sınırlı bir oksijen tedarikiyle fırınlarda yüksek ısıda ısıtılması yoluyla kömür ya da şehir gazı üretilmesi oldu (Elton 1958). İlk kullanışlı tesisler, 1805-1806’da İngiliz pamuk fabrikalarında bağımsız olarak kuruldu. 1812’de Londra’ya merkezi olarak gaz temin edecek

bir şirket açıldı. Daha iyi imbikler, sülfürün gazdan ayrılması, küçük çevreli dövme demir borular yapmaya yönelik yeni bir teknik ve daha verimli yakıcılar gazla aydınlanmanın hızla yaygınlaşmasını sağladı. Kömür kullanımı ampullerin piyasaya çıkmasıyla son bulmadı. Patentini 1885'te Carl Auer von Welsbach'ın aldığı akkor bir gaz mantosu, gaz sanayiinin otuz-kırk yıl kadar daha elektrik ışıklarıyla rekabet etmesini sağladı.

İngiltere dışında kömür madenciliğinin yaygınlaşması on sekizinci yüzyılda biraz yavaş gelişti. Başlıca üretim ilk olarak Kuzey Fransa'da, Liege ve Ruhr bölgelerinde, Bohemya ve Silezya'nın bazı bölgelerinde yapıldı. Kuzey Amerika'da kömür çıkarma faaliyeti ülke çapında, ancak on dokuzuncu yüzyıl başında önem arz etmeye başladı. Tarihsel kömür üretim istatistikleri ve ülke çapında yakacak odun tüketimine ilişkin mevcut (ve çok daha az güvenilir) en iyi tahminler kömürün odunu geride bıraktığı, ülkenin asli enerji kaynağının yarısından fazlasına katkıda bulunmaya başladığı tarih aralığını daraltmamızı, hatta birkaç örnekte işaret bile etmemizi mümkün kılar (Smil 2010a). İngiltere ve Galler'de bu gelişme istisnai derecede erken gerçekleşti, bu en erken enerji geçiş süreçlerinin zamanlaması ancak yaklaşık olarak belirlenebilir.

Warde (2007) odun ile kömür arasındaki geçiş noktası için kesin bir tarih seçmenin keyfi olacağı sonucuna varmıştı, ama yeniden kurguları, ısı kaynağı olarak kömürün biyokütleyi geride bıraktığı en muhtemel tarihin 1620 civarı, hatta belki biraz daha öncesi olduğunu gösterir. 1650'ye gelindiğinde kömürün payı yüzde 65'e çıkmıştı, 1700'de yüzde 75 civarındaydı, 1800'de yüzde 90'a yakındı, 1850'lere gelindiğindeyse yüzde 98'i aşmıştı (son iki oran Birleşik Krallık içindir). Britanya'da kömürün üstünlüğü bir yüzyıl daha devam etti: 1950'de kömür ülkenin asli enerjisinin yüzde 91'ini, 1960'a gelindiğinde hâlâ yüzde 77'sini temin ediyordu. Bunun sonucunda kömür ülkenin enerji kullanımına 250 yıl daha ağırlığını koydu (yüzde 75'ten fazlaydı payı), başka ülkelerde olduğundan çok daha uzun bir süredir bu.

Napoléon Fransası ilk dönemlerde asli enerjisinin yüzde 90'ından fazlasını odundan temin ediyordu, bu oran 1850'de hâlâ yüzde 75 civarındaydı, 1875'e gelindiğinde yüzde 50'nin altına gerilemeye başladı (Barjot 1991). Kömür, 1950'lerin sonlarında, ithal petrol lider haline gelinceye dek Fransa'nın başat yakıtı olarak kaldı. Sömürge dönemi Amerikası'nda kömür madenciliği 1758'de Virginia'da başladı, on dokuzuncu yüzyıl başına gelindiğinde Pensilvanya, Ohio, Illinois ve Indiana kömür üreten eyaletler haline gelmişlerdi (Eavenson 1942). Bu yakıt 1843'e gelindiğinde toplam asli enerjinin sadece

yüzde 5'ini karşılıyordu, ama sonrasında kömür çıkarmanın hızla yükselişe geçmesi kömürün payını 1860'ların başında yüzde 20'ye çıkardı, 1884'te çıkarılan kömür ülkenin büyük yakacak odun tüketimine nazaran daha fazla enerji içeriyordu (Schurr ve Netschert 1960). 1880'de, Japonya tarihsel istatistiklerinin başlangıç tarihinde odun (ve ondan üretilen odun kömürü) ülkenin asli enerjisinin yüzde 85'ini temin ediyordu, ama 1901'e gelindiğinde yoğun modernleşme kömürün payını yüzde 50'nin üstüne çıkardı, 1917'ye gelindiğindeyse bu oran yüzde 77'yle zirveye tırmanmıştı (Smil 2010a).

Rusya İmparatorluğu, Kuzey Avrupa ve Sibirya'daki büyük boreal ormanıyla esasen oduncu bir toplumdur. Sovyet tarihsel istatistiklerine göre yakacak odun 1913 üretiminde asli enerjinin tamamının yüzde 20'sini temin ediyordu (TsSU 1977), ama bu rakam açıktır ki sadece ticari olarak üretilmiş yakıtı dikkate alıyordu, ki bu da Rusya'da evlerin içini ısıtmak için ihtiyaç duyulan enerjinin sadece bir bölümünü oluştuyordu: Küçük bir ev bile yılda en az 100 GJ'ye ihtiyaç duyardı. Benim en iyi tahminlerime göre odun 1913'e gelindiğinde bütün enerjinin yüzde 75'ini temin ediyordu, petrol ve kömür de ancak 1930'ların başında bütün asli enerjinin yarısından fazlasını temin etmeye başladı (Smil 2010a).

Fitokütleden kömüre geçişi en geç tamamlayan öncü ekonomi Çin oldu, burada geçiş süreci yirminci yüzyılda sonu gelmez krizler nedeniyle ertelenip durdu: Krizler 1911'de imparatorluk yönetiminin çöküşüyle başladı, Komünistler ile Kuomintang arasındaki uzatmalı iç savaş (1927-1936, 1945-1950) ve Japonya'yla savaş (1933-1945) ile devam etti, sonraları Mao'nun ülkeyi ekonomik olarak kötü yönettiği yıllar geldi, ki bu krizler arasında Mao'nun yarattığı, dünyanın en büyük kıtlığı olan Büyük Kıtlık (1958-1961) ile adına çılginca Kültür Devrimi (1966-1976) denilen kriz de vardı. Bunun sonucunda biyokütle yakıtları ancak 1965'te Çin'in asli enerjisinin yarısından fazlasını temin etmeye başladı, 1983'e gelindiğinde bu yakıtların payı yüzde 25'in altına, 2006'ya gelindiğinde yüzde 10'un altına gerilemişti (Smil 2010a).

Odun Kömüründen Kok Kömürüne

Pik (ya da dökme) demir eritme işleminde odun kömürünün yerini metalurjik kok kömürünün alması hiç kuşkusuz modern çağın en büyük teknik yenilikleriyle ilgilidir, zira iki temel değişikliği gerçekleştirmiş, ülkenin oduna bağımlılığını kesmiş (dolayısıyla ormanlık bölgelerde ya da yakınlarında

ocak yerlerine duyulan ihtiyaca son vermiş) ve ocak kapasitesinin çok daha fazlaşmasını, dolayısıyla yıllık üretimde hızlı bir artış olmasını mümkün kılmıştır. Ayrıca daha üstün metalurjik bir yakıt, odunun yerini almıştır. Kömürün pirolizi (yıkıcı damıtılması) –(düşük kül ve sülfür içeriğine sahip) bitümin kömürlerin yakılması– görünür yoğunluğu düşük ($0,8-1 \text{ g/cm}^3$) ama enerji yoğunluğu yüksek ($31-32 \text{ MJ/kg}$) neredeyse saf bir karbon matrisi üretir; ki bu karbon matrisi sıkıştırıldığında kömürden çok daha güçlüdür, dolayısıyla daha yüksek kapalı ocaklarda daha ağır demir cevheri ve kireçtaşı yüklemelerini destekleyebilir (Smil 2016).

Kok kömürü İngiltere’de 1640’ların başında malt kurutmakta kullanılıyordu zaten (kömür bu işe yaramıyordu, zira yakıldığında is ve sülfür oksit saçıyordu), ama kok kömürünün metalurjik kullanımı ancak 1709’da, Abraham Darby’nin (1678-1717) Coalbrookdale’de bu işin öncülüğünü yapmasıyla başladı. Kok kömürü çıkarma, üstün bir metalurjik yakıtı neredeyse sınırsız bir kaynak olarak sunuyordu, ama bu süreç başlarda mürşifçe ve maliyetliydi, kok kömürünün yaygın olarak benimsenmesi ancak 1750 sonrasında gerçekleşti (Harris 1988; King 2011). On sekizinci yüzyılın ilk yarısındaki demir ustaları hemen Darby’yi izlemediler, bunun nedeni büyük ölçüde yurt içi külçe demir üretimi İsveç’ten yapılan ithalatla yarıştığı için fiyatların gerilemiş olmasıydı. 1750’lerin ortalarında piyasa düzeldiğinde İngiliz demir ustaları kok kömürünün yakıt olarak kullanıldığı yeni ocaklar inşa etmeye başladılar, 1770’e gelindiğinde kok kömürü İngiliz demirinin yüzde 46’sını üretmek için kullanılıyordu (King 2005). Bu çığır açan değişiklik, kıtada olduğu kadar Birleşik Krallık’ta da hissedilen, odun kaynakları üzerindeki sürdürülemez baskıya son verdi (bkz. **Kutu 4.22**): Örneğin 1820’de Belçika’da ormanlık bölgenin yüzde 52’si metalurjik kömür üretmek için kullanılıyordu (Madureira 2012).

Amerika’daki durum on dokuzuncu yüzyıl başında bu kadar sıkıntılı değildi (bkz. **Kutu 4.23**), 1840’a gelindiğinde ABD’de pik demirin tamamı odun kömürüyle eritiliyordu, ama sonrasında sektörün genişlemesi önce antrasit, sonra kok kömürü yönünde hızlı bir değişikliği beraberinde getirdi, kok kömürü 1875’te baskın yakıt haline geldi. Kok kömürü kapalı kovan fırınlarda kuşaklar boyunca mürşifçe üretilmişti (Sexton 1897; Washlaski 2008). Radikal bir iyileşme ancak yan ürünlerden kok üreten fırınların benimsenmesiyle sağlandı: Bu ocaklarda karbon zengini gazlar yakıt olarak geri kazanılıyordu, kimyasallar (tar, benzol, toluol) hammadde, amonyum sülfat gübre olarak kullanılacaktı. Bunların kullanılmasına Avrupa’da

1881’de, Amerika’da 1895’te başladı, iyileştirilmiş ocak tasarımları, modern kok üretiminin başlıca temel direği olmayı sürdürdü (Hoffmann 1953; Mussatti 1998).

Kok kömürünün yakıt olarak kullanıldığı ilk dikeç ocaklar ancak aynı dönemin odun kömürü yakılan büyük yapıları kadar yüksek (yaklaşık 8 metre) ve hacimliydi (17 m³’ten küçük), ama 1810’a gelindiğinde kok kömürünün yakıt olarak kullanıldığı ocaklar genellikle yaklaşık 14 metre yüksekliğindeydi (70 m³’ten büyüktü). 1840 sonrasında önde gelen İngiliz metalurgılardan Lowthian Bell (1816-1904) büyük bir yeniden tasarım geliştirdi, on dokuzuncu yüzyıl sonuna gelindiğinde büyük dikeç ocaklar yaklaşık 25 metre yüksekliğindeydi ve iç hacimleri de yaklaşık 300 m³’tü (Bell 1884; Smil 2016). Üretkenliği çok daha yüksek daha büyük ocaklar (1900’e gelindiğinde odun kömürünün yakıldığı en iyi ocaklarda günde 10 tondan az, kok kömürünün yakıldığı ocaklarda günde 250 tondan fazla) küresel pik demir üretimini 1750’de sadece yaklaşık 800.000 ton iken 1900’de yaklaşık 30 Mt’ye çıkardı ve böylece 1860 sonrasında modern çelik sanayiinin gelişmesinin temellerini attı ve sanayileşmenin kilit metalini sağladı (Smil 2016).

Buhar Makineleri

Buhar makinesi, ondan 800 yılı aşkın bir süre önce ortaya çıkmış yel değirmenlerinin benimsenmesinden sonra başarıyla kullanılan ilk yeni asli itici güç oldu. Bu makine kömürün kimyasal enerjisini mekanik enerjiye çeviren ilk pratik, ekonomik ve güvenilir mekanizmaydı, güneş ışınlarının neredeyse anında dönüşmesi yerine enerjisini fosil yakıtlardan alan ilk cansız asli itici güçtü. On sekizinci yüzyıl başındaki ilk buhar makineleri, ancak pompalamaya uygun karşılığı veren hareketi gerçekleştirebiliyordu, ama 1800 öncesinde daha kullanışlı dönüş hareketini yapan tasarımlar ortaya çıktı (Dickinson 1939; Jones 1973). Hiç kuşku yok ki buhar makinesinin benimsenmesi küresel sanayileşme, kentleşme ve ulaştırma için derin bir önem taşıyordu ve bu etkiler hakkında çok şey yazılmıştır (von Tunzelmann 1978; Hunter 1979; Rosen 2012).

Öte yandan buhar makinelerinin ticarileşmesi ve yaygın olarak benimsenmesi yavaş yavaş ilerledi, bir asırdan uzun sürdü, hatta hızlı bir yayılmanın görüldüğü yıllarda, 1820 sonrasında (dördüncü bölümde belirttiğimiz üzere) su değirmenleri ve türbinlerle rekabet etmeleri gerekti. Buhar makinelerinin kullanılması, hayvansal emeğin birçok biçimini bertaraf et-

mişse de (madenlerden su pompalama, çok sayıda imalat işi) insan emeğine ve hayvanların yük çekmesine mutlak bağımlılık on dokuzuncu yüzyılın tamamı boyunca artmaya devam etti. Bu gerçeklikler, buhar makinelerinin benimsenmesini genellikle, ama hatalı olarak Sanayi Devrimi diye bilinen süreçle bir tutan, yaygın kabul gören anlayışın yeniden incelenmesine yol açmıştır.

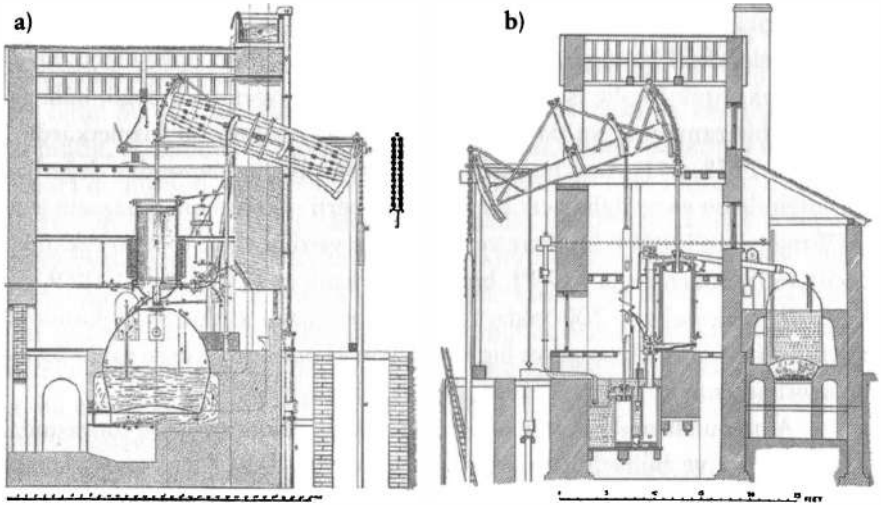
Bu dönemin, ağırlığını hissettiren bir algıyla çığır açan bir ekonomik ve sosyal değişim dönemi olarak görülmesi (Ashton 1948; Landes 1969; Mokyr 2009) onu çok daha sınırlı, hatta yerelleşmiş bir olgu olarak gören, teknik değişikliklerin sadece bazı sektörleri (pamuk, demir yapımı, ulaştırma) on dokuzuncu yüzyıl ortasına dek modern öncesi durgunluk halinde bıraktığını düşünen kişilerce sorgulanmıştır (Crafts ve Harley 1992). Bazı eleştirmenler daha ileri gitmiş, değişikliğin ekonominin tamamına nispeten çok küçük olduğunu, öyle ki Sanayi Devrimi adının yanlış bir isim olduğunu (Cameron 1982), hatta bir İngiliz sanayi devrimi düşüncesinin bir mit olduğunu savunmuşlardır (Fores 1981).

Daha özel olarak, Britanya verileri on dokuzuncu yüzyıldaki ekonomik büyümeyi esasen buharla ilişkilendirmenin hatalı bir düşünceyle varılmış bir sonuç olduğunu gösterir (Crafts ve Mills 2004). Buhar makineleri bir yana “Britanya ekonomisi 1760’ın üstünden geçen 90 yılın ardından büyük ölçüde geleneksel kalmıştı,” (Sullivan 1990, 360) ve “on dokuzuncu yüzyıl ortasındaki tipik İngiliz işçi bir fabrikada makine operatörü değil, hâlâ geleneksel bir zanaatkâr ya da işçi ya da ev içinde çalışan bir hizmetkârdı..” (Musson 1978, 141) Ama bu süreç genel enerji tüketimi açısından değerlendirildiğinde bu yargı daha açık bir hal alır: Enerji tüketiminin muazzam artışı (Wrigley’nin [2010] İngiltere ve Galler için verdiği yıllık toplam rakamlar 1650-1659 dönemi için 117 PJ, bir asır sonrası için 231 PJ, 1850-1859 için 1,83 EJ, yani kabaca 200 yılda 15 katlık bir artış) katlanarak ekonomik büyümeyi mümkün kılmıştı ve hiç kuşku yok ki buhar makinesi sanayileşme ile kentleşmenin kilit önemdeki mekanik itici gücüydü.

Ama buhar makinesinin etkisi tam anlamıyla ancak 1840 sonrasında, demir yolları ve buharlı gemilerin hızlı inşasıyla, daha fazla sayıda buhar makinesinin imalathanelere merkezi (tek tek makinelere kayışlarla aktarılan) bir kinetik enerji üreticisi olarak kurulmasıyla kendisini hissettirdi. Buhar makinesinin pratik evrimi Denis Papin’in (1647-1712) 1690’da yaptığı küçük bir model üzerindeki deneyleriyle başladı. Papin’in oyuncağa benzer makinesinden kısa bir süre sonra Thomas Savery’nin (1650-1715) küçük

(yaklaşık 750 W ya da bir beygir gücü) pistonsuz çalışan buhar makinelı pompası çıktı. 1712'ye gelindiğinde Newcomen (1664-1729) maden pom-palarını çalıştıracak 3,75 kW gücünde bir makine yapmıştı. Atmosfer bas-sıncında çalışan bu makine, buharı pistonun alt tarafında sıkıştırdığı için, verimliliği çok düşüktü, en iyi ihtimalle yüzde 0,7'ydi (Şekil 5.2). 1770'e gelindiğinde, asli itici güçlerin kuvvetlerinin karşılaştırılmasıyla ilgili çalış-masından dördüncü bölümde bahsettiğimiz John Smeaton makinenin tasarı-mını geliştirmiş, düşük verimliliği iki katına çıkarmıştı.

Newcomen'ın makineleri 1750 sonrasında İngiliz madenlerinde yay-gınlaşmaya başladı, ama kötü performansları ancak bulundukları yerde yakıt alabiliyorlarsa tolere edilebiliyordu, bu da yakıt naklinin gerektiği yerlerde bu makineleri kullanışlı olmaktan çıkarıyordu. James Watt (1736-1819) meşhur yeniden tasarımının amacını 1769 tarihli patentinin başlığında yakalamıştı: *A New Invented Method of Lessening the Consumption of Steam and Fuel in Fire Engines* (Yanmalı Motorlarda Buhar ve Yakıt Tüketimini Azaltmak Üzere İcat Edilmiş Yeni Bir Yöntem) (Watt 1855 [1769]). Bu patent 25 Nisan 1769'da verildi, Watt'ın sistematik iyileştirmeler sıralaması yeni makinenin öncüllerinden hangi açılardan farklı olduğunu açıkça gösterir (Kutu 5.3).



Şekil 5.2 Newcomen ve Watt'ın buhar motorları. a) John Smeaton'ın 1772'de yaptığı Newcomen'in motorunda kazan silindirin altına yerleştirilmişti ve buhar sağ alt tarafa inen borudan silindire su enjekte ederek sıkıştırılmıştı. b) Watt'ın 1788'de yaptığı motorda kazan, ayrıca kapalı bir yere yerleştirilmiş, silindir yalıtıcı bir buhar çeketiyle sarılmış ve ayrı bir sıkıştırıcı vakumu sağlayan bir hava pompasına bağlanmıştı. Farey'den tıpkıbasım (1827).

Kutu 5.3**Watt'ın 1769 tarihli patenti**

Watt iyileştirilmiş tasarımını şöyle açıklamıştı:

Benim ateşli motorlarda buhar tüketimini ve buna bağlı olarak yakıt tüketimini azaltma yöntemim şu ilkelerden oluşur: Birincisi, içindeki buhar gücünün motoru çalıştırmak için kullanılacağı, sıradan ateşli motorlarda silindir denen, benim buhar kazanı dediğim kazan motorun çalıştığı süre boyunca içine giren buhar kadar sıcak tutulmalıdır...

İkincisi tamamen ya da kısmen buharın yoğunlaştırılmasıyla çalıştırılacak motorlarda, buhar, buhar kazanları ya da silindirlere farklı kazanlarda sıkıştırılacaktır, gerçi zaman zaman bunlarla arasında iletişim olacaktır. Ben bu kazanlara sıkıştırıcı diyorum, motorlar çalışırken bu sıkıştırıcıların su ya da başka soğuk cisimlerin uygulanması sayesinde en azından motorların çevresindeki hava kadar soğuk tutulması gerekir.

Üçüncüsü sıkıştırıcının soğuğuyla sıkışmayan ve motorun çalışmasını engelleyebilecek hava ya da elastik buharlar motorların kendilerinin çalıştırdığı ya da başka türlü çalışan pompalarla buhar kazanlarından ya da sıkıştırıcılardan çekilmelidir (Watt 1855 [1769], 2).

Açıktır ki ayrı bir sıkıştırıcı en önemli yenilikti (Şekil 5.2). Watt daha sonra çift hareketli bir makine (bu makinede buhar pistonu hem yukarı hem aşağı doğru hareket ettiriyordu) ile yüklerin değişmesine rağmen hızları sabit tutacak santrifüjlü bir yönlendirici çıkarmıştı. Watt ile finansal ortağı Matthew Boulton'a (1728-1809) inceden inceye modern bir düzenleme çerçevesinde teslim ettikleri bir makine için değil, bu makinenin yaygın olan Newcomen makinesiyle kıyaslanmasına dayalı olarak iyileştirilmiş performansı için ödeme yapıldı. Kömür madenciliği ve buhar makineleri birbirlerinin gelişimini güçlendirmiştir. Daha derin madenlerden su pompalama ihtiyacı buhar makinelerinin geliştirilmesinde kilit bir gerekçe oldu. Daha ucuz yakıtın bulunabilmesi, buhar makinelerinin yaygınlaşmasına, böylece madenciliğin daha da genişlemesine yol açtı. Buhar makineleri çok geçmeden döndürme ve havalandırma mekanizmalarına da güç verir oldu.

Watt'ın iyileştirdiği buhar makinesi neredeyse hemen ticari başarı kazandı, bu makinenin imalat ve nakliyatta kömür madenciliğinin ötesine geçen bir etkisi olduğunu görmek kolaydır (Thurston 1878; Dalby 1920; von Tunzelmann 1978). Aynı zamanda on sekizinci yüzyılda arka planda sanayileşmeyle karşılaştırılarak tartıldığında da bir başarıydı: İyileştirilmiş makinelerin toplam kullanımı, modern kitlesel üretimle karşılaştırıldığında küçük boyutlardaydı. 1800'e gelindiğinde, orijinal patentin (1775 tarihli Buhar Makinesi Yasası'na göre) 25 yıllık uzatma süresi dolduğunda Watt ile

Boulton'un sahip olduğu şirket yaklaşık 500 makine tamamlamıştı, bunların yüzde 40'ı su pompalamak içindi. Makinelerin 20 kW'lık ortalama kapasitesi dönemin tipik su değirmenlerinin ortalamasından beş kat ve yel değirmenlerinin kapasitesinden yaklaşık üç kat daha fazlaydı.

Watt'ın en büyük birimleri (100 kW'nin hemen üstüne çıkıyordu) mevcut en güçlü su değirmenlerine denkti. Ama su değirmenlerinin yerleşimi esnek değildi, buhar makineleri ise karşılaştırma kaldırmayacak kadar büyük bir özgürlükle yerleştirilebiliyor, özellikle de limanların yakınına ya da kanal boylarına kurulabiliyordu; gemiler ya da teknelerle ucuz ulaştırma gerekli yakıtı getirebiliyordu. Watt'ın icatları bu makinenin sanayi başarısını haber verse de patentinin uzatılması daha başka yenilikler yapılmasını fiilen engelledi. Güvenliği dikkate alan Watt yüksek basınçlı buharı kullanmaya gönülsüz müydü yoksa uzatma süresi devam ederken benzer patentleri mi önlemeye çalışıyordu? Watt ile Boulton buhar gücüne dayalı nakliyatı geliştirmeye yönelik girişimlerde bulunmamanın ötesinde makinelerini tesis eden başlıca isim olan William Murdoch'u (1754-1839) böyle bir makine geliştirmekten caydırdılar, Murdoch ısrar ettiğinde de Boulton onu patent başvurusunda bulunmamaya ikna etti (Kutu 5.4).

Kutu 5.4

Watt ve Boulton buharlı bir arabanın geliştirilmesini erteliyor

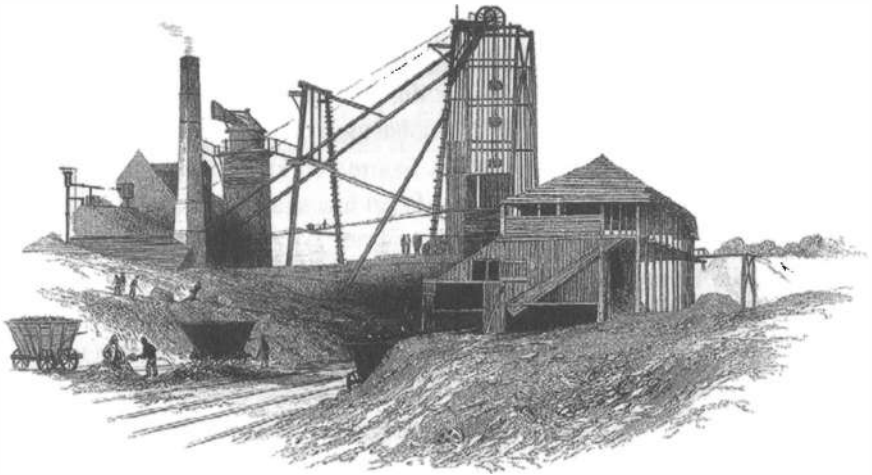
William Murdoch 1777'de, 23 yaşındayken Birmingham'a yaklaşık 500 km yürüyüp James Watt'ın buhar makinesi şirketinde işe girdi. Hem Watt hem de ortağı Matthew Boulton çok geçmeden onun kendileri için büyük bir değer olduğunu anladı. Boulton'un hünerle gerçekleştirdiği yeni makine kurulumları makinelerin verimli ve kârlı bir biçimde işlemesini sağladı. 1784'e gelindiğinde Murdoch küçük bir buharlı araba modeli yapmıştı, iki arka tekerleğin ortasında bir kazanın bulunduğu üç tekerlekli bir arabaydı bu. Bunu bir başka model izledi, Murdoch da sonunda buharlı arabasının patentini almaya karar verdi (Griffiths 1992).

Ama bunu yapmak için Londra'ya giderken Exeter'de karşısına Boulton çıktı, Boulton onu patent başvurusunda bulunmaksızın evine dönmeye ikna etti: Murdoch'un ısrarını bir rahatsızlık olarak görmüştü. Boulton Watt'a şunları yazmıştı:

Londra'ya adam bulmaya gittiğini söyledi, ama çok geçmeden oraya buharlı arabasıyla, onu göstermeye ve patent almaya gittiğini anladım. Mr W. Wilkn ona Sadler'ın söylediği şeyi söylemiş, kendisi de gazetede Simmington'ın şişirmelerini okumuş, bu da onun buhar makinesi yapma hevesini canlandırmış, onu sabırsızlandırmış. Ne var ki bastırıp sonraki günlerde aklını başına toplayıp Cornwall'a dönmeye kolayca ikna ettim, o da bugün öğleden sonra geldi... Ona rastlamamın bir şans olduğunu düşünüyorum, çünkü onun bu rahatsızlığını tedavi edebileceğime ya da kötülüğü iyiliğe çevirebileceğime ikna oldum. En azından Londra'ya yaptığı yolculuk sonucu doğabilecek belayı önleyebileceğim (Griffiths 1992, 161).

Ama herhalde bu da buhar gücüne dayalı ulaştırmanın gelecekteki gelişimi açısından bir fark yaratmadı, çünkü 1800’de yapılmış, tasavvur edilebilecek en iyi araba bile kabul edilemeyecek kadar ağırdı, ağır trafiği kaldıracak iyi döşenmiş yolların neredeyse yok denecek kadar az olmasının daha da az kabul edilebilir kıldığı bir yükü bu. Aracı yürütmenin yegâne pratik yolu raylar üstüne yerleştirmektir; ama o zaman bile, Watt’ın patentinin süresinin 1800’de dolması yoğun bir yenilik dönemine yol açmış olsa da fikrin akla gelmesiyle ticarileştirilmesi arasında elli-altmış yıl geçti. İlk temel ilerleme İngiltere’de 1804’te Richard Trevithick’in (1771-1833), ABD’de 1805’te Oliver Evans’ın (1755-1819) yaptığı yüksek basınç kazanları oldu. Diğer dönüm noktaları arasında 1827’de Jacob Perkins’in (1766-1849) çıkardığı doğru akımlı bir tasarım, George Henry Corliss’in 1849’da düzenleyici bir valf dişlisi icat etmesi, Fransızların 1870’lerin ortalarını takiben bileşik lokomotif motorlarını iyileştirmeleri yer alıyordu. Bir dizi temel motor tipi çok çeşitli uzmanlaşmış tasarımların doğmasını sağladı (Watkins 1967).

Buhar makinesinin en başta madenlerde (Şekil 5.3) pompalama ve hava akımı sağlama olan kullanım alanları çok geçmeden genişleyip geniş bir durağan ve hareketli uygulamayı kapsar hale geldi. Açık arayla en dikkat çekici kullanım alanı, sayılamayacak kadar çok fabrikada kayışla döndürmeydi. Bununla eş zamanlı olarak buharlı gemiler ve buharlı lokomotifler



Şekil 5.3 Hebburn Kömür Ocağı’nın C çukuru erken buhar makinesi çağına özgü tipik bir İngiliz kömür madeni. Madendeki buhar makinesi bacası olan bir binaya yerleştirilmişti ve havalandırma mekanizmasını çalıştırıyordu. Hair’den tıpkıbasım (1844).

geliştirildi. İlk buharlı gemiler 1780'lerde Fransa, ABD ve İskoçya'da yapıldı, ama ticari olarak başarılı ilk gemiler ancak 1802'de İngiltere'de (Patrick Miller'ın *Charlotte Dundas*'ı) ve Robert Fulton'ın *Clermont*'uyla birlikte 1807'de ABD'de ortaya çıktı.

İlk zamanlarda nehirlerde işleyen gemilerin hepsi de yandan çarklıydı (pruvada ya da gemi ortasında), deniz seyahatinde kullanılan tam donanımlı gemiler de öyleydi. Atlantik ilk kez *Royal William*'ın 1833'te yaptığı Quebec-Londra yolculuğu sırasında aşıldı (Fry 1896). Batıya doğru ilk koşu yandan çarklı gemiler *Sirius* ve *Great Western* arasında 1838'de yaşanan yarış oldu, aynı yıl John Ericsson ilk başarılı burgulu iticiyi kullandı. Daha büyük ve hızlı buharlı gemiler Kuzey Atlantik'teki en işlek yolcu ve kargo seferlerinde, daha sonra da Asya ve Avustralya'ya yapılan uzun seferlerde yavaş yavaş yelkenli gemilerin yerini almaya başladı. 1815 ile 1930 arasında Avrupa'yı terk eden 60 milyon göçmenin büyük bölümünü deniz aşırı diyarlara, en başta da Kuzey Amerika'ya taşıdılar (Baines 1991). Kömürün yakıt olarak kullanıldığı, okyanus aşan gemiler de ABD dış politikasının önemli enstrümanları haline geldiler (Shulman 2015).

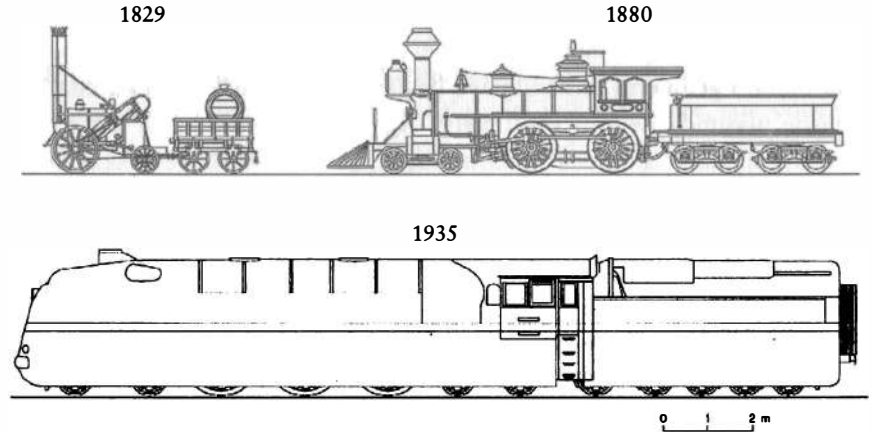
Buharlı taşımacılığın karada benimsenmesi de yavaş yavaş başladı, sonrasında demiryolları hızla yayıldı. Richard Trevithick'in 1804'te dökme demir raylar üzerinde giden bir makineyle yaptığı deneyin ardından birkaç özel demiryolu yapıldı. İlk kamusal demiryolu, Liverpool ile Manchester arasında 1830'da açıldı, treni George Stephenson'ın (1781-1848) *Rocket*'ı çekiyordu. Yeni tasarımların yayılması daha verimli ve hızlı makinelerin ortaya çıkmasını sağladı. 1900'e gelindiğinde en iyi lokomotif motorları, 1830'lardakinden beş kat daha yüksek basınçlarla işliyordu, verimlilikleri de yüzde 12'den fazlaydı (Dalby 1920). Saatte 100 km'yi aşan hızlar yaygın hale geldi, 1930'larda buharlı lokomotiflerin hızı saatte 200 km'ye yaklaştı, hatta bu hızı geride bıraktı (Şekil 5.4).

1830'da Liverpool ile Manchester arasında kurulan 56 km'lik şehirlerarası ilk bağlantıdan başlayarak İngiltere'de demiryollarının uzunluğu 1900'e gelindiğinde yaklaşık 30.000 km'yi buldu, Avrupa'da demiryollarının toplam uzunluğuyse yaklaşık 250.000 km'ydı. Başka yerlerde demiryollarının yayılmasının büyük bir bölümü on dokuzuncu yüzyılın son otuz yılında gerçekleşti: 1900'e gelindiğinde Rusya'da demiryolu ağı 53.000 km'yi bulmuştu (ama Pasifik'e uzanan trans-Sibirya demiryolu ancak 1917'de tamamlandı), ABD'deki sistem 190.000 km'den uzundu (kıtaya aşırı üç rota da dâhil olmak üzere),

(kalanın büyük bölümü Britanya yönetimindeki Hindistan'da olmak üzere) dünya çapında toplam ise 775.000 km idi (Williams 2006). Bunun sonucunda demiryollarının yaygınlaşması, on dokuzuncu yüzyılın ikinci yarısında çeliğe görülmemiş bir talep olmasının başlıca gerekçesi oldu.

Elbette ki birçok yeni sanayi piyasasında çok daha fazla miktarda metale ihtiyaç duyuluyordu: Çelik sanayii (yeni demir-çelik üretim tesislerine metal temin etmek için), yeni elektrik sanayii (kazanlar, buhar turbojeneratörleri, dönüştürücüler ve elektrik kabloları için), petrol, gaz çıkarma ve nakliyat sanayii (sondaj boruları, sondaj parçaları, kuyu kaplamaları, boru hatları ve depolama tankları için), gemi nakliyatında (yeni çelik tekneli gemiler), imalatla (yeni makineler, aletler ve parçalar), geleneksel tekstil ve gıda işleme sektörlerinde. Ama (önceden dövme demirden yapılan) raylar bütçeye uygun Bessemer çeliğinden yapılan, 1860'ların sonunda piyasaya çıkan en önemli nihai üründü (daha fazlası için bkz. altıncı bölüm) ve yüzyılın devamında da bu özelliğini korudu (Smil 2016).

Buhar motoru Watt'ın iyileştirmeler için aldığı patentten bir asır sonra zirveye tırmadı: 1880'lerin başında buhar motorunun yaygın olarak benimsenmesi modern sanayileşmenin enerji temelini atmıştı, böyle yoğunlaşmış bir gücün uygun fiyata elde edilebilir olması hem imalat verimliliğini,



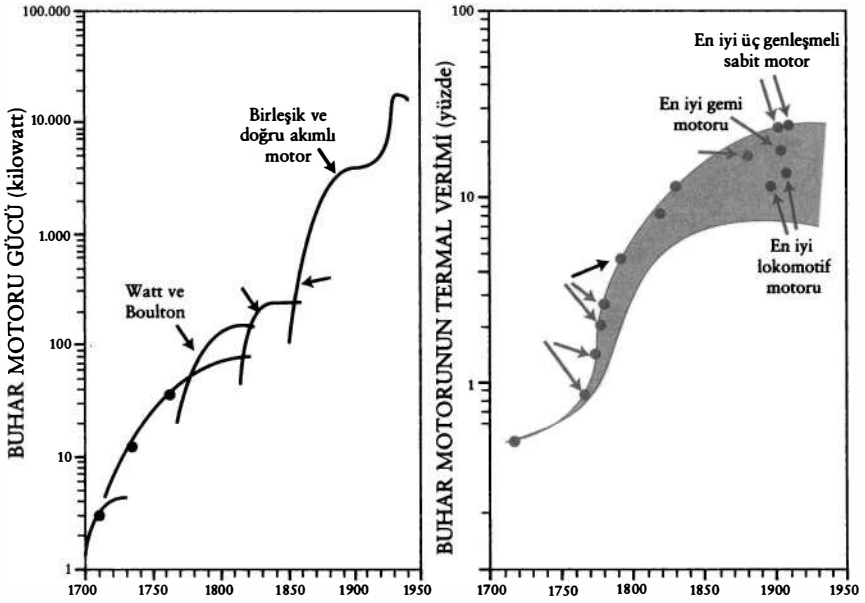
Şekil 5.4 Buharlı lokomotif devrinin dikkat çekici makineleri. İlk ticari makine olan, Stephenson'un 1829 tarihli Rocket'ti sonraki bütün tasarımlarda görülecek iki özellik getirmişti: her iki tarafta kısa bağlantı çubuklarıyla tekerlekleri hareket ettiren ayrı silindirlere ve verimli, çok tüplü bir kazan. Amerika'daki standart tasarımlar 1850'lerin ortalarından beri ABD demiryollarında ağırlığını hissettirmişti. Aerodinamik Alman Borsig tasarımı 1935'te 191,7 km/s hıza ulaşmıştı. Byrn (1900) ve Ellis (1983) kaynak alınmıştır.

hem uzun mesafeli kara ve deniz ulaşımını dönüştürdü. Buna karşılık bu değişiklikler yoğun bir kentleşmeye, yeni zenginlerin yükselmesine, uluslararası ticaretin büyümesine, ulusal liderlikte değişikliklere yol açtı. Birikimsel teknik ilerleme dikkat çekiciydi: 1890'larda tasarlanan en büyük makineler 1800'dekilerden 30 kat daha güçlüydü (3 MW'ye karşılık 100 kW), en iyi birimlerin verimliliği on kat daha iyiydi, yüzde 2,5'e karşılık yüzde 25 (Şekil 5.5). Büyük yakıt tasarruflarına ve daha az hava kirliliği anlamına gelen bu devasa performans kazanımı, ağırlıklı olarak çalıştırma basıncının yüz kat artırılmasından, basıncın 14 kPa'dan 1,4 MPa'ya çıkarılmasından kaynaklandı.

Bu ilerlemeler motorun dayanıklılığı ve sağlamlığı sayesinde imalat, inşaat ve ulaştırmada birçok alanda kullanmaya uygun olmasıyla birleşince onu on dokuzuncu yüzyıl sanayileşmesinin cansız asli itici gücüne çevirdi. Buhar makinesinin durağan kullanım alanları, önceden cansız asli itici güçlerin, su çarkları ya da yel değirmenlerinin gerçekleştirdiği işlerden (su pompalama, odun kesme ya da tahıl öğütme gibi) genişleyen fabrikalardaki yeni işlere (sondaj, döndürme ya da cilalama makinelerini çalıştıran kayışlara güç vermek) uzanıyordu; yapılan en büyük buhar makinelerinin bazıları 1880'ler ve 1890'larda ilk elektrik üreten istasyonlarda dinamoları çevirmekte kullanıldı (Smil 2005).

Buhar motorunun hareketli kullanım alanları (yaygın abartılı bir ifadeyle değil, doğru bir değerlendirmeye) demiryollarının hızla genişlemesi ve yeni buharlı gemilerin kullanılmaya başlamasıyla birlikte hem karada hem denizde ulaşımında devrim yaratmıştır. Ağır işleri kolaylaştıran diğer hareketli uygulamalar arasında buharlı vinçler, şahmerdanlar ve ekskavatörler yer alıyordu (ilk buharlı küreğin patenti 1839'da alınmıştı). 100 tane büyük Bucyrus ve Marion buharlı kürek kullanılılmıyaydı Panama Kanalı bu kadar hızlı tamamlanamazdı (1904-1914) (Mills 1913; Brodhead 2012); buharlı makineler kablolu pulluklarla birlikte Amerika tarlalarına bile girdi.

Gelgelelim buhar makineleri kendi başarılarının kurbanı oldu: Tipik verimlilikleri artar, en yüksek kapasiteleri görülmemiş seviyelere çıkarken (geleneksel asli itici güçlerin kerte kerte üstüne) yapabileceklerinden fazlası talep edilmeye başladığı için kendi sınırlarıyla karşı karşıya kaldılar (Smil 2005). Bir yüzyıldan uzun bir süre boyunca devam eden yeniliklerinden sonra bile en fazla kullanılan buhar makineleri hâlâ son derece verimsizdi: 1900'e gelindiğinde tipik buhar lokomotifi kazanına atılan kömürün yüzde 92'sini israf ediyordu. Ayrıca hâlâ ağırlardı, bu da kütlelerini desteklemenin



Şekil 5.5 En iyi buhar motorlarının gücünü artırmak ve verimliliğini iyileştirmek, 1700-1930. Dickinson (1939) ve von Tunzelmann'daki (1978) verilerden derlenmiştir.

kolay olduğu su ve raylar dışında hareket halindeki kullanımlarını sınırlıyordu (Kutu 5.5).

Buhar makinelerinin en yüksek verimliliğe, en yüksek güce, en düşük kütle/güç oranına ulaşmaları, hakimiyetlerinin daha fazla hissedilmesine zemin hazırlayan kazanımlar değildi: Etkileyici iyileştirmelere, son dönemde sanayide, demiryollarında, su yoluyla ulaştırmada son dönemde her yerde rastlanıyor olsa da, on dokuzuncu yüzyılın başlıca aslı itici gücü yirminci yüzyılın öncü aslı itici gücü olmaya devam edemezdi. Bu rol ikiye ayrıldı; buhar türbinleri elektrik üretiminde en güçlü aslı iticilere duyulan talebi hızla karşılarken, son olarak içten yanmalı motorlar (önce 1880'lerden başlayarak benzinin yakıt olarak kullanıldığı makineler, ardından dizel motorları) karayoluyla nakliyatın enerjisini sağlayacak kadar hafif, güçlü ve bütçeye uygun bir aslı itici güç haline geldi. Ham petrolden rafine edilen ucuz sıvı yakıtların bulunabilirliği, içten yanmalı motorların yükselişini mümkün kıldı: Bu yakıtların enerji yoğunlukları kömürünkünden fazlaydı, daha temiz yakılıyorlardı, taşınıp depolanmaları daha kolaydı, onları ulaştırmada en iyi seçenek haline getiren bir bileşimdi bu.

Kutu 5.5

Buhar makinelerinin kütle/güç oranları ve bir *Megateriyum*

750 kg gelen ve bir beygir gücüne (745 W) sahip orta ağırlıkta bir atın kütle/güç oranı neredeyse kesin olarak 1.000 g/W olacaktır, 80 W gücüyle sürekli çalışan 80 kg'lık bir adamınki de öyle. On sekizinci yüzyıldaki ilk büyük buhar makineleri son derece büyüktü, kütle/güç oranları (600-700 g/W) insanlar ve yük hayvanlarınınki kadar yüksekti. 1800'e gelindiğinde bu oran yaklaşık 500 g/W'ye gerilemişti, 1900'e gelindiğinde de en iyi buharlı lokomotif motorları sadece 60 g/W ağırlığındaydı. Ama bu, birbirinden çok farklı, ama temel önemde iki uygulama için hâlâ fazlasıyla ağırdı: Karada giden araçları çalıştırmak ve yeni elektrik üretme istasyonlarındaki büyük dinamoları döndürmek.

1894'te Paris-Bordeaux yarışını kazanan bir otomobile takılmış yeni bir Daimler-Maybach benzinli motorun kütle/güç oranı 30 g/W'den azdı (Beaumont 1902), kara yoluyla ulaştırmada buharlı motorlara şans tanınmıyordu. Charles Parsons'ın küçük buhar türbinlerinin ilk ticari tasarımlarında -1891'de yapılmış 100 kW'lık bir birim- bu oran sadece 40 g/W'ydı, Birinci Dünya Savaşı öncesinde 10 g/W'nin altına düştü; bu türbinlerin verimlilikleri de yüzde 25'i aştı, en iyi buhar motorlarının yüzde 11-17'lik performansının fazlasıyla üstündeydi (Smil 2005). Sonuçta 1902'de New York'ta Edison'un fabrikasına kurulan 16 tane büyük Westinghouse-Corliss buhar motorları çoktan modası geçmiş makinelerdi, ama bundan üç yıl sonra Londra Belediyesi Tramvayı Greenwich İstasyonu katedral benzeri bir mekâna 3,5 MW'lık bileşik buhar motorlarının ilki olan "bir motor dünyası megateriyumu" kurdu (Dickinson 1939, 152). Greenwich'teki büyük makineler geniş oldukları kadar yüksekti (14,5 m), Parsons'ın aynı güçteki jeneratörüyse ancak 3,35 metre genişliğinde, 4,45 m yüksekliğindeydi.

Petrol ve İçten Yanmalı Motorlar

Geniş ölçekli ham petrol çıkarma ve kullanma faaliyetlerinin başlangıcı on dokuzuncu yüzyılın son yirmi-otuz yılında yoğunlaşmıştır. Elbette ki hidrokarbonlar (ham petroler ve doğal gazlar) sızıntılar, bitümen havuzları, özellikle Ortadoğu'da (en fazla da Kuzey Irak'ta) sık rastlanan, ama başka yerlerde de bulunan "yanan sütunlar" sayesinde binlerce yıldır gayet iyi biliniyordu. George Washington'ın vasiyetine iliştilen Mülkiyet Takvimi Batı Virginia'da Kanawha Nehri'nde bulunan yanan bir kaynağı tarif eder:

Yaklaşık 60 hektarı ayrı bir parça olan arazi, General Andrew Lewis ve benim tarafımdan, gayet yanıcı nitelikte olup alkol gibi serbestçe yanan, söndürülmesi de bir o kadar güç olan bir bitümen kaynağı içerdiği gerekçesiyle alındı (Upham 1851, 385).

Ama antik devirlerde hidrokarbonların kullanımı neredeyse yalnızca yapı malzemeleri ya da koruyucu kaplamalarla sınırlıydı. Roma İmparatorluğu'nun son dönemlerinde Konstantinopol'deki *thermae*'nin ısıtılması dâhil

yakılmak için kullanıldıkları enderdi (Forbes 1964). Dikkat çekici bir istisna Çinlilerin denize kıyısı olmayan Sichuan eyaletinde tuzlu suyu buharlaştırmak için doğalgaz yakmalarıdır (Adshead 1992). En azından Han hanedanlığının başlangıcından (MÖ 200) beri kullanılan bu süreç Çinlilerin darbeleri sonradan icat etmesiyle mümkün olmuştu (Needham 1964). Bambu vinçlere asılan uzun bambu halatlara bağlanmış ağır demir parçalar bir kaldıraç üstünde zıplayan, sayıları iki ile altı arasında değişen adamlar tarafından ritmik olarak kaldırılıyordu. Kayıtlara geçen en derin kuyular Han hanedanlığı sırasında sadece 10 metre ile başlamış, onuncu yüzyılda 150 metre ulaşmış, 1835’de Xinhai kuyusunda 1 kilometreyle en derin haline ulaşmıştı (Vogel 1993). Bambu borularla dağıtılan doğalgaz, devasa dökme demir kazanlarda tuzlu suyu buharlaştırmakta kullanılıyordu.

Çinlilerin bu uygulaması münferit bir uygulama olarak kaldı, dünya çapında hidrokarbon çağı ancak iki bin yıl sonra başladı. Kuzey Amerika’da on sekizinci yüzyıl sonlarında Batı Pensilvanya’da doğal sızıntılardan petrol toplanıyor ve tıbbi “Seneca yağı” diye satılıyordu, Fransa’da Alsace’ta Merkwiler-Pechelbronn yakınlarında petrollü kumlar 1745’ten beri kullanılmış, ilk rafineri burada 1857’de kurulmuştu (Walther 2007). Ana sanayi öncesi dünyada ham petrol toplamanın uzun bir tarihinin olduğu bir tek yer vardı, bugünkü Azerbaycan’da, Hazar Denizi’nde Bakü’nün Apşeron Yarımadası.

Bu bölgedeki petrol havuzları ve kuyuları Ortaçağ kaynaklarında gayet iyi betimlenmiştir, 1593 tarihli bir yazıtta Balakhani’de elle kazılmış 35 metre derinliğinde bir kuyudan bahsedilir (Mir-Babaev 2004). 1806’ya gelindiğinde Çarlık Rusyası bölgenin kontrolünü ele geçirdiğinde Apşeron Yarımadası’nda birçok sığ kuyu bulunuyor, buralardan toplanan hafif petrol damıtılarak yerel aydınlatma ve ahşap varillerde develerle (deri heybelerde) ihraç edilmek üzere kerosen üretiliyordu. Dünyanın ilk ticari petrol damıtma fabrikası 1837’de Ruslar tarafından Balakhani’de kuruldu, Ruslar 1846’da Bibi-Heybat’ta dünyanın keşif amaçlı (21 metre derinliğindeki) ilk petrol kuyusunu açtılar ve dünyanın bugün hâlâ üretim yapılan devasa petrol yataklarından birinin sömürüsü böylece başlamış oldu.

Batı’da petrol sanayiinin tarihini konu alan eserlerde Bakü’deki bu gelişmeler ya es geçilir ya da ABD’de Pensilvanya’da petrol sanayiinin başlangıcı anlatıldıktan sonra bunlara değinilir. Amerika’da petrol arayışının gerisinde, gemilerde ispermeçet balinalarından elde edilen ve lambalarda yakılan pahalı balina yağının yerini alacak bir yakıt bulma gereksinimi vardı

(Brantly 1971). Amerikalılar dünyanın en büyük balina avı filosuna sahipti (toplam gemi sayısı 1846'da 700'ü aşmıştı); 1840'ların başında gemiler her yıl New England limanlarına 160.000 varil ispermeçet yağı getiriyordu (Starbuck 1878 – Francis 1990).

Ama Kuzey Amerika'daki ilk kuyu 1858'de Kanada'da Charles Tripp ve James Miller Williams tarafından, Güneybatı Ontario'da Lambton County'de Black Creek yakınlarında elle açıldı, böylece dünyanın ilk petrol patlaması yaşandı ve bu adacığa Oil Springs (Petrol Kaynakları) adı verildi (Bott 2004). Petrol üretimiyle ilgili bütün tarihlerde betimlendiği üzere, kazılmak yerine sondajla açılan ilk meşhur kuyu Pennsylvania Rock Oil Company'yi kuran (Dickey 1959) George Henry Bissell'in işe aldığı eski bir tren kondüktörü olan Edwin Drake'in (1819-1880) gözetiminde tamamlandı. Bu kuyunun yeri Pensilvanya'da Titusville yakınlarında Oil Creek'te bulunan bir petrol sızıntısıydı; sondajcılar 27 Ağustos 1859'da 21 metre derinlikte petrole rastladılar; bu tarih genellikle modern petrol çağıının başlangıcı olarak görülür. Kuyu açma işi küçük bir buhar makinesinin güç verdiği darbeleri sondajla halledilmişti.

1860'larda üç ülkede (ABD, Kanada ve Rusya) yeni, büyüyen petrol sanayileri bulunuyordu. Kanadalıların üretimi, 1862'de Oil Springs'te dünyanın ilk fışkıran kuyusunun bulunmasıyla ve 1865'te Petrolea yakınlarında yeni keşifler yapılmasıyla birlikte geçici bir artış gösterdi, ama yüzyılın sonu gelmeden epey önce Kanada'nın üretimi ihmal edilebilir düzeye indi ve bu ülke ancak İkinci Dünya Savaşı sonrasında Alberta'da devasa petrol yataklarının keşfedilmesiyle birlikte önde gelen petrol üreticileri arasına yeniden katıldı. Ama tersine Amerika'nın üretimi, önce Appalachia havzasında bulunan çok sayıda küçük yatak (New York'tan başlayıp Pensilvanya üzerinden Batı Virginia'ya), sonra da 1865'ten itibaren California'daki yataklar sayesinde artmaya devam etti. Los Angeles havzasında petrol çıkarma çalışmaları 1880'de, San Joaquin havzasında 1891'de (devasa Midway-Sunset ve Kern Nehri havzalarında bir asrı aşkın bir süre sonra hâlâ üretim yapılmaktadır), Santa Barbara County'de 1890 sonrasında başladı (ahşap mendireklerden sondaj yapılarak denizde açılan ilk kuyular da burada açılan kuyular arasında yer alıyordu).

Kansas petrol üreten eyaletler arasına 1892'de, Oklahoma 1897'de katıldı, 1901'de Anthony Francis Lukas muhteşem bir keşifte bulunarak Güney Teksas'ta Beaumont yakınlarında Spindletop petrol yatağını ortaya çıkardı, 10 Ocak 1901'de keşfedilen petrol fışkırtan kuyu günde 100.000 varil

petrol ürettiyordu (Linsley, Rienstra ve Stiles 2002; Şekil 5.6). Doğmakta olan Rus petrol sanayiine bol miktarda yabancı yatırım geldi, bunların başında Ludwig ve Robert Nobel'in 1875'te kurdukları Nobel Kardeşler Petrol Şirketi'nin ve Rothschild kardeşlerin 1883'te kurdukları Hazar ve Karadeniz Petrol Sanayi ve Ticareti Şirketi'nin yaptığı yatırımlar geliyordu. 1890'a gelindiğinde Rusya'nın petrol biçiminde ürettiği enerji kömür biçiminde ürettiği enerjiden fazlaydı, 1899'da Güney Teksas'ta petrolün keşfedilmesi öncesinde Rusya kısa bir süreliğine dünyanın en büyük ham petrol üreticisi oldu, yılda 9 milyon tondan biraz daha fazla petrol ürettiyordu (Samedov 1988). Bu yakıtın büyük bölümü yabancı yatırımcılar tarafından ihraç ediliyordu. Bakü üretimi 1900 sonrasında gerilemeye başladı, 1913'e gelindiğinde Rusya'nın kömür tüketimi petrol tüketiminin iki katından fazlaydı. 1900 öncesindeki diğer ciddi petrol keşifleri Romanya, Endonezya (Sumatra'da 1883) ve Burma'da (üretim 1887'de başlamıştır) yapılmıştır. Meksika petrol üreticileri arasına 1901'de katılmıştır; 1908'de İran'da Mescid-i Süleyman'da Ortadoğu'daki ilk büyük petrol keşfi yapılmıştır; Trinidad'da petrol ilk kez 1913'te üretilmiş, Venezuela'da Maracaibo Gölü sahilindeki dev Mene Grande yatağında üretim 1914'te başlamıştır.

Bu keşiflerin çoğu, hem ham petrol hem onunla bağlantılı doğal gaz içeren hidrokarbon yataklarıydı, ama doğalgaz hidrokarbon sanayiinin ilk yirmi-otuz yılında nadiren kullanılmıştır, çünkü kompresörler ve çelik borular olmaksızın doğalgaz uzun mesafelerde taşınmıyor, sadece delik açılıyor-



Şekil 5.6 Teksas'ta Beaumont yakınlarında Spindletop kuyusundan petrol fışkırıyor, Ocak 1901 (Corbis).

du. Oysa tersine ham petrolden rafine edilen sıvı yakıtların (benzin, kerosen ve fuel-oiller) yüksek enerji yoğunluğu ve kolay taşınabilir olmaları, onları ulaştırma konusunda üstün enerji kaynağı haline getiriyordu; içten yanmalı motorun icat edilmesi ve hızla benimsenmesi de bu yakıtların kullanımı için dev bir yeni piyasa açtı.

Ham petrol çıkarmanın amacı, aydınlatma için bütçeye daha uygun bir kaynak bulmaktır, ama bu faaliyetin ABD’de başlamasının üstünden 25 yıl geçmemişti ki ticari elektrik üretimi ve ampuller (bir sonraki kısma bakınız) daha üstün bir seçenek sunmaya başladı. 1860’larda petrol çıkarma işleri genişlemeye başladığında araçlara enerji verme yetisine sahip ticari içten yanmalı motorlar yoktu, ama yine 25 yıl içinde, iki Alman mühendis ilk pratik otomobil motorlarını yaptı ve 130 yılı aşkın bir süre sonra küresel çapta zirveye tırmanacak yeni bir yakıt talebi yarattı.

İçten yanmalı motorun, silindir içinde yakıt yakan yeni bir asli itici gücün geliştirilmesi çok hızlı bir ilerleme gösterdi. Ticari kullanımın ilk kuşağında, 1886 ile 1905 arasında mükemmelleştirilen tasarımlar yirminci yüzyılın büyük bölümünde temelde hiç değişmeksizin kaldı (gerçi epey iyileştirildiler) (Smil 2005). Elli-altmış yıl süren başarısız denemeler ve terk edilmiş tasarımlar sonrasında, ticari olarak başarılı ilk içten yanmalı motorun patentini Jean Joseph Etienne Lenoir (1822-1900) aldı. Ama Lenoir’ın motoru herhangi bir hareketli kullanıma hiçbir şekilde uygun değildi: Bir elektrik kıvılcımıyla tutuşturulan sıkışmamış bir aydınlatıcı gaz ve hava karışımını yakan, çift eylemli yatay bir makineydi ve verimliliği de sadece yüzde 4’tü (Smil 2005).

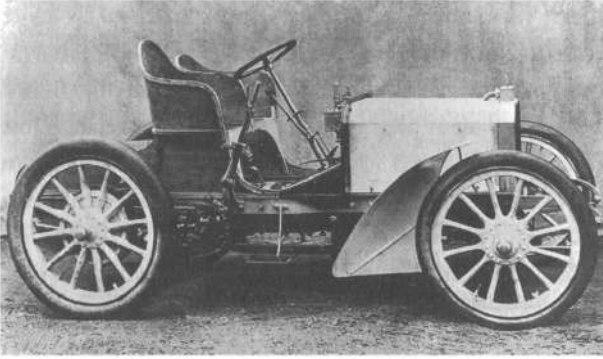
1862 yılında Alphonse Eugene Beau (Beau de Rochas, 1815-1913) dört vuruşlu bir motorun işleyişini kavramsallaştırdı, ama ancak 15 yıl sonra Nicolaus August Otto (1832-1891) böyle bir makinenin patentini, 1877’de aldı ve sonrasında buhar makinesi alacak maddi gücü olmayan küçük atölyelere yaklaşık 50.000 adet sattı (makinenin gücü ortalama 6 kW idi, sıkıştırma oranıysa sadece 2,6’ydı) (Clerk 1909). Yakıtı kömür gazı olan bu yavaş makine ulaştırmada asli bir itici güç olarak iş göremiyordu. Böyle bir makine, Otto’nun şirketinin eski bir çalışanı olan Gottlieb Daimler (1834-1900) ile Wilhelm Maybach (1846-1929) tarafından, Stuttgart’taki atölyelerinde benzin yakmak üzere tasarlandı (Walz ve Niemann 1997). Benzinin enerji yoğunluğu 33 MJ/L’dir (Otto’nun kullandığı şehir gazının yaklaşık 1.600 katıdır) ve parlama noktası da çok düşüktür (-40 derece), bu da makinelerin çalıştırılmasını çok kolaylaştırır.

Daimler ile Maybach ilk prototipi 1883'te yaptılar, Kasım 1885'te dünyanın ilk motorsikletini çalıştırmak için sonradan geliştirdikleri, havayla soğutulan bir versiyonu kullandılar ve Mart 1886'da da daha büyük (0,462 L, 820 W), suyla soğutulan 600 rpm'lik bir tasarım, ahşap tekerlekli bir arabaya yerleştirildi (Walz ve Niemann 1997). Aynı tarihlerde Stuttgart'ın yaklaşık 120 km kuzeyinde, Mannheim'da çalışan Karl Friedrich Benz (1844-1929) 1883'te iki zamanlı ilk benzinli motoru geliştirdi ve (Otto'nun patentinin süresinin dolmasından sonra) dört zamanlı bir motor da geliştirerek Ocak 1886'da patentini aldı. 500 W gücündeki, 250 rpm'lik bu motoru üç tekerlekli bir şasiye yerleştirdi ve bu aracı 3 Temmuz 1886'da halka gösterdi. Daimler'in yüksek devirli motoru, Benz'in elektrikli ateşlemesi ve Wilhelm Maybach'ın şamandıra beslemeli karbüratörü modern yol araçlarının kilit bileşenlerini oluşturdu, yeni yüzyıl başladığında, önde gelen bu Alman imalatçı esasen modern ilk otomobili tasarladı (Kutu 5.6, Şekil 5.7).

Kutu 5.6 İlk modern otomobil

Otomobil bir Alman icadıdır, ama atsız bir araba olmanın ötesine geçen ilk aracı Fransız bir mühendis olan Emile Levassor (1844-1897) tasarlamıştır, gerçi bu araçta en iyi Alman motoru bulunuyordu. Levassor, Daimler Motoren-Gesellschaft'ın (DMG) 1891'de yaptığı Alman V motorunu görmüş ve buna uyacak yeni bir şasi tasarlamıştı. 1890'larda DMG motorlara sahip otomobiller Avrupa'daki otomobil yarışlarını kazanmaya devam etti, ama şirketin tarih yazan otomobili kesinlikle ticari kökenliydi (Robson 1983; Adler 2006). İş adamı ve Avusturya-Macaristan'ın Monaco başkonsolosu Emil Jellinek (1853-1918) 2 Nisan 1900'de Daimler otomobillerinin satış aracılığını üstlendiğinde 36 otomobil sipariş etti, çok geçmeden de siparişini ikiye katladı. Bu kazanç getiren siparişe karşılık Avusturya-Macaristan İmparatorluğu, Fransa, Belçika ve ABD'de özel satış haklarını almak ve otomobillerin kızına verdiği isim olan Mercedes markasını taşımasını istedi.

Bu benzersiz sipariş için Maybach bir otomobil tasarladı, bu araba halefi olacak Mercedes-Benz şirketince ilk gerçek otomobil olarak tanımlanacak ve "bütün temel özelliklere sahip ilk modern otomobil" diye betimlenecekti (Flink 1988, 33). Mercedes 35 uzatılmış profiliyle bir yarış otomobili olarak düşünülmüştü; ağırlık merkezi çok aşağıdaydı ve toplam ağırlığı 1.200 kg'ydi. Otomobilin (zamanına göre) güçlü, iki karbüratörü ve mekanik olarak işleyen iç valfları olan dört silindirli bir motoru vardı (5,9 L, 26 kW veya 35 hp, 950 rpm). Maybach alüminyum bir blok kullanıp kütle/güç oranını 9 g/W'nin altına indirerek, yani 1895'te yapılmış en iyi DMG motorundan yüzde 70 daha düşük hale getirerek motorun ağırlığını sadece 230 kg'ye çekti. Bu yeni otomobil çok geçmeden dünya hız rekorunu kırdı (64,4 km/h), bunu 1903'te daha gösterişli bir gövdesi olan çok daha güçlü bir Mercedes 60 izledi, böylece aradan 125 yıl geçse de cazibesinden pek yitirmeyen bir marka ortaya çıkmış oldu.



Şekil 5.7 Wilhelm Maybach ve Paul Daimler'in 1901'de tasarladığı Mercedes 35. Fotoğraf Daimler'in web sitesinden alınmıştır.

DMG otomobilde en yüksek kaliteyi temsil ediyordu belki, ama başlarda genellikle zengin piyasaya odaklandı. Binek araç 1880'lerin ortasında Almanya'da yaptığı başlangıçtan yirmi yıl sonra hâlâ pahalı bir makineydi, zanaatkârların üretim yöntemleriyle küçük seriler halinde imal ediliyordu. Amerikan arabalarının da hiçbir özelliği yoktu: Önde gelen İngiliz otomobil uzmanlarından biri 1906'da "Amerika'da motorlu araçların tasarımı ve imalatındaki ilerleme, gerek bu ülkede gerek kıtada pratik kazanmada dikkat çekici bir ilerleme sayesinde ayırt edilesi bir noktaya gelmiş değil," diye yazmıştı (Beaumont 1906, 268). İki yıl sonra Henry Ford'un (1863-1947) Amerika'da sürüşün zorluklarını karşılamak üzere kitlesel olarak imal ettiği, bütçeye uygun Model T'yi çıkarmasıyla birlikte bunların hepsi de değişti: Ford'un başarısını ve mirasını bir sonraki bölümde açıklıyoruz.

Beklenmedik iki öncü –Ohio'da Dayton'dan bisiklet yapımcıları Wilbur (1867-1912) ve Orville (1871-1948) Wright– hafif bir içten yanmalı motorla ilk başarılı uçuşu gerçekleştiren ilk yenilikçiler oldu; yaptıkları uçak 17 Aralık 1903'te (McCullough 2015) North Carolina'da Kitty Hawk'un kum tepeleri üstünde kısa bir süre havada kaldı. Bunu deneyen ilk yenilikçiler onlar değillerdi. Onların başarılı uçuşlarından sadece dokuz gün önce Charles M. Manly *Aedrome A'yı* Potomac'ta bir barkadan bir mancınkla fırlatarak ikinci bir kez uçuş girişiminde bulunmuştu. Uçak Smithsonian Enstitüsü'nün sekreteri Samuel Pierpoint Langley'nin (1834-1906) aldığı bir ABD hükümeti bağışıyla yapılmış, güçlü (39 kW, 950 rpm) beş silindirli radyal bir motorla donatılmıştı. Ama Manly'nin 7 Ekim 1903'teki ilk girişiminde olduğu gibi uçak fırlatılır fırlatılmaz suyun dibini boyladı.

Wright kardeşler neden başarılı oldu, daha önceden hiçbir bilgileri olmaksızın Smithsonian Enstitüsü'ne uçuş hakkında bilgi almak için yazma-

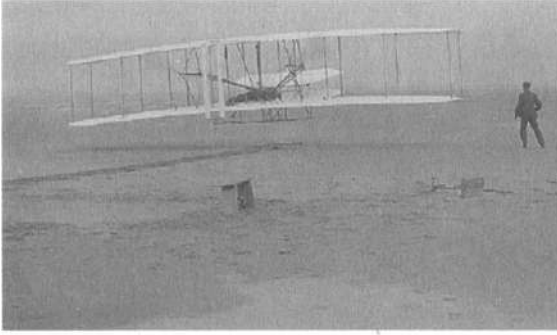
ların üstünden beş yıl bile geçmeden başarmalarının nedeni neydi? Belirtilikleri özelliklerde bir makine yaptırmak için başvurdukları motor imalatçılarından aldıkları ret cevaplarının üstüne makineyi kendileri tasarlamışlardı, mekanikleri Charles Taylor da işi sadece altı haftada bitirmişti. Motorun alüminyum bir gövdesi vardı, karbüratörü yoktu, kıvılcım çakmağı yoktu, ama dört çelik silindir 3,29 L'nin yerini almıştı ve 6 kW güçteydi (Guns-ton 1986). 91 kg ağırlığındaki bitmiş motor uçuş sırasında 7,6 g/W'lık bir kütle/güç oranına göre fiilen 12 kW'ye çıkmıştı. Ama bu hafif, güçlü motor Wright kardeşlerin başarılarının kilit bileşenlerinden sadece bir tanesiydi. Kardeşler aerodinamik çalışmışlar, denge, istikrar ve uçuşta kontrolün önemini anlamışlar, bu sorunu 1902 tarihli planörleriyle çözmüşlerdi (Jakab 1990). Kardeşler mühendislik deneyimlerini kuvvetli ve sistematik kanat ve kanat şekli testleriyle, deneysel planör uçuşlarıyla birleştirmişlerdi. 17 Aralık 1903'te yaptıkları ilk uçuşları gayet iyi belgelenmişti (Kutu 5.7, Şekil 5.8).

Bu uçağın patenti (U.S. 821,393) ancak Mayıs 1906'da verildi, birçok ülkede tasarımcılar kendi uçaklarını yapmaya başladıklarından yaygın olarak da ihlal edildi. Uçuş kontrolü ve süresinde hızlı bir ilerleme oluyordu. 20 Eylül 1904'te Wright kardeşler ilk kez havada bir çember çizdiler ve 9 Kasım 1904'te de üç mil uçtular (McCullough 2015). Aradan beş yıl geçmeden, yoğun bir uluslararası rekabet döneminin ardından, daha

Kutu 5.7 İlk uçuşlar

Manly'nin ikinci başarısızlığından dokuz gün sonra, Wright kardeşler Kitty Hawk'ta Flyer'ı test etmeye hazır. Uzak iki kanatlı hassas bir kanarddı (kanat kuyruğu kanatların önündeydi), ladin ağacından bir çerçevesi ve ince dokunmuş pamuklu bir örtüsü vardı: kanat genişliği 12 metreydi, ağırlığı sadece 283 kg'ydi. Bir aktarma zinciri karşıt yönlerde dönen iki iticiyi çalıştırıyordu. 10:35'teki ilk uçuş sırasında pilot Orville'di, daha aşağıda duran kanadın üstüne önüne doğru yatıp kanatlara ve dümene bağlı telleri çeken bir dümeni hareket ettirerek uçağı yönlendiriyordu. İlk uçuş daha ziyade 37 metrelik bir sıçrama gibiydi, pilot sadece 12 saniye havada kaldı.

İlk yere iniş sırasında hasar gören bir takozun tamir edilmesinden sonra gerçekleştirilen ikinci uçuşta 53 metre, üçüncüsünde 61 metre gidildi. Dördüncü deneme sırasında uçak havaya inip kalkmaya başlamıştı ki Wilbur kontrolü yeniden kazandı, sonra uçak birden yere çarptı ve öndeki dümen çerçevesi kırıldı, ama havada 57 saniye kalıp 260 metre yol aldıktan sonra oldu bunlar. Wright kardeşler Dayton'a dönüş yolculuğuna başlamadan önce babaları Muhterem Milton Wright'a bir telgraf çektiler: "Başarı dört uçuş Perşembe sabahı hepsi de 21 mil hızında rüzgâra karşı yerden başladık sadece motor gücüyle havada ortalama hız 31 mil en uzun 57 saniye basını bilgilendir Noel'de evdeyiz." (World Digital Library 2014).



Şekil 5.8 Kuzey Carolina'da, Kitty Hawk'ta 17 Aralık 1903'te 10:35'te kendi motorunun itici gücüyle çalışan bir makinenin Orville Wright kontrolünde ilk uçuşu. Kongre Kütüphanesi'nden fotoğraf.

önce dünyanın ilk monouçağını yapmış olan Louis Charles Joseph Bleriot (1872-1936) 25 Temmuz 1909'da ilk kez uçakla Manş Denizi'ni aştı (Bleriot 2015), 1915'te başlıca büyük güçlerin hava kuvvetleri doğmuştu bile, bu filolar Birinci Dünya Savaşı sırasında kullanıldı ve genişletildi.

Benzinli kıvılcımlı motorlar ticari başarı kazanma yoluna girmişken, Rudolf Diesel'in (1858-1913) patentini 1892'de aldığı icadıyla birlikte, yakıtı alevlendirmenin tümüyle farklı bir biçimi geliştirildi (Diesel 1913). Dizel motorlarda, silindire giren yakıt, 14-24 oranındaki sıkıştırmanın ürettiği yüksek ısıda kendiliğinden tutuşuyordu, oysa Otto motosikletlerinin benzinli motorlarında bu oran sadece 7-10'du. 14-24 oranı daha yüksek motor kütlesi ve daha düşük hız gerektirir, ama dizeller içkin olarak daha verimlidir. Motorun Şubat 1897'deki ilk sertifika testlerinde bile bu prototipin verimliliği yüzde 25'in üstündeydi (o devrin en iyi benzinli motorlarında verimlilik yüzde 14-17 civarındaydı). 1911'e gelindiğinde bu oran yüzde 41'e ulaşmıştı ve artık en iyi büyük dizel motorlarında bu oran yüzde 50'nin biraz üstündeydi, benzinli motorlardaki oranın iki katına çıkmıştı (Smil 2010b). Ayrıca bu motorlar daha ağır ve ucuz yakıt kullanıyordu. Dizel yakıtı (mazot) benzinden yaklaşık yüzde 14 ağırdır (820-850 g/L'ye karşılık 720-750 g/L) ve kütle başına enerji yoğunluğu benzer, bu da demektir ki dizel motorunun hacim başına enerji yoğunluğu yaklaşık 36 MJ/L'dir, yani benzinden yaklaşık yüzde 12 daha yüksektir.

Diesel, daha üniversite öğrenimi sırasında daha verimli bir içten yanmalı motor tasarlamaya karar vermişti ve Aralık 1892'de sonunda (iki kez reddedildikten sonra) aşağıda belirtildiği üzere bir patent aldı:

başlıca özelliği... saf havayla dolu olan bir silindirin bir piston tarafından çok yüksek düzeyde sıkıştırılması, o kadar ki sonuçta ortaya çıkan ısının yakıtın alevlenme ısısının çok üstünde olması... ve yakıt eklenmesi o ka-

dar tedrici olur ki yanma, pistonun dışı doğru hareket etmesi ve sıkışmış havanın genişlemesi nedeniyle esasen basınç ya da ısı artışı olmaksızın gerçekleşmesi... olan bir içten yanmalı motor için... (Diesel 1893a, 1)

Dosyada belirtildiği üzere patent çalışan bir motora çevrelemiyordu, ikinci patent 1895'te verildi, Diesel daha sonra ülkenin en önde gelen makine mühendisliği girişimi Maschinenfabrik Augsburg'un genel müdürü Heinrich von Buz (1833-1918) ile şirketleri işleyen bir motor geliştirmek için hatırı sayılır harcamalarda bulunan önde gelen çelik üreticisi Friedrich Alfred Krupp'un pratik yardımlarını aldı. 13,5 kW'lık bir motorla 17 Şubat 1897'de yapılan resmi sertifika testinde net verimliliğin yüzde 26,2 olduğu, azami basıncın ise 34 atmosfer olduğu görülmüyordu, Dizel'in orijinal özelliklerinin onda biri düzeyindeydi (Diesel 1913). 1897 sonbaharında performans yüzde 30,2'ye çıkmıştı. Böylece Diesel daha iyi bir makine elde etti ve hevesi büyük ölçüde gerçekleşti, ama makinenin toplumsal etkisiyle ilgili baştaki umutları tümüyle yersizdi – bu, teknik bir ilerlemenin niyet edilmiş sonuçlar doğurmasına verilebilecek örneklerden bir diğeridir (**Kutu 5.8**).

Yeni motorun ticarileşmesi, başta beklendiğinden daha yavaş gerçekleşti, 1901 sonuna gelindiğinde satılan birimlerin sayısı 300'den azdı (Smil 2010b). 1903'te dizelle çalışan ilk gemi, küçük petrol tankeri *Vandal*, Hazar Denizi ve Volga'da çalışmaya başladı; 1904'te dizelle çalışan ilk elektrik üretme istasyonu Kiev'de açıldı ve Fransız *Aigrette* dizelle çalışan ilk denizaltı oldu. Ama asıl büyük ilerleme Şubat 1912'de, Danimarka bandıralı *Selandia* (6.800 dwt yük ve yolcu gemisi) dizel motorlarıyla okyanusu aşan ilk gemi olduğunda yaşandı. Diesel ölümünden bir yıl önce, 1912'nin ortalarında “Donanma çevrelerinde artık yeni bir fiil var: ‘dizellemek.’ Biz dizellemekten başka bir şey yapmıyoruz diyorlar her yerde,” diye yazmıştı (Diesel 1937, 421).

Ne var ki içten yanmalı motorların hızlı başarısı (yol araçları, uçaklar ve gemilere güç veriyorlardı ve traktörler, kombinler, sulama pompaları Batı tarımında yük hayvanlarının yerini almaya başladığından tarım işlerinde de hakimiyeti ele geçirmeye başlamışlardı) buhar çağının sonunu getirmedi. On dokuzuncu yüzyıl sona ermeden evvel bir başka asli itici güç ticari olarak bulunabilir hale geldi, sonrasında bu gücün geliştirilmesi de yirminci yüzyılın büyük bölümündeki sanayi ilerlemelerinde belirleyici oldu. Bu önemli icat su türbiniydi, su türbini çok geçmeden, giderek büyüyen merkezi istasyonlarda elektrik üreten jeneratörleri döndürmekte üstün asli itici güç olarak kullanıldı.

Kutu 5.8

Diesel'in motoru: Amaç ve sonuç

Diesel'in arzusu bağımsız girişimcilerin (makinistler, saat ustaları, restoran sahipleri) satın alacağı ve sanayide kapsamlı bir merkezsizleşmeyi sağlayacak hafif, küçük (dönemin diğış makineleri büyüklüğünde) ucuz bir motor yapmaktı; sanayinin merkezsizleşmesi Diesel'in en büyük toplumsal hayallerinden biriydi:

Sanayinin olabildiğince merkezsizleşmesi ve şehir çevrelerine, hatta kırsal kesime kurulmaya çalışılması, havasız, ışıksız ya da mekânsız sıkış tepiş bir halde büyük şehirlerde merkezleşmesinden hiç kuşkusuz daha iyiydi. Bu hedefe ancak bağımsız bir makineyle, burada önerilen, hizmete sunması kolay makineyle ulaşılabilirdi. Hiç kuşku yok ki bu yeni motor, küçük sanayinin gelişmesine ekonomik, siyasal, insancıl ve hijyenik gerekçelerle hatalı olan son eğilimlere nazaran daha sağlam bir katkıda bulunabilirdi (Diesel 1893b, 89).

Diesel bundan on yıl sonra Solidarismus: Natürliche wirtschaftliche Erlösung des Menschen (Diesel 1903) adlı kitabında fabrikaları işçilerin yönetmesini savunuyor, bir dürüstlük, adalet, kardeşçe barış, şefkat ve sevgi çağının hayalini kuruyor, işçi kooperatiflerini arı kovanları, işçileri de kimlik kartları ve sözleşmeleri olan arılar olarak görüyordu. Ama kitabın 10.000 kopyasından sadece 300 tanesi satıldı, modern toplumlar işçi kooperatifleri etrafında örgütlenmemişlerdi. Diesel oğluna “en büyük başarımlar toplumsal sorunu çözmek oldu,” demişti (Diesel 1937, 395) – ama motorlarının en önemli kullanım alanları küçük atölyeler değil, ağır makineler, kamyonlar, lokomotifler ve İkinci Dünya Savaşı sonrasında da büyük tankerler, yük taşıyıcıları, konteynır gemileri oldu; bütün bunlar Diesel'in hayalinin tam karşısının yaratılmasına, kitlesel üretimin görülmemiş düzeyde yoğunlaşmasına ve ürünlerinin yeni bir küresel ekonomide çok pahalıya dağıtılmasına katkıda bulundu (Smil 2010b).

Elektrik

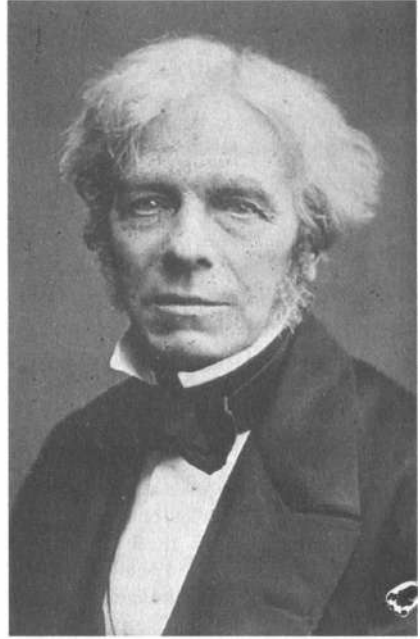
Elektriğin temel özellikleri ve yasalarının sistematik olarak anlaşılması, on sekizinci yüzyılın ikinci yarısında ve on dokuzuncu yüzyılın ilk altmış yılında Avrupalı ve Amerikalı birçok bilim insanı ve mühendisin emekleri sayesinde oldu ve birçok durumda bu insanların öncü katkısı temel fiziksel birimler için onların soyisimlerinin kullanılmasıyla teslim edildi. On sekizinci yüzyıldaki meşhur köşe taşları arasında Luigi Galvani'nin (1737-1798) 1790'lar da kurbağa bacaklarıyla yaptığı deneyler (dolayısıyla “hayvansal elektriği” yanlış kavraması), Charles Augustin Coulomb'un (1736-1806) elektrik kuvvetine ilişkin çalışmaları ve Alessandro Volta'nın (1745-1827) ilk elektrikli pili yapması vardır (volt elektrik potansiyeli birimidir).

Hans Christian Ørsted (1777-1851) 1819'da elektrik akımlarının manyetik etkisini ortaya çıkardı (ørsted manyetik alan birimidir) ve 1820'lerde Andre-Marie Ampere (1775-1836) tam devre kavramını formüle ederek

elektrik akımının manyetik etkisini nicelik haline getirdi (amper elektrik akımı birimidir). On dokuzuncu yüzyıldaki bu keşiflerin hiçbiri Michael Faraday'ın (1791-1867) elektromanyetik indüksiyonu göstermesi kadar önemli değildir (Şekil 5.9). Faraday basit bir soruyu cevaplamaya çalışıyordu: Ørsted'in kanıtladığı üzere elektrik mıknatıslanmaya neden oluyorsa, mıknatıslanma elektrik üretebilir mi? Onun keşfettiği cevabın kesin tarihini ve ayrıntılı betimlemesini biliyoruz (Kutu 5.9).

Faraday'ın mekanik enerjinin elektriğe (alternatif akım üretmek için) ve elektriğin mekanik enerjiye çevrilebileceğini göstermesi elektriğin ağır, düşük enerji yoğunluklu pillere dayalı (ve onlarla sınırlanan) kullanışlı elektrik üretimi ve çevriminin yolunu açtı. Ama bu imkanın birçok kişinin çabası sayesinde ticari gerçekliğe dönüşmesi uzun yıllar alacaktı. Jules Verne (1828-1905) *Denizler Altında Yirmi Bin Fersah*'ta, Kaptan Nemo'ya açıklamıştı; Nemo Aronnax'ya "Her kullanıma uygun, gemimin tek hakimi olan güçlü, itaatkâr, hızlı, kolay bir amil var. Her şey onun sayesinde yapılıyor. O aydınlatıyor, ısıtıyor, mekanik aygıtımın ruhu. Bu amilin adı elektrik," diye açıklıyordu, ama 1870'te bu hâlâ bilimkurguydu, zira elektrik geniş ölçekte üretilmiyordu ve elektrikli motorların yetileri küçük pillerin verdiği güçle sınırlıydı.

Bu erteleme hiç de şaşırtıcı değildir, çünkü elektrik üretimi, aktarımı ve elektriğin ısı, ışık, hareket ve kimyasal potansiyele çevrilmesi enerji yenilikleri arasında benzeri olmayan bir kazanımdı. Daha önce belli işlerin daha hızlı, daha ucuza ya da daha fazla güçle gerçekleştirilebilmesi için yeni enerji kaynakları ve yeni asli itici güçler tasarlanmıştı ve bunlar mevcut üretici düzenlemeler çerçevesinde kolayca kullanılabilirdi (örneğin değirmen taşları hayvanlar yerine bir su tekeri tarafından çevriliyordu). Oysa tersine elektriğin devreye girmesi, onu güvenilir ve keseye uygun olarak üretmek, uzun mesafelerde güvenle aktarmak ve yerel düzeyde bireysel tüketicilere



Şekil 5.9 Michael Faraday. (Wellcome Kütüphanesi, Londra).

Kutu 5.9

Faraday'ın elektromanyetik indüklenmeyi keşfetmesi

Kraliyet Kurumu'nda kendi kendisini eğitmiş bir asistan olan, çoğunlukla Humphry Davy (1778-1829) ile çalışan, iki karbon elektrotunun hafifçe birbirinden ayrılmasının ortaya çıkardığı elektrik arkını betimleyen ilk bilim insanı olan Faraday elektriği konu alan (elektromanyetik dönüş hakkındaki) ilk önemli çalışmasını 1821'de yayımlamış, bu eserde elektrikli motorun çalışma prensibini özetlemişti. 1831'de yeni bir dizi deneye başladı, bunlar da onu 17 Ekim 1831'de elektromanyetik indüklenmeyi keşfetmeye götürdü. Vardığı sonuçların de-neysel bir tasarımdan etkilenmiş olabileceği endişesi taşıyan Faraday nihai deneyi farklı bir teknik kullanarak yaptı ve bu deneyde sürekli bir akım üretti. Faraday sonuçları 24 Kasım 1831'de Kraliyet Cemiyeti'nde düzenlenen bir konferansta sundu. Experimental Researches in Electricity'de (Faraday 1832, 128) deneyleri şöyle betimliyordu:

Önceki deneylerde teller birbirine yakın yerleştirilmişti, indükleme etkisi gerektiğinde indükleyici telin pille teması sağlanıyordu; ama temasın kurulma ve bozulma anlarında belli bir eylemin gerçekleştirilmesi gerekebileceğinden indükleme başka bir biçimde üretildi. Bir-bir buçuk metrelik bakır tel geniş bir levha üzerinde geniş bir W harfine benzer geniş zikzak biçiminde gerildi; ikinci bir levha üzerinde tam aynı biçimde ikinci bir tel gerildi, öyle ki bu tel birincinin yakınına getirildiğinde birinciyle her yerden temas etmesi gerekiyordu, sadece aralarına kalın bir kâğıt parçası kondu. Tellerden biri galvanometreye, diğeri voltaik pile bağlandı. Sonra birinci tel ikinciye yaklaştırıldı, o yaklaşırken iğnede bir sapma oldu. Uzaklaştırılırken iğne bu kez ters yönde saptı. İğnenin titreşimleriyle eş zamanlı olarak telleri önce yaklaştırıp sonra uzaklaştırırken iğne çok kapsayıcı hareketler göstermeye başladı, ama tellerin birbirlerine yaklaştırılıp uzaklaştırılmaları kesildiğinde galvanometre iğnesi de çok geçmeden olağan konumuna döndü.

Teller yaklaşırken indüklenen akım indükleyici akımın tam tersi yöneydi. Teller uzaklaşırken indüklenen akım indükleyici akımla aynı yöneydi. Teller hareketsiz kaldığında indüklenmiş bir akım yoktu.

dağıtmak, kullanıcıların istediği nihai enerji biçimlerini teslim etmek üzere verimli bir biçimde çevirmek için yepyeni bir sistemin icat edilmesini, geliştirilmesini ve kurulmasını gerektiriyordu.

Elektriğin ticarileşmesi, daha iyi ışık arayışıyla başladı. Daha önce belirttiğimiz üzere, Davy 1808'de ark etkisini göstermişti, ama ilk elektrikli ark ışıkları Aralık 1844'te kısa süreliğine Concorde Meydanı'nı, daha sonra Kasım 1848'de Londra'da Ulusal Galerî'nin kemerini aydınlattı. 1871'de Z. T. Gramme (1826/1901) ilk halka sarmalı armatür dinamoyu Paris'te Aca-demie des Sciences'a sundu; o buna yeni *machinemagneto-electrique produisant de courant continu* (sürekli akımın ürettiği manyeto-elektrik makinesi) diyordu (Chauvois 1967). Bu tasarım nihayetinde dinamoların ürettiği elektrikle çalışan ark ışıklarının tasarlanmasına zemin hazırladı: 1877'den beri ark ışıkları Paris ve Londra'da bazı meşhur kamusal alanları aydınlatıyor-

du, 1880'lerin ortasına gelindiğinde ark ışıkları birçok Avrupa ve Amerika şehrine yayıldı (Figuier 1888; Bowers 1998). Ama akım pozitif elektrotu tükettiğinden ark ışığının sürekliliğini sağlamak kontrol gerektiriyordu, bu nedenle de ark ışığı ev içinde kullanılmaya uygun değildi, tükenen elektrotların yeniden temin edilmesi de büyük bir lojistik zorluk yaratıyordu: 50 metre aralıklı 500 W'lık ark için şehirdeki yolların her kilometresi için yılda 3,6 km uzunluğunda 15 ve 9 mm kalınlığında karbon elektrot kullanmak gerekiyordu (Garcke 1911).

Kor halindeki fitillerle evlerin aydınlatılması yönündeki arayış kırk yıla yayıldı; Warren de La Rue'nun 1830'larda platin bobinle yaptığı deneylerden 1879'da Edison'un ilk dayanıklı karbon fitilli lambasını çıkarmasına (Edison 1880) uzanan bir süreçti bu. Bu arayışa Britanya, Fransa, Almanya, Rusya, Kanada ve ABD'den yaklaşık 24 önde gelen (ama artık unutulup gitmiş) mucit dâhil olmuştu (Pope 1894; Garcke 1911; Howell ve Schroeder 1927; Friedel ve Israel 1986; Bowers 1998). En azından 1865'te yüksek bir vakum üretmek için cıva buharı pompasını icat eden Hermann Sprengel'den, çalışmalarına 1850'de başlayan ve nihayetinde 1880'de karbon filtreli lamba için Britanya'da patent alan Joseph Wilson Swan'dan (1828-1914) ve 1875'te patentini aldıkları icatla Edison'un çalışmalarının temelini atan Kanadalı Henry Woodward ile Matthew Evans'tan bahsetmem gerek. Peki, Edison'un başarıları kendisinden önce gelen birçok bilim insanının ve rakibinin başarılarını neden çok geride bırakmıştı?

Edison başarılı olmuştu, çünkü yarışın sadece ilk güvenilir ampülü üretmek için değil, tümüyle kullanışlı, ticari bir elektrikli aydınlatma sistemini yerleştirmek için verildiğini fark etmişti; bu güvenilir elektrik üretimi, elektrik aktarımı ve ölçümünü de kapsıyordu (Friedel ve Israel 1986; Smil 2005). Bunun sonucunda elektrik sanayiinin yaratılması, on dokuzuncu yüzyıldaki başka inovasyon örneklerinin çok daha ötesinde tek bir adamın vizyonunun güdümünde oldu. Bu yaratma süreci teknik zorlukların doğru tanımlanmasını, bu zorlukların disiplinler arası titiz araştırma ve geliştirme çalışmalarıyla çözülmesini, sonuçta ortaya çıkan inovasyonların hızla ticari kullanıma sunulmasını gerektiriyordu (Jehl 1937; Josephson 1959). O dönemde ampul ya da büyük jeneratör imalatıyla uğraşan başka mucitler de vardı, ama sadece Edison hem eksiksiz bir sistem vizyonuna hem de bütünün çalışmasını sağlayacak kararlılık ve örgütsel yeteneğe sahipti (Kutu 5.10, Şekil 5.10).



Şekil 5.10 Thomas A. Edison, 1882, kömür yakılarak elektrik üretilen ilk istasyonunun aşağı Manhattan'da çalışmaya başladığı yıl. (Kongre Kütüphanesi).

Şurası inkâr edilemez: Edison istisnai derecede icatçı ve çalışkan bir adamdı (zihinsel düzeyde işine bağlılığı sadece efsanevi fiziksel dayanıklılığının gölgesinde kalıyordu); akılcı, kendisini işine adanmış bir yenilikçi ve şaibeli iddialarda bulunan, kendi kendisini ileri süren bir girişimci olarak çelişkili nitelikleri onunla birlikte çalışanları yabancılaştırabileceği gibi, onlara esin kaynağı da olabiliyordu. Edison dönemin en zengin işadamlarından bazılarının cömertçe sunduğu finansman desteği olmasaydı bu kadar çok şey başarmış olmayabilirdi, ama bu yatırımları çok iyi kullanmıştı, Menlo Park'taki laboratuvarında birçok yeni kavram ve seçenek araştırılmış, laboratuvar inovasyonlarıyla yirminci yüzyılı yaratmak için çok şey yapmış olan

AR-GE kurumlarının öncü habercisi olarak görülmeyi hak etmişti.

Edison'un yüksek vakumlu bir ortamda ampul teli olarak kullandığı karbonlaştırılmış pamuk dikiş ipliği 21 Ekim 1879'da ilk dayanıklı ampulde sürekli ışık üretmişti; Edison ayrıca 31 Aralık 1879'da New Jersey'de Menlo Park'ta yeni ampullerinden 100 tanesiyle yaptığı gösteride laboratuvarını, laboratuvarın yakınındaki caddeleri ve demiryolu istasyonunu aydınlatmıştı. İlk ampuller çok verimsiz olsalar da performansları o dönemin diğer ışık kaynaklarına göre çok üstündü. Gaz fitillerinden on kat, kandillerden 100 kat daha parlaklardı. Işıklılandırmadaki bu büyük yenilikler sınai modernleşme ve daha yüksek bir hayat kalitesi açısından, en az daha iyi asli itici güçlerin ortaya çıkması kadar önemliydi.

Dayanıklı bir ampul sadece bir başlangıçtı: Ampulün ortaya çıkarılmasından üç yıl sonra Edison ampul teli ve lamba için yaklaşık 90, manyeto ya da dinamo-elektrik makineler için 60, aydınlatma sistemleri için 12, elektrik dağıtımı için 12, elektrik ve elektrik ölçerler ve elektrik motorları

Kutu 5.10**Edison'un elektrik sistemi**

Joseph Swan'ın 18 Aralık 1878'de Newcastle-on-Tyne'de gösterimini yaptığı ilk dayanıklı elektrik ampulü, Edison'un patentini on ay sonra aldığı ilk dayanıklı ampulle aynı kilit bileşenlere sahipti: platin kurşun teller ve karbon bir tel (Electricity Council 1973; Bowers 1998). Ama Swan'ın kullandığı tellerin rezistansı çok düşüktü ($1-5 \Omega$) ve geniş ölçekte kullanılmaları voltajın çok düşük olmasını, dolayısıyla akımın çok yüksek olmasını ve çok büyük miktarda aktarım teli kullanmayı gerektirebilirdi. Üstelik Edison'dan önceki lambalar diziler halinde bağlanıyor ve bir dinamodan gelen sabit bir akımla çalıştırılıyordu; bu da ışıkların tek tek yakılmasını ve sistemin tamamının tek bir kesintiyle kapatılmasını imkânsız kılıyordu. Edison ticari olarak yaşayabilecek bir ışıklandırma sisteminde elektrik tüketiminin, sabit voltajlı bir sistemde birbirine paralel bağlanmış yüksek rezistanslı teller kullanarak en aza indirilmesi gerektiğini fark etmişti.

Bu anlayış dönemin teknik fikir birliğine tümüyle ters düşüyordu (Jehl 1937), ama basit bir karşılaştırma bu iki yaklaşımın pratik sonuçlarını aydınlatır. Edison'dan önceki olağan düzenlemeler -100 W ve 2Ω 'lık bir lamba- 7 A gerektiriyordu. Edison'un 140Ω tercihi, sadece $0,85 \text{ A}$ gerektiriyor ve bakır devre maliyetini önemli ölçüde azaltıyordu (Martin 1922). Edison'un 12 Nisan 1879'da yaptığı patent başvurusunda belirttiği üzere: "Böyle yüksek rezistanslı lambalar kullanarak, bütün lambaların toplam direncini büyük bir ana kondüktör gerektirecek kadar düşük bir noktaya çekmeksizin, tam tersine çok ortalama boyutlarda bir ana kondüktör kullanarak çok sayıda ark yerleştirebildim" (Edison 1880, 1). Ohm kanunu Edison'un belirttiği özelliklerin 118 V 'lık bir akım gerektirdiğini şart koşar ve bu voltaj ($110-120 \text{ V}$) Kuzey Amerika'da (ve Japonya'da) standarttır, Avrupa'da ise voltaj 240 V 'dır.

Ama bu hükmün oybirliğine dayandığı pek söylenemez. Hughes'a (1983, 18) katılıyorum: "Edison sistemlerin büyümesiyle ilgili sorunları bütüncül olarak kavramlaştıran, kararlı bir sorun çözücüydü... Edison'un geliştirdiği kavramlar çeşitli etkenler ve bileşenlere amaçlı olarak yön verecek ve bunları bütünleştirecek kadar güçlü örgütleyici ilkeler bulma ihtiyacından türemiştir." Ama Friedel ile Israel (1986, 227) şu sonuca varmışlardı: "Bu sistemin tamlığı amaçlı sistemler yaklaşımının sonucu olmaktan ziyade, teknik başarılar ve finansal kaynakların sağladığı fırsatların ürünüdür."

için 10 yeni patent başvurusunda bulundu (Thomas Edison Papers 2015). Bununla birlikte o ve yanında çalışanlar bu fikirleri inanılmaz derecede kısa bir süre içinde pratik gerçeklikler haline getirdi. Edison'un Londra'daki şirketi tarafından Holborn Viyadükü'ne yapılan ilk elektrik üretim tesisi 12 Ocak 1882'de elektrik dağıtımına başladı. Aynı yıl 4 Eylül'de devreye giren New York'taki Pearl Street İstasyonu Amerika'daki ilk termal enerji tesisi oldu. Açılmasından bir ay sonra şehrin finans merkezindeki 1.300 lambayı aydınlatıyordu, bir yıl sonraysa 11.000'i aşkın lamba bu tesise bağlıydı.

İki gerçeklik var ki özellikle dikkat çekici buluyorum. Bunlardan birincisi, derin kavrayışlar bileşkesi ve tamamlanmış işin kalitesidir, Edison'un

sisteminin temel parametrelerini o kadar başarılı ve eksiksiz kılmıştır ki bunlar bugün hâlâ hayatımızdadır. Eleştiriler ve sorulara rağmen (bkz. **Kutu 5.9**) böyle bir sistemi hiç yoktan tasarlamamanın inceliklerini ve karmaşık yönlerini anlayan herkes bu başarıyı her zaman takdir etmiştir. Herhalde en büyük takdir Almanya'nın en büyük elektrikli cihaz üreticisi ve Avrupa elektrik sanayiinin öncülerinden olan Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft'ın kurucusu Emil Rathenau'dan gelmiştir. Rathenau 1881'de Paris'teki Elektrik Fuarı'ndaki gösteriyi izledikten sonra izlenimlerini 1908'de şöyle anlatmıştır:

Edison'un aydınlatma sistemi en ince ayrıntılarına dek gayet güzel düşünülmüş, sanki yıllardır çeşitli şehirlerde test edilmişçesine incelikle işlenmiştir. Ne soketler ne anahtarlar ne fitiller ne lamba tutucular ne de tesisatın tamamlanması için gerekli diğer aksesuarlar çetrefildir; akımın üretilmesi, düzenlenmesi, dağıtım kutularının kablolarla bağlanması, ev bağlantıları, metreler vs. hepsi de hayret verici bir beceri ve emsalsiz bir dehanın emarelerini gösterir (Dyer ve Martin 1929'da, 318-319).

İkinci gerçeklik herhalde çok daha dikkat çekicidir. Edison'un sistemi ne kadar geniş erimli ve temel olmuş olursa olsun, tek başına eksiksiz, kalıcı ve verimli modern elektrik sistemini yaratmak için yeterli olmazdı: Gerekli inovasyonların hepsinin de sadece çok kısa bir süre içinde değil (neredeyse hepsi de mucizevi yıllar olan 1880'lerde gerçekleşmiştir) ama bir yandan da optimuma en yakın bir biçimde yerli yerine oturması gerekiyordu. 120 yılı aşkın bir süre sonra her yere nüfuz etmiş elektrik sistemlerimizin başkın bileşenlerinin (buhar turbo jeneratörleri, dönüştürücüler, yüksek voltajlı alternatif akım [AC] aktarımı) verimleri, yetileri, güvenilirlikleri artmıştır, ama temel tasarımları ve özellikleri aynı kalmıştır; bunları yaratanlar da yarattıkları temalar üzerindeki son değişiklikleri kolayca anlayabilirlerdi.

Akkor ışıklar (1930'larda ticarileşmiş) florasanların, hatta daha yakın dönemde çok daha verimli ışık kaynaklarının (sodyum buharı, sülfür lambaları, ışık saçan diyotlar) gerisinde kalmış olsa da, 1880'lerde sistemin bir başka kilit bileşeni olan elektrikli motorlar küresel elektrik sisteminin hiç olmadığı kadar yaygın bileşenleri haline gelmiştir. İşte bu nedenle Edison'a ait olmayan, elektriğin muazzam kuramsal potansiyelinin evrensel bir ekonomik ve sosyal gerçeklik haline dönüşmesine katkıda bulunan dört kritik icat ya da inovasyona daha yakından bakmam gerekiyor: buhar türbinleri, dönüştürücüler, elektrik motorları ve alternatif akımla elektrik aktarımı.

Buhar motorlarının kütle/güç oranlarının yüksek olduğunu, güç düzeylerinin sınırlı olduğunu daha önce belirtmiştim. Aynı zamanda hantal

ve gayet verimsiz olan bu aslı itici güçler Charles Parsons'ın (1854-1931) 1884'te daha verimli, daha küçük ve daha hafif buhar türbininin patentini almasından kısa bir süre sonra terk edildi (Parsons 1936). Parsons'ın şirketi 1888'de Newcastle'daki bir istasyona 75 kW'lık bir türbin yerleştirdi ve 1900'de Almanya'nın Eberfeld istasyonunda 1 MW'lık bir türbine geçti; Parsons'ın 1912'de Chicago'da kurulan, Birinci Dünya Savaşı öncesindeki en büyük makinesinin gücü 25 MW'ydi (Smil 2005). Buhar makineleri nadiren birkaç yüz rpm'den hızlı dönebiliyor olsa da, modern türbinler 3.600 rpm'ye ulaşarak 34 MPa'lık bir basınç altında, 600 dereceye kadar ısıtılmış buharla çalışabilir ve yüzde 43'e ulaşabilen bir verimlilik gösterebilir (Termuehlen 2001; Sarkar 2015). Birkaç kilowatt'tan başlayıp 1 GW'ye varabilecek kapasitede yapılabilir, küçük ölçekte atık ısısının elektrığe çevrilmesinden tutun nükleer enerji santrallerindeki devasa turbojeneratörlere varıncaya dek çeşitli nişleri doldurabilirler.

Dönüştürücüler modern dünya için ne kadar yaygın ve vazgeçilmez olsa da kamunun bilincinden o kadar uzak bir aygıt yarışmasında herhalde birinci olurdu (Coltman 1988). Genellikle (yeraltında, yapıların içinde, yüksek çitlerin ardında) gizli olan, sessiz ve durağan bu makineler ucuz, merkezi elektrik üretimini mümkün kılmıştır. Üretim tesislerinden müşterilere ilk doğrudan akımlı elektrik aktarımının sınırlı bir erimi olmuştı. Bu aktarımın çeyrek mille sınırlı bir alanın ötesine aktarılması, devasa bağlantıların inşa edilmesini gerektirecekti, Siemens'in (1882, 70) vardığı sonuca göre bu bağlantılar "artık kenartaşlarının altına yerleştirilen dar kanalların içine sığdıramazdı, pahalı alt geçitlerin, tam da *cava electrica* denen şeylerin yapılması gerekiyordu." Diğer yegâne seçenek sınırlı yerel bölgelere hizmet eden çok sayıda istasyonun inşa edilmesiydi, her iki seçenek de çok pahalıya patlardı. Alternatif akım dönüştürücülerini ucuz ve güvenilir bir çözüm sundu (Kutu 5.11).

Daha önce belirttiğimiz üzere, dönüştürücüler elektromanyetik indüksiyonla çalışır, Faraday'ın keşfettiği bir süreçti bu; dönüştürücülerin geliştirilmesi çığır açıcı bir icadın sonucu değil, Faraday'ın temel kavrayışına dayanan tedrici iyileştirmelerin ürünüydü. Lucien H. Gaulard'ın (1850-1888) ve John D. Gibbs'in yaptığı ilk etkili tasarımlardan biri 1883'te gerçekleştirildi, sonrasında üç Macar mühendis kapalı demir çekirdekler kullanarak bu tasarımı iyileştirdi, ama 1885'te bugün hâlâ kullandığımız, yüksek voltajlı alternatif akımı enerji santrallerinden nispeten az kalıpla aktarmayı ve düşük voltajda evlere, sanayi tesislerine dağıtmayı mümkün kılan aygıtın pro-

Kutu 5.11

Elektriğin dönüştürülmesi ve aktarım kayıpları

Elektrik düşük voltajlarda en verimli biçimlerde üretilir ve nihai kullanım haline en uygun biçimde çevrilir, ama aktarım sırasındaki güç kaybı aktarılan akımın karesi kadar arttığından yüksek voltajları aktarım kayıplarını sınırlamakta kullanmak en iyidir. Dönüştürücüler girdi akımının voltajını ya azaltarak ya artırarak bir elektrik akımını bir diğerine dönüştürürler ve bunu pek enerji kaybı olmaksızın, geniş bir voltaj yelpazesinde gerçekleştirirler (Harlow 2012). Basit hesaplamalar bu avantajı gösterir. Aktarılan elektriğin gücü akım ve voltajın çarpımına eşittir ($\text{watt} = \text{amper} \times \text{volt}$); voltaj akım ile direncin çarpımıdır (Ohm kanunu, $V = A\Omega$), dolayısıyla güç $A^2\Omega$ çarpımına eşittir.

Güç kaybı (direncin, rezistans) voltajın karesi azaldıkça azalır: voltajı 10 kat artırdığınızda hat rezistansı aynı oranda enerji aktarırken sadece 1/100 olacaktır. Bu durum her zaman olabilecek en yüksek voltaja çıkmayı destekleyen bir durumdur, ama pratikte artış başka değerlendirmelerle de sınırlanır (elektrik boşalması, artan yalıtım gerekleri, aktarım kulesi büyüklükleri), ama yüksek voltajlı (HV) ve ekstra yüksek voltajlı (EHV) aktarım artık rutin olarak 240.000-750.000 V (240-750 kV) olarak yapılmaktadır, kayıplar genellikle aktarılan elektriğin yüzde 7'siyle sınırlıdır.

totipini geliştiren Westinghouse'da çalışan genç bir mühendis olan William Stanley (1858-1916) oldu (Coltman 1988).

Yeni elektrikli sistemlerin diğer bileşenlerinde olduğu gibi, dönüştürücülerin kapasiteleri ve voltajları da on dokuzuncu yüzyılın geri kalanında ve Birinci Dünya Savaşı öncesinde hızla gelişti. Bu basit ama dâhiyane aygıtı takdir etmek için Stanley'nin 1912'de Amerika Elektrik Mühendisleri Enstitüsü'ne yaptığı konuşmadan daha iyi sözler bulamam:

Zor bir soruna getirilmiş son derece eksiksiz ve basit bir çözümdür. Regülasyonla ilgili bütün mekanik girişimleri utandırır. Kendisine verilen ya da kendisinden alınan büyük enerji yükünü büyük bir kolaylık, kesinlik ve tutumlulukla halleder. Çok güvenilir, güçlü ve kesindir. Bu çelik ve bakır karışımında olağanüstü kuvvetler kendilerinden neredeyse hiç kuşku duyulmayacak kadar güzel bir denge içindedir (Stanley 1912, 573).

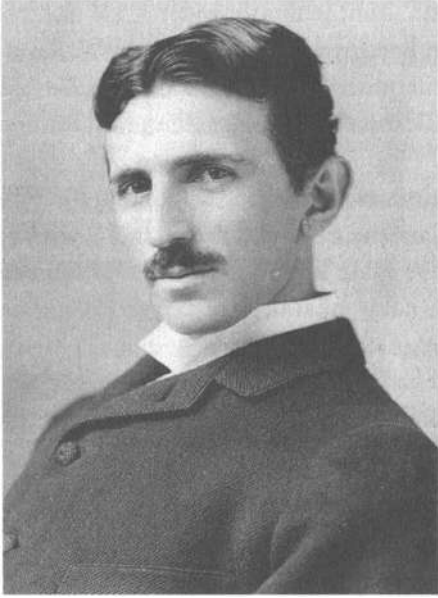
Dönüştürücüler alternatif akımın yeni elektrik ağlarının standart tercihi olarak yükselmesinde temel önem taşımıştır. Doğrudan akım şehirlerin çeşitli kesimlerine hizmet eden ilk yalıtılmış mini şebekeler için mantıklı seçimdi ve yüksek voltajlı alternatif akımın (HVAC) güvenliğiyle ilgili inkar edilemez bazı kaygılar mevcuttu. Ama kaygıların hiçbirisi de Edison'un 1887'de başlattığı, sokak köpekleri ve kedilerinin (AC'nin ölümcül tehlikele-

rini göstermek üzere) bir AC (alternatif akım) jeneratöründen 1 kV elektrik verilen metal bir levha üzerinde öldürölmesini ve AC'nin ilk savunucularından, Amerika'nın önde gelen sanayicilerinden, Stanley'nin işvereni George Westinghouse'a (1846-1914) kişisel saldırıları da içeren saldırganca tutumu haklı çıkarmaz.

Edison daha 1889'da "Benim şahsi arzum alternatif akımların tümüyle yasaklanması olurdu. Tehlikeli oldukları kadar gereksizler de... Bu nedenle hiçbir kalıcılık unsuru olmayan, cana ve mala karşı her tür tehlikeli unsuru barındıran bir sistemin kullanılmasını haklı çıkaracak hiçbir gerekçe göremiyorum," diye yazmıştı (Edison 1889, 632). Edison AC'ye muhalefetinde, Britanya'da kendisine şaşırtıcı bir müttefik bulmuş, dünyanın önde gelen fizikçilerinden biri olan Lord Kelvin'le kol kola girmişti. Ama bir yıl sonra Edison bir AC savunucusu olarak konuşuyordu, David (1991), Edison'un mantıksızmış gibi duran muhalefetiinin aslında doğrudan akıma dayalı sistemlerin bileşenlerini üretmeye, dolayısıyla geri kalan hisselerini satma koşullarını iyileştirmeye bağlı olan girişimlerinin değerini desteklemeye yönelik akılcı bir tercih olduğunu savunarak bu gelişmelere en iyi açıklamayı getirir.

Ama bu meşhur "sistemler savaşı"nın sonucu önceden belirlenmişti: Temel fizik AC'den yanaydı, 1890 sonrasında yeni sistemler AC temelli oldu (bu geçişe 1889'da kesin ve ucuz bir AC ölçerin ortaya çıkması da katkıda bulundu), oysa 1891'e gelindiğinde ABD'de kentlerde ışıklandırmanın yarısından fazlasının dayandığı mevcut DC sistemleri Edison'un eski çalışanlarından Charles S. Bradley'nin 1888'de patentini aldığı döner dönüştürücünün icat edilmesi sayesinde AC'ye çevrilebilir hale geldi: dönüştürücü mevcut DC üreten teçhizatı kullanmayı mümkün kılıyor, öte yandan daha geniş bölgelere çok fazlı yüksek voltajlı alternatif akım aktarabiliyordu. Yüksek voltajlı alternatif akımın yayılması, 1890'larda, 200.000'i aşkın ışığı yakan Londra'daki büyük Deptford İstasyonu dâhil büyük ölçekli birkaç projeye ve Niagara Şelaleleri'ndeki bir hidroelektrik santralinden Buffalo'ya dünyanın en büyük alternatif akım bağlantısının geliştirilmesiyle ivme kazandı (Hunter ve Bryant 1991). 1900'de üç fazlı akımın kullanılmasıyla kamuya ilk kez elektrik sunuldu ve en yüksek aktarım voltajları 1900'de 60 kV'ye, 1913'te de 150 kV'ye çıktı. Dolayısıyla modern elektrik üretimi ve aktarımının bütün bileşenleri Birinci Dünya Savaşı öncesinde kurulmuştu.

Stanley'nin dönüştürücüsünden üç yıl sonra Nikola Tesla alternatif akımla çalışan ilk pratik çok fazlı indüksiyon motorunun patentini aldı (Cheney 1981; Şekil 5.11). Akkor ampullerinin geliştirilmesine çok benzer



Şekil 5.11 Nikola Tesla, 1890. Napoleon Sarony'nin çektiği fotoğraf.

bir şekilde bu icat da on yıllar süren deneyler, denemeler, hatta 1830'ların sonundan itibaren pillerle çalışan doğrudan akımlı motor tasarımlarının, 1870'lerin sonundan itibaren dinamoyla çalışanların da ilk kez ticari olarak kullanılması sonrasında yapılmıştı (Hunter ve Bryant 1991). Doğrudan akımla çalışan küçük motorlar, yüksek işletim maliyeti ve sınırlı pil kapasitesi nedeniyle, buhar motorlarına kıyasla daha geri asli itici güçlerdi.

Doğrudan akımla çalışan, ticari olarak başarılı, ilk elektrikli motor (binlerce satılmıştı) da büyük bir pille çalışıyordu, Edison 1876'da bu cihazın patentini almıştı; anıtların mekanik kopyasını çı-

karmakta kullanılan, stensil çizecek bir kalem çalıştırmak üzere kalemin üstüne yerleştirilecekti (Pessaroff 2002). Büyük dinamolar yapıldığında, küçük doğrudan akım motorlarını (ilk olarak Almanya'da) arabaları çalıştırmakta ve (hepsinden önce ABD'de) birçok sanayi işi için kullanma girişimleri de oldu. Elektrikli motorların geleceği ancak Nikola Tesla'nın (1857-1943) Avrupa'da tasarladığı, bu genç Sırp mühendisin ABD'ye göç ettikten sonra işler bir makineye dönüştürdüğü icadı sayesinde kökten değişti.

Tesla, bu fikrin aklına ilk kez 1882'de geldiğini ileri sürüyordu, ama Amerika'daki ilk işvereni olan Edison alternatif akıma pek ilgi duymuyordu; ne var ki Tesla finansman kaynağı bulma, 1887'de kendi şirketini açma ve gerekli bütün patentleri alma konusunda hiç zorluk çekmedi (1887 ile 1891 arasında 40 patent aldı). Tesla çok fazla motorunu tasarlarken şunu amaçlamıştı:

O zamana kadar mevcut olandan çok daha ekonomik bir dönüştürme, daha ucuz, daha güvenilir ve daha basit aygıtlar kurma, son olarak da aygıtların kolayca yönetilebilir olması; öyle ki ekonomik bir aktarım için gerekli olduğu üzere yüksek gerilimli akımlar kullanmaktan ileri gelen bütün tehlikeden kaçınılabilsin (Tesla 1888, 1).

Westinghouse, Tesla'nın bütün AC (doğrudan akım) patentlerini satın aldı ve 1889'da şirket bir Tesla motoruyla çalışan ilk elektrikli cihazı imal etti: bu 125 W'lık bir AC motoruyla çalışan küçük bir pervaneydi; 1900'e gelindiğinde bu pervaneden yaklaşık 100.000 adet satılmıştı (Hunter ve Bryant 1991). Tesla ilk patentini iki fazlı bir makine için almıştı, ilk üç fazlı tasarımı AEG için çalışan Rus bir mühendis olan Mikhail Osipovich Dolivo-Dobrowolsky (1862-1919) tarafından yapıldı. Üç fazlı motorlar (her faz 120 derecede devreye giriyordu) üç fazdan birinin her zaman zirve noktasında ya da o noktaya yakın olmasını sağlar, bu da iki fazlı bir tasarıma göre çok daha büyük bir güç üretimiyle sonuçlanır, ayrıca başka bir kablo gerektirecek dört fazlı bir makine kadar da iyidir. Üç fazlı motorların piyasayı fethetmesi, bir sonraki bölümde açıklayacağım üzere, imalat alanında hızla büyük bir dönüşüm yarattı.

TEKNİK YENİLİKLER

Fitokütleli yakıtlardan fosil yakıtlara, canlı asli itici güçlerden mekanik asli itici güçlere büyük dönüşüm hem yeni, gerçekten çığır açıcı nitelikleri itibarıyla hem benimsenmelerinin hızı itibarıyla görülmedik değişiklikler getirdi. 1800'de Paris, New York ve Tokyo sakinleri enerji temelleri sadece 1700'dekinden değil, 1300'dekinden de çok farklı olmayan bir dünyada yaşıyorlardı: odun, odun kömürü, ağır çalışma ve yük hayvanları bütün bu toplumların gücünü sağlıyordu. Ama 1900'e gelindiğinde Batı'nın büyük şehirlerindeki birçok kişi teknik parametrelerin 1800'de dünyaya hakim olanlardan neredeyse tümüyle farklı olduğu, temel nitelikleri itibarıyla 2000 yılındaki hayatlarımıza daha yakın olan toplumlarda yaşıyorlardı. Tarihçi Lewis Mumford'ın (1967, 294) özetlediği üzere "Güç, hız, hareket, standartlaşma, kitlesel üretim, ölçme, tasnif, kesinlik, tektiplik, astronomik düzenlilik, kontrol, hepsinden de önemlisi kontrol... bunlar yeni Batı tarzı modern toplumun anahtar sözcükleri haline gelmişti."

Bu değişikliklerin örnekleri boldur, ben bunlar arasından bu hızlı kazanımların büyüklüğünü gösterecek birkaç küresel başarı seçtim. En temel düzeyde, 1800'de dünya yaklaşık 20 EJ enerji tüketiyordu (500 Mt'den daha az miktarda ham petrolünkine denktir) bunun yüzde 98'i fitokütleydi, çoğunlukla odun ve odun kömürüydü; 1900'e gelindiğinde toplam asli enerji arzı iki katın üstüne çıkmıştı (yaklaşık 43 EJ'ye, 1 Gt ham petrolden biraz daha fazlaydı); bunun yarısı da fosil yakıtlardan, çoğunlukla kömürden ge-

liyordu. 1800’de en güçlü cansız asli itici güç, Watt’ın iyileştirmiş olduğu buhar makinesi 100 kW’nin biraz üstünde bir kapasiteye sahipti; 1900’de en büyük buhar makineleri 3 MW gücündeydi, yani 30 kat daha güçlüydü. 1800’de çelik ender bulunuyordu, 1850’ye gelindiğinde Britanya’da bile “ticarete nispeten sınırlı miktarlarda biliniyordu” (Bell 1884, 435) ve dünya çapında ancak birkaç yüz bin ton üretiliyordu; ama 1900’e gelindiğinde küresel üretim 28 Mt’ye tırmanmıştı (Smil 2016).

Ama 1900’lerin dünyasını tanımlarken kullandığım niteleyici ve tanımlayıcı terimlere (“neredeyse” ve “temel özellikleri itibarıyla”) dikkat edin lütfen. Başarılan değişiklik hem niceliksel hem niteliksel itibarla derindi, hızı sıklıkla hayret vericiydi; öte yandan fosil yakıtlar ve cansız asli itici güçler dünyası hâlâ yeniydi, olgunluktan uzaktı, sıklıkla son derece verimsizdi ve birçok olumsuz çevresel etkiyle ilişkiliydi. 1900’e gelindiğinde ABD ve Fransa çoktan ağırlıklı olarak fosil yakıtlardan enerji temin eden ülkeler haline gelmişlerdi; ama dünyanın tamamı asli enerjisinin yarısını odun, odun kömürü ve ekin kalıntılarından temin ediyordu; ABD’de zirve yapılan yılda bile yük atlarının sayısı ilerde 17 yıl sonra görülecek seviyedeydi. Akkor ışıkları, elektrik motorları ve telefon hızla yaygınlaşsa da ABD ya da Almanya’da kentli ailelerin kullandığı elektriğin büyük bölümü sadece birkaç ampulü yakıyordu.

Yeni bir enerji dünyasının temelleri sağlam bir biçimde atılmıştı, ama yirminci yüzyılda bu yeni sistemin bütün bileşenleri, daha hızlı bir büyüme ve niceliksel iyileşmelerin bir bileşimi sayesinde, yani büyük ölçüde verimlilik, üretkenlik, güvenilirlik, emniyet ve çevreye etki konusunda elde edilen kazanımlar sayesinde büyük bir dönüşüm geçirdi. Bu ilerleme Birinci Dünya Savaşı’nda, sonra 1930’lardaki ekonomik krizle kesintiye uğradı. İkinci Dünya Savaşı nükleer enerjinin geliştirilmesini, gaz türbinleri (jet motorları) ve roketli itilimin ortaya çıkmasını hızlandırdı. 1945’te bütün sanayilerin bir kez daha büyümeye geçmesi 1970’lerin başında yeni zirvelere tırmandı, bunun sonrasında birçok enerji tekniği mutlak boyutlara, sıklıkla da performans, yani platolara ulaştı. Buhar türbinlerinin kapasitelerinin, tipik büyük petrol tankerlerinin tonajlarının artması, baskın HV-AC aktarım hatlarının verimi örnek gösterilebilir.

Bu düz uçuşa geçme büyük ölçüde teknik sınırlarla ilgili bir mesele değil, engelleyici maliyetlerin ve çevre üzerinde kabul edilemez etkiler yaratacak olmanın bir sonucuydu. Enerji alanındaki ilerlemelerin ılımlı bir hızla geçmesine katkıda bulunan bir başa önemli etkense OPEC öncülüğünde petrol fiyatlarının iki kez (1973-1974, 1979-1980) hızlı bir yükseliş göstermesi

ve bu fiyat artışlarının enerji tüketimi üstünde kısıtlayıcı bir etki yaratmasıydı. Sonuçta daha yüksek verimlilik, daha büyük güvenilirlik ve çevreye uyumlu olma mühendisliğin yeni hedefleri haline geldi. Ama enerji fiyatları nihayetinde stabilize oldu ve hâlâ dünyanın en büyük ekonomisi olan ABD 1990'larda Çin'le hiç olmadığı kadar fazla ilişki kurarken bir on yıl daha güçlü bir yayılma yaşadı.

Dünyanın en kalabalık ülkesi yıllar süren Maocu sefaletin ardından 1980 ile 2010 arasında kişi başına asli enerji kullanımını dört katına çıkaran reform politikalarını kucakladı: Çin 2009'da dünyanın en büyük enerji tüketicisi haline geldi (2015'e gelindiğinde ABD'nin yüzde 30 önündeydi). Çin'in 2015'te ortalama kişi başına enerji kullanımı 95 GJ'yle Fransa'nın 1970'lerin başındaki kullanım düzeyine benziyordu, ama enerjinin sanayide kullanılması hâlâ baskındı, Çin'de hanelerde enerji kullanımı karşılaştırılabilir bir kalkınma aşamasında Batı'ya nazaran daha düşük olmayı sürdürmüştür. 2015'e gelindiğinde Çin ekonomisinin ve enerji talebinin artış oranları kaçınılmaz olarak ılımlı seviyeye inmişti, ama Hindistan, Güneydoğu Asya ve Afrika'da Çin'in başarısını tekrarlamayı ümit eden milyarlarca insan vardır ve 2050'ye gelindiğinde 2015'teki dünya nüfusuna 2 milyarı aşkın kişi daha eklenmiş olacaktır.

Enerji talebinin artmaya devam edeceği doğrudur, ama bu talebin ekonomik eşitsizlikler ve küresel çevreyle ilgili kaygılarla dolu bir dünyada nasıl karşılanacağını hiçbirimiz öngöremiyoruz. Çok sayıda tahmin ve senaryo var, ama enerji alanındaki ilerlemelerin tarihi, öngörme başarısızlığının tahminler ve senaryoların en ortak özelliği olduğunu göstermiştir (Smil 2003). Bu bölümde fosil yakıt çıkarma, işleme, dağıtmanın yayılması, olgunlaşması ve dönüşümünü belirleyen başlıca eğilimleri, hem termal hem yenilenebilir elektrik üretimindeki ilerlemeleri, mekanik asli iticilerin bileşimleri ve performanslarındaki değişiklikleri inceleyip özetliyorum, ama bunu ayrıntılı olarak yapmadan önce fosil yakıtların üretimine, elektrik üretimine ve asli itici güçlerin yaygınlaşmasına damgasını vurmuş birkaç ortak özelliği işaret etmem gerekiyor.

1900 sonrasında fosil yakıtların çıkarılmasına üç dikkat çekici eğilim damgasını vurdu. Birincisi kömür madenciliği ve hidrokarbon üretiminin yaygınlaşması, her yıl çıkarılan fosil karbon miktarını 1900 ile 2015 arasında kabaca 20 kat artırdı: 1900'de 500 Mt olan bu miktar bir asır sonra 6,7 Gt'ye, 2015'te de yaklaşık 9,7 Gt'ye ulaştı (Olivier 2014; Boden ve Andres 2015; bu toplamaları CO₂ açısından ifade etmek için 3,67 ile çarpın). Fosil yakıtların eşitsiz dağılımı nedeniyle, bu yakıtların çıkarılmalarının yaygın-

laşması kolayca taşınabilir ham petrol alanında kaçınılmaz olarak gerçekten küresel bir ticaretin doğmasına ve kömür ile doğal gaz ihracatlarının artmasına yol açtı (her iki ihracat da boru hatlarıyla, sıvılaştırılmış doğal gaz tankerleriyle yapıyordu). Ama daha yakından bakıldığında bazı önemli nitelikler ve istisnalar açıklık kazanır, zira küresel artış ulusal çapta birçok karmaşık ilerleme hattını kendisine tabi kılmıştır, ki bunlar arasında yakıt çıkarma alanında dikkat çekici üretim gerilemeleri ya da üretimin tamamen kesilmesi de yer alır.

İkincisi, çok sayıda teknik ilerleme bu yayılmayı sağlayan en önemli etkenler olmuş, sonuçta belli kirlilik oranlarının azalmasının (hatta dikkat çekici bir örnekte, küresel emisyonda mutlak bir gerileme gözlenmesinin) yanı sıra çıkarma, nakliye ve işleme yöntemlerinin daha ucuz ve daha verimli olmasını sağlamışlardır. Üçüncüsü yüksek kaliteli yakıtlardan yana bir yön değişikliği olduğu açıktır, yani kömürlerden ham petrol ve doğal gaza geçilmiştir, bu da küresel çapta fosil yakıt çıkarmanın nispeten karbondan yoksunlaşması (H:C oranının yükselmesi) sonucunu doğurmuştur; atmosfere salınan mutlak CO₂ seviyeleri de yıllık geçici birkaç küçük gerileme dışında yükselmiştir. Odun yakmanın H:C oranı farklılık gösterir, ama 0,5'ten daha yüksek değildir, bu oran kömür için 1,0, benzin ve kerosen için 1,8 ve doğal gazın baskın bileşeni metan için 4,0'dır.

Enerji içeriği açısından karşılaştırıldığında, yüksek karbonlu yakıtlar (odun ve kömür) 1900'de dünyada harcanan enerjinin yüzde 94'ünü, 1950'de yüzde 73'ünü temin ediyordu, ama 2000'de sadece yaklaşık yüzde 38'ini karşılıyordu (Smil 2010a). Bunun sonucunda dünya fosil yakıt arzının ortalama karbon yoğunluğu gerilemeye devam etti: küresel toplam asli enerji arzının birimi başına karbon açısından ifade edildiğinde bu oran 1900'de 28 kg C/GJ iken 1950'de 25'in hemen altına, 2010'da 19'un biraz üstüne geriledi, kabaca yüzde 30'luk bir gerileme kaydedildi; bunun ardından Çin'de kömür üretiminin hızla artması sonucu yirmi birinci yüzyılın ilk on yılında bir parça arttı (Şekil 5.12). Aynı zamanda fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanan küresel karbon salımı da 1900'de 534 Mt iken 1950'de 1,63 Gt'ye, 2000'de 6,77 Gt'ye ve 2010'da 9,14 Gt'ye çıktı (Boden, Andres ve Marland 2016).

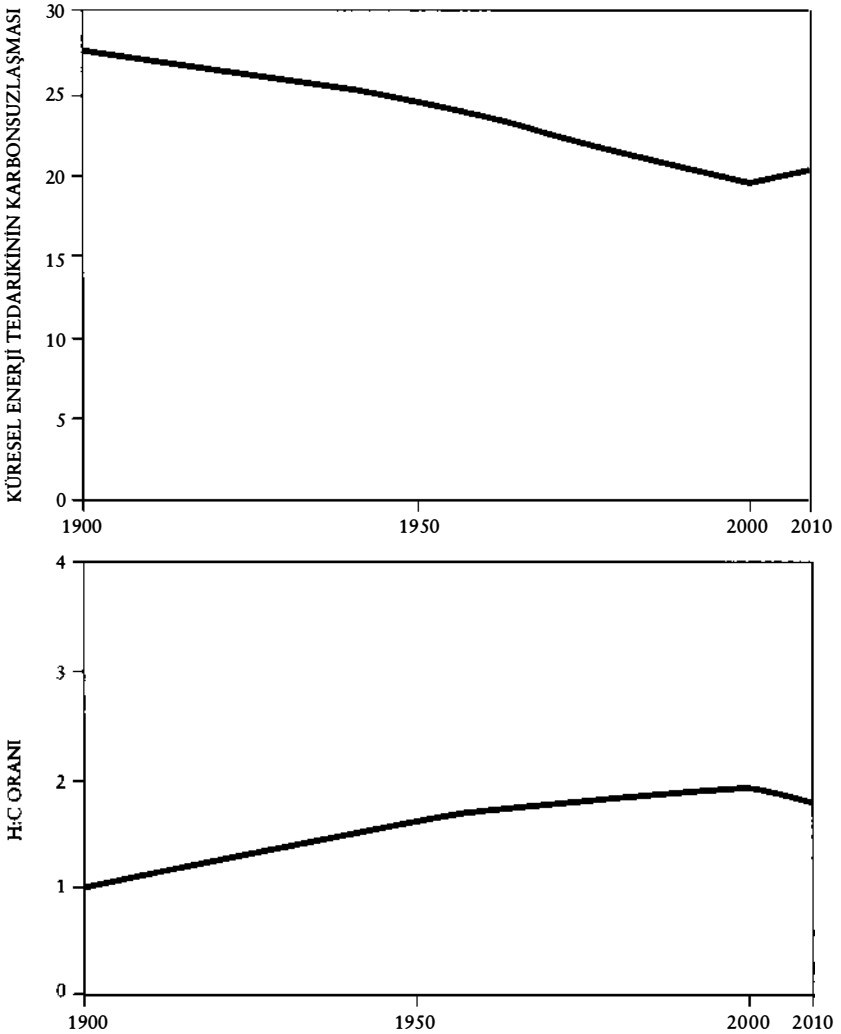
Elektrik üretimi teknik iyileşmeleri geniş ölçekli mekânsal yayılmayla birleştirmiştir, ikinci süreç şaşırtıcı biçimde ABD'nin bazı bölgelerinde bile ertelenmiştir ve nüfusun kalabalık olduğu düşük gelirli birçok ülkede de tamam-

lanmış olmaktan hâlâ uzaktır. Bu süreç küçük, yalıtılmış ağlarla başlamış, büyük şebekelere doğru ilerlemiştir: Avrupa'da şebekeler kıtanın tamamına yayılıyordu, Rusya'da geniş bir ağ vardı; 1990'dan itibaren Çin'de uzun mesafeli birçok yeni ara bağlantı inşa edilmiştir, yüksek gelirli ekonomiler arasında sadece ABD ve Kanada'da ülke çapında bütünleşik şebekeler yoktur. Elektrik sanayiini etkileyen en son dönüşüm rüzgâr türbinleri, güneş enerjisi pilleri ve merkezi güneş enerjisi istasyonlarının tesis edilmesidir: (yenilenebilir enerji üretiminin eski biçimi olan hidroelektrik üretimine karşı) bu yeni yenilenebilir enerji biçimleri sıklıkla yoğun bir biçimde teşvik ve sübvans edilir, hızlı kapasite eklemeleri de yapılmıştır, ama bunlara içkin olan kesintililik hali ve düşük kapasiteli olmaları gibi etkenler mevcut şebekelerle bütünleştirilmeleri konusunda hiç de önemsiz olmayan sorular doğurmaktadır.

Kömürler

Kömür üretiminde iki evrensel eğilim, yeraltından çıkarmanın giderek mekanikleşmesi ve yüzey madenciliği payının giderek artması olmuştur. Amerika'da gözlenen dünyanın en yüksek verimlilik oranları 1900'de vardiya başına her madenci için 1 t iken ülke çapında işçi başına saatte ortalama yaklaşık 5 t'ye yükselmiştir; Appalach dağlarında yer altı madenlerinde saatte 2-3 ton ile Montana ve Wyoming'de Powder Nehri Havzası'nda yüzey madenlerinde saatte 27 ton arasında değişen verimlilik oranları söz konusudur (USEIA 2016a). Yüksek verimlilik Avustralya ve Almanya'da yüzeyden kalın linyit (kahverengi kömür) çıkarma faaliyetlerinin de baskın özelliğidir. Böyle büyük madenlerden çıkarılan kömürler madenin bitişiğindeki (maden ağzı) büyük enerji tesislerinde yakılmaktadır. Bu kömürün uzak piyasalara nakli güçlü bir lokomotif tarafından çekilen 100'den fazla büyük, hafif, da-ima birbirine bağlanmış vagonlardan oluşan özel trenlerle gerçekleştirilmektedir (Khaira 2009).

Kömür tüketimi, geleneksel sanayi, hane ve nakliyat piyasalarındaki kayıplar kömüre dayalı elektrik üretiminden elde edilen kazanımlarla (ve çok daha az bir düzeyde metalurjik kok kömürü üretiminin artması ve kömürün kimyasal sentezleri besleyen bir madde olarak kullanılması sayesinde) telafi edilirken iki ana eğilimin gelişmesine tanık olmuştur. Evlerde ısınma ve pişirme için kömür yakılması yerini bugün doğalgaz ve elektriğin başat olduğu daha verimli alternatiflere bırakmıştır. Kömür yirminci yüzyılın ilk yarısında başlıca nakliyat yakıtı olarak kalmıştır, ama lokomotifler

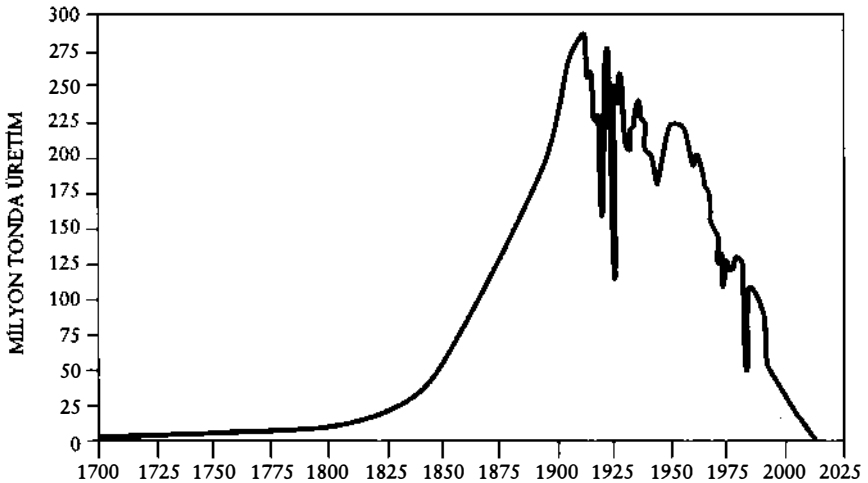


Şekil 5.12 Dünyanın asli enerji tedarikinin karbonsuzlaşması, 1900-2010. Smil'deki (2014b) verilerden derlenmiştir.

ve gemilerin dizel motorlara geçmesi (sırasıyla yüzyılın birinci ve üçüncü on yıllarında başlamıştı) İkinci Dünya Savaşı sonrasında ivme kazanmıştır, bütün yeni hızlı trenler (önce Japonya'da 1964'te *shinkansen*, sonra 1978'de Fransa'da TGV, sonra Avrupa ve Asya'daki diğer versiyonlar) elektrikli motorlarla çalışır.

Kömürün yakılması 1880'lerde, geleneksel kömür madenciliğinin yapıldığı bütün ülkelerde termal elektrik üretiminin başlatılmasında etkili olmuştur ve bu bağımlılık ancak İkinci Dünya Savaşı sonrasında büyük merkezi enerji santrallerinin kurulmasıyla, yüzey madenciliğinin artan payının kömürü çok daha ekonomik hale getirdiği dönemlerde artmıştır. 1950'lerde kömür yakılması ABD, Birleşik Krallık, Almanya, Rusya ve Japonya'da elektrik üretiminde en büyük paya sahipti. Fuel oil 1960'larda önem kazandı, ama çoğu ülke 1970'lerde OPEC'in petrol fiyatlarını artırması sonrasında elektrik üretiminde fuel oil kullanmaya son verdi; Çin, Hindistan ve ABD'de kömüre bağımlılık hâlâ yüksektir. Metalurjik kok kömürü kullanımı (kg kok/kg sıcak metal) yıllardır gerilemektedir, ama pik demir eritmenin dünya çapında yayılması, 1900'de 30 Mt'den 2015'te yaklaşık 1,2 Gt'ye çıkması, kok kömür üretimini kabaca 1,2 Gt'ye itmiştir (Smil 2016).

Ülkelerin kömür tarihlerinde birçok öngörülebilir ve bazı şaşırtıcı gelişmeler dikkat çeker, ki bu yakıtın çıkarılmasına öncülük eden ülkede kömür madenciliğinin son bulması da bunlar arasında yer alır (Şekil 5.13). Britanya'da kömür üretimi 1913'te 292 Mt ile zirveye ulaşmıştı, ama kömür Britanya'daki sanayilere enerji temin etmekle kalmamış, Britanya'nın sömürge imparatorluğunun on dokuzuncu yüzyıldaki yayılmasını da beslemişti ve Britanya donanma kuvvetlerine ve ticari gemiciliğe hakim olması



Şekil 5.13 Britanya'nın kömür üretimi, 1700-2015. Nef (1932) ile Enerji & İklim Değişikliği Bakanlığı'nın verilerinden derlenmiştir (2015).

sayesinde ülkenin ticaret imparatorluğunun işleyişi de enerjisini kömürden almıştı. 1947’de İşçi Partisi hükümetinin kömür sanayini millileştirip Ulusal Kömür Kurulu’nu yarattığı tarihte, Britanya’da kömür üretimi hâlâ 200 Mt’ydi (Smil 2010a). Savaş sonrasında kömür üretimi 228 Mt ile 1952’de (ve sonra yine 1957’de) zirveye tırmandı, ama sonra ham petrol ithalatının artması, 1970 sonrasında da Kuzey Denizi petrolü ve doğalgazının kullanılabilir olması, ülkenin kömür bağımlılığını 1980’de yarıya indirdi.

1984’te uzun süren bir kömür madencileri grevi sırasında ülkenin toplam kömür üretimi 51 Mt’ye geriledi, sonra kısa bir süreliğine önceki haline geri dönüp ardından gerilemeye devam etti, gerileme 1994’te yeniden özelleştirme sonrasında da devam etti (Smil 2010a). 2000’de kömür üretimi sadece 31 Mt civarındaydı, Temmuz 2015’te Birleşik Krallık Kömür İşletmeleri Thoresby madeninin kapatılacağını, Britanya’nın son madeni Kellingley’de faaliyetin Aralık 2015 itibarıyla son bulacağını duyurdu (Jamasmie 2015). Britanya’yı ekonomik ve stratejik olarak muhteşem hale getiren (1920’lerin başında istihdam seviyesi 1,2 milyon işçiyle toplam işgücünün yaklaşık yüzde 7’sini oluşturan) sanayi, 400 yıl boyunca ülkenin enerjisini sağladıktan sonra bugün bir-iki müze ve yeraltında rehberli turlardan ibarettir (Ulusal Kömür Madencilik Müzesi 2015).

Amerika’da çıkarılan kömür miktarı 1950’de 508 Mt’yi buldu ve 2001’de 1,02 Gt’ye tırmandı. Bu süre zarfında Amerika bütün nakliyat ve neredeyse bütün ev içi piyasalarını kaybetti ve kok kömür üretimi de geriledi, ama ihracat genişledi. Yapılan nakliyatın yüzde 90’ından fazlası artık termal enerji santrallerinde yakılıyor: 1950’de ABD elektriğinin yüzde 46’sını kömürden üretiyordu, kömürün bu üretimdeki payı 1990’da yüzde 52’ye yükseldi, on yılı aşkın bir süre boyunca bu kadar yüksek kaldı; 2010’a gelindiğinde bu pay hâlâ yüzde 45 civarındaydı, ama 2015’te (eski kömür yakılan fabrikaların kapatılması ve bol miktarda ucuz doğalgaz sayesinde) bu oran yüzde 33’e geriledi (USEIA 2015a). ABD’nin kömür üretimi 1985’te Çin’in kömür üretiminin gerisinde kaldı, kömür o tarihten beri Çin’in olağanüstü ekonomik büyümesine enerji veren en önemli yakıttır (USEIA 2015b; Kutu 5.12).

SSCB 1983’e kadar ABD’den daha büyük bir kömür üreticisiydi, devletin çökmesinin ardından Rusya’da kömür üretimi gerilerken bu açığı doğal gaz ve petrol kapattı. Hindistan bugün dünyanın en büyük kömür üreticisidir (2014’te Çin’in kömür üretiminin yalnızca altıda biri kadar bir üretim söz konusuydu), ama Hindistan’ın kömürü Çin ve ABD rezervlerinden çok

Kutu 5.12

Çin'de kömür üretimi

Çin Komünist Partisi 1 Ekim 1949'da yeni bir rejim kurduğunda, Stalinist tipteki sanayileşmesinin enerjisini Çin'in bol miktardaki, ama çok eşitsiz bir biçimde dağılmış kömür rezervleriyle sağladı. Sonraki yıllarda ülkenin kömüre göreli bağımlılığı geriledi, ama toplamalar rekor seviyelere ulaştı (Smil 1976; Thomson 2003; Çin Enerji Grubu 2014; Dünya Kömür Derneği 2015). Kömür üretimi 1949'da 32 Mt'yken 1957'de 130 Mt'ye çıktı, 1960'ta Mao Zedong'un demir, çelik ve diğer sanayi ürünleri üretiminde Britanya'yı 15 yıl içinde geride bırakmak üzere başlattığı, adı kötüye çıkmış (açlığa neden olan) İleri Doğru Büyük Atılım sırasında kömür üretiminin yaklaşık 400 Mt'ye yükseldiği ileri sürülüyordu (Huang 1958). Atılımın çöküşü sonrasında daha düzenli bir ilerleme, kömür üretimini 1978'de 600 Mt'nin üstüne çıkardı; o tarihlerde Deng Xiaoping nihayetinde Çin'i dünyanın en büyük mamul mallar ihracatçısı haline getiren ve yaklaşık 1,4 milyar insanın hayat standartlarını yükselten uzun erimli ekonomik reformlarını başlatmıştı.

Değişmeyen iki şey vardı, onlar da partinin devleti sıkı bir denetim altında tutması ve ekonominin kömüre bağımlı olmasıydı. Çin'in kömüre göreli bağımlılığı 1955'te yüzde 90'ın üstündeyken, 2010'da yüzde 67'ye gerilemiş, ülkede kömürün elektrik üretimindeki payı da azalmıştır, ama hâlâ yüzde 60'ın üzerindedir. Çin'in toplam kömür üretimi 1980 (907 Mt) ve 2013 (3,97 Gt) arasında dört kattan fazla arttı; 2013'teki kömür üretimi, dünyanın geri kalanının toplam kömür üretimine neredeyse eşitti. 2014 kömür üretiminde yüzde 2,5'lik bir gerilemenin yaşandığı ilk yıl oldu, 2015'te yüzde 3,2'lik bir gerileme daha yaşandı, ama reel toplamalar belirsizliğini korumaktadır. Eylül 2015'te Çin Ulusal İstatistik Bürosu 2000 ile 2013 arasında yıllık kömür üretimiyle ilgili önceki verilerini hiçbir açıklama yapmaksızın artırdı. Muazzam boyutlardaki kömür üretimi Çin'de yaşanan ölümcül iş kazalarının başlıca nedenlerinden biri olmuştur ve son derece yüksek düzeylerdeki hava kirliliğinin de en önemli nedenidir, küçük parçacık madde seviyesi ($<2.5 \mu\text{m}$) tekrar tekrar, istenen azami seviyelerin bir kerte üstüne çıkmıştır (Smil 2013b).

daha düşük bir kalitededir ve üretimin verimliliği hâlâ sıkıntılıdır. Endonezya ve Avustralya (her ikisi de büyük ihracatçılardır) kömür üretiminde ilk beşte yer alan diğer ülkelerdir, onları Rusya, Güney Afrika, Almanya, Polonya ve Kazakistan izler; aralarında Almanya ve Britanya'nın da yer aldığı eskinin bazı büyük kömür üreticileriye önemli kömür ihracatçıları haline gelmişlerdir.

Kömür yakıtı, salınan birim enerji başına diğer fosil yakıtların hepsinden daha fazla CO_2 ürettiğinden (bu oranlar genellikle kömür için 30 kg'den fazla C/GJ, sıvı hidrokarbonlar için yaklaşık 20 kg C/GJ ve doğalgaz için 15 kg'den az C/GJ'dir) hızlı küresel ısınma kaygısı taşıyan bir dünyada kömürün geleceği belirsizdir. Çin'de, Hindistan'da ve en azından bir düzine kadar başka ülkede elektrik üretimi için ağırlıklı olarak kömüre dayanılması, bu yakıtın hızla terk edilmesini engellemektedir, ama uzun vadede kömür hâlâ



Şekil 5.14 El-Burkan petrol yatağındaki kuyular (resmin sağında, doğusunda) 1991’de geri çekilen Irak ordusu tarafından ateşe verildi. earthobservatory.nasa.gov tarafından 7 Nisan 1991’de alınmış görüntü.

çok bol kaynaklar halinde bulunsa da üretimi çevresel kaygılar nedeniyle sınırlı olacak ilk büyük enerji kaynağı olabilir.

Hidrokarbonlar

Yirminci yüzyıl başında petrol sadece bir avuç ülkede bol miktarda üretiliyordu, bu yakıt fosil yakıtlardan elde edilen bütün enerjinin sadece yüzde 3’ünü karşılıyordu; 1950’ye gelindiğinde bu oran yaklaşık yüzde 21’di, ham petrolün enerji içeriği 1964’te kömürünkini geride bıraktı ve 1972’de bütün fosil yakıtlardan elde edilen enerjide yüzde 46’lık payla petrol zirveye yerleşti. İki yaygın izlenim vardır (nasıl ki on dokuzuncu yüzyıl kömürün damgasını taşıyorsa yirminci yüzyılın da petrolün damgasını taşıdığı izlenimi) ki ikisi de yanlıştır: odun 1900 öncesinde en önemli yakıttı ve bir bütün olarak alındığında yirminci yüzyıl hâlâ kömürün hakimiyetinde olmuştu (Smil 2010a). Yaptığım en iyi hesaplar kömürün yaklaşık yüzde 15 ham petrolün önünde olduğunu gösterir (yaklaşık 5,2 YJ’ye karşılık 4 YJ), işlenmiş petrolün enerji dışı uygulamaları (yağlama maddeleri ve döşeme malzemesi olarak) da dâhil edildiğinde kömür yine de sıvı hidrokarbonların biraz önünde olur ya da

çıkarılan kütlelerin yaygın enerji denklıklarına çevrimine içkin belirsizlikler nedeniyle yirminci yüzyılda iki yakıtın birikimsel üretimi kabaca eşit olur.

Ama ham petrolden rafine edilerek ayrılan sıvı yakıtlar kömürlerden üstündür ve yirminci yüzyılda kömür piyasası (biraz önce gösterdiğimiz üzere) tedricen sadece elektrik üretimi ve kok gibi iki büyük sektöre sıkışmışsa da sıvı hidrokarbon piyasası hem muadil ürünler sayesinde hem yeni büyük tüketim sektörlerinin yükselmesi sayesinde sürekli genişlemektedir. Başlıca muadil ürünlerin üretimi, gemi nakliyatında (Birinci Dünya Savaşı'ndan önce başlayıp 1920'lerde hızlanan bir süreçle) ve sonra demiryollarında (1920'lerden itibaren) kömürün yerini fuel oil ve mazotun alması; sanayide, kurumlarda ve evlerde ısınmada kömürün yerini fuel oil'in alması ve (İkinci Dünya Savaşı sonrasında) petrokimya sanayiini besleyen ürünler olarak da kömürün yerini sıvı ve gaz hidrokarbonların almasıyla sonuçlanmıştır.

İlk büyük yeni piyasa Birinci Dünya Savaşı öncesinde Ford'un Model T'sinden başlayarak bütçeye uygun otomobillerin çıkmasıyla ve İkinci Dünya Savaşı sonrasında otomobil sahipliğinde hızlı bir yükseliş yaşanmasıyla yaratıldı; ikinci büyük yeni piyasa 1950'lerde ticari havacılıkta jet motorlarının kullanılmasıyla başladı, uçmayı çok pahalı ve ender bir deneyimden küresel bir kitlesel sanayiye çeviren bir yenilikti bu (Smil 2010b). Petrol sanayii, işleyişinin her yönünü etkilemiş çok sayıda teknik ilerleme nedeniyle bu artan talebi karşılayabildi. Öyle ki sırf yirminci yüzyılda kilit önemdeki iyileştirmelerle sınırlı tutulan bir liste bile bir düzineden fazla kalem içerir (Smil 2008a).

Böyle bir listenin en başında jeofizik tahminlerdeki ilerlemelerin yer alması gerekir. Bu ilerlemeler arasında elektrik iletkenlik ölçümleri (1912), yüzey altında hidrokarbon taşıyan yapıları tanımlamaya yönelik elektrikli direnç ölçer kayıtları, toprakta doğal olarak mevcut elektrik potansiyeli (1931) ve Conrad Schlumberger (1878-1936) ile akrabalarının geliştirdiği, daha sonra onun adını taşıyan şirketin ve başka petrol-gaz arayıcıların mükemmel hale getirdiği indüksiyon kayıtları* yer alır. Petrol üretimindeki ilerlemeler öncelikle döner sondajı (ilk kez 1901'de Texas'ta Beaumont'ta Spindletop petrol kuyusunda kullanılmıştır; bkz. Şekil 5.6), sonra Howard Hughes'un (1905-1976) 1909'da döner kaya kesiciyi geliştirmesini, 1933'te trikon delginin icadını, petrol akışının izlenmesi ve düzenlenmesindeki, ku-

(*) Yerkabuğunda hava, petrol ya da çamur dolu bir delikte yapılan sondaj kayıtları -ç.n.

yularda patlamaların önlenmesindeki iyileştirmeleri kapsar. İkinci ve üçüncü seviyedeki geri kazanım yöntemlerine (daha fazla petrolün yüzeye çıkmasını zorlamak için su ve başka sıvıların ya da gazların kullanılması) giderek daha bağımlı hale gelmesi kuyuların ömrünü uzatmış, geleneksel olarak çok düşük olan verimliliklerini artırmıştır (bir rezervdeki petrolün ancak yüzde 30 kadar az bir kısmı geri kazanılabiliyordu).

Petrol üretiminin giderek artan bir bölümü, açık denizdeki kuyulardan gelmektedir. Rıhtımlardan kıyıya yakın kuyular açılması 1900'de California'da yaygındı, ama karadan görülmeyen ilk petrol kuyusu 1947'de Louisiana açıklarında açıldı. Açık denizlerdeki teçhizat (çoğunlukla yarı gömülebilir tasarımlardır) 2.000 metreden derin sularda çalışır. Açık denizlerdeki büyük petrol sahalarına kurulan üretim platformları şimdiye kadar inşa edilmiş en büyük yapılar arasında yer alır. Üretimde en yakın tarihte sağlanan ilerlemeye alışıldık olmayan ham petrol kaynaklarından çıkarılan petrolün artmasıdır; bu kaynaklar arasında ağır petroller (dünyanın birçok yerinde), katranlı kuma gömülmüş petrol (Alberta, Venezuela) ve hidrolik parçalamayla killi şistten petrol üretimi yer alır. ABD'nin öncüsü olduğu bu teknik o kadar başarılı olmuştur ki Amerika bir kez daha dünyanın en büyük ham petrol ve diğer petrol sıvıları üreticisi haline gelmiştir; ama sadece ham petrol düşünüldüğünde Suudi Arabistan 2015'te hâlâ bir parça öndeydi, ABD'de üretilen 567,2 Mt ham petrole karşılık 568,5 Mt ham petrol ürettiyordu.

Nihayetinde kıtaları aşma yetisine sahip geniş çaplı boru hatları haline gelen kesintisiz çelik borular, ham petrol nakliyatını dönüştürmüştür. Bu borular karada büyük miktarda petrol nakletmenin en sağlam, en güvenilir, en temiz ve en güvenli yoludur. Amerika'da Körfez'den Doğu Sahili'ne ham petrol taşıyan, İkinci Dünya Savaşı sırasında inşa edilmiş boru hatları 1970'lerde Batı Sibiryâ ham petrolünü Avrupa'ya taşımak üzere tasarlanmış dünyanın en uzun boru hattı sisteminin gerisinde kaldı. Ust-Balik-Kurgan-Almetievsk petrol boru hattı (çapı 120 cm, uzunluğu 2.120 km) dev boyutlardaki Samotlor petrol havzasından Rusya'nın Avrupa'daki kısmına her yıl 90 Mt ham petrol taşır, daha sonra bu hatta bağlanan 2.500 km uzunluğundaki geniş çaplı yan boru hatları bu petrolü Avrupa piyasalarına, Almanya ve İtalya kadar Batı'ya ulaştırır. İkinci Dünya Savaşı sonrasında Avrupa ve Japonya'nın petrol ithalat talebi petrol tankeri boyutlarında hızlı bir artışa yol açtı (Ratcliffe 1985). Bu da, kaynağı ile nihai kullanıcı arasındaki mesafe sadece küçük bir ekonomik değerlendirme haline geldiğinden ve

Kutu 5.13

Dev petrol tankerleri

İlk tanker, 1886'da suya indirilen Britanya yapımı Alman Glückauf'ın brüt tonajı sadece 2.300 tondur (Tyne Built Ships 2015). Sonraki yıllarda tankerlerin büyümesiyle birlikte azami büyüklük de 1920'lerin başında olarak yaklaşık 20.000 detveyt tona (dwt / yüksüz durumdaki ağırlık) çıktı. Savaş sırasında en sık kullanılan ABD tankerlerinin (T-2) kapasitesi 16.500 dwt'ydı, hızlı kapasite artışı, ancak 1950'lerin sonunda küresel petrol ticaretinin yayılmasıyla birlikte (Avrupa ve Japonya'ya nakliyatla) başladı. *Universe Apollo* 1959'da 100.000 dwt'lik ilk gemi oldu, 1966'de *Idemitsu Maru* 210.000 dwt'ye ulaştı, OPEC'in 1973'te petrol fiyatlarını beş katına çıkardığında en büyük tanker 300.000 tondan fazlasını taşıyabiliyordu. (Kumar 2004)

Bir milyon ton ham petrol taşıma kapasitesine sahip gemiler yapmak teknik olarak mümkündür, ama birçok nedenden ötürü pratik değildi: Tasarımları izledikleri rotaları ve uğradıkları limanları sınırlar (Süveyş Kanalı ya da Panama Kanalı'ndan geçemezler), durmaları için uzun mesafeler gerekir, sigortalımaları çok pahalıdır; Amoco Cadiz (Fransa 1978), Castillo de Belver (Güney Afrika 1983) ve Exxon Valdez'in (Alaska 1989) başına geldiği gibi feci petrol sızıntılarına neden olmuşlardır. Dünyanın en büyük petrol tankerleri *Seawise Giant* 1979'da yapıldı, büyütüldü ve 564.763 dwt olacak hale getirildi, 1988'de İran-Irak Savaşı sırasında vuruldu, (yaklaşık 459 m uzunluğundaki) Jahre Viking adıyla yeniden denize indirildi (1991-2004), sonra adı *Knock Nevis* olarak değiştirildi ve Katar açıklarında yüzen bir depolama-yükleme birimi olarak kullanıldı (2004-2009), sonra Hint gemi sökücülere satıldı ve *Mont* adı verilerek Gujarat'ta Alang'a doğru son yolculuğuna gönderildi (Konrad 2010).

kıtalararası yıllık ham petrol satışları 2 Gt'yi aştığından petrolü ekonomik gücün yetebileceği küresel bir emtia haline getirdi (Kutu.5.13).

Petrolü rafine etme konusundaki en önemli tek ilerleme ham petrolün katalitik ayrılmasıdır. Termal ayrılma 1936'ya kadar normdu, Eugene Houdry (1892-1962) bu tarihte Sun Oil'in Pensilvanya rafinerisinde ilk katalitik ayırma biriminde otomobillerin başlıca yakıtı olan yüksek oktanlı benzin üretmeye başladı. Katalitik ayırma ağır ara bileşiklerden daha yüksek miktarda daha değerli (hafif) ürün (benzin, kerosen) elde etmeyi mümkün kılıyordu. Bundan kısa süre sonra üretimi kesmeksizin yeni bir devin gen yatak katalizörü yeniden üretilebildi ve havada uçan tozlu katalizörle yüksek oktanlı benzin üretiminde daha iyi sonuçlar elde edildi (Smil 2006). 1950'lerde sıvı katalitik ayırma nispeten yüksek ısılarda hidro-ayırma ile destekleniyordu; bu iki teknik hâlâ modern rafine işlemlerinin başlıca dayanak noktasıdır. Rafine etme işleminde, sıvı yakıtların desülfürize olmasından da yararlanılmıştır, ki bu da mazot gibi yarattığı kirlilikle dillere destan olmuş yakıtların bile düşük emisyonlu yolcu arabalarında kabul edilebilir bir yakıt olmasını sağlamıştır (CDFA 2015).

Bütün bunların dikkat çekici dört sonucu oldu. Birincisi, küresel petrol üretimi yirminci yüzyılda kabaca 200 kat arttı; 2015'e gelindiğinde (4,3 Gt'nin üstünde) 2000'e göre yaklaşık yüzde 20 artmıştı, petrolün enerji içeriğinin kömürünkini geride bıraktığı 1964'ten bu yana petrol dünyanın en yaygın olarak kullanılan yakıtıdır. İkincisi petrol artık her kıtada, yüksek Kuzey ve Güney Kutbu denizleri hariç her okyanusta açık denizdeki kuyularda, karada yerin 7 km kadar altına inen derin yataklardan üretilmektedir; belirtmeden geçmeyelim, Brezilya'daki Tupi rezervleri Atlantik yüzeyinin 2,1 km altında başlayıp okyanus dibinin yaklaşık 5 km altına iner. Üçüncüsü petrol en değerli ticaret metasıdır: 2014'te (West Texas Intermediate'in** fiyatı varil başına ortalama 93 dolardı) yıllık petrol üretimi 3 trilyon dolar değerindeydi, 2015'te (fiyatlar varil başına 49 dolara gerilediğinden) bu rakam yaklaşık 1,6 trilyon dolardı (BP 2016).

Son olarak petrol üretimi geniş bir alana yayılmıştır, dünyanın en büyük petrol havzaları karada, 1927 (Kerkük, Irak) ile 1958 (İran'da Ahvaz) arasında Basra Körfezi'nde keşfedilmiştir. Suudi Arabistan'ın doğu kesiminde bulunan dünyanın en büyük petrol yatağı El-Gavar'da 1951'den beri petrol üretilmektedir, ikinci büyük petrol havzası olan Kuveyt'teki el-Burkan 1946'dan beri çalışmaktadır (Smil 2015b; Şekil 5.14). Şu temel gerçeği hiçbir şey değiştiremez: 2015'te bilinen alışıldık (sıvı) petrol rezervlerinin neredeyse yarısı; maalesef aynı zamanda karmaşık çatışma ve kronik siyasal istikrarsızlık kaynağı olarak dünyanın en önde gelen bölgesindedir (BP 2016).

Doğal gaz yıllarca küresel enerji arzına önemsiz bir katkıda bulunan bir yakıt olarak kaldı: 1900'de bütün fosil yakıtların sadece yüzde 1'ini oluşturuyordu, 1950'ye gelindiğinde doğalgazın payı hâlâ yüzde 10 civarındaydı, ama sonrasında üç büyük talep eğilimi doğalgazın bütün fosil yakıtlardaki payını 2000 yılında yüzde 25 civarına taşıdı ve yirminci yüzyılda fosil yakıtların bu en temizinden her yıl elde edilen toplam enerjide 375 kat bir artışa tanık olundu (Smil 2010a). Nispeten en küçük, ama çok önemli yeni piyasa, doğalgazın amonyak sentezi (bugün ağırlıklı olarak katı üre üretiminde hammadde olarak kullanılan en önemli azotlu gübre, Smil 2001; IFIA 2015) ve plastik üretiminde hem hammadde hem yakıt olarak kullanılmasıdır.

Bu en büyük yeni küresel piyasa, İkinci Dünya Savaşı sonrası sanayileşmenin ivme kazandığı dönemde Batı'da çoğu kentte yaşanan yüksek düzey-

(**) Petrol fiyatlandırılarda köşe taşı olarak kullanılan yüksek kaliteli ham petrolü ifade eden bir terim -ç.n.

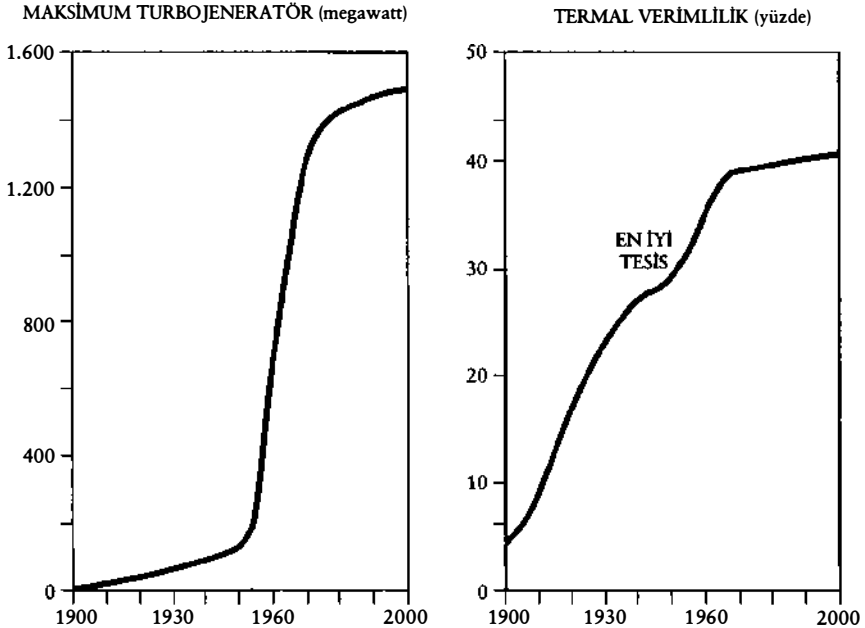
deki hava kirliliğine cevaben gelişmiştir: Sanayide, kurumlarda, evlerde ısıtma (ve pişirmede) kömür ve fuel-oil'in yerini doğalgazın alması parçacık madde salımlarını ortadan kaldırmış, SO_2 üretimini neredeyse bertaraf etmiştir (yakma öncesinde sülfür bileşiklerini gazdan ayırmak zor değildir). Latin Amerika ve Asya'nın hızla modernleşen ülkelerindeki kentler bu eğilimi takip etmiştir, gerçi Tokyo ve Japonya'daki diğer bitişik kentler, Seul, Guangzhou, Şangay ve Mumbai dâhil birçoğu ithal edilmiş sıvı doğalgaz (LNG) kullanmak zorunda kalmıştır. Doğalgaz kullanımını artıran en son eğilim, yakıtın gaz türbinleriyle elektrik üretiminde verimli bir biçimde kullanılması, kombine-döner gaz türbinleriyle elektrik üretiminde daha verimli sonuçlar vermesidir (bir sonraki bölüme bakınız). 2005 sonrasında hidrolik parçalama Amerika'da doğalgaz üretiminin daha fazla gerilemesine nokta koymakla kalmamış, ülkeyi yine en büyük doğalgaz üreticisi haline getirmiştir.

Doğalgazın boru hatlarıyla nakledilmesi, sıvıların taşınmasına kıyasla doğal olarak daha pahalıdır, uzun mesafeli boru hatları, ancak geniş çaplı (çapları 2,4 metreyi bulan) çelik borular ve verimli gaz türbini kompresörlerinin kullanılmasıyla ekonomik bir hal almıştır (Smil 2015a). ABD ve Kanada 1960'ların sonundan beri entegre doğalgaz boru hattı sistemlerine sahiptir, ama en kapsamlı uluslararası ağ 1960'ların sonundan beri Avrupa'da gelişmektedir. En uzun boru hatları, Urengoy'dan Ukrayna-Slovakya sınırındaki Uzhgorod istasyonuna kadar 4.451 km'lik hat ile Yamal'dan Almanya'ya uzanan 4.190 km'lik hat, bugün Sibiryâ doğalgazını Batı Avrupa'ya taşımakta, burada Hollanda, Kuzey Denizi ve Kuzey Afrika'dan gelen tedarik hatları birleşmektedir.

1960'larda ilk LNG nakliyatları çok pahalı olmuştu, sonraki otuz yılda sınırlı doğalgaz ticareti çoğunlukla doğalgaz kaynaklarına sahip olmayan Doğu Asya ülkelerine (Japonya, Tayvan, Güney Kore) gaz tedarik ediyordu. Yeni doğalgaz kaynaklarının keşfedilmesi ve daha büyük LNG tankerlerinin çıkması bu ticaretin nispeten ani bir biçimde genişlemesini beraberinde getirdi, 2015'e gelindiğinde ihraç edilen toplam doğalgazın neredeyse üçte biri tankerlerle naklediliyordu (BP 2016). Japonya hâlâ en büyük doğalgaz ithalatçısıdır, ama çok geçmeden Çin en büyük doğalgaz alıcısı haline gelecektir; geleneksel olarak Kanada'dan boru hattıyla doğalgaz ithal eden ABD ise büyük bir rol değişimiyle, önde gelen LNG ihracatçılarından biri olma, hatta Basra Körfezi'nde dünyanın en büyük doğalgaz yatağından LNG satan küçük, zengin bir ülke olan Katar'a rakip çıkma umuduyla birçok yeni LNG tesisi geliştirmektedir (Smil 2015a).

Elektrik

Elektriğe bağlanmanın ilerletilmesi bütün sistem bileşenlerinin veriminin katlanarak artmasını gerektirmiştir. İlk, nispeten küçük kazanlar hareketli ızgaralar üzerinde yakılan kömür yumrularıyla dolduruluyordu. 1920'lerden itibaren bunların yerini, yanma odacığına verilen tozlaştırılmış yakıtı yakan ve kazan duvarlarını çevreleyen çelik borularda dolaşan suyu ısıtan çok katkılı birimler aldı. Fuel oil ve doğal gaz da büyük merkezi enerji santrallerinin olağan tercihi haline geldi, ama fuel oil'in kullanılması (Rusya ve Suudi Arabistan dışında) OPEC'in 1979-1980'de petrol fiyatlarını ikinci kez artırması sonrasında kesintiye uğradı, elektrik üretiminde kullanılan doğal gaz bugün sadece gaz zengini ülkelerde değil, pahalı LNG ithal etmek zorunda olan ülkelerde bile çoğu kez gaz türbinlerinde yakılır. ABD'de gazla üretilen enerjinin toplamdaki payı 1990'da yüzde 12'yken 2014'te yüzde 33'e tırmandı, Japonya'da LNG'nin payı 2010'da yüzde 28'ken, 2012'de Fukuşima felaketi sonrasında nükleer enerji santrallerinin kapatılmasıyla yüzde 44'e tırmandı (The Shift Project 2015).



Şekil 5.15 Buhar turbojeneratörlerinin maksimum kapasiteleri ve en iyi termal enerji tesislerinin verimlilik düzeyleri, 1900-2000. Dalby (1920), Termuehlen (2001) ve Smil'deki (2008a) verilerden derlenmiştir.

Geniş kazanlar, en yüksek verim oranları 1900’de olduğundan üç basamak daha büyük olan turbojeneratrlere buhar sağlar (en büyük birim, Fransa’daki Flamanville Nükleer Enerji Santrali’nin verimi 1,75 GW’dır) ve daha yüksek olan işleyiş basınçları ile ısıları 1900’de yüzde 10’un altında olan en iyi verim oranlarını yüzde 40’ın biraz üstüne çıkar mıştır (şekil 5.15). Gaz türbini (en büyük makinelerde oran artık 400 MW’nin üstündedir) ile (gaz trbiniinden çıkan sıcak gazı kullanarak buhar üreten) buhar türbini-
lerinin bir bileşimini kullanarak yüzde 60 düzeyinde daha yüksek verime erişmek de mümkündür. Tahmin edileceği üzere, bileşik döngülü gaz türbini-
lerinin kullanılması elektrik üretmenin beğenilen bir yolu haline gelmiştir, özellikle de talebin zirveye tırmandığı dönemlerde yaratılan ihtiyaı karşı-
lamak için (Smil 2015b). Büyük dizel motorları, acil durumlarda kesintisiz enerji sağlayacak yedek kapasite sunmanın yanı sıra uzak yerlerde elektrik üretimi için en ekonomik seçenekler haline gelmiştir.

Tesislerin genişleyip kentsel sistemler olmaktan çıkıp ülke çapında sistemler haline gelmesi Birinci Dünya Savaşı sonrasında yavaş yavaş baş-
lamış, İkinci Dünya Savaşı sonrasında ivme kazanmış ve şu genel bileşenleri içermiştir (Hughes 1983): Ölçek ekonomilerinin izlenmesi; büyük kentlerin içinde ya da yakınlarında daha büyük istasyonlar inşa edilmesi; uzak hidro istasyonlardan elektrik aktaracak yüksek voltajlı bağlantıların geliştirilmesi; kitlesel tüketimin teşvik edilmesi; tedarik güvenliğini iyileştirmek için daha küçük sistemler arasında ve daha düşük olan yerleşik ve rezerv kapasiteler arasında bağlantılar kurulması. 1950 sonrasında hava kirliliğiyle ilgili kay-
gılar yakıt kaynaklarının yakınlarına kurulan yeni, büyük, elektrik üretim istasyonlarının ortaya çıkmasını beraberinde getirmiştir. Maden ağızlarındaki enerji santrallerine doğru bu yönelme yüksek voltajlı elektrik aktarımı ihtiyaını daha da artırmıştır.

Bunu takiben en büyük dönüştürücülerin gücü 1890’lardan beri 500 kat artmış, en yüksek aktarım voltajları 100 kat yükselmiştir. Aktarım aħřap direkler ve sağlam bakır tellerle başlamıştır. Nihayetinde elikle güçlendirilmiş alüminyum kablolarda 765 kV taşıyan elik kulelere geçilmiştir; en yüksek doğrudan akım voltajı bugün Xiangjiaba hidroenerji santrali ile şangay arasında 6,4 GW taşıyan ± 800 kV’dır. Konutlara verilen hizmet bir avuç prizden, genelde bir konutta 50’den fazla anahtar ve priz içeren sistemlere dnşmştir. Daha yüksek kapasite ve artan elektrik üretimine hizmet güvenilirliğinin artması eşlik etmiştir, elektronik aygıtlar ve kontrollerle dolu bir dünyada özellikle önemli bir değerlendirmedir bu (Kutu 5.14).

Kutu 5.14 Elektrik arzının güvenilirliği

Elektrik arzının güvenilirliği sıklıkla 9'larla, bir şebekenin 365 günlük standart bir yılda düzgün bir şekilde çalıştığı, ihtiyaç duyulan talebi karşılayabildiği zaman yüzdesiyle ifade edilir. Dört dokuzluk bir sistem, yani yılın yüzde 99,99'unda elektrik temin eden bir sistem son derece güvenilir bulunabilir, ama toplam yıllık elektrik kesintisi bu sistemde neredeyse 53 dakika olacaktır. Beş dokuzluk bir sistemde toplam kesinti süresi beş dakikanın biraz üstünde olacaktır; sektörün hedefiye yüzde 99,9999 (altı dokuzluk) güvenilir bir sisteme ulaşmak, sistemi yılda sadece 32 saniye elektriksiz bırakmaktır. ABD'de halihazırdaki performans yüzde 99,98 civarındadır; sadece hava koşulları (fırtınalar, kasırgalar, kar fırtınaları, aşırı soğuk) değil, şiddet olayları ya da yakıt temininin kesintiye uğraması da elektrik kesintilerine neden olmaktadır (Wirfs-Brock 2014; North American Electric Reliability Corporation 2015).

Elektronik iletişim, kontroller, enformasyon depolama modern ekonomilerde, gıda sevkiyatının çıkarılması ve izlenmesinden tutun otomatik hale getirilmiş mikroçip üretimine, menkul değer ticaretinden hava trafik kontrollerine varıncaya dek bütün sektörlerin temelinde yatar ve hizmetin kesintisiz olmasını sağlamanın yegâne yolu acil durum sistemleri (hızla cevap verme yetisine sahip piller ve jeneratörler) kurmaktır. Elektrik arzındaki çok kısa kesintiler bile çok pahalıya mal olabilir, maliyetler bazı hizmet ve sanayi operasyonlarında 10 milyon doların üstüne çıkabilir. 2003 ile 2011 arasında ABD'de ülke çapındaki kayıp 18 milyar ilâ 75 milyar dolardı (2008'de Ike Kasırgası'nda) (Başkanlık Yürütme Ofisi, 2013). Elektrik şebekeleri terörist grupların ve düşman hükümetlerin başlıca hedefleri arasında yer alır.

Termal elektrik üretimi için buhar yaratmanın bir diğer önemli yolu olarak nükleer fizyonun ortaya çıkması İkinci Dünya Savaşı sonrasında hız kazanmıştır. Bu olgunun Lise Meitner ve Otto Frisch tarafından Aralık 1938'de ilk kez sergilenmesini takiben 2 Aralık 1942'de Chicago Üniversitesi'nde ilk sürdürülebilir zincirleme tepki gerçekleştirilmiştir. İlk nükleer bomba Temmuz 1945'te test edilmiş, Ağustos 1945'te üç gün arayla iki bomba atılmıştır (Kesaris 1977; Atkins 2000). Sürekli daha güçlü nükleer silahlar geliştirme çalışmalarını bir kenara bırakırsak (bir sonraki bölümde silahlar ve savaşla ilgili bölüme bakınız) ABD'nin savaş sonrasındaki ilk büyük nükleer programı denizaltıların itici gücünü sağlayacak nükleer reaktörler geliştirilmesi olmuştur: *Nautilus* programı Ocak 1955'te başladı, bunun hemen ardından nükleer denizaltı programının başkanı Hyman Rickover (1900-1986) reaktörü ticari elektrik üretimi için yeniden tasarlamakla görevlendirildi (Polmar ve Allen 1982). ABD'nin Pensilvanya'da Shippingport'taki ilk nükleer enerji istasyonu, İngiltere'de Calder Hall'un Ekim 1956'da faaliyete geçmesinden bir yılı aşkın bir süre sonra Aralık 1957'de çalışmaya başladı.

Geri dönüp bakıldığında, bu tercih edilebilecek en iyi reaktör tasarımı değildi, ama dünya çapında baskın tip haline geldi. Üstün bir tasarım olmamasına rağmen erken tarihlerde benimsenmesi sayesinde, diğer reaktörler rekabet edecek hale geldiklerinde o artık yerleşiklik kazanmıştı (Cowan 1990). 2015 ortasına gelindiğinde dünyada faaliyet gösteren 437 nükleer reaktörden 277'si, çoğu ABD ve Fransa'da bulunan basınçlı su reaktörleridir. Yaklaşık yarım asırdır devam eden ticari nükleer üretime geri dönüp baktığımda, nükleer elektriği başarılı bir başarısızlık olarak görüyorum (Smil 2003), sonradan yaşanan gelişmeler bu hükmümü güçlendirdi sadece. Başarılıdır çünkü 2015'te nükleer enerji dünyadaki elektriğin yüzde 10,7'sini temin ediyordu, son dönemde Çinlilerin kömür kullanılan enerji santralleri inşasına ağırlık vermesi öncesinde bu pay yüzde 17 civarındaydı. Birçok ülkede nükleer enerjinin elektrik üretimindeki payı daha yüksektir; ABD'de de yüzde 20 civarında, Güney Kore'de (ve 2011 öncesi Japonya'da) yüzde 30 ve Fransa'da yüzde 77'dir. Başarısızlıktır, çünkü ilk zamanlardaki muazzam vaadi (1970'lerde nükleer enerjinin küresel çapta baskın elektrik üretim biçimi olması bekleniyordu) büyük ölçüde gerçekleştirilmemiştir.

Baskın tasarımların teknik zayıflıkları, nükleer santrallerin yüksek inşaat maliyetleri, tamamlanmalarının kronik olarak ertelenmesi, radyoaktif atıkları uzun vadede elden çıkarma sorununun çözülememesi ve işleyiş güvenliğiyle ilgili kaygılar (60 yıllık ticari deneyimin ardından bile sağlığa olası etkileriyle ilgili çok çirkin bir biçimde abartılmış iddialar mevcuttur) nükleer sanayinin hızla daha da büyümesini engellemiştir. Güvenlik kaygıları ve halkın hoşgörülemez risklerle karşı karşıya olduğu düşüncesi 1979'daki Three Mile Island kazası sonrasında güçlenmiş, 1986'daki Çernobil felaketi ve 2011'de büyük bir deprem ve tsunami sonrasında Fukushima Dai-ichi reaktörlerinin patlamasıyla çok daha pekişmiştir (Elliott 2013).

Bunun sonucunda bazı ülkeler (Avusturya, İtalya) nükleer santral inşasına izin vermeyi reddederken bazıları (Almanya, İsveç) yakın gelecekte nükleer santralleri tamamen kapatmayı planlamış, işleyen tesislerin bulunduğu çoğu ülke (Kanada, Britanya) ya onlarca yıl önce yeni kapasiteler eklemeye son vermiş ya da yaşlanmış tesislerin yerini almak için gerekli sayının çok çok altında sadece birkaç yeni santral inşa etmiştir. ABD ile Japonya bu son kategoride yer alan, en önde gelen iki ülkedir: 2015 ortasında dünya çapında faaliyet gösteren 437 reaktör bulunuyordu, inşa halindeki 67 reaktör

törden 25'i Çin'de, 9'u Rusya'da, 6'sı Hindistan'daydı (WNA 2015b). Batı bu temiz, karbonsuz elektrik üretim yönteminden esasen vazgeçmiştir.

Yenilenebilir Enerjiler

Fosil yakıtlara bağımlılığın giderek artması biyoyakıtları nispeten daha az önemli kılmıştır, ama düşük gelirli ülkelerin kırsal bölgelerinde (modern enerjilere erişimin olmadığı ya da çok sınırlı olduğu yerlerde) nüfusların hızlı artması nedeniyle bugün dünyada hiç olmadığı kadar fazla yakacak odun ve odun kömürü tüketilmektedir. Benim en iyi tahminlerime göre geleneksel biyoyakıtların brüt enerjisi 2000 yılında yaklaşık 45 EJ'ye, yani 1900'deki seviyenin neredeyse tam iki katına ulaşmış (Smil 2010a) ve yirmi birinci yüzyılın ilk 15 yılında toplamda ancak marjinal bir gerileme olmuştur. Bu da 2000 yılında biyoyakıtların dünyanın asli enerjisinin kabaca yüzde 12'sini temin ettiği, 2015'e gelindiğinde bu oranın yüzde 8 civarına gerilediği anlamına gelir (1900'de ise yüzde 50'sini oluşturunuyordu).

Maalesef yaklaşık 1Gt petrole eşdeğer bu hasat bile yeterli olmamıştır: Afrika, Asya ve Latin Amerika'nın düşük gelirli ülkelerinde kırsal kesimlerde yüz milyonlarca insan hâlâ biyokütle yakıtları yakmaktayken yakacak odun ve odun kömürüne talep Afrika'nın Sahil bölgesi, Nepal, Hindistan, Çin'in iç kesimleri ve Orta Amerika'nın büyük bölümünde en şiddetli biçimde hissedildiği üzere ormansızlaşmanın başlıca nedeni olmuştur. Bu bozulmayı azaltmanın en etkili yolu yeni, verimli sobalar (yüzde 10-15 verimli geleneksel sobalara kıyasla verimliliği yüzde 25-30 civarında olan sobalar) kullanmaktır: Bu değişikliğin en başarılı olduğu yer Çin olmuştur, burada verimli sobalar yüzyıl sona ermeden kırsal kesimdeki hanelerde yaklaşık yüzde 75'lik bir verimi yakalamıştır (Smil 2013).

Odunu sadece ormanlarla ilişkili olarak düşünmek de yanlıştır, çünkü düşük gelirli birçok ülkede odunsu maddenin büyük bir bölümü aileler (çoğu örnekte kadınlar ve çocuklar) tarafından küçük koruluk ve çalılıklardan, ağaç plantasyonlarından (kauçuk, hindistan cevizi) ve yol kenarındaki, bahçelerdeki ağaçlardan toplanır. Bangladeş, Pakistan ve Sri Lanka'da yapılan anketler ormana ait olmayan odunsu maddenin yakılan bütün odunların yüzde 80'inden fazlasını oluşturduğunu göstermektedir (RWEDP 1997) Düşük gelirli ülkelerde üretilen bütün ekin kalıntılarının en az beşte biri hâlâ yakılmaktadır, kurutulmuş tezek Asya'nın bazı bölgelerinde hâlâ önemlidir, ama odun kömürü tercih edilen biyoyakıt haline gelmiştir. Beklenebileceği

üzere Çin ve Hindistan dünyanın en büyük biyoyakıt tüketicileridir, onları Brezilya ve Endonezya izler, ama karşılaştırma yapıldığında Sahraaltı Afrika'nın bir benzeri olmadığı görülür, burada yirminci yüzyıl sonunda bazı ülkeler kırsal kesimdeki enerjinin yüzde 80'inden fazlasını odun ve ekin kalıntılarından elde ediyordu; Brezilya'da bu oran yüzde 25, Çin'deyse yüzde 10'dan azdır (Smil 2013a). Kişi başına düşünüldüğünde, bu kullanım miktarı yılda 5 GJ ile 25 GJ arasında değişir.

Yirminci yüzyılın son onyıllarında nispeten büyük ölçekte etanol üretimine tanık olundu. Binek otomobillerde etanolla yapılan denemelerin tarihi İkinci Dünya Savaşı öncesine uzanır (Henry Ford bu denemelere öncülük yapanlar arasındaydı), ama modern geniş ölçekli etanol üretimi 1975'te Brezilya'da şeker kamışından fermantasyonla yakıt üretilen ProAlcool programıyla (Macedo, Leal ve da Silva 2004; Basso, Basso ve Rocha 2011) başladı; ABD'de ise mısıra dayalı etanol üretimi 1980'de başladı (Solomon, Barnes ve Halvorsen 2007). Brezilya'da etanol üretimi 2008'den beri duraklama gösteriyor, ABD'de ise giderek artan üretim hacmi 2007'de ABD Kongresi'nin hükmüne bağlanan etanol üretiminde artış olası görünmüyor. Soya fasulyeleri, keten tohumu ve palmye meyvesi yağı gibi yağ bakımından zengin fitokütleden sıvı yakıt elde eden daha küçük bir biyodizel sanayi de mevcut (USDOE 2011). Küresel düzeyde sıvı biyoyakıt üretimi 2015'te 75 Mt petrole eşdeğer düzeye ulaştı, her yıl ham petrolden elde edilen enerjinin yaklaşık yüzde 1,8'ine denk gelen bir düzey bu (BP 2016). Bu sanayinin, dünyanın sıvı biyoyakıt üretiminin önemli bir bölümünü temin edecek şekilde büyütülmesi, çok açık bir tabirle, bir sanrıdan ibarettir (Giampietro ve Mayumi 2009; Smil 2010a).

Suyun potansiyel ve kinetik enerjilerinin kullanılmasıyla elektrik üretilmesi dünyada, geleneksel ve modern biyoyakıtların ardından, en önemli ikinci yenilenebilir enerji kaynağıdır. Hidroelektrik üretimi 1882'de termal elektrik üretimiyle birlikte, Wisconsin'de Appleton'daki Fox Nehri üzerinde bulunan küçük bir su tekerinin iki dinamoyu çalıştırıp 25 kW'lık elektrik üreterek 280 tane zayıf ampulü aydınlatmasıyla başladı (Dyer ve Martin 1929). Yüzyıl sonuna gelmeden Alp Dağları'nın eteğindeki ülkelerde, İskandinavya'da ve ABD'de giderek daha yüksek barajlar inşa edildi. Ama 1895'te Niagara Şelaleleri'nde inşa edilmiş ilk büyük AC (alternatif akım) santrali ABD'de devlet desteğiyle (Yeni Düzen çerçevesinde Tennessee Vadisi Otoritesi, ABD Arazi Islahı Bürosu) ve SSCB'de Stalinist sanayileşmenin bir parçası olarak inşa edilen projelere nazaran küçüktü (37 MW) (Allen 2003). 1930'larda ABD'de inşa

edilen en büyük projeler Colorado Nehri üzerindeki Hoover Barajı (1936; 2,08 GW) ile Columbia Nehri üzerinde ilk aşaması 1941'de tamamlanan Grand Coulee Barajı oldu (tamamlandığında 6,8 GW elektrik üretti).

1945'i izleyen otuz yıl içinde hidro-enerji dünyanın elektriğinin yaklaşık yüzde 20'sinin kaynağı oldu; Brezilya, Kanada, SSCB, Kongo, Mısır, Hindistan ve Çin'de büyük projeler tamamlandı. Çoğu ülkede yeni projelerin inşası 1980'lerden beri yavaşladı ya da durma noktasına geldi, ama Çin'de böyle olmadı, bilakis Çin'de dünyanın en büyük barajı (Sanxia, tesis kapasitesi 34 birimde 22,5 GW olan Üç Vadi Barajı) 2012'de tamamlandı (Chincold 2015). 2015'te su türbinleri dünya elektriğinin yüzde 16'sını temin ediyordu, payları Kanada'da yüzde 60, Brezilya'da yüzde 80 civarındaydı ve daha küçük birkaç Afrika ülkesinde daha da yüksek paya sahiplerdi.

Çok fazla dikkat çekmiş iki yenilenebilir enerji çevrimi, rüzgâr ve güneş enerjisiyle elektrik üretimi olmuştur. Bu ilgi, bu yöntemlerin hızla yaygınlaşmalarından (2010 ile 2015 arasında küresel düzeyde rüzgâr gücüyle elektrik üretimi 2,5 kat arttı, güneş enerjisiyle elektrik üretimi de yaklaşık sekiz katlık bir artış gösterdi) ve gelecekte benimsenmeleri yönündeki abartılı beklentilerden kaynaklanmaktadır. Hızlı yayılma gelişimin ilk aşamalarında gözlenen ortak bir özelliktir ve bu iki elektrik kaynağının katkısı küresel ölçekte ihmal edilebilir düzeydedir (2015'te rüzgâr enerjisi dünyadaki elektriğin yüzde 3,5'ini, doğrudan güneş ışınlarıyla yüzde 1'ini üretiyordu). Bu kesintili enerjilerin (birçok rüzgâr türbini zamanın sadece yüzde 20-25'inde çalışır, açık denizdeki bazı rüzgâr çiftliklerinde zamanın yüzde 40'ında çalışmaları mümkün olabilir) daha büyük akışlar halinde mevcut şebekelerle bütünleştirilmesi birçok zorluk ortaya çıkarmaktadır (J. P. Morgan 2015).

Modern rüzgâr enerjisinin geliştirilmesi 1980'lerin başında ABD'de vergi indirimleriyle başlamış, 1985'te bu indirimlerin son ermesiyle birden son bulmuştur (Braun ve Smith 1992). Avrupa, birkaç hükümetin (Danimarka, Birleşik Krallık, İspanya ve hepsinden de önemlisi *Energiewende*'nin bir parçası olarak Almanya) yenilenebilir enerjiye geçişe ivme kazandırmaya yönelik politikaları benimsemesiyle birlikte yeni lider haline gelmiştir. Maliyetler gerilemiş, daha büyük (bugün gücü 8 MW'yi bulan, ortalama 1-3 MW gücünde) makineler ve daha büyük rüzgâr çiftlikleri (bunlar arasında açık denizde kurulan tesisler de vardır) son dönemde büyümeyi artırmış, 1990'da 2 GW olan tesis edilmiş kapasite, 2000 yılında 17,3 GW'ye, 2015 sonunda da 432 GW'ye çıkmıştır (Global Wind Energy Council – Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi 2015).

Fotovoltaik (PV) etki (ışığa maruz bırakılan metal elektrotları kullanarak elektrik üretimi) Edmund Becquerel (1852-1908) tarafından 1839'da keşfedildi, ama Bell Laboratuvarları ancak 1954'te pahalı, düşük verimli (başta sadece yüzde 4,5, sonra yüzde 6) silikon güneş pilleri üretmeyi başardı, bu piller ilk kez 1958'de *Vanguard 1* uydusuna enerji vermekte (sadece 0,1 W) kullanıldı; dört yıl sonra 1962'de ilk ticari telekomünikasyon uydusu *Telstar 1*'de 14 W gücünde PV hücreleri bulunuyordu, 1964'te Nimbus uydularıysa 470 W'lık piller taşıyordu (Smil 2006). Maliyetin asli bir değerlendirme kalemi olmadığı uzay uygulamaları yıllardır serpiliş gelişmektedir, ama karada elektrik üretimi için kullanım yüksek maliyetle sınırlanmıştır, bu sanayi de ancak 1990'larda büyümeye başlamıştır. En yüksek güç itibarıyla düşünüldüğünde (ki bu da en güneşli günlerde bile, günün birkaç saatinde söz konusudur) 1990'da sadece 50 MW'lık PV hücreleri nakledilmiş, 2010'da bu rakam 17 GW'ye, 2015'te 50 GW civarına çıkmıştır, ki aynı tarihte kümülatif kapasite 227 GW'ye ulaşmıştır (James 2015; REN21 2016).

Ama PV hücreleriyle elektrik üretiminin kapasite etkenleri rüzgârdan bile düşüktür (daha bulutlu iklimlerde izleme olmaksızın sadece yüzde 11-15, Arizona'da bile yüzde 25 civarı); 2015'te küresel düzeyde PV hücreleriyle elektrik üretimi, rüzgâr türbinleriyle üretilen toplam enerjinin sadece yüzde 30'u kadardı (Şekil 5.16). Bu sanayinin büyümesi de tedri-



Şekil 5.16 İspanya'da Endülüs'te Lucaneina de las Torres fotovoltaik enerji tesisi. (Corbis).

ci, organik bir süreç değil, hükümetlerin sübvansiyonlarıyla teşvik edilen bir süreç olmuştur. Hiçbir şey bunu şundan daha iyi resmedemez: 2015'te bulutlu Almanya güneşli İspanya'dan üç kat daha fazla PV elektriği ürettiyordu (BP 2016). Evlerin çatılarına yerleştirilen küçük ısıtıcılarla, ayrıca sanayi tipi büyük yerleştirmelerle suyun ısıtılması, PV ile elektrik üretimi öncesinde başlamıştır. 2012 sonuna gelindiğinde çoğu Çin ve Avrupa'da bulunan tesis edilmiş ısıtıcıların kapasitesi 270 GW civarındaydı (Mauthner ve Weiss 2014). Elektrik üretmek üzere suyun (ya da tuzun) ısıtılması için güneş ışınlarını yoğunlaştırmak amacıyla aynaların kullanıldığı Konstantre Güneş Enerjisi PV ile üretilen elektriğe yararlı bir alternatiftir, ama 2015'te sadece birkaç tesis çalışıyordu (toplam kapasite 5 GW'den azdı).

Dört büyükle, yani biyoyakıtlar, hidroelektrik, rüzgârla ve PV ile elektrik üretimiyle karşılaştırıldığında diğer yenilenebilir çevrimler küresel ölçekte ihmal edilebilir düzeydedir, bazıları tek tek ülkeler ve bölgeler düzeyinde önemli olsalar da hiçbiri jeotermal enerji kadar önemli değildir. Sıcak su kaynakları ve kuyuları tarih öncesi devirlerden beri kullanılmıştır, bugün birçok ülkede daha derin kuyular mekânların ısıtılması ve sanayi süreçleri için sıcak su temin etmektedir. Ama bu enerjinin doğal sıcak buhar olarak elde edilebildiği ve elektrik üretiminde kullanılabildiği yerler o kadar yaygın değildir. Dünyanın ilk jeotermal enerji üretim tesisi İtalya'nın Larderello havzasında 1902'de çalışmaya başladı, Yeni Zelanda'da Wairakei 1958'de faaliyete geçti, California'da Geysers ise 1960'ta. 2014'e gelindiğinde küresel düzeyde tesis edilmiş kapasite 12 GW'ydı. ABD tesis edilmiş en yüksek kapasiteye sahiptir, İzlanda ise bu yenilenebilir enerji kaynağına en bağımlı ülkedir (Geothermal Energy Association [Jeotermal Enerji Derneği] 2014).

Büyük gelgit dalgalarının gücünden yararlanarak enerji üretmeye yönelik uzun zamandır var olan planların hiçbiri hayata geçirilmemiştir; Fransa'da ve Çin'de sadece birkaç küçük tesis çalışır. Elektrik üretiminde kullanılacak odun temin etmek üzere kesilecek, hızlı büyüyen ağaçlardan (kayın, ökaliptüs, kavak, kurşun ağacı ya da çam ağacı) yeni plantasyonlar kurmak, birçok çevre sorunuyla birlikte gündeme gelen bir tercihtir, ekin kalıntıları ve başka organik atıklar da artık geniş ölçekli biyogaz üretiminde kullanılmaktadır (en fazla da Almanya ve Çin'de), ama bu üretimin katkısı ancak yerel ölçekte bir fark yaratmaktadır. Birçok yenilenebilir seçeneğe, bazı hızlı ilerlemelere ve birçok çelişkili iddiaya rağmen, temel hüküm açıktır: Diğer enerji geçiş süreçlerinin hepsinde olduğu gibi fosil yakıtlardan uzaklaşmak uzun süren bir süreç ola-

çak, farklı enerji çevrimlerinin nasıl gelişeceğini, yeni bir enerji dünyasında nasıl kilit roller üstleneceklerini bekleyip görmemiz gerekecek.

Ulaştırma Aslı İtici Güçler

Modern medeniyette hem insanların hem malların hareketli olmasının önemi ışığında, modern toplumların bugünkü enerji dayanaklarını belirleyen teknik ilerlemelerle ilgili araştırmamın son bölümünde, hantal küçük motorlardan güçlü roketlere yelpazenin tamamında dolaşarak taşıma alanındaki aslı itici güçleri ele alacağım. Dört zamanlı motorların (bugün ağırlıklı olarak benzinle çalışırlar, ama etanol ve doğal gaz da yer yer kullanılmaktadır) gelişmesi, kitlesel olarak üretilmeye başladıkları yirminci yüzyılın ilk on yılından itibaren biraz ihtiyatlı olmuştur. En önemli değişiklikler arasında, sıkıştırma oranlarının yaklaşık olarak iki katına çıkması, ağırlıklarının artması, güçlerinin artması, sonuçta kütle/güç oranının gerilemesi yer alır: Bu oran 1900’de yaklaşık 40 g/W iken bir asır sonra 1g/W civarına gerilemiştir. Amerika’nın kitlesel olarak üretilen ilk otomobili olan Ransom Olds’un Curved Dash’inde tek silindirli 5,2 kW (7 beygir gücü) bir motor vardı. Üretimi 19 yılda 16 milyon birimden sonra son bulan Ford’un Model T’sinin motoru ondan üç kat daha güçlüydü.

Amerikan otomobillerinin ortalama gücündeki bir artış 1970’lerde OPEC’in petrol fiyatlarında yaptığı bir artışla kesintiye uğradı, ama 1980’lerde yine devam etti: Otomobillerin ortalama gücü 1990’da 90 kW iken 2015’te 175 kW’ye yükseldi (USEPA 2015). Ama “otomobil” aslında yanlış bir terimdir, çünkü ABD’de kişisel taşıtımda kullanılan bütün hafif araçların yüzde 50’sini minibüsler, pikaplar ve SUV’lar oluşturur (Sports Utility Vehicle - spor amaçlı araç, gelmiş geçmiş en yanıltıcı isimlerden biri: Bu ağır küçük kamyonetlerle alışveriş merkezine gitmenin spor neresinde, yarar neresinde?). Dizel motorlar da hem nispeten daha hafif hem de çok daha güçlü hale gelmiştir, bu iyileştirmeler onları kilit önemdeki birkaç piyasada baskın hale getirmiştir (Smil 2010b). Dizel motorlu ilk kamyonlar Almanya’da 1924’te piyasaya çıkmıştır, bu motorun kullanıldığı ilk ağır binek otomobillerse 1936’da. İkinci Dünya Savaşı’ndan hemen önce Avrupa’da üretilen yeni kamyonlar ve otobüslerin çoğunda dizel motor bulunuyordu, savaş sonrasında bu da küresel bir norm halini aldı. 350 kW kadar yüksek bir verime sahip dizel otobüs motorlarının kütle/güç oranları 3-9 g/W civarındadır ve bu motorlar büyük bir bakıma ihtiyaç duymaksızın 600.000 km yol kat edebilir.

Otomotiv dizel motorlarının kütle/güç oranları nihayetinde 2 g/W gibi düşük bir düzeye gerilemiştir, bu da binek otomobillerdeki motorların benzin yakılan motorlardan sadece biraz daha ağır olduğu anlamına gelir (Smil 2010b). Yakıt maliyetlerinin daha düşük olması dizel otomobillerin AB'de daha yaygınlaşmasını sağlamıştır, bugün AB'de yeni kaydedilen otomobillerin yüzde 50'sinden fazlasının motoru dizeldir (ICCT 2104). Ama ABD'de bu otomobiller enderdir: 2014'te dizel otomobiller bütün araçların yüzde 3'ünden azını oluştuyordu. Volkswagen, 2015 yılının sonbaharında, 2008'den beri satılan birçok dizel modelin motorunda, ABD'nin nitrojen oksitlerle ilgili testlerini geçebilmesi için asılsız değerler üreten yasadışı bir yazılım bulunduğunu kabul etti. Bu, imajını büyük ölçüde yıprattı.

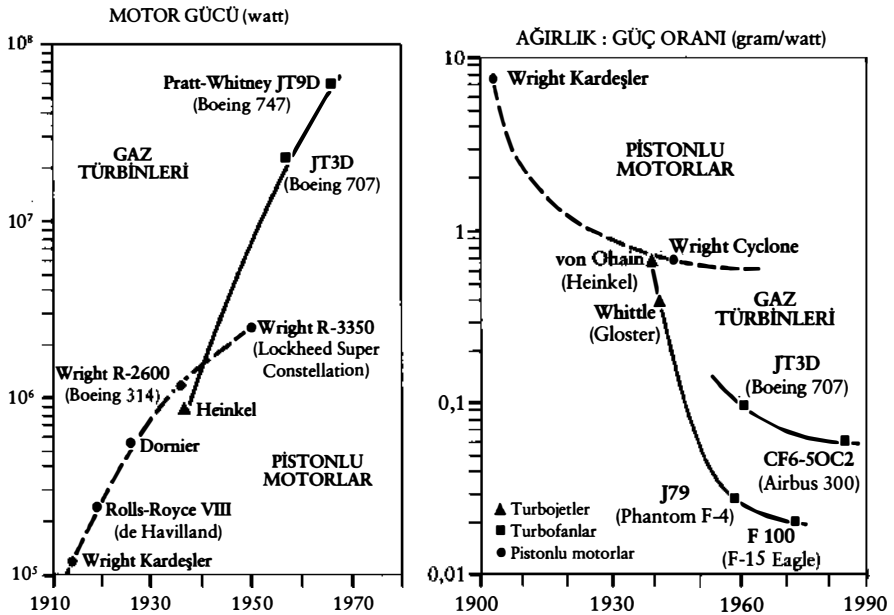
Dizel enerjisiyle çalışan lokomotifler (güçleri 3,5 MW'yi bulur) dünyanın her yerinde elektrikli olmayan demiryollarında yük trenlerini çeker (ve iter). Daha önce belirttiğimiz üzere dizel motorları deniz nakliyatını fethetmeye daha Birinci Dünya Savaşı öncesinde başlamıştı; zaman içinde küreselleşmenin vazgeçilmez itici güçleri haline geldiler, çünkü su yoluyla yapılan bütün enerji kaynakları, hammadde, geri dönüştürülebilir atık, gıda ve yem, mamul ürün ticareti, bu devasa, verimli makinelerin enerjisiyle gerçekleştirilir (Smil 2010b). Denizlerde kullanılan, Avrupa'da MAN ve Wärtsilä'nın tasarladığı, Güney Kore ve Japonya'da yapılan süpertankerler ve büyük yük gemilerinde bulunan en güçlü dizel motorlar neredeyse 100 MW gücündedir.

Bu gelişmelere paralel olarak uçak motorları da çok hızlı bir ilerleme göstermiştir. Boeing'in 1936 tarihli Clipper'ındaki (ABD'nin Batı Sahili ile Doğu Asya arasında tarifeli seferler yapan büyük bir deniz uçağı) motorlar, Wright'ın 1903'teki uçağında kullanılan motorlardan 103 kat daha güçlüydü (Wright'ın uçağında ağırlık/güç oranı Clipper'in 10 katıydı) (Şekil 5.17). Gaz türbinleri (birçok sanayinin performansının yanı sıra uçmada da devrim yaratmış tümüyle yeni asli itici güç) yirminci yüzyıl başında biraz ayrıntılı bir biçimde kavramlaştırılmıştı, ama ilk pratik tasarımlar ancak 1930'ların sonunda ortaya çıktı. İngiltere'de Frank Whittle ve Almanya'da Hans Pabst von Ohain birbirlerinden bağımsız olarak, askeri uçaklarda kullanılacak deneysel gaz türbinleri yaptılar, ama jet motoruna sahip ilk savaş uçakları İkinci Dünya Savaşı'nın gidişatını değiştiremeyecek kadar geç bir tarihte hizmete başladı (Constant 1981; Smil 2010b).

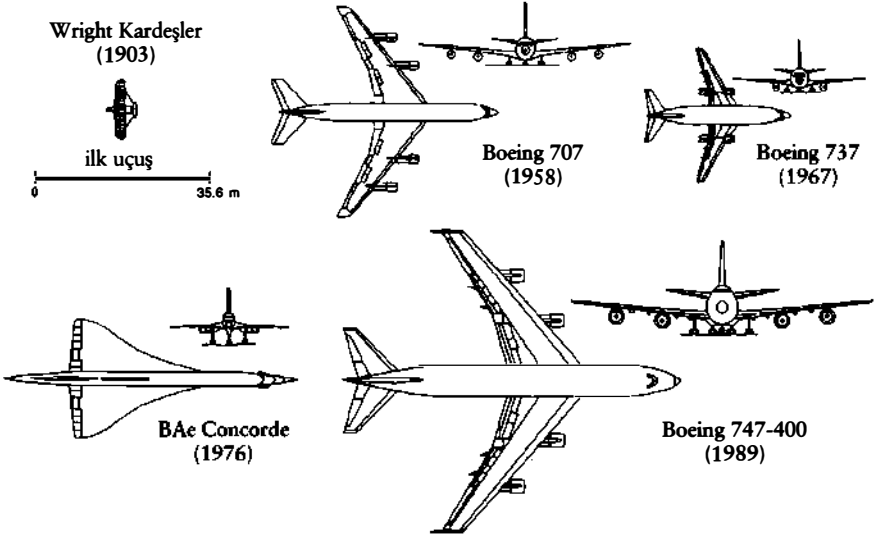
Bu yeni asli itici gücün hızlı gelişim süreci 1945 sonrasında da devam etti. Ses hızı ilk kez 14 Ekim 1947'de, Bell X-1 uçağıyla aşıldı, 1940'ların sonundan itibaren çok sayıda süpersonik savaş ve bombardıman uçağı ta-

sarlandı, en hızlı savaş uçağı MiG-35 azami 3,2 Mach hızına ulaştı. Gaz türbinlerinin kullanılması, keseye uygun kıtalar arası uçuşları da mümkün kıldı: bu uçakların ağırlık/güç oranlarının düşük olması (500 kN'lık bir basınçla sadece 0,06-0,07 g/W'dir), yüksek basınç/güç oranı (ticari motorlarda 6'dan küçük, en iyi askeri uçaklarda 8,5'tir) ve yüksek bypass oranı (hali hazırda en yüksek değer olan 12:1'de bir motorun sıkıştırdığı havanın yüzde 92'si motorun yanma odacığını bypass eder, bu da yakıt tüketimini azaltır ve motor gürültüsünü azaltır) giderek daha güçlü ve daha verimli bir hal alan bu asli itici güçlerin gelişen tasarımını ayrıksı bir yere taşımıştır (Şekil 5.17). Uçaklarda kullanılan gaz türbinleri o kadar güvenilir bir hal almıştır ki iki motorlu uçaklar artık sadece Atlantik'in değil, Pasifik'in iki yakası arasındaki birçok rotada uçmaktadır (Smil 2010b).

Olgunlaşan sanayilerde sıklıkla gerçekleştiği üzere, küresel jet motoru piyasasına da sadece dört üretici hakimdir. Rolls Royce 1953'te ticari motorları piyasaya süren ilk üretici oldu, onu iki Amerikalı şirket, General



Şekil 5.17 Uçak motorlarının giderek daha güçlü ama daha hafif olması uçuş alanında sürekli ilerleme kaydedilmesini mümkün kılmıştır. Pistonlu motorların performans sınırlarına ulaşması öncesinde jet motorların muhteşem ilerleyişi başladı. Büyük Boeing ve Airbus uçaklarını çalıştıran jet motorlarının ağırlığı bugün 0,1 g/W'den daha azdır, Wright kardeşlerin öncü piston tasarımına göre 100 katlık bir iyileşmeyi temsil eder bu. Askeri jetlerin motorları daha da hafiftir. Constant (1981, Gunston (1986), Taylor (1989) ve Smil'deki (2010b) verilerden alınmıştır.



Şekil 5.18 En bilinen jet uçaklarının planları ve önden görünüşleri. Boeing 707 (1957) uçuş sırasında yakıt ikmali yapan bir tankere dayanıyordu. Boeing 737 (1967) tüm zamanların en çok satan jet uçağı oldu (2015 sonuna dek yaklaşık 9.000 uçak satılmıştı ve 13.000 uçak daha sipariş alınmıştı). 1976 ile 2003 arasında sınırlı rotalarda uçan Fransız-İngiliz yapımı süpersonik Concorde pahalı bir istisnaydı. Boeing 747 (1969'dan beri hizmet verir) ilk geniş gövdeli, uzun kuyruklu uçaktır. Bunlarla karşılaştırmak için Wright kardeşlerin uçağı ve 7 Aralık 1903'te aldığı toplam yol karşılaştırmalı çizimlerle gösterilmiştir. Boeing ve Aerospatiale/BAe yayınları ve Jakab (1990) kaynak alınmıştır.

Electric ile Pratt & Whitney, sonra da GE ile Fransız Snecma Moteurs'ün 1974'te kurduğu kısa ve orta menzilli uçaklar için motor üretiminde uzmanlaşmış CFM International izledi (CFM International 2015). Öte yandan (ilk kez 1976'da ticarileşen) süpersonik Concorde'un uçuşları bu piyasayı yakalayamayacak kadar pahalı hale geldi ve uçağın Atlantik'in iki yakası arasındaki seferleri 2003'te son buldu (Darling 2004).

Britanya yapımı Comet, 1952'de ilk yolcu jeti oldu, ama motor sorunlarından ziyade yapısal kusurlar nedeniyle üç ölümcül kaza yaşandı ve uçak servisten çekildi. Tasarımı yeniden yapılan uçak 1958'de yeniden hizmete girdi, ama ticari başarı gösteremedi (Simons 2014). İlk başarılı ticari jet uçağı, 1958'de çıkan Boeing 707 oldu (Şekil 5.18). Geniş gövdeli ilk Boeing 747 1969'da uçmaya başladı, ikonlaşmış geniş gövdeli jet 200 kN'yi aşkın itiş gücü üreten, bileşik itiş gücü kalkış sırasında 280 MW'ye çıkan büyük turbofan motorlarla çalışıyordu (Smil 2000c). 2015'e gelindiğinde en güçlü jet motoru GE 90-115B 513 kN'lik bir itiş gücüne sahipti.

Ağırlık birimi başına gaz türbinlerinden daha büyük bir güç sağlayabilecek olan yegâne asli itici güç füzeler ve uzay araçlarını fırlatan roket motorlarıdır. Modern roket biliminin kurucuları –Rusya’da Konstantin Tsiolkovsky (1857-1935), Almanya’da Hermann Oberth (1894-1989) ve ABD’de Robert H. Goddard (1882-1945)– antik bir fikir olan roketli itilimin nihayetinde başarılı olacağını doğru tahayyül etmiştir; bu fikir modern mühendislik tarafından dünyanın en kuvvetli asli itici güçlerine tercüme edilmiştir (Hunley 1995; Angelo 2003; Taylor 2009). Bu alanda hızlı ilerlemeler İkinci Dünya Savaşı sırasında kaydedilmeye başladı: 1942’de Wernher von Braun’un (1912-1977) tasarladığı etanolla çalışan Alman V-2 füzeleri deniz seviyesinde 249 kN’lik itiş gücüne (0,15 g/W düzeyinde bir kütle/güç oranıyla 6,2 MW civarındaydı) ve azami 1,7 km/s hıza ulaştı. Bu füzelerin 340 kilometrelik menzili Britanya’ya saldırabilecek kadar uzundu (von Braun ve Ordway 1975).

Süpergüçlerin uzay yarışı Dünya’nın ilk yapay uydusu Sovyet Sputnik’in 1957’de fırlatılmasıyla başladı ve giderek daha güçlü, aynı zamanda daha kesin kıtalararası balistik füzeler üretilmesini sağladı. 16 Temmuz 1969’da Amerika’nın (baş tasarımcısı yine Wernher von Braun’du) Saturn C-5 roketinin kerosen ve hidrojen yakan on bir motoru Apollo uzay aracını Ay’a doğru yolculuğuna gönderdi. Roketler sadece 150 saniye ateşlendi ve bileşik itiş güçleri yaklaşık 36 MN’ye ulaştı, bu 2,6 GW civarında bir güçtü ve ağırlık/güç oranı (yakıtın ve üç itici roketin ağırlığı da dâhil olmak üzere) sadece 0,001 g/W’ydi (Tate 2009).

ALTINCI BÖLÜM

Fosil Yakıtlara Bağlı Medeniyet

Tezat açıktır. Sanayi öncesi toplumlar neredeyse anında güneş enerjisi akışlarından yararlanıyor, pratikte tükenmez olan güneş ışınlarının ancak ihmal edilebilir bir bölümünü çeviriyorlardı. Modern medeniyet ise devasa enerji rezervlerinin çıkarılmasına, türümüzün varoluşundan milyonlarca yıl sonra bile yenilenemeyecek olan sonlu fosil yakıt rezervlerinin tüketilmesine dayanıyor. Önceki dönemlere nazaran nükleer fizyona giderek daha fazla güveniliyor, yenilenebilir enerjilerden (130 yılı aşkın bir geçmişi olan hidroelektrik üretimine rüzgâr enerjisi ve fotovoltaiik hücrelerle elektrik üretimini ekleyerek ve fitokütleleri yakıta çevirmenin yeni yollarına başvuruarak) daha fazla yararlanılıyor, ama 2015'e gelindiğinde fosil yakıtlar hâlâ dünyanın asli enerjisinin yüzde 86'sını oluşturuyordu, bu bir kuşak öncesinde, 1990'a göre sadece yüzde 4 gerilemiş bir orandı (BP 2016).

Bu zengin kaynaklardan yararlanarak, görülmemiş miktarda enerjiyi dönüştüren toplumlar yarattık. Bu dönüşüm tarımsal verimlilik ve ekin getirisinde muazzam ilerlemeleri beraberinde getirdi; sonuçları ilk önce hızlı sanayileşme ve kentleşmede, ulaştırmanın yayılması ve ivme kazanmasında, enformasyon ve iletişim becerilerimizin çok daha etkileyici bir biçimde artmasında görüldü; ve bütün bu gelişmeler birleşerek, büyük bir gerçek zenginlik yaratan, dünya nüfusunun çoğunluğu için hayatın ortalama kalitesini yükselten, nihayetinde yeni, yüksek enerjili hizmet ekonomileri ortaya çıkaran uzun süreli yüksek ekonomik büyüme oranları yarattı.

Ama şimdiye kadar görülmemiş bu gücün kullanılması, kaygı verici birçok sonuç doğurdu ve sürmeleri halinde modern medeniyetin temellerini

tehlkeye atabilecek değişiklikler ortaya çıkardı. Kentleşme icatların, teknik ilerlemelerin, hayat standardının yükselmesi, enformasyonun genişlemesi ve anında iletişim kurma yetisi gibi kazanımların başlıca kaynaklarından biri oldu, ama öte yandan çevrenin niteliğinin bozulmasının ve kaygı verici gelir eşitsizliğinin ardındaki kilit etkenlerden de biri oldu. Enerji kaynaklarının eşitsiz dağılımının siyasal etkileri, bölgesel uyumsuzluklardan tutun yolsuzluklara bulaşmış, sıklıkla hoşgörüsüz ya da düpedüz şiddete başvuran rejimlerin kalıcılık kazanmasına uzanan hem ülke içi hem uluslararası sonuçlara yol açtı.

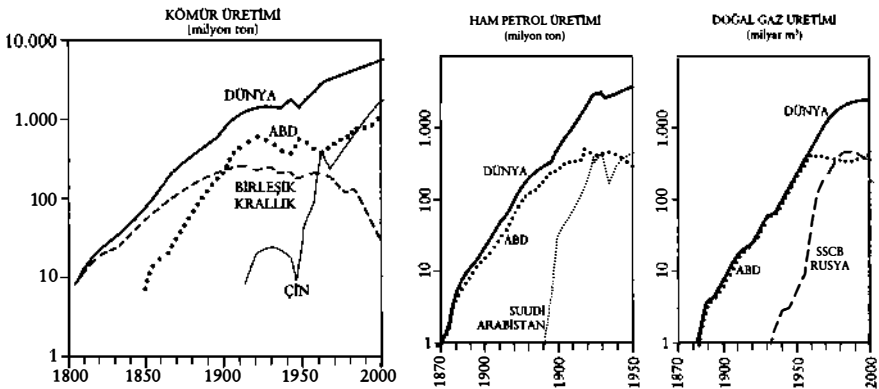
Modern yüksek enerjili silahlar ülkelerin yıkıcı güçlerini, sanayi öncesi yetilerine kıyasla katbekat artırmış, bu nedenle de modern silahlı çatışmalar sadece askeri değil sivil kayıplarda da buna mukabil artışlara yol açmıştır. Hepsinden de önemlisi nükleer silahların geliştirilmesi, tarihte ilk kez medeniyetin tamamının, hadi yok edilmesi demesek de, büyük oranda sakat bırakılması olasılığını doğurmuştur. Bununla birlikte modern saldırı ve savaşların izi sürülmesi en zor yöntemleri, öteden beridir varlığını sürdüren bireysel terörizme dayandıkları için yoğunlaşmış enerjilere üstün bir biçimde komuta edilmesini gerektirmez. Ama modern medeniyet, geniş ölçekli bir termonükleer çatışmadan kaçınılacağı garanti olsaydı bile, derin belirsizliklerle karşı karşıya kalırdı. Şurası kesin ki en kaygı verici zorluk, çevresel bozulmanın yaygınlaşmasıdır. Bu hızlı değişiklik, hem fosil yakıtların hem fosil olmayan enerjilerin çıkarılması ve çevrilmesinden, bunun yanı sıra sanayi üretimi, hızlı kentleşme, ekonomik küreselleşme, ormansızlaşma ve tarım ile hayvancılık alanındaki uygunsuz pratiklerden kaynaklanmaktadır.

Bu değişikliklerin birikimsel etkileri, yerel ve bölgesel sorunlar olmanın ötesine geçmiş, küresel biyosfer değişikliğinin istikrar bozucu etkilerine, hepsinden de önemlisi nispeten hızlı küresel ısınmanın hiç istenmeyen sonuçlarına dönüşmüştür. Modern medeniyet gerçek bir enerji kullanımı patlaması yaratmış, insanın cansız enerjiler üzerindeki kontrolünü daha önceden akla hayale sığmayacak düzeylere çıkarmıştır. Bu kazanımlar onu inanılmaz derecede özgürleştirici, hayran olunacak kadar yapıcı kılmıştır; ama bir yandan da rahatsız edici derecede dizginleyici, korkunç derecede yıkıcı ve birçok bakımdan kendi kendisini yenilgiye uğratar hale de getirmiştir. Bütün bu değişiklikler kuşaklar boyu devam edecek güçlü bir ekonomik büyüme ve kesintisiz yeniliklerle beslenen bu sürecin ille de kısa süre içinde ermesi gerekmediği yönünde beklentiler doğurmuştur, ama devam etmesi hiçbir şekilde kesin değildir.

GÖRÜLMEMİŞ GÜÇ VE KULLANIM BİÇİMLERİ

İki dünya savaşıyla ve 1930'larda dünyanın en kötü ekonomik kriziyle ke-sintiye uğramış olsa da küresel enerji artışı, yirminci yüzyılın ilk yetmiş yı-lında görülmemiş hızda ilerledi. Sonrasında OPEC'in Ekim 1973 ile Mart 1974 arasında petrol fiyatlarını beş katına çıkarmasından kaynaklanan bir yavaşlama oldu; enerji artışı, bu şok olmasa da ılımlı düzeye inerdi, çünkü mutlak seviyeler daha düşük toplam seviyelerde mümkün olan büyüme hızı-nı destekleyemeyecek kadar artmıştı. Ama muazzam niceliksel değişiklikler (daha yavaş bir hızda) devam etti ve bunlara yeni, dikkat çekici bazı nitelik kazanımları da eşlik etti. En iyi küresel istatistik derlemeleri fosil yakıtların geniş ölçekte çıkarılmaya başladığı on dokuzuncu yüzyıldan bu yana bu ya-kıtların üretiminde sürekli katlanan bir artış olduğunu gösterir (Smil 2000a, 2003, 2010a; BP 2015; Şekil 6.1).

Kömür madenciliğinin üretimi 1810 ile 1910 arasında 100 kat arta-rak 10 Mt'den 1 Gt'ye çıkmış, 1950'de 1,53 Gt, 2000'de 4,7 Gt ve 2015'te 8,25 Gt'ye ulaşmış, sonra yine 2015'te biraz azalarak 7,9 Gt olmuştur (Smil 2010c; BP 2016). Ham petrol üretimi 1880'lerin sonunda 10 Mt'den azken 300 kat artarak 1988'de 3 Gt'nin üstüne çıkmış, 2000'de 3,6 Gt, 2015'te neredeyse 4,4 Gt olmuştur (BP 2016). Doğalgaz üretimi 1.000 kat artmış, 1880'lerin sonunda 2 Gm³'ten azken, 1991'de 2 Tm³'e çıkmış, 2000'de 2,4 Tm³, 2015'te 3,5 Tm³ olmuştur. Yirminci yüzyılda küresel enerji üretimi toplam enerji terimleriyle 14 kat artmıştır.



Şekil 6.1 Başlıca fosil yakıtların üretimi: Küresel toplamalar ve en büyük üreticilerin yıllık üretimleri. Birleşmiş Milletler Örgütü (1956), Smil (2010a) ve BP (2015) verilerinden alınmıştır.

Bu artışın izini sürmenin çok daha iyi bir yolu, bu büyümeyi yararlı enerjiyle, fiilen dağıtılan ısı, ışık ve hareketle ifade etmektir. Daha önce gördüğümüz üzere ilk fosil yakıt çevrimleri biraz verimsizdi (akkor ışığı için % 2'den az, buhar lokomotifleri için % 5'ten az, termal elektrik üretimi için yüzde 10'dan az, küçük kömür sobaları için yüzde 20'den azdı), ama kömür yakılan kazanlar ve sobalardaki iyileşmeler sayesinde bu verimlilik oranları çok geçmeden iki katına çıktı, daha fazla artış için de yine büyük bir potansiyel vardı. Konutlardaki kazanlarda, sanayi ve enerji santrallerinin kazanlarında yakılan sıvı hidrokarbonlar daha yüksek verimlilikle çevrilir, sadece binek otomobillerdeki benzin yakan içten yanmalı motorlar nispeten verimsizdir. Gerek kazanlarda gerek türbinlerde doğal gaz yakılması son derece verimlidir, genellikle verim yüzde 90'ı aşar; asli elektrik çevrimleri de öyledir.

Bunun sonucunda 1900'de küresel enerji kullanımının ortalama verimliliği yüzde 20'den fazla değildi, 1950'ye gelindiğinde yüzde 35'i aşmıştı, 2015'e gelindiğindeyse fosil yakıt ve asli elektrik çevriminin küresel ortalaması toplam ticari girdinin yüzde 50'sine ulaşmıştı: Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA 2015a) 2013 hesaplamaları dünya çapında 18,8 Gt petrole eşdeğer bir asli tedarik ve 9,3 Gt petrole eşdeğer bir nihai tüketim olduğunu gösterir; en büyük kayıplar tahminen termal elektrik üretimi ve ulaştırmada yaşanmaktadır. Daha da dikkat çekici bir nokta, kilit bir tüketim sektörü olan konutların ısıtılması konusunda nüfusların sadece yirmi-otuz yıl içinde tam bir verimlilik dönüşümü yaşamış olmasıdır (**Kutu 6.1**).

Yirminci yüzyılda bütün fosil enerjilerin toplam arzı 14 kat artmış olsa da, verimliliklerin sürekli ilerleme göstermesi, 1900'de mevcut olandan 30 kat daha fazla yararlı enerji temin edilmesini sağlamıştır. Bunun sonucunda fosil yakıtların 1900'de genel tedarik edilen miktarın ağırlıklı bir bölümünü oluşturduğu zengin ülkeler, tedarik edilen asli enerjinin bir birimi başına bir yüzyıl öncesine kıyasla iki, hatta üç kattan fazla yararlı enerji almaktadır; geleneksel biyokütle enerjileri çok düşük verimliliklerle çevrildiğinden (ışık için yüzde 1'den az, ısı için yüzde 10'dan az) modern enerjilerin ancak yirminci yüzyılın ikinci yarısında egemen hale geldiği düşük gelirli ülkeler genellikle, tedarik edilen asli enerjinin bir birimi için bir asır öncesinde olduğundan beş ilâ on kat daha fazla yararlı enerji elde etmektedir. Kişi başı miktarlar açısından değerlendirildiğinde (dünya nüfusunun 1900'de 1,65 milyar, 2000'de 6,12 milyar olduğu düşünülürse) yararlı enerji tedarikinde küresel artış sekiz kattan fazladır, ama bu ortalama ülkeler arasında gözlenen büyük farklı-

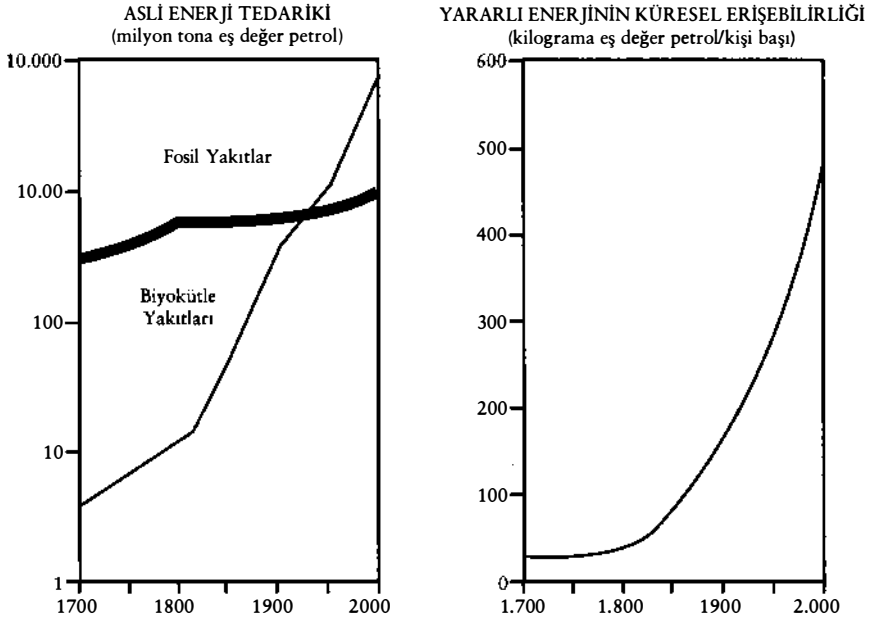
Kutu 6.1**Evlerde ısıtmanın verimliliği**

50 yıldan kısa bir süre içinde, dört farklı yakıtla ısıtılan evlerde yaşadım ve bu kilit enerji hizmetinde çevrim verimliliğinin üç katına çıktığını gördüm (Smil 2003). 1950'lerde Çek-Bavyera sınırının yakınındaki ormanlarla çevrelenmiş bir köyde yaşarken evimizi, komşularımızın çoğu gibi odunla ısıtırdık. Babam önceden kesilmiş çam ya da köknar kerestesi ismarlardı, bunları ateşe atmaya hazır parçalar haline getirmek (ayrıca ateşi yakmak için daha ince parçalar hazırlamak) ve korunaklı bir yere kurusunlar diye istiflemek yazları benim görevimdi. Odunlarımızın verimliliği yüzde 30-35'ten fazla değildi. Prag'da öğrenim gördüğüm yıllarda bütün enerji hizmetleri –mekânların ısıtılması, pişirme, elektrik üretimi– linyite dayalıydı ve kalın duvarlı bir manastırda bulunan odamdaki kömür sobası yaklaşık yüzde 45 verimliydі. ABD'ye taşındıktan sonra bir banliyö evinin üst katını kiraladık, burası kamyonla getirilen fuel oil'in kazanda yakılmasıyla ısıtılıyordu ve kazanın verimliliği yüzde 60'tan fazla değildi. Kanada'daki ilk evimizdeki doğal gaz kazanının verimliliği yüzde 65'ti, yeni bir süper verimli ev tasarlayınca verimi yüzde 94 olan bir doğalgaz kazanı taktırdım, sonra da onu verimi yüzde 97 olan bir kazanla değiştirdim.

lıkları gözden gizler. (Bu bölümün sonlarında, ekonomik büyüme ve hayat standardıyla ilgili tartışmada bu konuya biraz daha değineceğim.)

Modern enerji akışlarının toplam büyüklüğünü değerlendirmenin bir başka yolu da onları hem mutlak hem görelî anlamda geleneksel kullanımlarla karşılaştırmaktır. En iyi tahminler dünya çapında toplam biyokütle yakıt tüketiminin 1700'de 700 Mt iken 2000'de 2,5 Gt'ye çıktığını gösterir. Yani petrol eşdeğerliğiyle düşünülürse 280 Mt'den 1 Gt'ye çıkmıştır, üç yüzyılda dört kattan biraz daha az bir artış gerçekleşmiştir (Smil 2010a). Aynı tarihlerde fosil yakıt üretimi, petrol eşdeğerliğiyle 10 Mt'den yaklaşık 8,1 Gt'ye çıkmış, yaklaşık 800 katlık bir artış gerçekleşmiştir (Şekil 6.2). Brüt enerji açısından düşünüldüğünde biyoyakıt ve fosil yakıtların küresel düzeydeki enerji tedariki 1900'de hemen hemen aynıydı (her ikisi de kabaca 22 EJ düzeyindeydi); 1950'ye gelindiğinde fosil yakıtlar odun, ekin kalıntıları ve rezekten elde edilen enerjinin üç katı kadar enerji temin ediyordu, 2000'e gelindiğindeyse aradaki fark neredeyse sekiz kata çıkmıştı. Ama hesaplarımızda fiilen dağıtılan, yararlı enerjiyi dikkate alan bir değişiklik yaptığımızda, 2000'de biyoyakıtlar ile fosil yakıtlar arasındaki fark yaklaşık 20 kat olur.

Enerji kullanımındaki artışlar, kişi başı ortalama tüketim düzeylerini de görülmemiş seviyelere taşımıştır (Şekil 6.3). Avcı toplumların enerji ihtiyaçlarına gıda temin etme ihtiyacı hükmediyordu, yıllık ortalama tüketimleri kişi başına 5-7 GJ'nin üstüne çıkmamıştı. Antik yüksek kültürler daha iyi



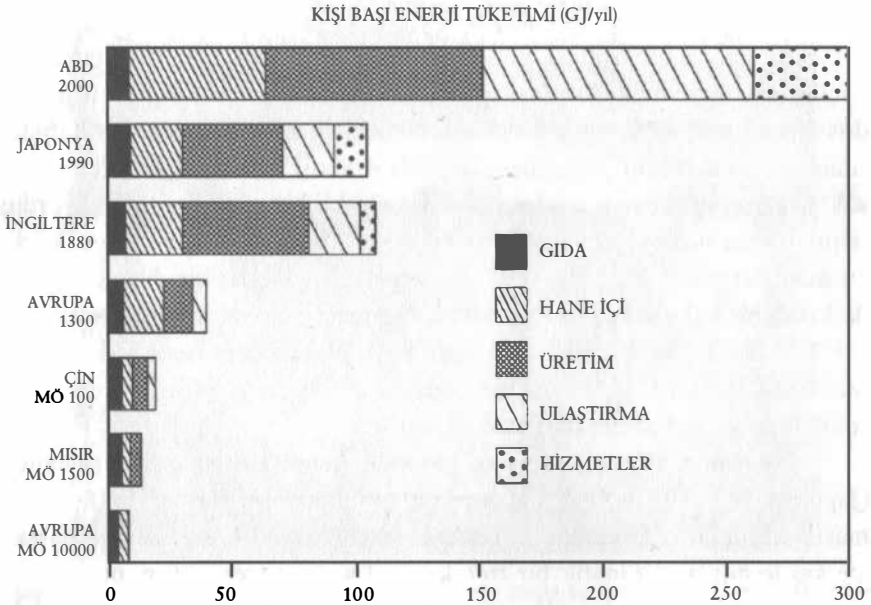
Şekil 6.2 Küresel fosil yakıt üretimi, on dokuzuncu yüzyıl son bulmadan hemen önce toplam geleneksel biyokütle enerjileri arzını geçmişti (solda). Yararlı enerjideki artış, toplam asli arzdaki artışın iki katından fazladır (sağda). Birleşmiş Milletler Örgütü (1956) ve Smil'in (1983, 2010a) verilerinden derlenmiştir.

barınaklar ve giysiler, ulaştırma (enerjisi gıda, yem ve rüzgârdan geliyordu) ve çeşitli mamuller için (kömür enerjisi başta geliyordu) enerji kullanımını yavaş yavaş artırdı. Mısır'da Yeni Krallık döneminde ortalama kişi başı 10-12 GJ'den fazla değildi, Roma İmparatorluğu'nun ilk dönemlerine ilişkin tahminim kişi başı yaklaşık 18 GJ düzeyindedir (Smil 2010c). Erken sanayi toplumları geleneksel kişi başı enerji kullanım miktarını kolayca iki katına çıkardı. Bu artışın büyük bölümü de enerjisini kömürün yakılmasından alan imalat ve ulaştırmaya harcandı. Malanima (2013b) Avrupa'daki ortalama-ları 1500'de yaklaşık 22 GJ/t verir, ardından 1800'lere dek 16,6-18,1 GJ/t seviyesinde bir durgunluk gözlenmiştir.

Bunun sonrasında sanayileşen uluslar ve ülkeler ile ekonomileri büyük ölçüde tarımsal kalan ülkeler arasında dikkat çekici bir farklılaşma oldu. Kander (2013) İngiltere ve Galler ortalamasının 1820'de kişi başına 60 GJ iken, 1910'da kişi başına 153 GJ'ye yükseldiğini belirtir, aynı dönemde Almanya'daki oran beş katın üstüne (kişi başı 18'den 86 GJ'ye) çıkmış, Fransa'daki oran üç kat artmıştır (kişi başı 18'den 54 GJ'ye), ama İtalya'da-

ki oran sadece yüzde 20 (kişi başı 10 GJ'den sadece 22 GJ'ye) yükselmiştir. Bir karşılaştırma yaparsak, ABD'deki ortalama 1820 ile 1910 arasında 70 GJ'den daha az bir seviyeden yaklaşık 150 GJ'ye yükselmiştir (Schurr ve Netschert 1960). Bundan bir yüzyıl sonra Avrupa'daki daha zengin ülkelerin hepsinde kişi başı tüketim 150 GJ'nin üstüne çıkmıştı, ABD'de kişi başı tüketim 300 GJ'nin üstündeydi ve ortalama tüketim oranları artarken tüketim kompozisyonu da değişiyordu (Şekil 6.3).

Avcı toplumlarda gıda yegâne enerji kaynağıydı, benim tahminlerime göre yiyecek ve yem, erken Roma İmparatorluğu'nda bütün enerjinin yaklaşık yüzde 45'ini karşılıyordu (Smil 2010c). Sanayi öncesi Avrupa'da yiyecek ve yemin toplam enerjideki payı yüzde 20 ila 60'tı, ama 1820'ye gelindiğinde bu ortalama yüzde 30'u aşmıyordu. 1900'de Britanya ve Almanya'da yüzde 10'dan azdı. 1960'lara gelindiğinde en zengin toplumlarda gıda enerjisi ihmal edilebilir bir düzeye inmiş, gıda enerjisi yüzde 3'ü aşmayan, hatta yüzde 2'den az bir düzeye gerilemişti, ki tüketimine yakıtlar ve elektriğin sanayi, ulaştırma ve ev içi kullanımları hakimdi (Şekil 6.3). Kişi başı elektrik dağı-



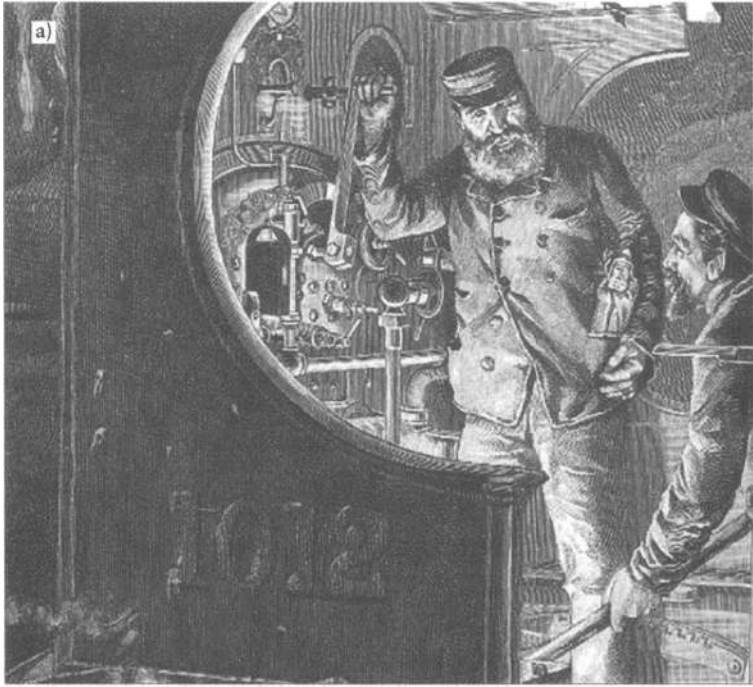
Şekil 6.3 İnsanın evriminin farklı aşamalarında yıllık tipik kişi başı enerji tüketimi. Mutlak tüketimde büyük artışlara haneler, sanayiler ve ulaşırmada kullanılan enerji paylarında artışlar eşlik etmiştir. On dokuzuncu yüzyıl öncesi değerleri, Smil (1994, 2010c) ve Malanima'dan (2013a) yararlanarak geliştirilmiş yaklaşık değerlerdir; sonraki rakamlar bazı ulusal istatistik kaynaklarından alınmıştır.

lını yüksek gelirli ekonomilerde iki basamak artmıştı, 2010'a gelindiğinde Batı Avrupa'da yıllık yaklaşık 7 MWh, ABD'de ise yıllık yaklaşık 13 MWh idi. Bireylerin doğrudan kontrol ettiği enerji akışları arasındaki tezatlar da bir o kadar etkileyicidir.

1900'de Büyük Düzlükler'de çalışan bir çiftçi, buğday tarlasını altı büyük atın dizginlerini tutarak pullukla sürerken (çelik bir oturağa tünemiş, genellikle toza bulanmış bir halde hatırı sayılır bir fiziksel kuvvetle) 5 kW'yi aşmayan bir canlı enerjiyi kontrol ediyordu. Bir asır sonra yerden yüksekte, havalandırılmalı traktörünün içinde oturan torununun çocuğu ise, 250 kW'yi aşan bir dizel motoru gücünü gayet rahat kontrol ediyordu. 1900'de kıtalar arası bir treni saatte yaklaşık 100 km hızla çeken, yakıtı kömür olan bir lokomotif çalıştıran bir mühendis yaklaşık 1 MW'lik bir buhar gücüne komuta ediyordu, kömür kazanının elle beslenmesi halinde ulaşılan maksimum performanstı bu (Bruce 1952; Şekil 6.4). 2000 yılına gelindiğindeyse, 11 km yüksekte kıtalararası uçuş yapan bir Boeing 747'nin pilotları dört gaz türbini yaklaşık 120 MW ürettiğinden ve uçak saatte 900 km hızla gittiğinden yolculuğun büyük bölümünü otomatik pilota bağlanarak geçirmeyi tercih edebiliyordu (Smil 2000a).

Bu güç yoğunlaşması, kontrol hatalarının doğuracağı kaçınılmaz sonuçlar nedeniyle daha büyük güvenlik önlemleri almayı da gerektirir. On dokuzuncu yüzyıla kadar şehirler arası yolculuklarda kullanılan at arabalarının tepesinde oturan sürücüler genellikle 4-8 kişi taşımak için kullanılan 3 kW'yi aşmayan (koşum takılmış dört at) sürekli bir gücü kontrol ediyordu; şehirler arası uçuş yapan jetlerin pilotlarıysa 150-200 yolcu taşımak için jet motorlarının ürettiği 30 MW'yi kontrol eder. Geçici bir dikkatsizlik ya da hatalı bir hüküm açıktır ki çok farklı sonuçlara yol açacaktır, sürücünün 3 kW ya da 30 MW'yi idare etmesine bağlı olarak dört kerte daha büyük olabilecek farklara. Bu tür riskleri engellemenin bariz yollarından biri elektronik kontrol mekanizmaları kullanmaktır.

Dünyanın gelmiş geçmiş en güvenilir kamusal ulaştırma sisteminde (Japonya'da Tokyo ile Osaka arasında işleyen, kazasız belasız 50 yıldır çalışması 1 Ekim 2014'te kutlanan *shinkansen*) elektronik kontrolleri en baştan merkezileştirilmiştir: otomatik bir tren kontrol sistemi trenler arasında uygun mesafeyi korur ve hız belirtilen en yüksek değeri aşarsa derhal frenleri devreye sokar; merkezi bir trafik kontrol sistemi rotayı kontrol eder; deprem tespit sistemiyse Dünya'nın yüzeyine ulaşan ilk sismik dalgaları hisseder ve



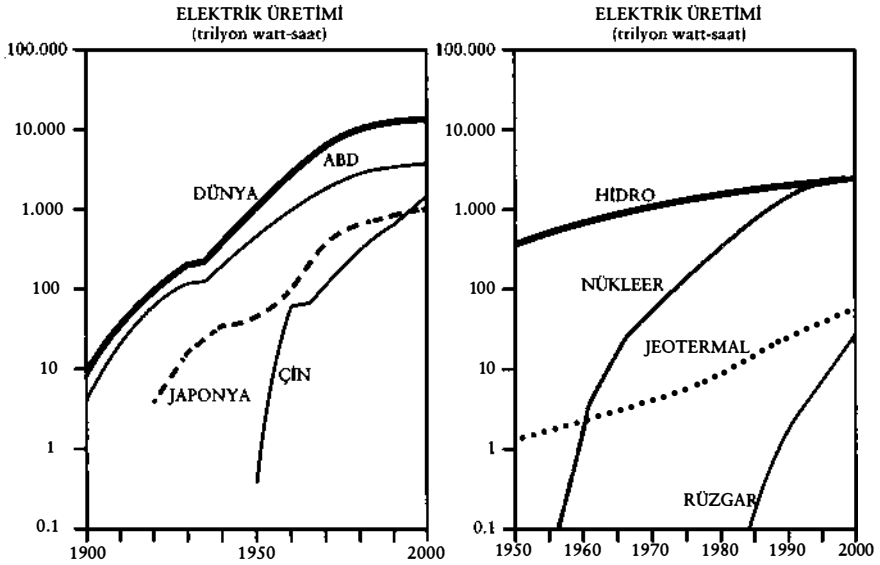
Şekil 6.4 On dokuzuncu yüzyılda buharlı bir lokomotifte ateşin beslenmesi (üstte) ve bir Boeing jet uçağında pilotluk (altta). İki pilot, lokomotifteki ateşçi ve mühendisin kontrol ettiğinden iki kerte daha büyük bir enerjiyi kontrol eder.

Lokomotif VS arşivinden; Boeing kokpiti http://wallpapersdesk.net/wp-content/uploads/2015/08/2931_boeing_747.jpg.'den.

asıl sarsıntı gelmeden önce trenleri durdurabilir ya da yavaşlatabilir (Noguchi ve Fuiji 2000). Modern jet uçakları yıllardır son derece otomatik sistemlerle sahiptir, ileri kontroller artık binek otomobillerde de yaygınlaşmaktadır. Elektronik kontroller ve sürekli izleme (oda termostatlarından büyük maden eritme ocaklarına, otomobillerde ABS fren sistemine şehirlerin her yerinde rastlanan kapalı devre televizyon sistemlerine kadar), bilgisayar ve taşınabilir elektronik cihazların kitlesel olarak benimsenmesiyle birlikte elektrik gerektiren başlıca yeni kategorilerden biri olarak yükselmiştir.

Küresel elektrik üretiminin yirminci yüzyıldaki artışı, fosil yakıt üretiminin yaygınlaşmasından daha hızlı gerçekleşmiştir (Şekil 6.5), fosil yakıt üretiminin yaygınlaşma hızı yılda ortalama yüzde 3'tür. 1900'de bütün yakıtların yüzde 2'sinden azı elektriğe çevriliyordu; bu pay 1945'te hâlâ yüzde 10'dan azdı, ama yüzyıl sonuna gelindiğinde yaklaşık yüzde 25'e yükselmişti. Ayrıca yeni hidroelektrik istasyonları (Birinci Dünya Savaşı sonrası daha geniş ölçekte) ve yeni nükleer kapasiteler (1956'dan beri) elektrik üretimini daha da artırmıştı. Bunun sonucunda küresel elektrik arzı 1900 ile 1935 arasında yılda yüzde 11'lik bir artış kaydetmiş, bundan sonra 1970 başlarına dek her yıl yüzde 9'dan fazla artmıştı. Yüzyılın geri kalanında elektrik üretimi artışı büyük ölçüde yüksek gelirli ekonomilerde talebin azalması ve çevrim verimliliğinin daha yüksek olması nedeniyle her yıl yaklaşık yüzde 3,5 gerilemişti. Güneş enerjisi ve rüzgâr gibi yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretiminin yeni yolları ancak 1980'lerin sonundan itibaren dikkat çekici ilerlemeler göstermiştir.

Bu yeni gücün sağladığı hiçbir kazanım küresel gıda üretimindeki ciddi artış kadar temel önemde olmamıştır; gıda üretimindeki artış dünya nüfusunun yaklaşık yüzde 90'ına yeterli besin temin etmeyi mümkün kıldı (FAO 2015b). Hiçbir değişiklik modern toplumları sanayileşme süreci kadar fazla şekillendirmemiştir, hiçbir yeni gelişme karşılıklı bağımlılık içinde bir küresel medeniyetin doğmasına, tarihte hiç görülmemiş bir yoğunlukta enformasyon toplama ve iletişim kurma yetilerimizin muazzam düzeyde genişlemesi ve kitlesel ulaştırmanın gelişmesi kadar büyük bir katkıda bulunmamıştır. Ama bu etkileyici kazanımlar eşit bir biçimde paylaşılmamıştır ve ben de küresel ekonomik büyümenin getirdiği yararların, dünya nüfusunun azınlığını oluşturan bir kesime ne kadar oransız dağıldığını inceleyecek ve ülkelerin kendi içlerindeki hatırı sayılır eşitsizliklere dikkat çekeceğim. Böyle bile olsa, birçok genel iyileşme olmuştur.



Şekil 6.5 Küresel elektrik üretimi, fosil yakıt arzından hatırı sayılır düzeyde hızlı artmaktadır. En büyük ekonomiler her zaman önde gelen üreticiler olmuştur, (bugün büyük ölçüde kömür ve doğalgaza dayalı) termal üretim küresel üretime (solda) hakim olmayı sürdürür. Hidroelektrik ve nükleer üretim sırasıyla ikinci ve üçüncü sıralarda yer alır, rüzgâr ve güneş elektrliği ise 2000 sonrası hızlı artışlar olmuştur (sağda). Birleşmiş Milletler Örgütü (1956), Palgrave Macmillan (2013) ve BP (2015) verilerinden derlenmiştir.

Tarımda Enerji

Fosil yakıtlar ve elektrik modern tarımın vazgeçilmez girdileri haline gelmiştir. Fosil yakıtlar makinelerle güç vermek için doğrudan, onları yapmak, mineral gübreler çıkarmak, azot bileşiklerini ve çeşitleri hâlâ artan koruyucu tarımsal kimyasal maddeleri (pestisitler, fungusitler, herbisitler) sentezlemek, yeni ürün çeşitleri geliştirmek ve yakın dönemde bugün hassas uygulamalı tarımı destekleyen birçok işlevde kullanılan elektronik teçhizatın elektrliğini sağlamak için dolaylı olarak kullanılırlar. Fosil yakıtlar ve elektrik daha yüksek ve daha güvenilir getiriler elde edilmesini sağlamıştır. Bütün zengin ülkelerde neredeyse bütün yük hayvanlarının yerini almış, yoksul ülkelerde yük hayvanlarının önemini büyük ölçüde azaltmıştır; kasaların yerini içten yanmalı motorların ve elektrikli motorların alması sanayi öncesi tarımsal ilerlemelerin başlattığı emek azalmasını sürekli kılmıştır.

Tarımda dolaylı fosil yakıt sübvansiyonları (çok küçük bir ölçekte) on sekizinci yüzyılda, demir cevherlerinin eritilmesinde odun kömüründen

kok kömürüne geçildiğinde başlamış, on dokuzuncu yüzyılın ikinci yarısında çelik makinelerin yaygın olarak benimsenmesiyle yayılmış ve yirminci yüzyılda daha güçlü ve daha büyük arazi makinelerinin, sulama pompalarının, ekin işleme ve hayvancılık teçhizatının ortaya çıkmasıyla yeni zirvelere tırmanmıştı. Ama makinelerin içkin enerji maliyeti, traktörler, kombinler ve diğer hasat makinelerini çalıştırmak, su pompalamak, tahılları kurutmak ve ekinleri işlemek için kullanılan enerjinin sadece bir bölümünü oluşturuyordu. Dizel motorlar içkin yüksek verimleri sayesinde bu kullanım alanlarının çoğunda ağırlığa sahiptir, ama benzin ve elektrik de başlıca enerji girdileri arasında yer alır.

Arazi makinelerinde içten yanmalı motorların kullanılması önce ABD’de, binek otomobillerin nihayet kitlesel olarak üretilen bir meta haline geldiği yıllarda başladı (Dieffenbach ve Gray 1960). İlk Amerikan traktör fabrikası 1905’te kuruldu; eklenti uygulamalar için güç çıkışı 1919’da kondu; çekiciler, dizel motorlar ve kauçuk lastikler 1930’ların başında çıktı. 1950’lere dek mekanikleşme Avrupa’da çok daha yavaş bir biçimde ilerledi. Asya ve Latin Amerika’nın kalabalık ülkelerinde mekanikleşme ancak 1960’larda başladı, bu değişim birçok yoksul ülkede hâlâ yaşanmaktadır. Tarla işlerinin mekanikleşmesi, emek verimliliğindeki artışın ve tarımla ilgilenen nüfusların azalmasının ardında yatan başlıca nedendir; yirminci yüzyıl başında Batı’da güçlü bir at en az altı adamın emeğine eşit bir düzeyde çalışıyordu, ama ilk traktörler bile 15-20 ağır atın gücüne denkti, bugün Kanada otlaklarında çalışan en güçlü makineler 575 beygir gücündedir (Versatile 2015).

3. bölümde verimlilik artışının Amerika’da buğday tarımındaki ortalama emek girdisini, 1800’de yaklaşık 1 ton tahıl başına 30 saatten 1900’de 1 ton tahıl başına 7 saatten aza nasıl indirdiğini göstermiştim; 2000 yılına gelindiğinde bu oran yaklaşık 90 dakikaya inmişti. Serbest kalan bu işgücü kaçınılmaz olarak kentlere yönelmiş, bu da dünya çapında kırsal kesim nüfusunun azalması ve kentleşmenin yükselişinin hâlâ devam etmesiyle sonuçlanmıştır (bu bölümün sonraki kısımlarında incelenmiştir). Amerika’ya ait istatistikler sonuçta yaşanan bu yer değiştirmeyi gözler önüne serer. Ülkedeki kırsal iş gücü 1850’de toplam iş gücünün yüzde 60’ından fazlasını oluşturuyorken, 1900’de bu oran yüzde 40’ın altına inmişti; tarımsal iş gücünün toplam iş gücündeki payı 1950’de yüzde 15’ti, 2015’teyse sadece yüzde 1,5’ti (USDOL 2015). Karşılaştırsak AB’de tarımda çalışan iş gücü bugün toplamın yüzde 5’ine eşittir, ama Çin’de hâlâ yüzde 30 civarındadır.

Amerika'da yük atları en yüksek sayıya 1915'te ulaştı, 21,4 milyon hayvan vardı; ama katır sayısı ancak 1925 ve 1926'da 5,9 milyonla zirveye çıktı (USBC 1975). 1910'larda toplam yük hayvanı gücü yeni ortaya çıkan traktörlerin tamamının on katı kadardı; 1927'ye gelindiğindeyse bu iki asli itici güç eşit güç kapasitesine sahipti, 1940'lara gelindiğinde hayvan sayıları zirve düzeylerinin yarısına inmişti. Ama mekanikleşmenin tek başına kırsal kesimde bu kadar büyük bir iş gücünü serbest bırakmış olması mümkün değildi. Daha fazla gübrelemeye cevap veren yeni ürün çeşitleri sayesinde ürün getirilerinin yüksek olması, zararlı ot ve böcek ilaçlarının uygulanması, sulamanın daha yaygın olması da gerekliydi.

İyi dengelenmiş bir bitkisel besin tedarığının önemi 1843'te Justus von Liebig (1803-1873) tarafından formüle edilmiş ve Liebig'in minimum yasası olarak bilinir olmuştur: Arzı en az olan besin getiriği belirler. Üç makrobesinden (nispeten çok miktarda sağlanması gereken azot, fosfor ve potasyum) son ikisini temin etmek zor değildir. John Bennett Lawes 1842'de (1814-1900) fosfat taşlarının sülfürik asit çözeltisiyle muameleden geçirip sıradan süperfosfat elde etmeyi başarmış, bu da Florida'da (1888) ve Fas'ta (1913) büyük fosfat rezervlerinin keşfedilmesini beraberinde getirmişti; potasyum hidrat Avrupa ve Kuzey Amerika'da birçok yerde çıkarılabilmekteydi (Smil 2001).

Ekilen toprağın birimi başına her zaman en fazla miktarda ihtiyaç duyulan makrobesin olan azotu temin etmek en büyük zorluktu. 1890'lara gelinceye dek organik olmayan tek seçenek 1809'da keşfedilmiş Şili nitratlarını ithal etmek olmuştur. O sıralarda kok fırınlarının yeni bir yan ürünü olan nispeten küçük miktarlarda amonyum sülfat elde edilmeye başladı; pahalı siyanamid işlemi (kokun kireçle tepkimeye girmesi kalsiyum karbit üretiyordu, bunun da saf azotla birleşmesi kalsiyum siyanamid oluşturunordu) Almanya'da 1898'de ticari oldu; yirminci yüzyıl başında nitrik asit ve nitratlara çevrilmek üzere nitrojen oksit üretiminde bir elektrik arkı kullanılıyordu (Birkeland-Eyde işlemi, 1903). Ne var ki bu işlemlerin hiçbirisi kitlesel ölçekte sabit nitrojen temin edemiyordu, dünyanın beslenmesinin geleceği ancak 1909'da Fritz Haber'in (1868-1934) elementlerinden amonyak sentezlediği yüksek basınçlı, katalitik bir süreç icat etmesiyle değişti (Smil 2001; Stoltzenberg 2004).

Amonyak sentezleme sürecinin hızla ticarileşmesi (1913'te) Ludwigs-hafen'da Carl Bosch'un (1874-1940) öncülüğünde gerçekleşti. Ama bu sürecin ilk pratik kullanımı gübre üretmeye değil, Birinci Dünya Savaşı sırasında patlayıcılarda kullanılacak amonyum nitrat üretmeye yönelikti. İlk sentetik

azotlu gübreler 1920'lerin başında satıldı. İkinci Dünya Savaşı öncesinde azotlu gübre üretimi sınırlı kaldı, 1960'a gelindiğinde bile Amerikalı çiftçilerin üçte birinden fazlası hiçbir sentetik gübre kullanmıyordu (Schlebecker 1975). Amonyak sentezi, sonrasında bu sentezin sıvı ve katı gübrelere çevrilmesi enerji yoğun süreçlerdir, ama teknik ilerlemeler genel enerji maliyetini azalttı ve azotlu bileşiklerin dünya çapında uygulamalarının 2000'e gelindiğinde yaklaşık 100 Mt nitrojene eşdeğer bir miktara ulaşmasını sağladı, ki bu da toplam amonyak sentezinin yaklaşık yüzde 80'ine denk gelir (Kutu 6.2, Şekil 6.6).

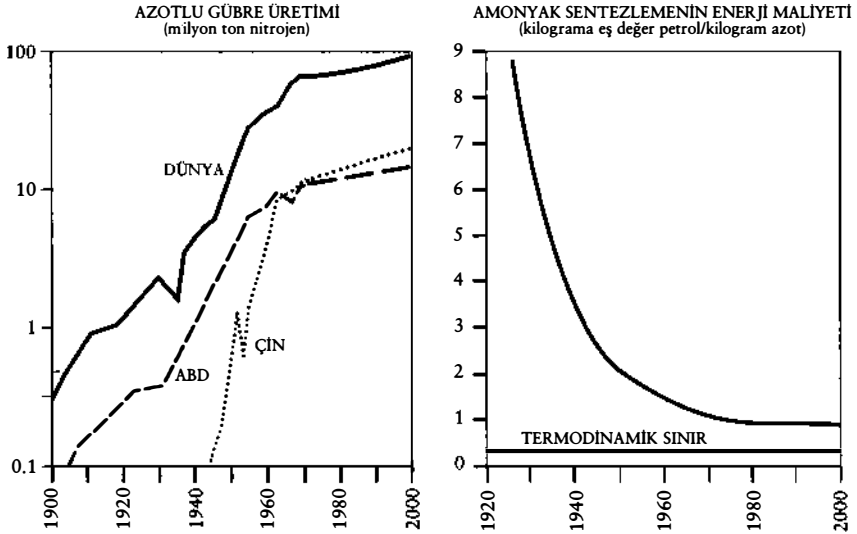
Enerjinin başka hiçbir kullanım biçimi, sentetik nitrojen kullanımının getirdiği yüksek ürün getirisini sağlamaz: Bugün dünya piyasalarında paraya çevrilen ürünlerin her yıl kullandığı besinin yaklaşık yarısını küresel enerjinin kabaca yüzde 1'ini harcayarak temin etmek mümkündür. Gıda proteinlerindeki bütün nitrojenin yaklaşık dörtte üçü ekilebilir arazilerden geldiği için bugün küresel gıda arzının neredeyse yüzde 40'ı Haber-Bosch amonyak sentezleme sürecine dayanmaktadır. Tersinden söyleyecek olursak Haber-Bosch sentezi olmasaydı, bugünün yiyeceklerinden yararlanılan küresel nüfusun yaklaşık yüzde 40 daha az olması gerekirdi. Tahıllarının çoğunu

Kutu 6.2

Azotlu (nitrojenli) gübrelerin enerji maliyetleri

Haber-Bosch sentezinin enerji koşulları arasında bu süreçte kullanılan yakıtlar ve elektrik ile gıdalardaki enerji de yer alır. BASF'nin ilk ticari tesisindeki koka dayalı Haber-Bosch sentezleme süreci 1913'te 100 GJ/t NH_3 gerektiriyordu; İkinci Dünya Savaşı öncesinde bu oran 85 GJ/t NH_3 'e indi. 1950 sonrasında doğalgaza dayalı süreçler toplam enerji maliyetini 50-55 GJ/t NH_3 'e indirdi; santrfüllü kompresörler, buhar ile daha iyi katalizörlerin yüksek basınçta daha iyileştirilmesi bu koşulları önce 1970'te 40 GJ/t seviyesine, sonra 2000 yılında 30 GJ/t seviyesine indirdi, bu tarihlerde en iyi fabrikaların sadece yaklaşık 27 GJ/t NH_3 'e ihtiyacı vardı; bu oran da amonyak sentezi için gerekli kesin bileşimli enerjiye (20,8 GJ/t) eşitti (Kongshaug 1998; Smil 2001). Doğalgaza dayalı tipik yeni tesislerde 30 GJ/t NH_3 kullanılır, ağır fuel oil kullanıldığında gerekli miktar bunun yaklaşık yüzde 20 daha fazlasıdır, kömüre dayalı sentez için de yaklaşık 48 GJ/t NH_3 gerekir (Rafiqul vd. 2005; Noelker ve Ruether 2011).

Ortalama performans 2015'te yaklaşık 35 GJ/t'yd; bu son oran yaklaşık 43 GJ/t nitrojene eşittir. Ama çoğu çiftçi (normal basınçta gaz olan) amonyak uygulamaz ve sıvıları ya da katıları, özellikle de küçük tarlalara bile kolayca uygulanan katı bileşikler arasında en yüksek azot miktarına sahip (yüzde 45) üreyi tercih eder. Amonyakı üreye çevirmek, paketlemek ve nakletmek toplam enerji maliyetini 55 GJ/t N'ye çıkarmıştır. Bu oranın küresel ortalama olarak kullanılması, tarımda yaklaşık 115 Mt azotun kullanıldığı 2015'te azotlu gübrelerin yaklaşık 6,3 EJ, yani küresel enerji tedarikinin yüzde 1'inden biraz fazla enerji ürettiği anlamına gelir (Smil 2014b).



Şekil 6.6 Azotlu gübre üretiminin (sol) küresel düzeyde katlanarak artmasına amonyak sentezlemenin enerji maliyetlerinde etkileyici bir gerileme eşlik etmiştir (sağ). Smil (2001, 2015b) ve FAO verilerinden (2015a) alınmıştır.

yem olarak kullanan Batı ülkeleri, sentetik azota bağımlılıklarını yüksek et tüketimlerini azaltarak kolayca düşürebilirdi. Nüfusun kalabalık olduğu düşük gelirli ülkelerin çok daha sınırlı seçenekleri olurdu. En başta, sentetik nitrojen Çin'de bütün nitrojen girdilerinin yaklaşık yüzde 70'ini sağlar. Ülkede bitkilerden temin edilen proteinin yüzde 70'i sentetik nitrojenden gelir. Ülkenin ekinlerden elde edilen proteinin yüzde 70'inden fazlasıyla birlikte, Çin'de yiyeceklerdeki bütün nitrojenin kabaca yarısı sentetik gübrelerden gelir. Sentetik gübreler olmasaydı, ortalama öğünler yarı açlık düzeyine inerdi ya da bugün kişi başına düşen gıda seviyesiyle ancak mevcut nüfusun yarısı beslenebilirdi.

Potasyum hidrat ve fosfat madenciliği (10 GJ/t K) ile fosfatlı gübrelerin formüle edilmesi (toplamı 20 GJ/t P) bu toplama bir yüzde 10'u kadar daha katkıda bulunacaktı. Diğer tarım kimyasallarının toplam enerji maliyeti çok daha düşüktür. İkinci Dünya Savaşı sonrasında gübreleme uygulamalarının artışına, zararlı otlar, böcekleri ve ekinlerde gelişen mantarlı hastalıkları azaltan kimyasalların, zararlı ot ve böcek ilaçlarının (herbisitler ve pestisitler) piyasaya çıkması ve kullanım alanlarının artması neden olmuştur. 1945'te piyasaya çıkan, geniş yapraklı birçok bitkiyi ekinlere zarar vermeksizin öldüren ilk ticari zararlı bitki ilacı 2,4-D'ydi. İlk böcek ilacıysa 1944'te piyasaya çıkan

DDT'ydi (Friedman 1992). Küresel herbisit ve pestisit envanteri bugün çoğu petrokimya hammaddelerinden elde edilmiş binlerce bileşik içerir: Bunların özgün sentezleri, amonyak üretiminden çok daha enerji yoğundur (genelde 100 GJ/t'den fazladır, bazı sentezler 200 GJ/t'nin epey üstündedir), ama hektar başına kullanılan miktarlar birkaç basamak küçüktür.

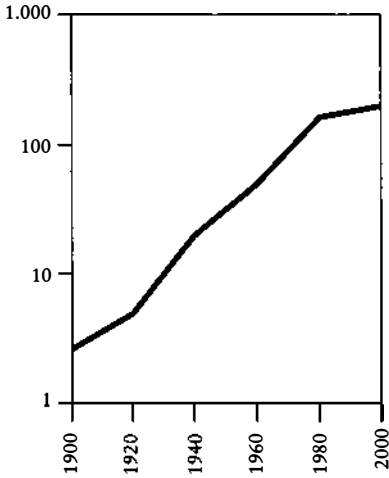
Sulanan tarım arazilerinin tüm dünyadaki büyüklüğü yirminci yüzyıl da kabaca beş kat artmış, 50 Mha iken 250 Mha'nın üstüne çıkmış, 2015'te 275 Mha'ya yükselmiştir (FAO 2015a). Görelî koşullar açısından değerlendirildiğinde bu, dünyada hasat edilen ekinlerin artık yaklaşık yüzde 18'inin sulandığı, yaklaşık yarısının çoğunlukla kuyulardan çekilen suyla sulandığı, sulanan tarım arazilerinin yaklaşık yüzde 70'inin Asya'da bulunduğu anlamına gelir. Sulamanın obruklardan su çektiği yerlerde (çoğunlukla dizel motorlar ya da elektrikli motorlar kullanılarak gerçekleştirilen) pompalamanın enerji maliyeti şaşmaz bir biçimde piyasa ürünü yetiştirmenin (doğrudan ve dolaylı) genel maliyetinde en büyük paya sahiptir. Sulama çekilmiş suyun büyük bir bölümünün saban karıklarına verilmesini sağlar, ama birçok ülkede çok daha verimli ve daha pahalı fıskiyeler (hepsinden önemlisi dairesel hareket yapan başlıklar) kullanılmaktadır (Phocaidis 2007).

Fosil yakıtlar ve elektriğin modern tarımda dolaylı ve doğrudan kullanımının yükselişinin izi ancak yaklaşık hesaplamalarla sürülebilir. Yirminci yüzyılda dünya nüfusu 3,7 kat artar, hasat yapılan araziler yaklaşık yüzde 40 genişlerken, antropojenik enerji sübvansiyonları sadece 0,1 EJ'den neredeyse 13 EJ'ye tırmandı. Bunun sonucunda 2000'de ortalama bir hektarlık arazi 1900'de olduğundan kabaca 90 kat daha fazla enerji sübvansiyonu alıyordu (Şekil 6.7). Ya da rakamları bir kenara bırakırsak Howard Odum'la birlikte (1971, 115-116) şunları söyleyebiliriz:

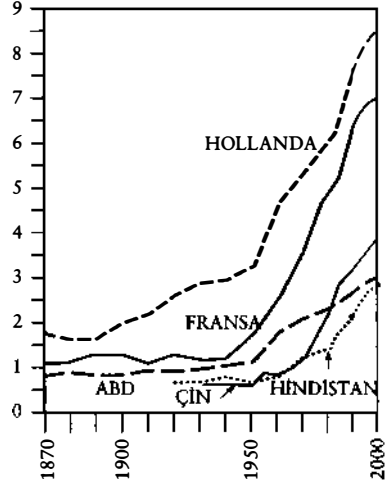
Koca bir yurttaşlar kuşağı, toprağın taşıma kapasitesinin ekilen arazi miktarıyla doğru orantılı olduğunu, güneşin enerjisini kullanarak daha yüksek verimlilik elde edilecek günlerin geldiğini düşünüyordu. Bu üzüntü verici bir aldatmacaydı, çünkü sanayi devri insanı artık güneş enerjisinden yapılmış patatesler yemez, kısmen petrolden oluşan patatesler yer.

Ama bu dönüşüm, yiyeceklerin küresel olarak erişilebilir, bulunabilir olmasını birkaç köklü biçimde değiştirmiştir. 1900'de küresel brüt piyasa ürünü üretimi (depolama ve dağıtım kayıpları öncesinde) insanların ortalama yiyecek ihtiyaçlarının ancak küçük bir miktar üstüne çıkıyordu, bu da insanlığın büyük bir bölümünün zar zor yeterli besine sahip olduğu ya da yetersiz bes-

EKİN TARIMINDA ORTALAMA ENERJİ GİRDİSİ
(kilograma eşdeğer petrol/hasat edilen tarım arazisi hektar)



BUĞDAY ÜRETİMİ
(ton/hektar)



Şekil 6.7 Modern tarımda toplam (doğrudan ve dolaylı) enerji sübvansiyonları (sol), toplam hasatlar ve artan buğday getirileri (sağ). Smil (2008b), Palgrave Macmillan (2013) ve FAO'dan (2015a) alınmış veriler.

lendiği, hayvanları beslemekte kullanılabilecek hasadın payının çok az olduğu anlamına gelir. Çok büyük artış gösteren enerji sübvansiyonları, yeni temel ürünlerin (1930'larda çıkan hibrit mısır, ilk kez 1960'larda benimsenen kısa saplı buğday ve pirinç) tam potansiyellerine erişmelerini mümkün kıldı, bu da bütün temel ürünlerin getirilerinin artmasıyla ve hasat edilen yiyecek enerjisinin toplam altı kat artmasıyla sonuçlandı (Smil 2000b, 2008).

Yirmi birinci yüzyıl başında, küresel hasat kişi başına ortalama 2.800 kcal civarında günlük enerji sağlıyordu, ki bu da eşit derecede erişilebilir olsaydı yetip de artacak bir düzeydi (Smil 2008a). Dünya nüfusunun bugün hâlâ yeterince beslenemeyen yüzde 12'lik bölümünün yiyecek olmadığından değil, gıdaya erişimi sınırlı olduğundan yeterince yiyeceği yoktur; zengin ülkelerde gıda arzı bugün fiili ihtiyaçlardan yüzde 75 daha fazladır, bu da muazzam bir yiyecek israfına (perakende düzeyinde bütün yiyeceklerin yüzde 30-40'ı), aşırı kilo ve obezlik sorunlarının daha yüksek oranda görülmesine yol açmaktadır (Smil 2013a). Üstelik tahılların çok büyük bir bölümü de (zengin ülkelerde yüzde 50-60) evcil hayvanları beslemekte kullanılmaktadır. Tavuklar en verimli yem çeviricilerdir (bir birim et için yaklaşık üç birim konsantre yem), domuzun yem/et oranı yaklaşık 9'dur, tahılla beslenen hayvanlardan et üretimi ise en zorlu iştir, bir birim et için 25 birim yem gerekir.

Bu düşük oran aynı zamanda, et/ canlı ağırlık oranından kaynaklanır: Tavuk için bu rakam 0,65 kadar yüksektir, domuz için 0,53'tür, ama bifteklilik büyükbaşlarda 0,38 gibi düşük bir orandır (Smil 2013d). Ama ete (ve süte) çevrimde enerji kaybının besinle gelen ödülleri vardır: Hayvani gıda tüketiminin artması bütün zengin ülkelere yüksek proteinli beslenme biçimleri getirmiştir (boyların uzunluğundan bellidir) ve dünyada kalabalık yoksul nüfusun en yüksek olduğu ülkelerde bile ortalama olarak bakıldığında yeterli beslenmeyi sağlamıştır. Verebileceğimiz en dikkat çekici örnek şudur: Çin'de kişi başına ortalama diyetin enerji içeriği bugün günde yaklaşık 3.000 kcal ile Japonya ortalamasının yaklaşık yüzde 10 önündedir (FAO, 2015a).

Sanayileşme

Sanayileşme sürecinin kritik bileşenleri arasında birbiriyle bağlantılı çok sayıda değişiklik bulunur (Blumer 1990) ve sürecin gelişiminin her aşamasında geçerli olmuştur bu. Fabrikada açık ara en önemli değişiklik tek tek makinelerle güç veren, buhar motorlarının gücünü demir kayış ve millerle aktaran merkezi itici güçlerin üretimlerini yerinden ederek kesin ve bağımsız kontrolü mümkün kılan elektrik motorlarının çıkması olmuştur, ama üstün makineler ve bitmiş parçalar üretecek yüksek hızlı aletler ve daha iyi nitelikli çelikler olmasaydı bu temel dönüşümün bile sınırlı bir etkisi olurdu. Daha önce belirttiğimiz üzere uluslararası ticaretin yoğunlaşması, yeni, güçlü, asli itici güçler olmadan gerçekleşemezdi, ama bunların geliştirilmesi de sadece makinelerin teknik tasarımındaki ilerlemelere değil, devasa miktarlarda yeni sıvı yakıtlar, ham petrol çıkarma ve karmaşık rafine etme süreci sonrasında üretilen yakıtların temin edilmesine dayanıyordu.

Aynı şekilde, hiyerarşik kontrolle yönetilen fabrikalarda yoğunlaşan makine üretiminin payının giderek artması, işlerin bu tesislerin yakınlarında yerleşmesini (bu nedenle yeni kentleşme biçimleri ortaya çıkmıştı) ve yeni beceriler ile meslekler geliştirilmesini (bu nedenle çırak eğitimi ve teknik eğitim görülmemiş düzeyde yaygınlaşıyordu) gerektiriyordu. Bir para ekonomisinin kullanılması ve işgücü ile sermayenin hareketliliği göç ve bankacılığın büyümesini güçlendiren yeni sözleşme ilişkileri tesis ediyordu. Kitleli üretim ve düşük birim maliyet arayışları, işleyişleri güvenilir ve ucuz nakliyat ile dağıtımaya dayalı yeni büyük piyasalar yaratmıştı.

Yaygın inancın tersine, kömürden elde edilen ısının ve buhar makinelerinin ürettiği mekanik güç sanayileşme yönünde bu karmaşık değişiklikleri

başlatmak için gerekli değildi. Kırsal kesimden ucuz emeğe dayanan çiftlik ve atölye üretimi, ülke içi, hatta uluslararası piyasalara hizmet kömür enerjisine dayalı sanayileşme daha başlamadan, kuşaklar önce de devam ediyordu (Mendels 1972; Clarkson 1985; Hudson 1990). Bu proto-sanayileşme, sadece Avrupa'nın bazı kesimlerinde (Ulster, Cotswolds, Picardy, Westphalia, Saksonya, Silezya ve daha birçok bölge) hatırı sayılır bir varlık göstermekle kalmıyordu, Ming ve Qing hanedanlarının Çin'i, Japonya'da Tokugawa'da ve Hindistan'ın bazı kesimlerinde de ülke içi piyasalar ve ihracat piyasaları için hacimli üretim yapıyordu.

Dikkat çekici bir örnek dökme demirin karbonlanarak Hint işi *wootz* çeliği üretilmesidir, *wootz* çeliğinin en bilinen dönüşmüş hali Şam işi kılıçlardır (Mushet 1804; Egerton 1896; Feuerbach 2006). Bu çeliğin Hindistan'da bazı bölgelerde (Lahor, Amritsar, Agra, Jaipur, Mysore, Malabar, Golconda) üretimi, İran ve Türk imparatorluğuna yapılan ihracat nedeniyle neredeyse sanayi ölçeğindeydi. Tekstil ürünlerinin su gücüne dayalı kısmen mekanik ve nispeten büyük ölçekli imalatı, Avrupa'da çiftlik düzeyinde üretimden merkezi imalata geçişte sıklıkla bir ara adım olmuştur. Birçok yerde sanayi tipi su çarkları ve türbinleri, yeni cansız itici gücün ortaya çıkmasını takiben, yıllar boyunca buhar motorlarıyla başarıyla rekabet etmiştir.

Kitlesel tüketim de yeni bir gerçeklik değildir. Materyalizmi sanayileşmenin bir sonucu olarak düşünmeye meylederiz, ama Batı Avrupa'nın bazı bölgelerinde, özellikle de Hollanda ve Fransa'da materyalizm daha on beşinci ve on altıncı yüzyıllarda önemli bir toplumsal gücü (Mukerji 1981; Roche 2000). Aynı şekilde Tokugawa Japonyası'nda (1603-1868) şehirlerdeki, özellikle de ülkenin başkenti Edo'daki daha zengin sakinler resimli kitaplar (*ehon*) satın almaktan tutun, dışarıda yemek yemeye (suşi bu yıllarda popüler olmuştu), tiyatro oyunlarını izlemeye, manzaralar ve aktörlerin renkli baskılarını (*ukiyo*e) toplamaya varıncaya dek çeşitli eğlencelerin tadını çıkarmaya başlamıştı (Sheldon 1958; Nishiyama and Groemer 1997). Sayıları giderek artan daha zengin insanların zevkleri ve hevesleri sanayileşme için önemli bir kültürel ivmeydi. Bu insanlar sıradan tencereleri süsleyecek malzemelerden tutun egzotik baharatlar ve güzel kumaşlara, büyüleyici harita minyatürlerinden incelikli çay servislerine varıncaya dek çeşitli mallara erişimleri olsun istiyordu.

“Sanayi devrimi” terimi gönül çelen ve derinlere işlemiş bir terim olduğu kadar yanıltıcı bir terimdir. Sanayileşme süreci tedrici, sıklıkla da

eşitsiz ilerlemeler meselesiydi. Ülke içi imalattan uzak piyasalar için geniş ölçekli üretime biraz hızlı geçilen bölgelerde bile durum böyle olmuştur. Bu değişikliklerin kesin tarihini titizlikle belirleme yönündeki bir çaba (Rostow 1965), bütün bir sürecin karmaşıklığını ve gerçekten evrimsel bir nitelik gösterdiğini görmezden gelir. Sanayileşme sürecinin İngiltere'deki başlangıcı, en azından on altıncı yüzyılın sonlarına uzanmalıdır, ama Britanya'da tam anlamıyla gelişmesi ancak 1850 öncesinde olmuştur (Clapham 1926; Ashton 1948). O tarihte bile, geleneksel zanaatkarların sayısı makine çalıştıran fabrika işçilerinden çok çok fazlaydı: 1851'de yapılan nüfus sayımına göre Birleşik Krallık'ta kömür madencisinden çok ayakkabı imalatçısı, demir fabrikası işçisinden çok demirci bulunuyordu (Cameron 1985).

Dünya çapında sanayileşme sürecini büyük ölçüde, İngiltere'deki gelişmeleri taklit eden dalgalar olarak görmek de (Landes 1969) bir o kadar yanıltıcıdır. İlerlemelerin Britanya'daki ilerleme sürecine çok yakın bir benzerlik gösterdiği Belçika örneği ayrı bir yol izlemiştir. Belçika'da metalurji daha fazla vurgulanıyor, tekstil ürünlerine daha az önem veriliyordu. Ülkelerin kendilerine özgü kritik yönleri, tektiplikten çok uzak sanayileşme örüntüleri doğurmuştur. Bunlar arasında Fransa'nın su gücüne verdiği önem, Amerika ve Rusya'nın uzun süre ahşaba dayanması, Japonya'nın titiz zanaatkarlık geleneği de vardır. Kömür ve buhar, başta devrimci girdiler değillerdi. Tedricen görülmemiş bir düzeyde, büyük bir güvenilirlikle ısı ve mekanik güç temin eder hale geldiler. Sanayileşme ancak bundan sonra genişletilebildi ve aynı zamanda ivme kazanabildi, nihayetinde fosil enerjilerin hiç olmadığı kadar yüksek tüketimiyle eş anlamlı hale geldi.

Kömür madenciliği sanayinin genişlemesi için gerekli değildi, ama bu genişlemenin hızlanmasında hiç kuşku yok ki kritik bir etken oldu. Belçika ile Hollanda'nın karşılaştırılması bu etkiyi aydınlatmamızı sağlar. Son derece kentleşmiş, mükemmel deniz nakliyatı ve nispeten ileri ticari, finansal becerilere sahip Hollanda toplumu, diğer yönlerden ondan daha yoksul olmakla birlikte kömür zengini olan, on dokuzuncu yüzyıl Avrupası'nda kıtanın en sanayileşmiş ülkesi haline gelen Belçika'nın gerisinde kaldı (Mokyr 1976). Avrupa'da kömüre dayalı ekonomileriyle sanayileşme kalkışına erken geçen bölgeler arasında Rhine-Ruhr bölgesi, Habsburg İmparatorluğu'nda Bohemya ile Moravya ve hem Prusya hem Avusturya Silezyası bulunuyordu.

Bu örüntü Batı ve Orta Avrupa dışında da tekrarlandı. ABD'de yüksek kalite antrasit madenlerine sahip Pensilvanya ile mükemmel bitümin kömür

rezervleri bulunan Ohio sanayileşmenin başını çeken ilk eyaletler olarak boy gösterdi (Eavenson 1942). Birinci Dünya Savaşı öncesi Rusyası'nda Ukrayna'da zengin Donetsk kömür rezervlerinin keşfedilmesi ve 1870'lerde Bakü petrol yataklarının geliştirilmesi, sonrasında hızlı sanayi genişlemesini başlatan gelişmeler oldu (Falkus 1972). Meiji döneminde Japonya'nın modernite arayışının enerjisi Kuzey Kyuşu'daki kömürden geliyordu. Ülkenin ilk modern entegre demir ve çelik fabrikası ülkenin dünyaya açılmasından sadece 48 yıl sonra 1901'de, Kuzey Kyuşu'da bulunan Yawata Çelik İşleri'nin (Nippon Çelik'in selefi) Higashida No. 1 adlı maden eritme ocağının yakılmasıyla faaliyete geçti (Yonekura 1994). Hindistan'daki en büyük ticari imparatorluk, J. Tata'nın Cemşidpur'dan gelen Bihari kok kömürünün 1911'den itibaren kullanıldığı maden eritme ocağından doğdu (Tata Steel 2011).

Geleneksel imalatçılar kömür ve buhar gücünün enerjisinden yararlanmaya başladıklarında daha büyük hacimde iyi kalite ürünü daha düşük fiyata üretebilmeye başladı. Bu başarı kitlesel tüketimin gerekli bir ön koşulu-ydu. Ucuz ve güvenilir bir mekanik enerji kaynağının bulunması, makineleşmenin giderek sofistike bir hal almasını da mümkün kıldı. Bu da parçalar, aletler ve makinelerin imalatında daha karmaşık tasarımları ve daha fazla uzmanlaşmayı beraberinde getirdi. Ulusal ve uluslararası piyasalara daha önce görülmemiş hızda mal temin etmek için kömür, kok ve buhar enerjisinden yararlanan yeni sanayiler kuruldu. Yüksek basınçlı kazanlar ve boruların imalatına 1810'dan sonra başlandı. Ray, tren lokomotifi ve vagon üretimi 1830 sonrasında hızla arttı, su türbinleri ve uskur pervane imalatı da 1840 sonrasında artış gösterdi. Demir gemi teknesi ve denizaltı telgraf kabloları 1850 sonrasında büyük yeni piyasalar buldu; ucuz çelik imalatının ticarileşmesi (ilk 1856 sonrasında Bessemer çeviricilerinde, sonra 1860'larda açık ocaklarda [Siemens-Martin]) çatal-bıçaktan tutun raylara, pulluklardan inşaat kirişlerine mamul ürünler için yeni büyük piyasalar buldu.

Yakıt girdilerinin artması ve aletlerin yerini makinelerin alması, insan kaslarını marjinal bir enerji kaynağı haline getirdi. İş gücü giderek üretim sürecinin desteklenmesi, kontrol edilmesi ve idare edilmesine yönelmeye başladı. 150 yılın İngiltere ve Galler'deki nüfus sayımları ile İş Gücü Anketi üzerinden analiz edilmesi bu eğilimi aydınlatır (Stewart, De ve Cole 2015). 1871'de bütün işçilerin yaklaşık yüzde 24'ü "kas gücü" gerektiren işlerdeydi (tarım, inşaat ve sanayi), sadece yüzde 1'i "bakım" işlerinde (sağlık ve öğretim, çocuk ve ev bakımı, sosyal hizmetler) çalışıyordu, ama 2011'de

bakım işleri iş gücünün yüzde 12'sinin, kas gücü gerektiren işlerse sadece yüzde 8'sini oluşturunuyordu, bugün kas gücü gerektiren işlerin birçoğu, örneğin temizlik ve ev işleri, rutin fabrika üretim hattı işleri çoğunlukla mekanize işlerden oluşur.

Ama insan emeğinin önemi gerilerken bile, bireysel işler ve eksiksiz fabrika süreçleriyle ilgili yeni sistematik araştırmalar, kas faaliyetlerinin optimize edilmesi, yeniden düzenlenmesi ve standartlaştırılması sayesinde iş gücü verimliliğinin büyük ölçüde artırılabilceğini göstermektedir. Frederick Winslow Taylor (1856-1915) bu tür araştırmalara öncülük etmişti. Taylor 1880'den itibaren 26 yılını, çelik kesme sürecindeki bütün kilit bileşenlerin nicelik haline getirilmesine harcamış, bulgularını basit bir dizi sürgülü cetvel hesaplaması haline getirmiş, *Bilimsel Yönetimin İlkeleri*'nde (Taylor 1911) verimlilik idaresi için genel sonuçlara varmıştı; bundan bir asır sonra bu kitapta verilen dersler dünyanın en başarılı tüketim malları üreticilerinin bazılarına kılavuzluk etmektedir hâlâ (Kutu 6.3).

Buhar motorlarının elektriğin gölgesinde kalmasıyla birlikte sanayileşmede kökten yeni bir dönem açıldı. Elektrik üstün bir enerji biçimidir, üstelik sadece buhar gücüne kıyasla üstün değildir. Anında ve rahat erişimin, uçuş dışında bütün tüketim sektörlerine çok güvenli bir hizmet sunma becerisiyle birleştiği tek enerji biçimi elektriktir. Düğmeye tek bir dokunuş, elektriği ışığa, ısıya, harekete ya da kimyasal potansiyele çevirir. Elektriğin kolayca değiştirilebilir akışı, önceden sürdürülemez olan bir kesinlik, hız ve süreç kontrolünü mümkün kılar. Ayrıca elektrik tüketim noktasında temiz ve sessizdir. Uygun kablolar yerli yerine bağlandığında, elektrik neredeyse sonsuz sayıda artan ya da değişen kullanıma uyarlanabilir, ama stoklanması hiç gerekmez.

Bu özellikler, sanayilerin elektriğe bağlanmasını, gerçekten de devrimci bir değişiklik haline getirdi. Nihayetinde buhar motorlarının su çarklarının yerini alması çeşitli sanayi işlerinin yapılması için gerekli gücü temin etmek üzere mekanik enerjinin aktarım biçimini değiştirmemişti. Sonuçta bu değişiklik, genel fabrika yerleşimini etkileyecek önemli bir değişikliğe neden olmadı. Fabrika tavanlarının altındaki mekân, hareketi kayışlarla tek tek makinelere aktaran paralel grup dişli bloklarına bağlı ana millerle dolu halde kaldı (Şekil 6.8). Asli bir itici gücün firesi (gerek su alçaklığı gerek motor arızası nedeniyle) ya da bir aktarım hatası (ister pervane şaftında kırılma ister kayış kayması) bütün düzeneği işlemez hale getiriyordu. Bu tür

Kutu 6.3

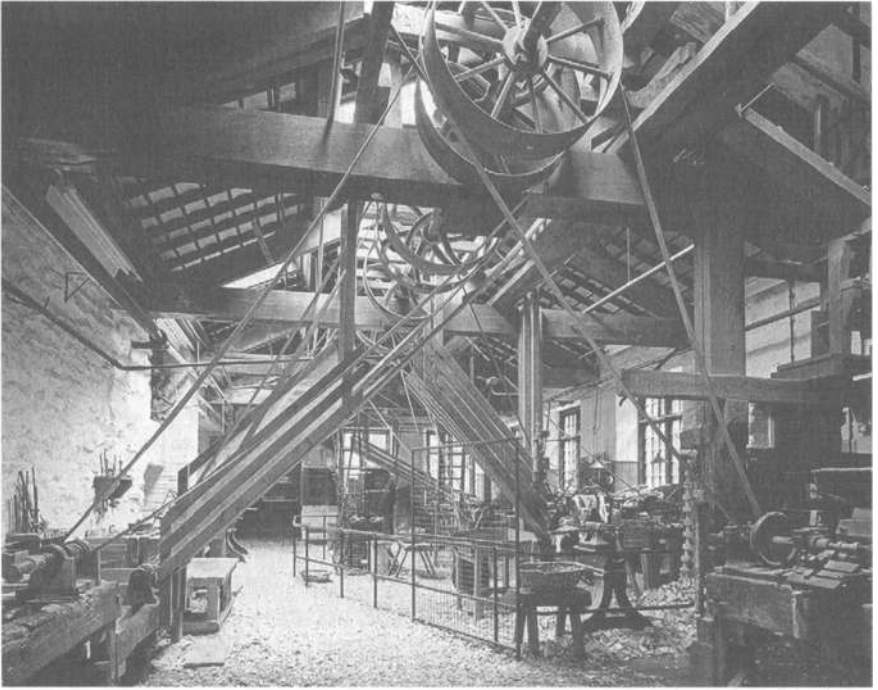
Çelik kesme deneylerinden Japonya'nın otomobil ihracatına

Frederick Winslow Taylor'ın başlıca kaygısı emeğin israf edilmesi, yani enerjinin verimsiz kullanılmasıydı: "insanların artlarında görünür ya da somut bir şey bırakmayan şu tuhaf, verimsiz, yanlış hareketleri." Taylor, fiziksel güç kullanımının optimum hale getirilmesini savunuyordu. Taylor'ı eleştirenler bunu stresli bir sömürü biçiminden başka bir şey olarak görmez (Copley 1923; Kanigel 1997), ama Taylor'ın çabası emeğin fiili enerji yasalarının anlaşılmasına dayanıyordu. Aşırıya kaçan kotalara karşı çıkıyor ("insanlar işleri nedeniyle aşırı yoruluyorlarsa, o zaman görev yanlış belirlenmiş demektir ve bu da bilimsel yönetimin amacından olabildiğince uzaktır") ve yöneticilerin birleşik bilgisinin "altlarında çalışan işçilerin birleşik bilgisi ve el becerilerinin çok gerisinde kaldığını" vurguluyordu (Taylor 1911, 115).

Taylor'ın tavsiyeleri başta reddedildi (Bethlehem Çelik 1901'de onu işten çıkardı), ama Bilimsel Yönetimin İlkeleri nihayetinde küresel yönetim için kilit önemde bir kılavuz haline geldi. Özellikle de Japon şirketlerinin küresel başarısı, verimsiz emeği ve aşırı iş yükünü, eşitsiz çalışma hızını ortadan kaldırma; işçileri üretim sürecinin iyileşmesi için tavsiyelerde bulunarak ona katılmaya teşvik etme ve işgücü-yönetim çatışmasını asgari düzeye indirme yönünde sürekli bir çabayı temel alır. Toyota'nın meşhur üretim sistemi (sesleri birbirine yakın muda mura muri üçlüsü; değer katmayan faaliyetlerin, eşitsiz üretim hızının, aşırı iş yükünün azaltılması) saf Taylorizmden başka bir şey değildir (Ohno 1988; Smil 2006).

düzenlemeler sürtünme nedeniyle büyük kayıplara da yol açıyor ve tek tek iş yerlerinde gücün ancak sınırlı kontrolünü mümkün kılıyordu.

İlk elektrik motorları daha küçük makine grupları için daha kısa millere güç verdi. 1900 sonrasında sürücü birimler hızla norm haline geldi. 1899 ile 1929 arasında Amerika'da imalat sektöründe tesis edilmiş mekanik güç toplamı kabaca dört katına çıktı, sanayi tipi elektrik motorlarının kapasiteleri de yaklaşık 60 kat artarak toplam mevcut gücün yüzde 82'sini aştı, oysa on dokuzuncu yüzyıl sonunda bu oran yüzde 5'ten azdı (USBC 1954; Schurr vd. 1990). Sonrasında elektrik gücünün payı çok az bir değişim gösterdi: Gücünü buhar ve doğrudan sudan alan itilimin yerini motorların alması 1890'ların sonlarında başladı ve sadece otuz yıl içinde tamamlandı. Bu verimli ve güvenilir birim güç temini, üst kısımda kaçınılmaz olarak gürültü çıkaran ve kaza riski yaratan kalabalığın kaldırılmasından fazlasını yaptı. Kardan milinin kaldırılması, üstün aydınlatma ve havalandırma tesisatının yerleştirilmesi için tavanları rahatlatırken, esnek bir fabrika tasarımı ve kapasitenin kolayca artırılmasını mümkün kıldı. Elektrikli motorların yüksek verimliliği daha iyi bir çalışma ortamında kesin, esnek ve bireysel güç kontrolüyle birleştğinde daha yüksek emek verimliliğini mümkün kılıyordu.



Şekil 6.8 Cumbria, Lakeside, Finthwaite'te Stott Park Bobbin Değirmeni'nde ana torna tezgâhı atölyesinin iç kısmı; büyük bir buhar makinesinden tek tek makinelere enerji aktaran baş üstü kayışlarının tipik düzenlenme biçimi görülmüyor. Değirmende, Lancashire'da iğirme ve dokuma sektörlerinde kullanılan ahşap bobinler üretiliyordu (Corbis).

Elektriğe bağlanma büyük uzmanlaşmış sanayiler kurulmasını da sağladı. İlk önce ampul, dinamo, aktarım kablosu (1880 sonrası), buhar ve su türbini (1890 sonrası) üretimine başlandı. Toz haline getirilmiş yakıtın yakıldığı yüksek basınçlı kazanlara 1920 sonrasında geçildi; çok büyük miktarda güçlendirilmiş betonun kullanıldığı devasa barajların inşasına on yıl sonra başlandı. Hava kirliliği kontrollerinin yaygınlaşması 1950 sonrasında gerçekleşti, ilk nükleer enerji santralleri inşaatına 1960 öncesinde başlandı. Artan elektrik talebi jeofizik keşiflerini, yakıt çıkarma çalışmalarını ve nakliyat alanındaki faaliyetleri de harekete geçirdi. Enerji çıkarma, nakletme ve çevirmeye yönelik pahalı tesislerin güvenilirliğini artıracak ve ömrünü uzatacak daha iyi çelikler, başka metaller ve alaşımlar üretebilmek için maddi özellikler, kontrol mühendisliği ve otomasyonla ilgili çok sayıda temel araştırmaya da gereksinim duyuluyordu.

Güvenilir ve ucuz elektriğin erişilebilir olması, neredeyse bütün sanayi faaliyetlerini dönüştürdü. İmalatı en fazla etkileyen şey açık arayla, montaj hattının yaygın olarak benimsenmesi oldu (Nye 2013). Montaj hattının artık modası geçmiş klasik, katı Fordcu biçimi 1913'te çıkan hareketli bir kayışa dayanıyordu. Modern, esnek Japon usulüyle, parçaların zamanında teslim edilmesine ve işçilerin birkaç farklı işi yapabilmesine dayanır. Toyota fabrikalarında başlayan bu sistem Amerika'daki uygulamalardan çeşitli unsurları, yerli yaklaşımlar ve orijinal fikirlerle birleştiriyordu (Fujimoto 1999). Toyota üretim sistemi (*kaizen*) sürekli ürün iyileştirmeye ve ulaşılabilcek en iyi sürekli kalite kontrole bağıli kalmaya dayanıyordu. Yine, bütün bu eylemlerin temeli enerji israfını en az düzeye indirmektedir.

Ucuz elektriğin erişilebilir olması yeni metal üretme ve elektrokimya sanayileri de yaratmıştır. Elektrik bir elektrolitte, en başta kriyolitte (Na_3AlF_6) çözülmüş alüminanın (Al_2O_3) elektrolitik indirgenmesiyle alüminyumun geniş ölçekte üretilmesini mümkün kılıyordu. Elektrik 1930'lardan başlayarak giderek artan plastik çeşitlerinin sentezlenmesi ve şekillendirilmesinde, yakın dönemde de yeni bir kompozit malzeme sınıfının, en önemlisi karbon fiberlerin ortaya çıkmasında vazgeçilmez bir rol oynadı. Bu malzemelerin enerji maliyeti, alüminyumun enerji maliyetinden üç kat yüksektir ve en geniş ticari kullanım alanları da ticari uçak yapımında alüminyum alaşımlarının yerini almak olmuştur: en son Boeing 787'nin hacim itibarıyla yüzde 80'ini kompozitler oluşturur.

Bu yeni hafif malzemelerin çeliğin yerini alması yaygınlık kazanırken, çelik üretimi de artık giderek elektrik arkı ocaklarında yapılmaktadır, daha hafif ama daha güçlü yeni çeliklerin özellikle otomotiv sanayiinde birçok kullanım alanı vardır (Smil 2016). Sayfalarca sürebilecek bu listeyi bitirmeden önce şunu vurgulamam gerek: Elektrik olmasaydı, jet motorları ya da tıbbi teşhis aygıtları gibi bugün artık her yerde rastlanan uygulamalar için hata paylarının düştüğü parçaların mikro mekanizmalarla geniş ölçekte üretimi söz konusu olmazdı, bugün küresel çapta kullanılan, her yerde var olan bilgisayarlar ile milyarlarca telekomünikasyon cihazı da olmazdı, şaşımaz elektronik kontroller de olmazdı.

Zengin ülkelerin hemen hepsinde (işgücünün ya da gayri safi milli hasılanın bir bölümü olarak) imalatçı payları hızla gerilemekte olsa da (2015 başında bu paylar işçilerin yüzde 10'undan fazlaydı ve ABD'nin gayrisafi milli hasılasının yüzde 12'si civarındaydı – USDOL 2015) sanayileşme devam etmektedir, ama konfigürasyonu değişmiştir. Kitlesel enerji ve malzeme

akışları sanayileşmenin temelinde kalacaktır, metaller tipik sanayi malzemeleri olarak kalacaktır; bugün çoğunlukla birçok çelik türünde kullanılan demir, metaller arasında hâlâ ağırlığa sahiptir. 2014'te çelik üretimi demir dışında başlıca dört metalin, yani alüminyum, bakır, çinko ve kurşunun toplam üretiminden yaklaşık 20 kat fazlaydı (USGS 2015). Demir cevherinin yüksek fırınlarda eritilmesi, ardından bazik oksijen fırınlarında çelik üretimi ve elektrik arkı ocaklarında geri dönüştürülmüş çelik kullanımı çelik üretimine hâkimdir. Daha büyük ve daha verimli yüksek ocaklar olmasaydı çelik üretiminin muazzam derecede artması (Kutu 6.4, Şekil 6.9) mümkün olmazdı.

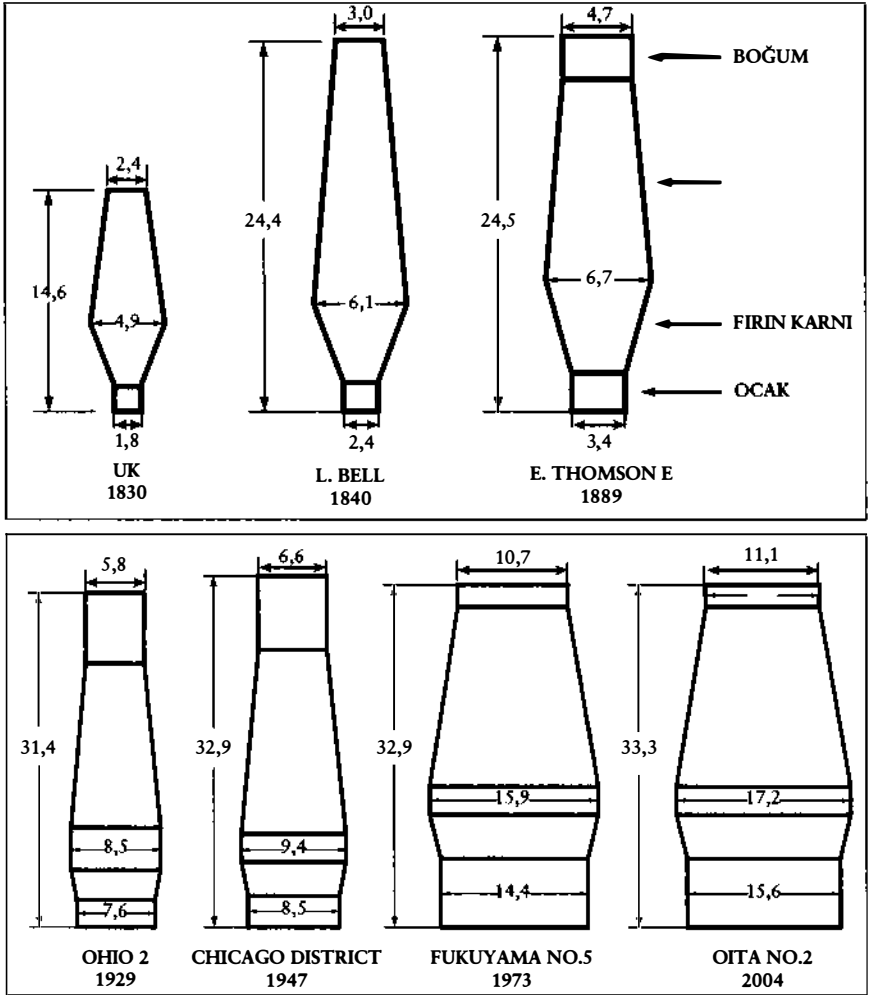
Aynı şekilde çelik üretim teknikleri de sadece enerji kullanımı azaldığı için değil, artan ürün getirisi nedeniyle de daha verimli hale gelmiştir (Takamatsu vd. 2014). İlk Bessemer çeviriciler, önceleri demirin % 60'ından azını, sonraları % 70'inden biraz fazlasını çeliğe çeviriyordu. Açık ocaklarda ise

Kutu 6.4

Metal eritme ocaklarının kütle ve enerji dengeleri ile gelişmeleri

Kökeni Ortaçağ'a uzanan pek az üretim yapısı, modern medeniyetin işlemesi açısından metal eritme ocakları kadar önemli olmuştur. Beşinci bölümde belirttiğimiz üzere Bell'in 1840 yılında yeniden tasarladığı ocakta iç hacim beş kat artıp 250 m³'e ulaşmıştı. 1880'e gelindiğinde en büyük ocakların hacmi 500 m³'ü aşmıştı; 1950'de 1.500 m³'e ulaştı, 2015'te de rekor iç hacimler 5.500 ile 6.000 m³ arasındaydı (Smil 2016). Sonuçta yaşanan üretim artışları 1840'ta günde 50 ton olan sıcak metal üretimini, 1900'de günde 400 tonun üstüne çıkardı. İkinci Dünya Savaşı öncesinde günde 1.000 ton noktasına yaklaşıldı, bugün en büyük ocaklarda günde 15.000 ton üretilir, Güney Kore'de POSCO'nun Pohang 4 ocağındaysa üretim rekor düzeyde, günde 17.000 tondur.

Büyük metal eritme ocaklarını ve onlara bağlı oksijen ocaklarını çalıştırmak için gerekli kütle ve enerji akışları olağanüstü boyutlardadır (Geerdes, Toxopeus ve Van der Vliet 2009; Smil 2016). Günde 10.000 ton demir üreten, bitişigindeki bazik bir oksijen ocağını tedarik eden bir metal eritme ocağının 5,11 Mt demir cevherine, 2,92 Mt kömüre, 1,09 Mt akışkan malzemeye ve yaklaşık 0,5 Mt çelik cürufatırcısına ihtiyacı olacaktır. Dolayısıyla büyük bir entegre çelik fabrikasına her yıl yaklaşık 10 Mt malzeme girer. Modern ocaklarda bugün, ısıya dayanıklı tuğladan yapılmış iç kısımları yıpranıp da yeniden sırlanıcaya dek 15-20 yıl sürekli sıcak metal üretilmektedir. Bu verim artışlarına kok tüketiminde gerilemeler de eşlik etmiştir. 1900'de 1 ton sıcak metal için 1-1,5 ton kok gerekiyordu, 2010'daysa ülkeler bazında oranlar şöyledi: Japonya'da bir ton sıcak metal için 370 kg, Almanya'da ise 340 kg'den az (Lüngen 2013). Dolayısıyla yakıtı kok olan demir eritme işlemlerinin enerji maliyeti 1750'de yaklaşık 275 GJ/t'yken, 1900'de yaklaşık 55 GJ'ye gerilemiş, 1950'de 30 GJ'ye yaklaşmış, 2010'daysa 12 ilâ 15 GJ/t olmuştur.



Şekil 6.9 Yüksek fırın tasarımlarında değişiklikler, 1830-2004. Başlıca eğilimler arasında daha yüksek ve geniş istifler, daha geniş fırınlar, daha alçak ve dık fırın karnları yer alır. En büyük fırınlar bugün günde 15.000 tonu aşkın sıcak metal üretir. Smil'den (2016) alınmıştır.

nihayetinde demirin yaklaşık % 80'i çevrilir oldu, bugün kullanılan, ilk kez 1950'lerde ortaya çıkan en iyi bazik oksijen fırınlarında ise verim yüzde 95'e yakın; elektrik arkı ocakları demirin yüzde 97'sini çeliğe çeviriyor. Elektrik arkı ocakları bugün bir ton çelik üretimi için 350 kWh'ten daha az enerji tüketiyor, 1950'de bu rakam 700 kWh/t'den fazlaydı; ayrıca bu kazanımlara emisyon oranlarının azalması da eşlik ediyor: 1960 ile 2010 arasında

ABD’de gözlenen oranlarda (bir ton sıcak metalde) CO₂ salımında yaklaşık %50, toz salımında % 98’lik bir azalma oldu (Smil 2016). Sıcak metalin sürekli dökülmesiyle çeliğin enerji maliyeti daha da düşürüldü. Bu yenilik işlem öncesinde yeniden ısıtılmayı gerektiren geleneksel külçe üretiminin yerini aldı.

Sonuçta ortaya çıkan üretim artışları, kişi başına değerlerle ele alındığında bile basamaklarla görülecek kazanımlara çevrilecek kadar büyük oldu: 1850’de modern çelik üretimi başlamadan önce her yıl zanaat üretimiyle 100.000 tondan az çelik üretiliyordu; yani yılda kişi başına sadece 75 gram. 1900’de 30 Mt ile küresel ortalama kişi başına 18 kg’ydi; 2000’de 850 Mt ile küresel ortalama kişi başına 140 kg’ye çıktı; 2015’e gelindiğinde 1,65 Gt ile kişi başına yaklaşık 225 kg oldu, kabaca 1900’deki oranın 12 katına çıktı. Benim hesaplamalarım 2013’te dünya çapında demir ve çelik üretiminin en az 35 EJ yakıt ve elektrik gerektirdiğini, yani dünyanın toplam asli enerji tedarikinin % 7’sinden azını gerektirdiğini gösteriyor, ki bu da onu dünyanın en büyük enerji tüketen sanayi sektörü haline getiriyor (Smil 2016). Bu oran diğer bütün sanayiler için % 23, ulaştırma için % 27, konut kullanımı ve hizmetler için % 36’dır. Ama sektörün enerji yoğunluğu 1960’larda olduğu gibi kalsaydı, bu sanayi kolu 2015’te dünyanın asli enerji tedarikinin en az % 16’sını tükettirdi, verimlilik iyileştirmelerinin sürekli devam ettiğini gösteren etkileyici bir örnektir bu.

Demir dışı metalurji alanında açık arayla en önemli yenilik alüminyum eritmenin geliştirilmesi olmuştur. Bu element 1824’te yalıtıldı, ama büyük ölçekte üretimi için ekonomik bir süreç ancak 1866’da geliştirildi. ABD’de Charles M. Hall’un, Fransa’da P. L. Heroult’nun bağımsız icatları alüminyum oksidin elektrolizine dayanıyordu. Metali ayırmak için gerekli asgari enerji demiri eritmek için gerekli enerjinin altı katından yüksekti. Bunun sonucunda alüminyum eritme, büyük ölçekli elektrik üretimi başladıktan sonra bile ağır ağır ilerledi. 1880’lerde bu işlemin elektrik ihtiyacı 1 ton alüminyum için 50.000 kWh’den fazlaydı, sonrasında Hall-Heroult sürecinin sürekli geliştirilmesi bu oranı 1990’da üçte ikiden fazla azalttı (Smil 2014b).

Alüminyumun kullanım alanı önce, uçuş teknolojisinin gelişmesiyle genişledi. 1920’lerin sonunda ahşap ve kumaşın yerini metal gövdeler aldı, İkinci Dünya Savaşı sırasında savaş ve bombardıman uçaklarının yapımı için alüminyuma talep keskin bir artış gösterdi. 1945’ten bu yana, tasarımın bir hafiflik ve kuvvet bileşimi gerektirdiği yerlerde alüminyum ve alaşımları çeliğin yerini almıştır. Bu kullanım alanları otomobillerden demiryolu

Kutu 6.5

Mekatronik makineler olarak otomobiller

Mekanik ve elektronik parçaların bileşiminin modern bir binek otomobilden daha iyi bir örneğı yoktur. 1977'de GM'nin Oldsmobile Tornado'su ateşleme zamanını yönetecek bir elektronik kontrol birimine (ECU) sahip ilk otomobil oldu. Bundan dört yıl sonra GM ülke içi otomobil üretim hattında yaklaşık 50.000 motor kontrol yazılım kod dizisine sahipti (Madden 2015). Artık ucuz otomobillerde bile yaklaşık 50 ECU bulunur, bazı büyük markalar (Mercedes-Benz S sınıfı da dâhil) 100 milyon dizi içeren yazılımların desteklediğı ağıba bağıli yaklaşık 100 ECU'ya sahiptir; ABD Hava Kuvvetleri'nin ortak Vurucu Savaş Uçağı F-35'i çalıştırmak için 5,7 milyon, şirketin en son model ticari jet uçağı Boeing 787'yi çalıştırmak için 6,7 milyon dizi yazılıma ihtiyaç olduğunu hatırlatalım (Charette 2009).

Otomobil elektroniğı daha karmaşık bir hal almaktadır, ama kod dizilerinin karşılaştırılması hatalı bir tercihtir. Otomobillerde yazılım şişkinliğinin temel sebebi, lüks modellerin sunduğı, motorun fiilen çalışmasıyla hiçbir ilgisi olmayan eğlence-bilgilendirme ve navigasyonla ilgili olanlar da dâhil, kapsanan seçenek ve konfigürasyon sayısının aşırı düzeyde olmasıdır; çok sayıda yeniden kullanılmış, kendiliğinden üretilmiş ve gereksiz kod vardır. Böyle bile olsa elektronik ve yazılım bugün lüks araçların maliyetinin % 40'ını temsil eder: otomobiller mekanik toplamalar olmaktan çıkıp mekatronik hibritler haline gelmiştir, eklenen her yararlı kontrol işlevi (örneğin şerit değıştirme sinyali, geri giderken arka tarafın çarpmasını önlemeye yönelik otomatik fren sistemi ya da ileri teşhis) yazılım koşullarını genişletir ve bir aracın maliyetini artırır. Bu eğilim açık, ama tümüyle otonom olmuştur, kendi kendilerine çalışan araçlar eleştiriden uzak birçok gözlemcinin inandığı kadar yakın bir tarihte ortaya çıkmayacaktır.

vagonlarına, uzay araçlarına uzanır, ama artık hafif çelik alaşımlar da bu piyasaya hizmet etmektedir. 1950'lerden bu yana yüksek ısıli uygulamalarda, en başta da süpersonik uçak yapımında titanyum alüminyumun yerini almaktadır. Titanyum üretimi alüminyum üretiminden en az üç kat daha enerji yoğunudur (Smil 2014b).

Kitlesel olarak üretilen metallerin temel önemi, en son elektronik ilerlemelerle meşgul bir toplumda sıklıkla görmezden gelinirse de, modern imalatın modern elektronikte devam eden füzyonu sayesinde dönüştüğüne kuşku yoktur; mevcut tasarım seçeneklerini müthiş güçlendiren, görülmemiş kesinlik ve esneklik denetimlerini devreye sokan, pazarlama, dağıtım ve performans izlemede değışiklikler yaratan bir birliktir bu. Uluslararası bir karşılaştırma 2005'te ABD'de imalatçıların dışarıdaki şirketlerden yaptığı alımların mamul mallara eklenen katma değıerin yüzde 30'u kadar olduğunu gösteriyordu, başlıca AB ekonomilerinde de benzer oranlar (% 23-29) gözleniyordu, 2008'de hizmetle ilgili meslekler ABD imalat sektöründeki bütün işlerin çoğunluğunu (% 53) oluşturunuyordu, Almanya, Fransa ve Britanya'da

% 44-50'sini, Japonya'da ise % 32'sini oluşturunuyordu (Levinson 2012). Birçok ürün seleflerinden o kadar farklı görünmese de aslında çok farklı hibritlerdir (Kutu 6.5).

Otomobiller araştırma, tasarım, pazarlama ve hizmet sunumunu malların üretimi kadar önemli bulan bir sanayinin önde gelen örneklerinden biridir sadece. Özel bir (bir aracın, bir bilgisayarın ya da bir montaj hattının) içkin enerji kullanımı (daha enerji yoğun malzemeler kullanılması, daha büyük kütle ya da daha iyi performans nedeniyle) artsa da, aynı kalsa da ya da gerilese de üretilen miktardan başka şeylerle ilgili kaygılar çok önemli hale gelmiştir, bunların başında da görünüm, markanın ayrıksılığı ve kalite değerlendirmeleri gelir. Bu eğilimin hem gelecekteki enerji kullanımı hem de iş gücünün yapısı açısından önemli sonuçları olmuştur, ama ille de basit, tek yönlü bir biçimde değil (bu konuda daha fazla bilgi için bkz. 7. bölüm).

Ulaştırma

Birkaç özellik bütün fosil yakıtlı ya da elektrikli ulaştırma biçimleri açısından geçerlidir. İnsanları ve malları taşımının geleneksel biçimlerinin tersine, bu ulaştırma biçimleri daha hızlıdır, genellikle de bu yönleriyle inanılmazdır: Artık her yıl milyonlarca insan 6-8 saatte Atlantik'i aşıyor, ama bir asır önce Atlantik'i geçmek yaklaşık altı gün sürüyordu (Hugill 1993), beş yüz yıl önce ilk Atlantik geçişi beş hafta sürdü. Ulaştırma araçları da karşılaştırılamayacak kadar güvenli bir hal aldı: En güçlü atların çektiği en iyi arabalar bile Alpler'deki geçitleri aşmakta zorlanırdı; dingillerin kırılması, hayvanların sakatlanması, göz gözü görmeyen fırtınalar gibi zorluklara maruz kalınırdı; artık her gün yüzlerce uçak Alp Dağları'nın üstünden geçiyor, altlarındaki derin tünellerde hızlı trenler sefer yapıyor. Maliyet açısından değerlendirildiğinde Birinci Dünya Savaşı öncesinde Atlantik'i geçmenin maliyeti ortalama 75 dolardı (Dupont, Keeling ve Weiss 2012), yani 2015'in parasıyla 1.900 dolardı. O zamanlar geri dönüş yolculuğu bugünkü değere 4.000 dolara mal olurken, bugün ortalama (indirimsiz) bir Londra-New York uçuşu 1.000 dolardır.

On dokuzuncu yüzyıl başında su çarkları ve su değirmenleri sayesinde doğal kinetik enerjilerin sabit bir konumda kullanılmasında hem birim kapasitesi hem verim açısından bazı önemli kazanımlar olmuşsa da sadece canlıların kas gücünden yararlanılan kara ulaşımı antik çağlardan bu yana pek az değişmiştir. Binlerce yıl boyunca karada hiçbir ulaştırma biçimi ata binmek

kadar hızlı olmamıştı. Yüzyıllarca hiçbir ulaştırma aracı iyi bir yaylı arabadan daha az yorucu olmadı. 1800'e gelindiğinde bazı yolların sert zeminleri daha iyiydi, birçok arabanın da daha iyi yayları vardı, ama bütün bunlar bir derece farkıydı, nitelik değil. Demiryolları bu sabit özellikleri birkaç yılda değiştirdi. Demiryolları mesafeleri kısaltmak, uzamı yeniden tanımlamakla kalmadı, bunu görülmemiş bir rahatlıkla yaptı. Dakikada bir mil (saatte 96 km) hızına ilk kez 1847'de İngiltere'de tarifeli bir seferde kısa bir süreliğine ulaşıldı; aynı yıl ülkedeki en büyük demiryolu yapım faaliyetine başlandı, bu sayede sadece iki kuşak içinde güvenilir bağlardan oluşan sağlam bir ağ kuruldu (O'Brien 1983).

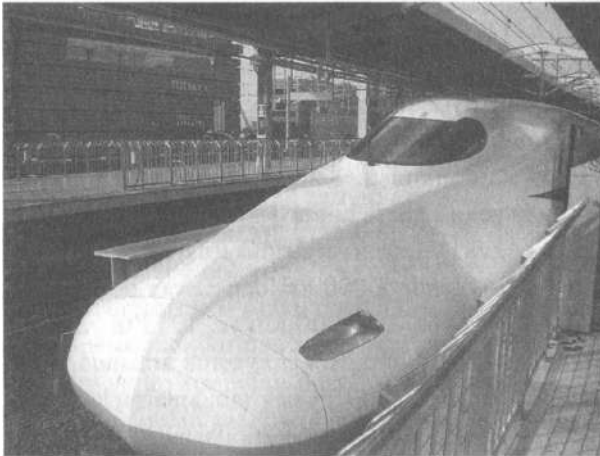
Kömür yakılan daha güçlü buhar motorlarının çektiği trenlerin çalıştığı demiryolları için geniş ölçekli inşaat faaliyeti Avrupa ve Kuzey Amerika'da 80 yıldan kısa bir süre içinde tamamlandı, 1820'ler deney yıllarıydı; 1890'lara gelindiğinde en hızlı trenler bazı bölgelerde saatte 100 km'yi aşan bir hızla gidiyordu. Yolcu vagonları ortaya çıkmalarından çok kısa bir süre sonra, sırf raylar üstündeki taşıyıcılar olmaktan çıktı, ısıtılmaya başladılar, banyoları oldu. Yolcular daha yüksek bir fiyat ödeyerek daha iyi döşemeler üstünde oturuyor, iyi yemek servisinden ve rahat uyumalarını sağlayacak düzenlemelerden yararlanıyorlardı. Daha hızlı ve daha rahat trenler ziyaretçiler ve göçmenleri şehirlere taşımakla kalmıyor, şehirli de kırsal kesime götürüyordu. Thomas Cook 1841'den itibaren demiryolu tatil paketleri sunmaya başladı. İnsanların işlerine gidip gelirken kullandığı demiryolu hatları ilk büyük banliyöleşme dalgasını mümkün kıldı. Giderek genişleyen yük trenleri hacimli kaynakları uzak sanayiye taşıyor ve ürünlerini hızla dağıtıyordu.

Amerika'da inşasına 1834'te başlanan demiryollarının uzunluğu, Britanya'da demiryollarının toplam uzunluğunu çok geçmeden geride bıraktı. 1860'a gelindiğinde ABD'de demiryollarının uzunluğu 48.000 km'yi buluyordu, Britanya'daki toplamın üç katıydı bu rakam. 1900'e gelindiğinde aradaki fark neredeyse on kata çıkmıştı. Kıtalar arasında ilk bağlantı 1869'da kuruldu, yüzyıl sonuna gelindiğinde böyle dört tane daha demiryolu hattı bulunuyordu (Hubbard 1981). Demiryollarının Rusya'daki gelişimi de epey hızlı ilerledi. 1860'a gelindiğinde 2.000 km'den az ray döşenmişti, ama 1890'da toplam demiryolu uzunluğu 30.000 km'ye, 1913'te yaklaşık 70.000 km'ye çıkmıştı (Falkus 1972). Sibiry ile Vladivostok arasında, inşası 1891'de başlayan kıtalar arası bağlantı 1917'ye dek tam anlamıyla bitmedi. İngilizler 1947'de Hindistan'dan çekildiklerinde arkalarında 54.000 km

uzunluğunda demiryolu bırakmışlardı (alt kıtanın tamamında demiryollarının uzunluğu 69.000 km'ydı). Asya anakarasında başka hiçbir ülke İkinci Dünya Savaşı öncesinde büyük bir demiryolu ağı inşa etmedi.

İkinci Dünya Savaşı'nın son bulmasından beri, otomobiller, otobüsler ve uçakların yarattığı rekabet sanayileşmiş ülkelerin çoğunda demiryollarının görelî önemini azalttı, ama yirminci yüzyılın ikinci yarısında Sovyetler Birliği, Brezilya, Irak ve Cezayir yeni demiryolları inşasına kuvvetle girişen ülkeler arasında yer aldı, Çin de 1950 ile 1990 arasında 30.000 km'yi aşkın yeni demiryolu yaparak Asya lideri oldu. Ama İkinci Dünya Savaşı sonrası dönemin en başarılı yeniliği uzun mesafeler arasında sefer yapan elektrikli tren oldu. İlk seferini 1964'te Tokyo ile Osaka arasında yapan Japon *shinkansen*, saatte azami 250 km hıza ulaştı, sistemin en son trenleri (*nozomi*) saatte 300 km yapıyor (Smil 2014a; Şekil 6.10). Fransız *trains a grand vitesse* (TGV) 1983'ten beri faaliyet gösteriyor; en hızlı tarifeli sefer saatte yaklaşık 280 km hızla yapılıyor. Aynı şekilde İspanya (AVE), İtalya (*Frecciarossa*) ve Almanya'da da (Intercity) artık hızlı tren hatları bulunuyor, ama Çin yüksek hızlı demiryollarının uzunluğu bakımından yeni rekoru elinde tutuyor: 2014'te Çin'in yüksek hızlı demiryollarının uzunluğu 16.000 km'ydı (Xinhua 2015). Oysa tersine Amerika'daki yegâne hızlı tren (Boston-Washington arasında saatte ortalama 100 km'den biraz hızlı giden) *Acela* modern yüksek hızlı trenlerden bile sayılmıyor.

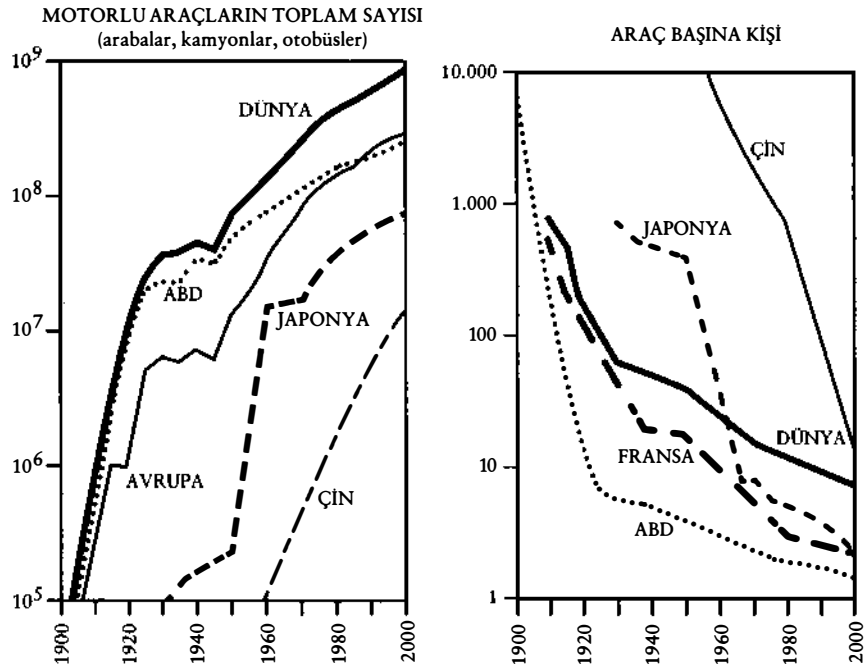
1880'lerin sonunda çıkan ilk kullanışlı benzinli motorlardan saymaya başlarsak, karadaki ikinci ulaştırma devrimi, yani içten yanmalı motorlarla



Şekil 6.10 Shinkansen N700, Kyoto İstasyonu'nda, 2014'te Japonya'daki hızlı trenlerin Tokaido hattında kazasız geçirdiği 50. yıl kutlandı. (Fotoğraf V. Smil)

çalışan karayolu araçlarının gelişmesi daha az zaman almamıştır. Avrupa ve Kuzey Amerika'nın daha yüksek gelirli ülkelerinde bu gelişme süreci dünya savaşlarıyla iki kez kesintiye uğradı. ABD'de daha 1920'lerin sonunda otomobil sahiplerinin sayısı yüksek olsa da Avrupa ve Japonya benzer aşamaya ancak 1960'larda ulaştı, Çin'de otomobil sahipliğinin kitleselleştiği devir ancak 2000'de başladı, ama ülkenin yüksek nüfusu ve yeni fabrikalara yatırımların hızlı olması nedeniyle Çin'de otomobil satışları 2010'da ABD'deki toplam otomobil satışını aştı. O tarihte dünyada yaklaşık 870 milyon binek otomobil ve toplam sayısı bir milyarı aşan karayolu araçları bulunuyordu (Şekil 6.11).

Otomobillerin neden olduğu ekonomik, sosyal ve çevresel değişiklikler modern çağın en derin dönüşümleri arasında yer alır (Ling 1990; Womack, Jones ve Roos 1991; Eckermann 2001; Maxton ve Wormald 2004). Otomobil yapımı (ilk 1920'lerin ortasında ABD'de) peş peşe birçok ülkede



Şekil 6.11 Dünya çapında karayolu araçlarının toplam sayısı 1900'de 10.000'ken 2010'da bir milyarı üstüne çıktı (solda). 1980'lerin sonunda Avrupa'daki toplam sayı ABD'deki kayıtları geride bıraktı, ama otomobil sahipliği oranının en yüksek olduğu ülke hâlâ ABD; 2010'da araç başına 1,25 kişi düşüyordu. Motorlu Araç İmalatçıları Birliği'nin (Motor Vehicle Manufacturers Association) ve Dünya Bankası'nın yıllık raporlarında sunulan verilere dayanarak hazırlanmıştır (2015b).

ürün değeri açısından öncü sanayi olarak yükseldi. Otomobiller uluslararası ticaretin başlıca metallerinden biri haline geldi. Almanya'nın (1960 sonrasında) ve Japonya'nın (1970 sonrasında) otomobil ihracatı bu iki ekonomiye yıllarca yaradı. Diğer sanayilerin önemli kesimleri (en başta çelik, kauçuk, cam, plastik ve petrol rafine etme) otomobil yapma ve kullanmaya dayanır. Otoban inşası devletin büyük bir katılım göstermesiyle gerçekleşti ve muazzam kümülatif sermaye yatırımını beraberinde getirdi. Hitler'in 1930'lardaki *Autobahnen*'i Eisenhower'ın (1956'da inşasına başlanan, bugün 77.000 km'den biraz uzun olan) eyaletler arası otobanından bir kuşak önceydi, Çin'in 2015'te toplam uzunluğu 112.000 km'yi bulan Ulusal Otoban Sistemi de ABD'deki eyaletler arası otobanı geride bıraktı.

Otomobillerin yarattığı en bariz etki, hiç kuşku yok ki dünyanın her yerinde, geçiş serbestisi olan yolların ve park alanlarının yayılmasıyla, mahallelerin yıkılmasıyla birlikte şehirlerin yeniden düzenlenmesi oldu. Mekânın izin verdiği yerlerde banliyöleşme (Kuzey Amerika'da şehir dışına yerleşme de) hızla arttı, alışveriş ve hizmetlerin yerleşimi ve biçimlerinde değişiklikler oldu. Sosyal etkiler daha da büyük oldu. Otomobil sahipliği *burjuvalaşmanın* önemli bir parçası haline geldi, kitlelilik kazanmış bu yeni mülkiyeti mümkün kılan bütçeye uygun bazı tasarımlar inanılmaz derecede uzun ömürlü oldu (Siuru 1989). Bu tasarımların ilki Ford'un fiyatı 1923'te 265 dolara kadar düşen ve üretimi 19 yıl devam eden Model T'siydi (McCalley 1994). Dikkat çekici diğer modeller Austin Seven, Morris Minor, Citroen 2CV, Renault 4CV, Fiat Topolino'ydu, hepsinin en popüleriyse Ferdinand Porsche'nin Hitler'den esinlenerek geliştirdiği Volkswagen'di (Kutu 6.6).

Kişisel seyahat özgürlüğünün hem ikamet değişikliği hem profesyonel hareketlilik açısından muazzam etkileri oldu. Sağladığı yararların son derece bağımlılık yaratıcı olduğu anlaşıldı. Boulding'in (1974) otomobili, sürücüsünü yaya köylülere tepeden bakan bir aristokratın hareket kabiliyetine sahip bir şövalyeye dönüştüren mekanik bir küheylana benzetmesi pek de abartılı değildir. 2010'da ABD'de (kamyonlar ve otobüsler de dâhil olmak üzere) motorlu araç başına sadece 1,25 kişi düşüyordu, hem Almanya'da hem Japonya'da bu oran 1,7'ydi (Dünya Bankası 2015b). İstendiğinde hareket etmeye bu kadar yaygın bir biçimde bağımlı olmak, bu alışkanlıktan kurtulmayı zorlaştırıyor: 2009 ile 2011 arasında ekonomik gerileme nedeniyle yaşanan batma döneminin ardından 2015'te ABD'de otomobil satışları 16,5 milyon birimle rekor seviyeye ulaştı.

Kutu 6.6

Volkswagen ve diğer dayanıklı modeller

Toplam üretim, büyüklük ve dayanıklılık (gerçi güncellenmiş modellerde) açısından düşünüldüğünde kitleler için tasarlanmış hiçbir otomobil Adolf Hitler'in halkı için en uygunu olduğuna karar verdiği otomobile yaklaşamaz (Nelson 1998; Patton 2004). 1933 Sonbaharında Hitler bu otomobilin özelliklerini belirledi: En yüksek hız saatte 100 km, 7 L/ml, iki yetişkin ve üç çocuk taşıma kapasitesine sahip, havalandırma sistemli, 1.000 RM'den ucuz. Ferdinand Porsche de (1875-1951) biraz çirkin ve Hitler'in ısrarı üzerine böcek gibi görünen bu otomobili (Käfer) 1938'de üretilmeye hazır hale getirdi. Savaş sivil üretimi engelledi, Beetle'ın seri üretimine ancak 1945'te, hasar gören fabrikayı kurtaran Binbaşı Ivan Hirst (1916-2000) başkanlığındaki Britanya Ordusu komutasında başlandı (Volkswagen AG 2013).

Batı Alman Wirtschaftswunder'in ilk yıllarında (Mercedesler, Audiler ve BMW'lerin mülikiyetinin kitleselleşmesi öncesinde) bu otomobil Almanya yollarında sel gibi aktı, 1960'lar da Volkswagen ABD'nin yaptığı ithalatın en popüler kalemi haline geldi, sonrasında yerini Hondalar ve Toyotalara bıraktı. Orijinal Beetle üretimi Almanya'da 1977'de durdu, ama Brezilya'da 1996'ya, Meksika'da 2003'e dek devam etti: Puebla fabrikasında üretilen son otomobilin seri numarası 21.529.464'tü. Dışını J. Mays'ın yeniden tasarladığı, motoru önde bulunan Yeni Beetle 1997 ile 2011 arasında hazırlandı, model yılı 2012'den beri son tasarımın (A5) adı yine Volkswagen Beetle yapıldı.

İkinci Dünya Savaşı sırasında gizlice tasarlanan Renault 4CV, Beetle'ın Fransız muadiliydi, 1945 ile 1961 arasında bir milyonu aşkın otomobil üretildi. Fransa'nın en meşhur ana modeli 1940 ile 1990 arasında üretilen Citroen 2CV'yd; deux cheveaux tam da silindirlerin sayısını belirtiyordu, motor aslında 29 hp'yd (Siuru 1989). Fiat'ın minik faresi Topolino, dingil arası mesafenin iki metreden kısa olduğu iki kişilik bu otomobil 1936 ile 1955 arasında üretildi, İngiliz Morris Minor ise 1948 ile 1971 arasında üretildi. Ama bütün bu modellerin popülerliği Japon tasarımlarının gölgesinde kaldı: Japon otomobilleri 1960'lar ile 1970'ler arasında nispeten az sayıdaki ihracatın ardından 1980'lerde küresel çapta çok satan modeller haline geldi.

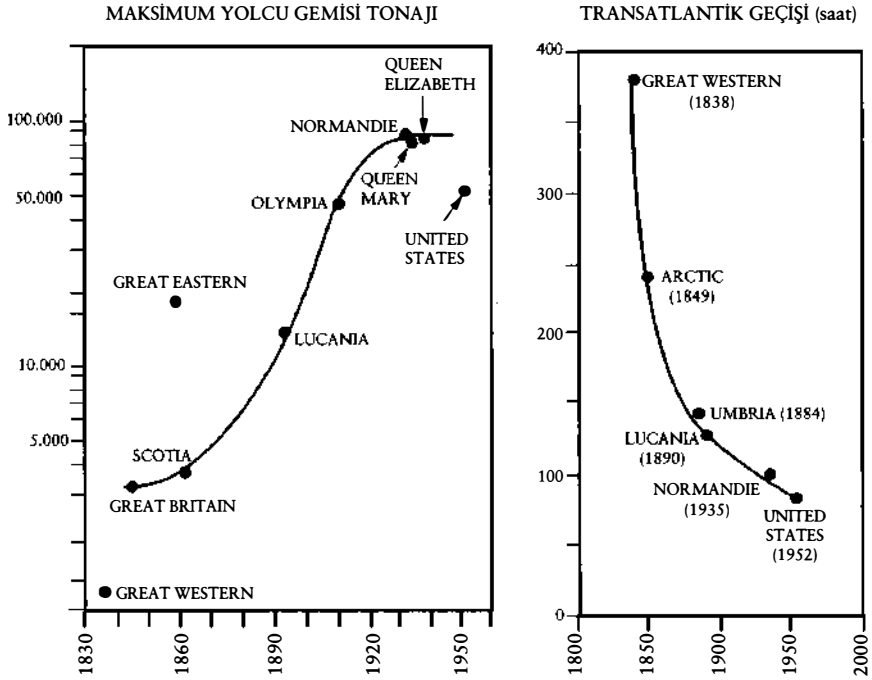
Bu ayrıcalığı korumak için olağanüstü yol aldık (ve Kuzey Amerika'da bütün araçların yüzde 90'ından fazlasını krediyle satarak araç sahipliğini kolaylaştırdık), bu nedenle de Çinliler ve Hintlerin Kuzey Amerika deneyimini taklit etmek istemelerine şaşıramayız. Ama her bağımlılık gibi bunun da ağır bir bedeli var. 2015'te dünyada yollarda 1,25 milyar araç bulunuyordu, aynı yıl yeni binek otomobil satışları 73 milyona ulaştı (Nova Scotia Bankası, 2015); trafik kazalarıysa her yıl yaklaşık 1,3 milyon kişinin ölmesine, 50 milyon kişinin de yaralanmasına neden oluyor (WHO 2015b), otomobillerin neden olduğu hava kirliliği de dünya çapında bütün kıtalarda megakentlerde gözlenen mevsimsel (ya da yarı kalıcı) fotokimyasal sise katkıda bulunan kilit etkenlerden biri (USEPA 2004). Ortalama bir otomobilin ömrü artık zengin ülkelerde 11 yıl civarıyla düşük gelirli ekonomilerde 15

yılın üstü arasında değişiyor. Bunun sonrasında çelik (bakır ve kauçuğun bir bölümü) çoğunlukla geri dönüştürülüyor, ama bu muazzam ölüm, yaralanma ve kirlilik bedellerinden kurtulmak istiyoruz.

Kamyonculuğun da derinlere inen birçok sosyoekonomik sonucu oldu. Kamyonların 1920 sonrasında Amerika'nın kırsal kesimlerinde kitlesel olarak yaygınlaşması çiftlik ürünlerinin piyasaya çıkmasını hızlandırdı ve bu sürecin maliyetini azalttı. Bu yararlar önce Avrupa ve Japonya'da, geçen yirmi yıl içinde birçok Latin Amerika ve Asya ülkesinde de tekrarlandı. Zengin ülkelerde uzun mesafeli ağır kamyon trafiği gıda dağıtımının belkemiği haline geldi, ayrıca sanayi parçalarının ve mamul malların dağıtımında da kilit bir hal aldı; kamyon trafiğinin işlemesi, vinçlerin okyanuslar aşan gemilerden indirip doğruca kamyonlara yüklediği konteynırların genel olarak benimsenmesinden de yarar sağladı. Hızla gelişen birçok ekonomide kamyon trafiği demiryolu inşasının önüne geçti (buna verilebilecek en iyi örnek Brezilya'dır), ücra bölgeleri ticarete ve kalkınmaya açarken beraberinde çevre yıkımını da getirdi. Yoksul ülkelerde otobüsler uzun mesafede yolcu taşımanın başlıca aracı haline geldi.

İlk buharlı gemiler Kuzey Atlantik'i, elverişli rüzgârlarda dönemin en iyi yelkenli gemilerinden daha hızlı aşamamışlardı. Ama 1840'ların sonuna gelindiğinde buharın üstünlüğü açıklık kazanmış, en kısa geçiş süresi 10 günün altına inmişti (Şekil 6.12). 1890'a gelindiğinde Atlantik'in öte yakasına geçiş yolculuklarının altı günden kısa sürmesi kural haline gelmişti, çelik tekneler de öyle. Çelik boyut kısıtlamalarını karşılıyordu: Yapısal değerlendirmeler ahşap teknelerin uzunluğunu 100 metreyle sınırlıyordu. Cunard, Collins ya da Hamburg-America gibi meşhur şirketlerin büyük gemileri teknik çağın gurur sembolleri haline geldi. Bunlar güçlü motorlarla ikili uskur pervaneleriyle donatılmış, lüks kamaralarla dolu, mükemmel hizmet sunan gemilerdi.

Bu müthiş gemilerdeki lüks, ara güverteadaki kalabalık, kesif kokular ve bıkkınlıkla tezat oluştuyordu. 1890'a gelindiğinde buharlı gemiler her yıl New York'a yarım milyonu aşkın yolcu taşıyordu. 1920'lerin sonunda Kuzey Atlantik'teki toplam trafik yılda bir milyon yolcuyu aşmıştı, bundan kısa bir süre sonra da yolcu gemileri azami tonajlarına ulaştı (Şekil 6.12). Ama 1957'ye gelindiğinde hava yolları Atlantik üzerinde gemilerin taşıdığından daha fazla yolcu taşıyordu, aynı yıl düzenli jet uçuşlarının başlaması uzun mesafede faaliyet gösteren yolcu gemilerinin yazgısını mühürledi: Bundan on yıl sonra düzenli transatlantik seferleri son buldu. 1869'da Süveyş Kanalı'nın



Şekil 6.12 Avrupa ile Kuzey Amerika'yı bağlayan gemilerin boyutları büyüyüp (solda), donanımları daha güçlü motorlarla pekişirken Atlantik'i geçmek için gerekli süre azaldı; bir zamanlar iki haftadan fazla olan bu süre artık üç günden biraz fazla (sağda). Fry (1896), Croil (1898) ve Stopford'ın (2009) verilerinden derlenmiştir.

tamamlanması ve 1880'lerde etkili soğutmanın devreye girmesi ilk dönemlerde ticari buharlı gemileri yükseltmişti. Buharlı gemi yolculuğu daha sonra Panama Kanalı'nın açılmasıyla (1914), büyük dizel motorların kullanılmasıyla (1920 sonrası) ve ham petrol nakliyatıyla hareketlendi. 1950'lerden beri sadece petrol değil, ticareti yaygın olan ağır malların (cevherler, kereste, tahıl, kimyasallar) taşınmasında ve artan otomobil, makine, tüketim malı nakliyatında daha büyük uzmanlaşmış gemilere ihtiyaç duyulmaktadır.

Tarifeli uluslararası hava nakliyatı 1919'da saatte 200 km'nin epey altında kalan hızlarda her gün yapılan Londra-Paris seferleriyle başladı ve İkinci Dünya Savaşı'ndan hemen önce okyanus aşırı düzenli uçuşlar yapılır oldu: Pan Am'ın Clipper'ı San Francisco'dan Hong Kong'a Mart 1939'da altı günlük bir uçuşun ardından vardı (Şekil 6.13). Hava yolculuğunun kitleselleşme çağı 1950'lerin sonunda jet uçaklarının çıkmasıyla başladı (1952'den beri hizmet veren İngiliz Comet üç ölümcül kazanın ardından 1954'te kı-

zağa çekildi). İlk uçuşunu 1957’de yapan, Ekim 1958’den beri hizmet veren Boeing 707’yi çok geçmeden orta menzilli Boeing 727 (Şubat 1964’ten beri düzenli hizmette olup 1984’e dek üretilmiştir) ile kısa ve orta menzilli Boeing 737 izledi. Bütün Boeing uçaklarının bu en küçük modeli havacılık tarihinin en iyi satan uçağı haline geldi: 2015’in ortasında 8.600’den fazla uçak satılmıştı (bütün Airbus modellerinden 9.200 tane satıldı). 1950’ler ve 1960’larda McDonnell Douglas (DC-9, üç motorlu DC-10), General Dynamics (Convair), Lockheed (Tristar) ve Sud Aviation (Caravelle) kendi jet uçaklarını çıkardı, ama (Rus üreticiler bir kenara bırakılırsa) yüzyıl sonuna gelindiğinde geriye sadece Amerikalı Boeing ile Avrupalı Airbus konsorsiyumunun düopolü kalmıştı (Kutu 6.7).

Bu uçakların hızı ve menzili, hava yolları ve uçuşların yaygınlaşması, rezervasyon sistemlerinin neredeyse genel olarak birbirine bağlanması tek bir

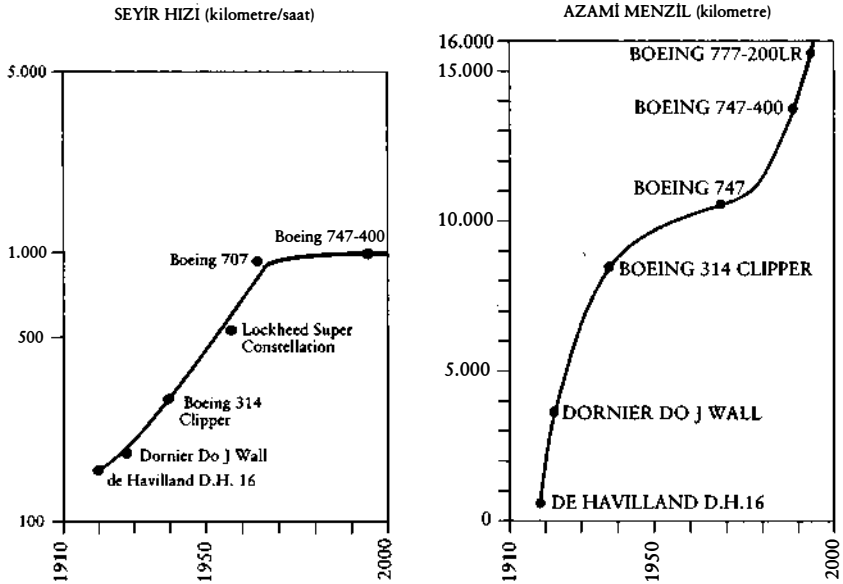
Kutu 6.7

Boeing ve Airbus

Boeing eski bir ABD şirketidir, 1916’da William E. Boeing (1881-1956) tarafından kurulmuştur, Boeing 314 Clipper ve 307 Stratoliner (ikisi de 1938 tarihli), Boeing 707 (ilk başarılı jet uçağı, 1957) ve 1969’daki ilk geniş gövdeli uçak gibi ikonik tasarımların üreticisidir (Boeing 2015). Şirketin en yeni tasarımı Boeing 787 gövdenin yüzde 80’inde daha hafif ama daha güçlü karbon fiberlerin kullanıldığı, 767’ye göre yüzde 20 yüksek bir yakıt verimliliğini mümkün kılan ileri bir modeldir (Boeing 2015). Airbus Aralık 1970’te Fransa ve Almanya’nın katılımıyla kuruldu, sonradan ortaklığa İspanyol ve İngiliz şirketler de katıldı. Şirketin ürettiği ilk ikiz jet Airbus A300 (226 yolcu) Ekim 1972’de hizmete girdi; şirketin sunduğu model yelpazesi kısa menzilli A319, 320 ve 321’den uzun menzilli, geniş gövdeli A340’a doğru genişledi. 2000’de Airbus’ın sattığı uçak sayısı ilk kez Boeing’i geride bıraktı. Airbus’ın en büyük yeniliği A380 oldu, 2007’den beri hizmet vermekte olan iki güverteli, geniş gövdeli bu uçağın maksimum yolcu kapasitesi tek sınıfta 853 kişidir, ama şimdiye dek sadece 538 kişi için üç sınıflı düzenlemeler yapılmıştır (Boeing 747-400 uçaklarında iki sınıflı 524, üç sınıflı 416 yolcu için düzenlemeler yapılmıştır).

İki şirket yakın bir rekabet içinde olmuştur. Boeing 2001 ile 2015 arasında 6.803 uçak sattı, Airbus ise 6.133 jet uçağı üretti, her iki şirket de özellikle Asya ülkelerinden gelen artan talebi karşılamak için çok yıllı sipariş birikimiyle çalışıyor. Her iki şirket de Avrupa, Kuzey Amerika ve Asya’da uçak ve motor tasarımcılarıyla, büyük uçak parçası tedarikçileriyle birçok işbirliği anlaşması yapmıştır, her iki şirket de aşağıdan artan rekabetle karşı karşıyadır. Kanadalı Bombardier ile Brezilyalı Embraer yolcu jetlerini genişletmiştir: Bombardier’nin CRJ-900’ü 86, Embraer’in EMB-195’i 122 yolculudur, bu iki şirket, ayrıca Rusya’nın Sukhoi Superjet’i, Çin’den Commercial Aircraft Corporation ve Japonya’dan Mitsubishi bugün Boeing 737 ile Airbus A319/320’nin faaliyet gösterdiği, kazancı bol dar gövdeli uçak piyasasına giriyor.

gün içinde gezegenin neredeyse bütün büyük kentleri arasında seyahat etmeyi mümkün kılmıştır (Şekil 6.13). 2000'e gelindiğinde geniş gövdeli jet uçaklarının azami menzili 15.800 km'ye ulaşmıştı, 2015'te en uzun tarifeli uçuşlar (Dallas-Sydney ile Johannesburg-Atlanta) yaklaşık 17 saat sürüyordu, birçok kent sık düzenlenen mekik uçuşlarla birbirine bağlanmıştı (2015'te Rio de Janeiro ile Sao Paulo arasında günlük yaklaşık 300 uçuş, New York ile Chicago arasında günlük yaklaşık 200 uçuş yapılıyordu). Ayrıca uçuş maliyeti, kısmen daha düşük yakıt tüketimi nedeniyle reel terimlerle sürekli gerilemektedir. Bu kazanımlar, büyük kentlere, yarı tropikal ve tropikal sahillere uzun mesafeli kitlesel turizmin yanı sıra yeni iş olanakları da açmıştır. Daha önce görülmemiş göçmen ve mülteci hareketliliği, geniş çaplı uyuşturucu kaçakçılığı, uçakların kaçırıldığı uluslararası terörizm faaliyetleri için de yeni olanaklar yaratmıştır.



Şekil 6.13 İlk tarifeli ticari uçuşların (1919'de de Havilland D.H. 16'yla) ortalama hızı saatte 150 km'nin biraz üstündeydi, uçağın azami menziliyse yaklaşık 600 km'ydı (solda). 1950'lerin sonuna gelindiğinde Boeing 707 saatte 1.000 km'ye yakın bir hızla yol alabiliyordu, 1990'ların sonunda Boeing 777 hiç durmadan 15.000 km'den fazla uçabiliyordu (sağda). Sesten iki kat hızlı uçan Concorde masraflı bir istisnaydı, yeni kuşak hızlı uçakların bir habercisi değildi. Taylor (1989) ve Gunston'daki (2002) veriler ile Boeing şirketinin web sitesindeki teknik bilgilerden derlenmiştir.

Enformasyon ve İletişim

Fosil yakıtlı toplumlar başlangıçlarından beri, kendilerinden önceki toplumlara kıyasla inanılmaz derecede fazla miktarda enformasyon üretmiş, depolamış, dağıtmış ve kullanmıştır. Doğu Asya ve erken modern Avrupa’da matbaa fosil yakıtların kullanılmaya başlamasından yıllarca önce yerleşiklik kazanmış bir ticari faaliyetti, ama elle baskı zahmetliydi ve elle çalıştırılan ahşap baskı makinelerinin yavaşlığı nedeniyle baskı sayısı sınırlıydı. Demir çerçeveler işi hızlandırdı, ama Gutenberg’in matbaasının ileri tasarımları bile saatte 240 kopyadan fazlasını üretemiyordu (Johnson 1973). Gelgelelim, Friedrich Koenig ile Andreas Friedrich Bauer’in tasarladığı, 1814’te *Times*’a satılan, bir buhar motoruyla çalışan ilk matbaa bile saatte 1.100 kopya basabiliyordu. 1827’ye gelindiğinde bu rakam 5.000’e çıkmıştı, 1840’ların ilk döner matbaasında saatte 8.000 kopya basılabiliyordu, yirmi yıl sonra bu rakam 25.000’e çıktı (Kaufer ve Carley 1993).

Kitlesel ucuz gazete basımı gündelik bir gerçeklik haline geldi, (1838’den beri ticari olarak faaliyet gösteren) telgraf ve onun üstünden iki kuşak geçmeden telefon (1876) sayesinde haberler daha hızlı yol alıyordu, yüzyılın sonu gelmeden iki yeni enformasyon-iletişim tekniği ticarileşti: ses kayıtları ve bu kayıtların yeniden çalınması ile film. Matbaa dışında bütün bu teknikler fosil yakıtlara dayalı yüksek enerji çağında geliştirilmişti. Fotoğraf ve ilk fonograflar dışında hiçbirisi elektriksiz çalışamaz. Yerini çok sayıda elektronik formata bıraktığı için geri çekilmekte olan basılı malzeme dışında, bütün bu teknikler kullanıcı tabanlarını genişletiyor ve yeni enformasyon yakalamanın, depolamanın, kaydetmenin, görüntülemenin, kendi içinde bağlantılı dünyayla anında paylaşmanın yeni biçimlerini ediniyor.

Ucuz, güvenilir ve gerçekten küresel telekomünikasyon ancak elektrikle mümkün oldu. Elektriğin ilk yüzyılına kablolardan aktarılan mesajlar damgasını vurdu. Çeşitli ülkelerde yıllarca yapılan deneyler William Cooke ile Charles Wheatstone’un 1837’de gösterdiği üzere ilk kullanışlı telgrafla son buldu (Bowers 2001). Telgrafın başarısı güvenilir bir enerji kaynağına dayanıyordu, bunu da Alessandro Volta’nın 1800’de tasarladığı pil sağlıyordu. Samuel Morse’un 1838’de geliştirdiği şifreleme sisteminin benimsenmesi, kara hatlarının demiryollarıyla birlikte hızla yayılması ilk gelişmeler arasında en dikkat çekici olanlardı. Denizaltı bağlantılar (1851’de Manş Denizi’nde, 1866’da Atlantik’te) ve bir teknik yenilik zenginliği (bunlar arasında Edison’un ilk icatları da vardı) sadece iki kuşak içinde telgrafı küresel

hale getirdi. 1900'de otomatik şifrelemenin yapıldığı mltipleks kablolar her gün milyonlarca kelime taşıyordu: Kişisel mesajlar, diplomatik şifreler, borsa fiyat sıralamaları, iş emirleri.

Patentini 1876'da Elisha Grey'in bağımsız başvurusundan sadece birkaç saat önce Alexander Graham Bell'in aldığı telefon (Hounshell 1981) yerel ve bölgesel hizmette çok daha hızlı bir kabul gördü (Mercer 2006). Güvenilir ve ucuz uzun mesafeli bağlantılar biraz yavaş kuruldu. Amerika'yı bir uçtan bir uca kat eden ilk bağlantı ancak 1915'te kuruldu, transatlantik telefon kabloları ancak 1956'da döşendi. Şurası kesin ki radyo-telefon bağlantıları 1920'lerin sonundan beri mevcuttu, ama ne ucuz ne de güvenilirli. Büyük telefon tekelleri bütçeye uygun ve güvenilir hizmet sunuyordu, ama büyük yenilikçiler değillerdi: Klasik siyah çevirmeli telefon 1920'lerin başında çıktı ve sonraki kırk yıl boyunca tek tercih olarak kaldı: ilk elektronik dokunmatik telefonlar ABD'de ancak 1963'te çıktı.

Ses ve resimlerin depolanması, yeniden üretilmesi ve aktarılmasına yönelik teknikler telefondaki ilerlemelere paralel geliyordu. Thomas Edison'un 1877 tarihli fonografı elle çalıştırılan basit bir makineydi, Emile Berliner'in (1851-1929) 1888'de yaptığı daha karmaşık gramofon da (Gronow ve Saunio 1999). Elektrikli plakçalarlar ancak 1920'lerde yaygınlık kazandı. Görüntü yaratma Fransa'da, en başta J. N. Niépce ve L. J. M. Daguerre'in 1820'ler ve 1830'lardaki çalışmalarında yaptığı başlangıcın ardından biraz yavaş ilerledi (Newhall 1982; Rosenblum 1997). Kodak'ın ilk ucuz kutu kamerası 1888'de çıktı, gelişmeler 1890 sonrasında sinematografi alanındaki atılımlarla hız kazandı: Lumière kardeşlerin ilk kısa filmleri 1895'te gösterime girdi. Sesli film-



Şekil 6.14 James Clerk Maxwell'in Fergus'un (Corbis) çektiği bir fotoğrafa dayanan gravür portresi. Maxwell'in elektromanyetizma kuramını formüleştirmesi, anında ucuz iletişim ve küresel bağlantıyı sağlayan modern kablosuz elektroniğin hâlâ gelişen biçimlerde kullanılmasının yolunu açtı: Yirmi birinci yüzyıl dünyası Maxwell'in kavrayışlarına dayanır.

ler 1920'lerin sonunda çıktı (ilk uzun metrajlı film *The Jazz Singer* 1927'de yapıldı), ilk renkli uzun metrajlı film (yıllarca çekilen renkli kısa filmlerin ardından) 1935'te yapıldı, bundan iki yıl sonra da Chester Carlson (1906-1968) serografiyi icat etti (Owen 2004).

Kablosuz aktarım arayışı, James Clerk Maxwell'in (1831-1879) formüle ettiği elektromanyetik ışımaya kuramında öngörülen elektromanyetik dalgaların 1887'de Heinrich Hertz (1857-1894) tarafından üretilmesiyle başladı (Maxwell 1865; Şekil 6.14). Bunu izleyen pratik ilerleme hızlı oldu. 1899'a gelindiğinde Guglielmo Marconi'nin (1874-1937) sinyalleri Manş Denizi'ni aşmıştı, bundan iki yıl sonra da Atlantik'i aştı (Hong 2001). Ferdinand Braun (1850-1918) 1897'de hem televizyon kameralarını hem alıcılarını mümkün kılan aygıtı, katot ışını tüpünü icat etti. Lee de Forest (1873-1961) 1906'da yayıncılık, uzun mesafeli telefon ve bilgisayarlar için vazgeçilmez önemi ancak transistörün icadıyla son bulan ilk triodu yaptı.

Düzenli radyo yayınları 1920'de başladı. BBC 1936'da ilk programlı televizyon hizmetini sunmaya başladı, onu 1939'da RCA izledi (Huurdeeman 2003). Charles Babbage ve Edward Scheutz'un 1820 sonrasında yaptıkları ileri görüşlü tasarımlarla başlayan (Lindgren 1990; Swade 1991) 1911'de IBM'in kurulmasıyla zirveye çıkan mekanik hesaplayıcılar nihayet İkinci Dünya Savaşı sırasında ilk elektronik bilgisayarların geliştirilmesiyle geride bırakıldı. Ama bu makineler (İngiliz Mark, Amerikan Harvard Mark 1 ve ENIAC) benzersiz, işlerine adanmış, binlerce cam vakum tüpü taşıyabilmek için oda büyüklüğünde, devasa aygıtlardı; yakın zamanda ticari bir geleceğe sahip olacak gibi görünmüyorlardı.

Bu çok iyileştirilmiş ve yepyeni iletişim ve enformasyon tekniklerinin etkileyici bir biçimde birleşmesi tümüyle İkinci Dünya Savaşı sonrasındaki gelişmelerin gölgesinde kaldı. Hepsinin ortak temeli katı hal elektronığının yükselmesiydi; bu yükseliş, transistörün, yani elektronik sinyalleri güçlendirebilen ve değiştirebilen bir vakum tüpün eşdeğeri olan minyatür bir katı hal yarı iletkeninin icat edilmesiyle başlamıştı. Julius Edgar Lilienfeld saha etkili transistör için 1925'te Kanada'da, bir yıl sonra da ABD'de patent başvurusunda bulunmuştu (Lilienfeld 1930); bu patent başvurusu iletken bir katı maddeden yapılmış iki terminal arasında akım akışını kontrol etmenin ve güçlendirmenin yolunu açıkça özetler.

Ama Lilienfeld herhangi bir aygıt yapma girişiminde bulunmadı, Bell Laboratuvarları'ndan iki araştırmacı, Walter Brattain ile John Bardeen 16

Aralık 1947’de başarılı olan ilk denemelerinde bir germanyum kristali kullandılar (Bardeen ve Brattain 1950). Ama Bell Sistemleri Anma sitesinde bugün kabul edildiği üzere “Bell Laboratuvarları’nın transistörü icat etmediği, yeniden icat ettiği gayet açıktır.” Ne var ki aynı web sitesinde yirminci yüzyılın ilk on yılından beri çok sayıda öncü araştırma ve tasarım çalışmaları yapıldığı teslim edilmemiştir (Bell System Memorial 2011). Her halükârda elektronik bilgisayar teknolojisini dönüştüren şey Brattain ve Bardeen’in kullandığı kaba sivri uçlu temas aygıtı değil, William Shockley’nin (1910-1989) patentini 1951’de aldığı daha yararlı bir alan etkili transistördü. Aynı yıl Gordon K. Teal ve Ernest Buehler daha büyük silikon kristalleri yapmayı, kristal çekme ve silikon katkılamının iyileştirilmiş yöntemlerinde ustalaşmayı başardılar (Shockley 1964; Smil 2006).

1948’de Claude Shannon’ın iletişimin enerji maliyetini niceliksel olarak değerlendirmenin yolunu açmasıyla birlikte çok önemli bir kuramsal ilerleme kaydedildi (Shannon 1948). Arada geçen yıllarda etkileyici bir ilerleme kaydedilmiş olmasına rağmen (bugün artık bir saç telinden kalın olmayan tek bir kablodan eş zamanlı görüşmelerin taşınmasında üç basamaklı bir artış olmuştur) Shannon’ın çizdiği kuramsal sınırlar bu performansın birkaç basamak daha artırılabilirliğini gösteriyordu. Ama İkinci Dünya Savaşı sonrasında elektronik bilgisayarların ticarileştirilmesi konusunda acele edilmedi ve Remington Rand’ın ilk UNIVAC’ı (Universal Automatic Computer – Evrensel Otomatik Bilgisayar, Eckert-Mauchly’nin ENIAC’ından hareketle geliştirilmişti) 1951’de sadece ABD Nüfus Sayım Bürosu’na satıldı.

Transistörler vakum tüplerin yerini almaya başladığında, bu programlanabilir yeni makinelerin hesaplama hızları da katlanarak artmaya başladı. ABD’de bilgisayarların işletmelerde kullanımı ancak 1950’lerin sonunda kalkışa geçti; Fairchild Semiconductor, Texas Instruments (ilk silikon transistörü 1954’te piyasaya sürdü) ve IBM en başarılı donanım ve yazılım geliştiriciler olarak öne çıktı (Ceruzzi 2003; Lécuyer and Brock 2010). 1958-1959’da Texas Instruments’ta Jack S. Kilby (1923-2005) ve Fairchild Semiconductor’da Robert Noyce (1927-1990) bağımsız çalışmalarıyla, minyatür devrelerin yarıiletken malzemenin gövdesiyle bütünleştirilmesini icat etti (Noyce 1961; Kilby 1964). Noyce’in düzlemsel transistör tasarımı katı hal elektronğinde yeni bir çığır açtı (Kutu 6.8).

ABD ordusu entegre devrelerin ilk müşterisi oldu. 1965’te bir mikroçipteki transistörlerin önceki yıl 32 olan sayısı ikiye katlanıp 64’e çıktığında

Kutu 6.8

Entegre devrelerin icadı

Robert Noyce California'da Santa Clara'da Fairchild Semiconductors'da araştırma müdürü olarak çalışırken laboratuvar defterine şöyle yazmıştı:

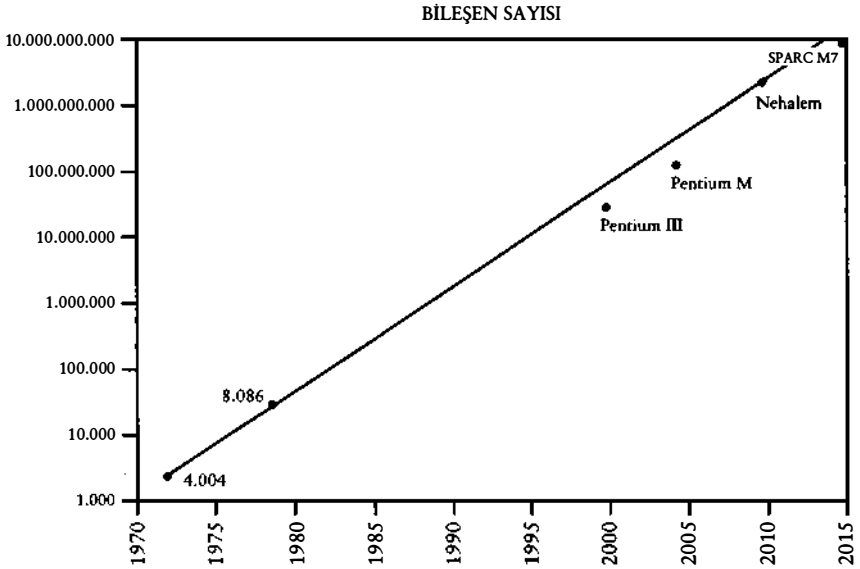
... imalat sürecinin bir parçası olarak aygıtlar arasındaki iç bağlantıları kurmak için tek bir silikon parçası üstüne çok sayıda aygıt yerleştirmek, böylece büyüklük, ağırlık vs.nin yanı sıra etkin eleman başına maliyeti de düşürmek istenebilir bir şeydir (Reid 2001, 13).

Noyce'un 1959'da "yariletken bir aygıt ve iletken yapısı" için yaptığı patent başvurusunda düzlemsel bir entegre devre görülüyordu ve şöyle tanımlanıyordu:

... başvuruda harici bir yariletkenin gövdesinin yüzeyine çıkan iç büküye bağlantı noktaları, esasen aynı yarı iletken malzemenin oksitlenmiş halinden oluşan ve bağlantı noktalarını da kaplayan yalıtıcı bir malzeme ve yariletken gövdenin çeşitli bölgeleri arasında bağlantı noktalarında kısa devre yaratmaksızın elektrik bağlantılar kurmak için yalıtıcı oksit tabakanın üstüne ve bitişğine uzanan, yerleştirilmiş vakum ya da başka şekilde metal şeritler biçiminde iletkenler (Noyce 1961, 1).

Noyce'un patenti (U.S. 2,981,877) Nisan 1961'de verildi, Kilby içinse (U.S. 3,138,743) Temmuz 1964'te ve uzun süren müdahil işlemler, duruşmalar ve temyizler sonrasında 1971'de Yüce Divan'ın Noyce'tan yana karar vermesiyle mesele çözüme kavuştu. O tarihe gelindiğinde bu artı maddi getirisi olmayacak bir zafer haline gelmişti, çünkü 1966 yazında iki şirket üretim lisanslarını paylaşma ve diğer fabrikatörlerin her ikisiyle de ayrı düzenlemeler yapmasını şart koşma konusunda anlaşmışlardı. Prensipte Kilby'nin ve Noyce'un fikirleri birbirine benziyordu, ama Noyce 1990'da kalp krizinden öldü, Kilby ise 2000 yılında "entegre devrenin icadındaki rolü" nedeniyle Nobel Fizik Ödülü'ne ortak olduğunu görece kadar uzun yaşadı.

Gordon Moore bu katlanarak artışın devam edeceği öngörüsünde bulundu (Moore 1965). Moore 1975'te ikiye katlanma hızının iki yılda bir olarak gerçekleşeceğini ileri sürdü (Moore 1975) ve bugün Moore yasası diye bilinen bu kural o zamandan beri geçerliliğini korumaktadır (Şekil 6.15). Dünyanın mikroişlemciyle kontrol edilen ilk ürünü küçük bir Japon şirket olan Busicom'un ürettiği programlanabilir bir hesap makinesiydi; dört çipli seti 1969-1970'te yeni kurulmuş Intel tarafından tasarlanmıştı (Augarten 1984). Busicom 1974'te iflas bayrağını çekmeden önce MCS-4 çip setinin kullanıldığı birkaç büyük hesap makinesi modeli sattı; talihe bakın ki Intel ileri görüşlü bir adımla Busicom'un iflasi öncesinde işlemcinin haklarını geri satın almıştı ve Kasım 1971'de dünyanın ilk evrensel mikroişlemcisini piyasaya sürdü: 2.250 tane metaloksit yarı iletken transistör içeren 3 mm x



Şekil 6.15 Moore kanunu iş başında. İlk ticari mikroçipte (Intel 4004) 2250 metal-oksit yarı iletken transistör vardı, en son tasarımlarda ise on milyarı aşkın bileşen vardır, altı kereden büyük bir artış olmuştur. Smil (2006) ve Intel (2015) verilerinden derlenmiştir.

4 mm büyüklüğündeki Intel 4004'ün fiyatı 200 dolardı. Saniyede 60.000 işlem gerçekleştiren bu mikroişlemci, 1945'te üretilmiş oda büyüklüğündeki ENIAC'ın işlevsel eşdeğeri idi (Intel 2015).

Giderek güçlenen bu mikroişlemcilerin, kapasitesi giderek artan hafıza aygıtlarıyla birlikte kullanılması modern imalat, ulaştırma, hizmet ve iletişimin her sektörünü etkilemiştir; bu becerilerin dudak uçuklatan artışı-na maliyetlerin sürekli düşmesi ve güvenilirliğin artması da eşlik etmektedir (Williams 1997; Ceruzzi 2003; Smil 2013c; Intel 2015). Mikroçipler modern medeniyetin her yerde en fazla rastlanan karmaşık eserleri haline gelmiştir: Her yıl 200 milyardan fazla mikroçip üretilir ve bu aygıtlar, sıradan ev aletleri ve aygıtlarından (termostatlar, fırınlar, ocaklar, her tür elektronik aksam) mikroişlemcilerin tasarımı ve üretimi de dâhil olmak üzere karmaşık toplulukların otomatik üretimine varıncaya dek birçok üründe bulunabilir. Mikroçipler otomobillerin motorlarında yakıtın alevlenme zamanını kontrol eder, jet uçağı türbinlerinin işleyişini optimize eder, uyduları yerleştirecek roketleri önceden belirlenmiş yollarında yönlendirir.

Ama mikroişlemcilerin en kişisel etkileri taşınabilir elektronik aygıt, en önemlisi de cep telefonu sahibi olmanın kişiselleşmesiyle yaşanmıştır. Bu



Şekil 6.16 Faydacı ama devrimci: 1973'te piyasaya çıkan Xerox Alto masa bilgisayarı, sonraki bütün kişisel bilgisayarların başlıca temel özelliklerinin neredeyse tam anlamıyla somutlaştığı ilk bilgisayardı (Wikimedia fotoğrafı).

gelişmenin öncesinde kişisel bilgisayarlar yükseldi, internet şaşırtıcı derecede uzun bir sürede gelişti ve cep telefonları nispeten yavaş bir süreçle benimsendi. Xerox Palo Alto Research Center (PARC / Palo Alto Araştırma Merkezi) mikroçiplerin işlem gücünü bir fare, grafik bir kullanıcı ara yüzü, ikonlar ve pop-up menüleri, lazer yazıcı, metin düzeltme, yazım kontrol, dosya sunucularına ve yazıcılarına tıklayarak erişme işlevleriyle birleştirerek kişisel bilgisayarları icat etmişti (Smil 2006; Şekil 6.16). Bu ilerlemeler yapılmış olmasaydı Steven Wozniak ve Steven Jobs 1977'de renkli grafik bir arayüze sahip ilk ticari kişisel bilgisayar Apple II'yi piyasaya süremezlerdi (Moritz 1984). IBM'in

kişisel bilgisayarı 1981'de çıktı, ABD'de kişisel bilgisayar sahipliği 1983'te iki milyon birimken, 1990'de yaklaşık 54 milyon birime çıktı (Stross 1996). Daha hafif taşınabilir makineler, diz üstü bilgisayarlar ve tabletler ancak 1990'ların sonunda olgunlaştı ve Apple'ın iPad'i 2010'da çıktı.

Bilgisayarları kullanarak iletişim ilk kez 1962'de Pentagon İleri Araştırma Projeleri Ajansı'nın ilk müdürü J. C. R. Licklider tarafından önerildi ve 1969'da ARPANET'le sadece dört yerle, Stanford Araştırma Enstitüsü, UCLA, UCSB ve Utah Üniversitesi'yle sınırlı olarak başladı. 1972'de BBN Technologies'den Ray Tomlinson diğer bilgisayarlara mesajlar göndermeye yönelik programlar geliştirdi ve @ işaretini e-posta adreslerinin yerleşim sembolü olarak seçti (Tomlinson 2002). ARPANET 1983'te bir ağlar sisteminde iletişimi mümkün kılan bir protokolü çevirdi, 1989'da operasyonunu sona erdirdiğinde sisteme bağlı 100.000'den fazla ana bilgisayar vardı. Bundan bir yıl sonra Tim Berners-Lee online bilimsel enformasyonu düzenlemek için Cenevre'de CERN'de hipertekste dayalı World Wide Web'i yarattı (Abbate

1999). İlk web'de navigasyon kolay değildi, ama bu durum 1993'te Netscape'le başlayarak daha etkili tarayıcıların çıkmasıyla birlikte hızla değışti.

Telefonda ilk büyük elektronik ilerleme, sabit konumlu uydular üzerinden otomatik çevirme sayesinde kıtalar arası ucuz telefon görüşmeleri yapma imkanı oldu. Bu yenilik, 1960'larda roket fırlatıcıların güçlenmesiyle mikroelettronik alanındaki ilerlemelerin birleşmesi sonucu ortaya çıkmıştı, temel maliyetler gerilerken görüşme ücretleri de ucuzladı. Ama telefonda ilk radikal değışiklik cep telefonlarının piyasaya çıkmasıyla yaşandı: İlk kez 1973'te gösterilen hantal Motorola setleriyle 1983'te ABD'de pahalı bir cep telefonu hizmeti başladı, ama cep telefonu sahiplerinin sayısı ancak 1990'ların sonunda hızla artmaya başladı (Japonya ve AB, ABD'nin önünde gidiyordu). Küresel cep telefonu satışları, Ericsson'un ilk akıllı telefonu çıkardığı 1997'de 100 milyon birimi aştı.

Cep telefonu satışları 2009'da bir milyar birime ulaştı, 2015'in sonuna gelindiğinde kullanımda 7,9 milyar birim bulunuyordu ve tabletler, notebook'lar ve netbook'lar dâhil mobil aygıtların toplam yıllık satışı 2,2 milyar birim civarına yaklaşmıştı, ki bu rakama 1,88 milyar cep telefonu da dâhildi (Gartner 2015; mobiForge 2015). Bu etkileyici ve hızla değışen iletişim, eğlence, izleme ve veri aygıtları, yazılım sistemi son derece enerji yoğun elektronik aygıtlarda ciddi miktarda bir enerjinin somutlaşmasını gerektirmektedir ve nihayetinde veri merkezlerinden cep telefonu kulelerine varıncaya dek gerekli altyapının enerjisini temin edecek son derece güvenilir ve kesintisiz bir elektrik akışına bağımlıdır (Kutu 6.9).

Çok geniş bir yelpazeye yayılan teşhis, ölçüm ve uzaktan algılama tekniklerinin tasarımı ve kullanımında 1960'lardan beri kaydedilen muazzam ilerlemeye de özellikle değinelim. Bu ilerlemeler önceden tasavvur edilemez bir enformasyon zenginliğini beraberinde getirdi. W. K. Roentgen'in (1845-1923) 1895'te keşfettiği X-ışınları, 1900'de bu alandaki tek seçenektir. 2015'e gelindiğinde bu teknikler (hem tıbbi teşhislerde hem mühendislikte kullanılan) ultrasondan yüksek çözünürlüklü görüntülemeye (MRI, CT), (İkinci Dünya Savaşı arefesinde geliştirilmiş olup bugün ulaştırma ve hava durumu izlemede vazgeçilmez bir aygıt haline gelmiş) radardan tutun elektromanyetik tayfın çeşitli bantlarından veri alan, çok daha iyi hava durumu tahminlerinde bulunmayı ve doğal kaynak yönetiminin iyileştirilmesini sağlayan çok geniş bir yelpazeye yayılmış uydu tabanlı sensörlere varıncaya dek geniş bir yelpazeye yayılıyordu.

Kutu 6.9

Cep telefonları ve otomobillerde somutlaşan enerji

Bütçeye uygun küçük bir aile arabası bile akıllı bir telefondan 10.000 kat ağırdır (1.4 tona karşılık 140 g), bu nedenle de hatırı sayılır miktarda daha fazla enerji temsil eder. Ama enerji farkı dört basamaklı kütle farkından çok daha azdır, toplam hesaplar bizi şaşırtıcı bir karşılaştırmaya götürür. Bir cep telefonu yaklaşık 1 GJ'lik enerji temsil eder, oysa bugün tipik bir binek otomobilin üretimi 100 GJ gerektirmektedir ki bu da bir cep telefonuna harcanan enerjiden sadece 100 kat fazladır. 2015'te dünya çapında cep telefonu satışları 2 milyar birime çok yaklaştı, bu nedenle üretimlerinde yaklaşık 2 EJ enerji harcandı (48 milyon ton ham petrole eşdeğer bir miktardır bu). 2015'te tüm dünyada 72 milyon otomobil satıldı, otomobil üretimine de kabaca 7,2 EJ enerji harcandı, yani cep telefonlarının tamamına harcanan enerjinin dört katı bile değil.

Cep telefonlarının ömrü çok kısadır, ortalama sadece iki yıldır, üretimlerine küresel düzeyde harcanan enerji de bugün, ortalama kullanım yılı başına 1 EJ civarında enerjiye denk gelir. Binek otomobillerin ömrü en az on yıldır, üretimlerine küresel düzeyde harcanan enerji de kullanım yılı başına 0,72 EJ'ye denk gelir; cep telefonlarının üretimine harcanan enerjiden yüzde 30 daha azdır! Bu demektir ki bu yaklaşık toplamlar ters yönde hatalı olsalar bile (gerçekte otomobiller daha fazla, cep telefonları daha az enerjiyi temsil etse de) iki toplam rakamın basamak sayısı aynı olmakla kalmaz, rakamlar da birbirlerine şaşırtıcı derecede yakındır. İşletim maliyetleri elbette ki çok farklıdır. Akıllı bir telefon yılda sadece 4 kWh elektrik harcar, hizmet verdiği iki yıl boyunca 30 MJ'den az enerji harcar, yani temsil ettiği enerji maliyetinin sadece yüzde 3'ünü harcar. Oysa küçük bir aile otomobili ömrü boyunca temsil ettiği enerjiden dört ilâ beş kat daha fazla enerji (benzin ya da mazot) tüketecektir. Ne var ki dünyanın enformasyon ve iletişim ağlarını elektrikle çalıştırmanın maliyeti artmaktadır: 2012'de enformasyon ve iletişim ağları tüm dünyada üretilen elektriğin yaklaşık yüzde 5'ini harcamıştır, 2020'de bu oran yüzde 10'a yaklaşacaktır (Lannoo 2013).

Ekonomik Büyüme

Enerji ve ekonomiden bahsetmek bir totolojidir: Bütün ekonomik faaliyetler temelde bir enerji biçiminin diğerine çevrilmesinden başka bir şey değildir ve para da sadece enerji akışlarının değerini biçmekte kullanılan uygun (sıklıkla da temsil gücünden yoksun) bir vekildir. Tahmin edileceği gibi, bu disipline bu bakış açısıyla yaklaşan Nobel ödüllü fizikçi Frederick Soddy “enerji akışının ekonominin başlıca kaygısı olması gerektiğini” savunmuştu (Soddy 1933, 56). Enerji akışı entelektüel faaliyeti ölçmekte de iyi değildir: Eğitim hiç kuşku yok ki enerji akışının altyapısı ve çalışanlarına harcanan çok miktarda enerjiyi temsil eder, ama parlak fikirler (ki eğitim görme yoğunluğuyla doğrudan hiçbir ilgileri yoktur) beynin metabolik hızında büyük artışlar gerektirmez.

Bu apaçık gerçek, son dönemde gayrisafi yurt içi hasıla artışının genel enerji talebinden ayrılmasının nedenlerini büyük ölçüde açıklamaktadır: Bugün ekonomik ürünün en büyük bölümünü oluşturan fiziksel olmayan faaliyetlere çok daha büyük bir parasal değer atfediyoruz. Neresinden bakılırsa bakılsın modern ekonomik çalışmalarda enerji marjinal düzeyde bir kaygı konusu olmuştur; sadece ve sadece ekolojik ekonomistler enerjiyi başlıca odak noktaları olarak görmüştür (Ayres, Ayres ve Warr 2003; Stern 2010). Kamunun enerji ve ekonomiyle ilgili kaygıları oransızca genel olarak fiyatlara, özel olarak dünyanın en önemli ticaret metaı ham petrol fiyatlarına odaklanmıştır.

Batı'da 1970'lerde OPEC'in iki kez petrol fiyatlarını artırması (hem Ortadoğu'da tüketim aşırılıklarının nedeni hem de bölgenin istikrarına yönelik bir tehdit olarak) özellikle eleştiri konusu haline gelmiş ve ekonomik yer değıştirmelerin, toplumsal kargaşaların nedeni olarak görülmüştür. Ama OPEC'in fiyat artırmasının OPEC petrolü ithal eden ülkelerin rafine edilmiş yakıtları tüketme verimliliğı üstünde sağlıklı (ve uzun zamandır beklenen) bir etkisi olmuştur. 1973'te kırk yıl süren yavaş bir gerilemenin ardından yeni Amerikan binek otomobillerinde ortalama yakıt tüketimi 1930'ların başına göre daha yüksekti: 1930'da 14,8 L/100 km iken 1973'te 17,7 L/100 km'ydi ya da Amerika'da kullanılan birimlerle 13,4 mpg'ye karşılık 16 mpg'ydi (Smil 2006); bu durum modern enerji çevriminin daha az verimli bir hal almasının ender örneklerinden biridir.

Petrol fiyatlarının yükselmesi, bu durumun tersine dönmesi zorunluluğı yarattı, 1973 ile 1987 arasında CAFE (Corporate Automobile Fuel Efficiency / Bileşik Otomobil Yakıt Verimliliğı) standardı 8,6 L/100 km'ye (27,5 mpg) gerilerken Kuzey Amerika piyasasındaki yeni otomobillerin ortalama yakıt talebi yarıya indi. Maalesef 1985 sonrasında petrol fiyatlarındaki düşüş verimlilikteki bu ilerlemeyi önce durdurdu, sonra da (daha fazla sayıda SUV ve pikapla birlikte) tersine çevirdi, rasyonelliğe ancak 2005'te dönüldü. OPEC'in fiyat artırmasının küresel ekonomi üzerinde yararlı bir etkisi oldu, zira ekonominin ortalama petrol yoğunluğunu (birim gayri safi yurtiçi hasıla başına kullanılan petrol miktarı) ciddi biçimde azalttı. Enerji santralleri sıvı yakıtlar yakmaya son verdi, demir üreticileri metal eritme ocaklarına fuel oil enjekte etmek yerine toz haline getirilmiş kömür kullanmaya başladı; jet motorları daha verimli hale getirildi ve birçok sanayi sürecinde doğalgaza başvuruldu. Gayet etkileyici sonuçlar elde edildi. 1985'e gelindiğinde ABD

ekonomisinin GSYİH'nin bir dolarını üretmek için ihtiyaç duyduğu petrol miktarı 1970'e göre yüzde 37 azalmıştı; 2000'e gelindiğinde petrol yoğunluğu 1970'e göre yüzde 53 gerilemişti ve 2014'te GSYİH'nin bir dolarını üretmek için ihtiyaç duyduğu ham petrol miktarı 1970'e göre yüzde 62 azalmıştı (Smil 2015c).

İlginçtir, görmezden gelinen bir gerçek de Batı hükümetlerinin petrolden OPEC'in kazandığı paradan fazlasını kazandığıdır. 2014'te G7 ülkelerinde bir litre petrolün fiyatı üzerinden vergiler yüzde 47'si düzeyindeydi, üreticilere gidense yaklaşık yüzde 39'du, ülke bazında paylar sırasıyla Britanya'da 60/30, Almanya'da 52/34, ABD'de 15/61'di (OPEC 2015). Ayrıca birçok hükümet (piyasa ekonomisine sahip olanlar dâhil) arzı güvence altına almak için sanayiye birçok yasal düzenleme getirme yoluna gitmişti, petrol üreten birçok ülkede hükümetlerse enerji fiyatlarının ağırlıklı olarak sübvansiyonla edilmesiyse siyasal destek satın alıyordu (GSI 2015). Suudi Arabistan'da sübvansiyonlar 2010'da hükümetin yaptığı toplam harcamaların yüzde 20'sini oluşturuyordu, Çin'de kömür sübvansiyonları fiyatların üretim maliyetinin bile altında sabitlenmesiyle sonuçlanmıştı.

Büyüme (kökeni, oranı ve devamı) modern ekonomik araştırmaların başlıca kaygısı olmuştur (Kuznets 1971; Rostow 1971; Barro 1997; Galor 2005), bu nedenle de enerji tüketimiyle gayri safi ekonomik ürünün (gerek tek tek ekonomilerde gayri safi yurtiçi hasıla, gerek küresel eğilimleri incelerken kullanılan gayri safi dünya hasılası) artışı arasındaki bağlar büyük dikkat çekmiştir (Stern 2004, 2010; Dünya Ekonomik Forumu 2012; Ayres 2014). Sanayi öncesi geleneksel ekonomiler ya büyük ölçüde durağanlardı ya da on yılda bir yüzde bir-iki puan büyümeyi başarmışlardı, kişi başına ortalama enerji tüketimi çok daha yavaş bir hızla artmıştı: On dokuzuncu yüzyılın ilk yıllarına ait, bazı yoksul grupların hayat koşullarının, iki, hatta üç-dört yüzyıl önce hakim olan hayat koşullarından çok da farklı olmadığını gösteren ifadeler hiç de az değildir.

Oysa tersine fosil yakıta dayalı ekonomiler, ekonomik genişlemenin döngüsel niteliğiyle değişmiş (van Duijn 1983; ECRI 2015), büyük iç ya da dış çatışmalarla kesintiye uğramış olsa da görülmemiş düzeyde büyüme oranları yakaladılar. On dokuzuncu yüzyılın sanayileşmiş toplumları ekonomilerinin on yıl içinde yüzde 20-60 büyüdüğüne tanık oldu. Bu tür büyüme oranları 1900'de Britanya ekonomisinin üretiminin 1800'de olduğundan yaklaşık on kat daha büyük olduğu anlamına geliyordu. Amerika'nın GSYH'si sadece 20

yıl içinde, 1880 ile 1900 arasında iki katına çıktı. Japonya'nın Meiji dönemindeki (1868-1912) üretimi 2,5 kat arttı. Yirminci yüzyılın ilk yarısındaki ekonomik büyüme iki dünya savaşından ve 1930'lardaki büyük ekonomik krizden etkilendi, ama 1950 ile 1973 arasında olduğu kadar hızlı ve geniş çaplı bir üretim ve refah artışının yaşandığı bir dönem daha önce hiç yaşanmamıştı.

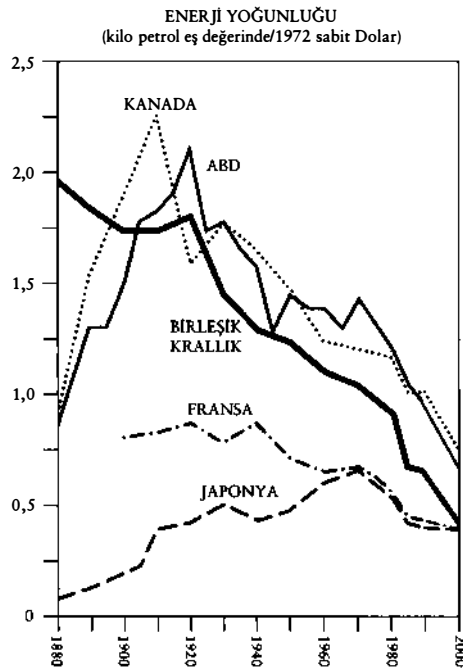
Reel ham petrol fiyatlarının 1970 öncesinde sürekli gerilemesi bu görülmemiş genişlemenin kritik bileşenlerinden biriydi. Amerika'da daha o zamandan dünya çapında en yüksek düzeyde olan, kişi başı GSYH yüzde 60 arttı. Batı Almanya'da bu oran üç kattan fazla, Japonya'da ise altı katın üstünde arttı. Asya ve Latin Amerika'da yoksul nüfusun kalabalık olduğu birkaç ülke de kuvvetli bir ekonomik büyüme evresine girdi. OPEC'in petrol fiyatlarında yaptığı ilk artış (1973-1974) bu büyümeyi duraklattı. 1979'daki ikinci fiyat artışının nedeniyse İran'da monarşinin devrilmesi ve köktenci Ayetullahların iktidara gelmesiydi. 1980'lerin başındaki küresel ekonomik yavaşlamaya rekor düzeyde enflasyon ve yüksek işsizlik eşlik ediyordu, ama 1990'larda düşük petrol fiyatlarının istikrar kazanması bir başka büyüme evresini destekledi, bu büyüme evresi de ancak 2008'de, İkinci Dünya Savaşı sonrasında dünyanın yaşadığı en kötü gerilemeyle son buldu, bu gerilemenin ardından zayıf bir iyileşme kaydedildi.

Ayres, Ayres ve Warr (2003) yararlı işin fiyatının gerilemesini yirminci yüzyılda ABD ekonomisinin büyüme motoru olarak tanımlamıştır; yararlı iş ekserji (ideal bir enerji çevrim sürecinde mümkün olabilecek azami düzeydeki iş) ile çevrim verimliliğinin ürünüdür. Tarihsel ekonomik üretim verileri normalleştirildiğinde (enflasyona göre ayarlanan sabit para birimleriyle ifade edilen GSYH değerleri ve resmi döviz kurları yerine satın alma gücü paritesi ile ifade edilen gayri safi dünya hasılasını hesaplamak için kullanılan ulusal üretimlerle) hem küresel hem ulusal düzeyde, ekonomik büyüme ile enerji kullanımı arasında etkileyici derecede güçlü, uzun vadeli korelasyonlar olduğu ortaya çıkar.

1900 ile 2000 arasında bütün asli enerji kullanımı (işleme sırasındaki kayıplar ve fosil yakıtların yakıt olmayan kullanımları çıkarıldıktan sonra) yaklaşık sekiz kat arttı, 44 EJ'den 382 EJ'ye çıktı, gayri safi dünya hasılası da 18 kattan fazla artarak 1990'daki sabit para birimleri itibarıyla yaklaşık 2 trilyon dolardan 37 trilyon dolar civarına yükseldi (Smil 2010a; Maddison Project 2013), bu da esnekliğin 0,5'ten az olduğunu düşündürür. Tek bir ülke için, zaman içinde iki değişken arasında yüksek korelasyonlar olduğu, ama esnekliklerin farklılaştığı gözlemlenebilir; yirminci yüzyılda Japonya'nın GSYH'si

52 kat, toplam enerji kullanımı 50 kat arttı (1'e çok yakın bir esneklik söz konusuydu), ABD'de ise bu değişkenler sırasıyla 10 kat ve 25 kat arttı (esneklik 0,4'ten azdı), Çin'de aynı oranlar yaklaşık 13 kat ve 20 kat arttı (esneklik 0,6).

Bu iki değişken arasında beklendiği üzere çok yakın olan bağ, dünyanın bütün ülkeleri dikkate alındığında kişi başına düşen ortalama GSYH ve enerji arzı arasında korelasyonların çok yüksek (0,9'dan yüksek) olmasıyla da doğrulanır. Açıkta ki bu, normalde düzensiz olan sosyoekonomik işler alanında gözlenen olağanüstü derecede yüksek korelasyonlardan biridir, ama daha homojen ülke gruplarını incelemeye başladığımızda bu etki hatırı sayılır ölçüde zayıflar: Zenginleşmek enerji kullanımında hatırı sayılır bir artışı gerektirir, ama zengin toplumlarda göreceli enerji tüketimi, ister birim GSYH başına ister kişi başına ölçülsün, geniş bir yelpazeye yayılan bir farklılık gösterir, bu da çok düşük korelasyonlara yol açar.



Şekil 6.17 GSYH'nin enerji yoğunluğunun azalması, olgunlaşan ekonomilerin genel özelliği olmuştur. Smil (2003) ve USEIA (2015d) verilerine dayanarak hazırlanmıştır.

Örneğin İtalya ve Güney Kore'de kişi başına GSYH oranı çok yakındır (satın alma gücü paritesine göre hesaplandığında 2014'te yaklaşık 35.000 doları), ama Güney Kore'de kişi başına enerji kullanımı İtalya'dakinden yüzde 90 daha yüksektir. Tersine Almanya ve Japonya'nın yıllık enerji tüketimleri birbirine çok yakındır, kişi başına yaklaşık 170 GJ'dir, ama 2014'te Almanya'nın GSYH'si Japonya'ninkinden yaklaşık yüzde 25 yüksek olmuştur (IMF 2015; USEIA 2015d). Ekonomik üretimi artırmak için gerekli mutlak enerji tüketimindeki artış, önemli bir göreceli gerilemeyi gözlerden gizler. Yüksek gelirli, yüksek enerjili olgun ekonomiler, gelişimlerinin daha önceki aşamalarına kıyasla ciddi oranda daha

düşük bir enerji yoğunluğu (birim GSYH başına düşen enerji) gösterir (Kutu 6.10, Şekil 6.17).

Uzun vadeli kişi başına enerji kullanımı ve ekonomik büyüme eğilimlerinin izlenmesinden çıkarılabilecek en önemli ders, hatırı sayılır ekonomik büyüme oranlarına kişi başına enerji kullanımının giderek düşmesiyle erişilebildiğidir. ABD’de devam eden, ama yavaş bir nüfus artışı mutlak yakıt ve elektrik tüketiminde artışlara neden olmuştur, ama kişi başına ortalama asli enerji kullanımı 1980’lerin ortasından beri otuz yıldır (ancak küçük dalgalanmalarla) düz bir seyir halindedir, kişi başına reel GSYH (doların

Kutu 6.10

Ekonomik büyümenin enerji yoğunluğunun azalması

Tarihsel istatistikler, Britanya’da enerji yoğunluğunun 1830 ile 1850 arasında buhar motorları ve demiryollarının benimsenmesinin yarattığı hızlı yükselişin ardından sürekli bir azalma eğilimi içinde olduğunu gösteriyor (Humphrey ve Stanislaw 1979). Kanada ve ABD’deki enerji yoğunlukları da 60-70 yıl geriden gelerek Britanya’daki azalma eğilimini izledi. ABD’deki oran 1920 öncesinde zirveye tırmandı, Çin’de 1970’lerin sonunda azami düzeye ulaşıldı, Hindistan’da enerji yoğunluğu ancak yirmi birinci yüzyılda gerilemeye başladı (Smil 2003). 1955 ile 1973 arasında ABD’de enerji yoğunluğu düz bir seyir halindeydi (yüzde civarında) reel GSYH ise 2,5 kat arttı, ama sonra azalmaya devam etti, 2010’a gelindiğinde 1980’deki seviyenin yüzde 45 altına inmişti.

Oysa tersine Japonya’da enerji yoğunluğu 1970’e kadar arttı, 1980 ile 2010 arasındaysa yüzde 25 geriledi (USEIA 2015d), Çin’de özellikle büyük bir azalma oldu, 1980 ile 2013 arasında yüzde 75’lik bir gerileme yaşandı (Çin Enerji Grubu 2014); Mao sonrası Çin’in ilk yıllarında verimliliklerin son derece düşük olması kadar 1980’den sonra modernleşmedeki ilerlemeleri de yansıtan rakamlardı bunlar. Öte yandan, ekonomik kalkınmanın hâlâ erken evrelerinde olan Hindistan 1980 ile 2010 arasında sadece yüzde 7’lik bir azalma yaşadı. Bu gerilemeler birkaç etkenin bir araya gelmesinden kaynaklanır: Ekonomik kalkınmanın ilk aşamalarına damgasını vuran, ağırlıklı olarak temel altyapıya odaklanmış enerji yoğun sermaye girdilerinin önemini yitirmesi; yakma ve elektrik kullanımının çevrim verimliliklerinin artması; değer artışının birim GSYH başına enerji çıkarma sanayileri ya da imalatla olduğundan daha az enerji kullanımı gerektirdiği hizmet sektörünün (perakende, eğitim, bankacılık) payının artması.

Başka yönlerden aynı seviyede başarılı ülkelerin enerji yoğunluklarındaki büyük farklılıklar, asli enerji kullanımı (birinin enerji yoğun metalleri üretmesi gerekir), nihai çevrimlerin verimliliği (hidroelektrik her zaman kömürden üstündür), iklim ve ülkenin büyüklüğü gibi etkenlerin bileşimiyle de açıklanır (Smil 2003). ABD’de bu oran 100 kabul edildiğinde, 2011’de Japonya ve Almanya’daki oranlar 60, İsveç’te 70, Kanada’da 150, Çin’de 340’tır. İlginçtir Kaufmann (1992), 1950 sonrasında zengin ekonomilerin enerji yoğunluğundaki gerilemenin teknik ilerlemelerden ziyade, kullanılan enerji tipindeki değişiklikler ile baskın mal ve hizmet tiplerinden kaynaklandığını göstermişti.

2009'daki değeri itibarıyla) ise yaklaşık yüzde 57 artmış, 1985'te 32.218 dolarken, 2014'te 50.456 dolara çıkmıştır (FRED 2015). Aynı şekilde hem Fransa'da hem (nüfusun artık azalmakta olduğu) Japonya'da kişi başına asli enerji kullanımı 1990'ların ortalarından beri istikrar kazanmıştır, ama sonraki yirmi yılda kişi başına ortalama GSYH Almanya'da yaklaşık yüzde 20, Japonya'da yaklaşık yüzde 10 artmıştır.

Ama bu sonuçları temkinli yorumlamak gerekir, zira enerji kullanımı / GSYH artışı arasındaki ilişkinin nispeten kopmuş gibi görüldüğü dönemler, ABD, Avrupa ve Japonya'nın enerji yoğun ağır sanayileri ve imalatlarının genel olarak Asya'ya, özel olarak Çin'e geniş çapta kaydığı dönemlere denk gelmektedir: Bu üç büyük ekonominin son dönemdeki deneyimlerinin iki değişken arasındaki ilişkinin kopma eğiliminin yaygınlaştığı bir dönemin habercisi olduğu sonucuna varmak erken atılmış bir adım olacaktır. En başta da Çin'in 2014 öncesindeki enerji talebinde gözlenen muazzam (1990'dan beri yaklaşık 4,5 kat) artış nedeniyle küresel asli enerji arzının, 1990'ı izleyen 25 yılda gayri safi dünya hasılasında 2,8 katlık (0,56 esneklikle) bir artış sağlamak için yaklaşık yüzde 60 yükselmesi gerekmiştir. Üstelik elektrik yoğunluğundaki gerilemeler, genel enerji yoğunluğundaki gerilemelere göre daha yavaş gerçekleşmiştir. 1990 ile 2015 arasında elektrik yoğunluğunda küresel çaptaki düşüş yüzde 20'nin biraz altındaydı (toplam enerji için yüzde 40'tan fazlaydı), ABD'deki gerileme de yüzde 20'ydi, ama hızla modernleşen Çin'de 1990 ile 2015 arasında hiçbir gerileme olmadı.

Küresel ekonominin asli enerji (ve elektrik) yoğunluğu azalmaktadır, ama dünya ekonomisinin boyutları ve Asya ile Afrika'da devam eden nüfus artışı nedeniyle, geçmiş deneyimler, değişik bir biçimde de olsa gelecek yıllarda tekrar edecektir, zira modernleşen ülkelerde ekonomik büyümenin enerjisini sağlamak için büyük miktarda yakıt, elektrik üretim kapasitesinin büyük ölçüde artırılmasına gerek duyulacaktır. Açıktır ki güçlü ekonomik büyümenin başlatılması ve devam ettirilmesi karmaşık, birbirine bağımlı girdilerin sonucudur. Teknik yenilikler ile bunlara cevap verecek kurumsal düzenlemeler yapılmasını, en başta da sağlam bir bankacılık ve hukuk sistemi bulunmasını gerektirirler. Uygun hükümet politikaları, iyi eğitim sistemleri, yüksek bir rekabet düzeyi de temel önemdedir. Ama bugün düşük gelirli ülkeler, (Çin'in 1990 sonrasındaki izlediği ekonomik yolu izleyerek) yoksulluktan refah başlangıcı düzeyine çıkacaklarsa, bu durumda bu etkenlerin hiçbir yakıt ve elektrik tüketimini artırmaksızın bir fark yaratmaz: Modern

ekonomik kalkınmanın ilk aşamalarında ekonomik büyüme ile enerji tüketiminin birbirinden ayrılması termodinamik yasalarına aykırı olacaktır.

SONUÇLAR VE KAYGILAR

Modern toplumlarda yüksek enerji kullanımının olumsuz sonuçları apaçık fiziksel tezahürlerden tutun istenmeyen sonuçları ancak birçok kuşak sonra belirginlik kazanan tedrici değişimlere uzanan bir yelpazeye yayılır. İlk grupta savunulamaz derecede yüksek gıda israfını artıran ve görülmemiş düzeyde aşırı şişmanlık (beden kütle endeksinin 25 ile 30 arasında olması) ve obezite (beden kütle endeksinin 30'un üstünde olması) oranlarına katkıda bulunan bol gıda arzı yer alır. Bedenlerin daha ağırlaşması yönündeki bu eğilim, kas kullanımının yerini makinelerin alması yönündeki kitlesel eğilimden ötürü, hayatların daha fazla oturarak yaşanması ve eskiden yürüyerek yapılan kısa yolculuklarda bile her yerde otomobillerin kullanılması nedeniyle enerji harcamanın azalması sonucu güçlenmektedir. 2012'de ABD nüfusunun yüzde 69'u aşırı kilolu ya da obezdi, 1950'lerde yüzde 33 olan bu oranın bu düzeye çıkması, aşırı kilo ya da obezitenin aşırı yeme ve fiziksel etkinliğin azalması nedeniyle ortaya çıktığının apaçık bir kanıtıdır.

ABD aşırı kilolu ve obez nüfusun arttığı tek ülke değildir (bu oranlar Suudi Arabistan'da daha da yüksektir, aşırı kilolu nüfusta en hızlı artışların bir bölümü artık Çinli çocuklar arasında da görülmektedir) ama bu eğilim (henüz?) küresel bir hal almamıştır: Avrupa'da birçok nüfus ve Sahraaltı Afrika nüfuslarının çoğunluğunda beden kütleleri hâlâ olması gerektiği gibidir. Her halükârda burada amacım yoğun enerji kullanımının sadece olumsuz yönlerine odaklanmak değil. Modern enerji kullanımının, burada inceleyeceğim beş temel küresel sonucundan her biri kaygı yaratan etkileri yerelden küresele farklı ölçeklerde gözlenebilecek sorunların yanı sıra memnuniyetle karşılanan birçok iyileşmeyi de beraberinde getirmiştir.

Kentleşmenin sürmesi (2007'den beri insanlığın yarısından fazlası şehirlerde yaşamaktadır) önemli bir yenilik kaynağı olmuştur. Hava ve su kirliliğinin zararlı seviyelere çıkmasına, aşırı kalabalıklaşmaya neden olsa da, en yoksul kent sakinleri için dudak uçuklatan hayat koşulları yaratmış olsa da kentleşme hayatın fiziksel kalitesini artırmıştır, görülmemiş düzeyde eğitim ve kültürel gelişme fırsatları sunmuştur. Yüksek enerjili toplumlar geleneksel seleflerine nazaran daha yüksek bir hayat standardına sahiptir, bu artışlar sürekli iyileşme beklentilerine yol açmıştır: Ama ısrarla varlığını sür-

düren (ve genellikle de derinlere işleyen) ekonomik eşitsizlikler nedeniyle bu yararlar eşitsiz bir biçimde dağılmaktadır. Ayrıca nüfuslar yaşlandığından, daha fazla açık harcamayı gerektirecek daha başka kazanımların devam edeceğinin bir garantisi yoktur.

Enerji fiyatları, yakıt ve elektrik ticareti, enerji kaynaklarının güvenliği hem enerji ithal eden hem enerji ihraç eden ülkelerde önemli siyasal etkenler haline gelmiştir; özellikle de petrol fiyatlarının yüksekliği ve düşüklüğü hidrokarbon ihracatına ağır bir bağımlılık gösteren ekonomiler açısından önemli sonuçlar doğurmuştur. Silahların daha yıkıcı hale gelmesi, gerçekten küresel düzeyde çevresel ve ekonomik sonuçlara yol açacak bir nükleer çatışma riskinin artması termonükleer bir savaşın yararsızlığının yaygın kabul görmesini ve bu tür çatışma olasılıklarını azaltacak adımların benimsenmesini beraberinde getirmiştir. Fosil yakıtların kitlesel ölçekte yakılması çevreyi birçok açıdan olumsuz etkilemiş, her şeyden önce de hızlı küresel ısınma riskini artırmıştır, bu tehdidi ortadan kaldırmak çok zor olacaktır.

Kentleşme

Kentlerin, büyük kentlerin bile uzun bir tarihi vardır (Mumford 1961; Chandler 1987). MS 1. yüzyıl Roması'nda yarım milyonu aşkın insan yaşıyordu. Harun er-Reşid'in yönetimindeki dokuzuncu yüzyıl Bağdatı'nın nüfusu 700.000'di, aynı dönemin Changan'ında (Tang hanedanlığının başkenti) nüfus 800.000'di. Bundan 1.000 yıl sonra Qing hanedanlığının başkenti Beijing'in nüfusu bir milyonu buldu, 1800'de nüfusu 100.000'i aşan yaklaşık 50 kent bulunuyordu. Ama Avrupa'da bile 1800'de nüfusun ancak yüzde 10'u kentlerde yaşıyordu. Sonrasında hem dünyanın en büyük kentlerinin nüfuslarında hem de kent sakinlerinin nüfustaki payında gözlenen hızlı artış fosil yakıtlar olmasaydı mümkün olamazdı. Geleneksel toplumlar ancak az sayıda büyük kenti destekleyebiliyordu, zira bu kentlerin enerjilerinin yerleşimin kendisinden en az 50 kat, genelde yaklaşık 100 kat daha büyük olan tarlalar ve ormanlardan gelmesi gerekiyordu (Kutu 6.11).

Modern kentler yakıtları çok daha yüksek bir verimlilikle kullanır, ama konut, fabrika ve ulaştırma ağı yoğunluklarının daha yüksek olması enerji yoğunluklarını büyüyen, ılıman iklimli yerlerde 15 W/m^2 'ye iterken, daha soğuk iklimlerdeki sanayi kentlerinde 150 W/m^2 'ye yükseltmiştir. Gelgelelim bu ihtiyaçları karşılamakta kullanılan kömürler de ham petrol de genellikle 1.000 ve 10.000 W/m^2 arasında değişen enerji yoğunluklarıyla

Kutu 6.11

Geleneksel kentsel enerji arzı ve kullanımının güç yoğunlukları

Nüfusu 500.000 olan geleneksel bir kent, sanayi öncesi beslenme biçimlerinin genelinde olduğu gibi ağırlıklı olarak (yüzde 90) bitkisel yiyeceklerden gelen, kişi başına ortalama günlük yaklaşık 9 MJ enerji alımıyla, hektar başına genelde 750 kg tahıl getirisiyle 150.000 hektar civarında tarlaya ihtiyaç duyardı. Daha soğuk bir iklimde yıllık yakıt (odun ve odun kömürü) ihtiyaçları kişi başına 2 ton civarında olurdu. Hektar başına yıllık 10 tonluk bir getiriyle ormanlardan ya da yakacak odun veren koruluklardan sürdürülebilir biçimde temin edilebilseydi, bu kentin yakıtını temin etmek için yaklaşık 100.000 hektar ormanlık araziye ihtiyacı olurdu. Bu büyüklükte bir nüfusun yoğun olduğu bir kent, 2.500 hektar kadar küçük bir araziyi kaplayabilir, gıda ve yakıt için kendisinin 100 katı kadar büyük bir alana ihtiyaç duyardı.

Ortalama enerji yoğunlukları açısından düşünüldüğünde bu örnek toplam enerji yoğunluğunun 25 W/m^2 , arzin $0,25 \text{ W/m}^2$ olduğu anlamına gelir. Fiili enerji yoğunluğu yelpazesi epey geniştir. Sanayi öncesi kentlerin toplam enerji tüketimleri gıda alımlarına, pişirme ve ısıtma pratiklerine, küçük imalathanelerin enerji gereksinimlerine ve yakma verimliliklerine bağlı olarak 5 ile 30 W/m^2 arasındaydı. Yakındaki ormanlardan ve korulardan sürdürülebilir yakıt üretimi $0,1$ ile 1 W/m^2 arasında bir enerji yoğunluğu yaratıyordu. Buna bağlı olarak kentlerin kendi alanlarının 50 - 150 katı büyüklüğünde ekilen ve ormanlık araziye dayanmaları gerekiyordu; güçlü ve ucuz asli itici güçlerin eksikliği uzak bölgelerden gıda ve yakıt nakletme yetilerini sınırılıyor, çevre bölgelerin bitkisel kaynakları üzerinde baskı yaratıyordu (Smil 2015b).

çıkarılır (Smil 2015b). Bu da bir sanayi kentinin büyüklüğü, inşa edilmiş alanının en fazla yedide biri, en az 1.000 'de biri büyüklüğünde bir kömür rezervine ya da petrol havzasına ve yakıtları temelde çıkarıldıkları yerlerden kentteki kullanıcılara taşıyacak yeni, güçlü asli itici güçlere dayanması gerektiği anlamına gelir. Geleneksel kentlerin geniş bölgelerden elde edilen dağınık enerji akışlarının yoğunlaşmasıyla desteklenmesi gerekmektedir, modern kentlerse nispeten küçük bölgelerden yoğun bir biçimde çıkarılan fosil enerjilerin dağıtılmasıyla desteklenir.

Gıdaya gelince; nüfusu 500.000 olan, kişi başına günde 11 MJ tüketilen (bu enerjinin üçte biri, kendi enerjilerinin dört katını yem olarak gerektiren hayvansal gıdalardan gelir) modern bir kentin ortalama ürün getirisi hektar başına sadece 4 ton olacaksa bile ekin yetiştirmek için yaklaşık 70.000 hektara ihtiyacı vardır. Bu, geleneksel kent örneğindeki toplamın yarısından az olacaktır, fosil yakıtlar ve elektrik de uzak mesafelerden geniş ölçekli gıda ithalatını bütçeye uygun hale getirir. Sadece elektrik ve sıvı ulaştırma yakıtları içme suyu pompalamayı, kanalizasyon ve çöpleri kaldırıp işlemekten geçirmeyi, megakentlerin (nüfusu 10 milyonu aşan kentlerin) ulaştırma ve iletişim ihti-

yaçlarını karşılamayı mümkün kılmıştır. Bütün modern kentler, yüksek güç yoğunluklarıyla çevrilen fosil enerji akışlarının eseridir, ama megakentler istisnai derecede yüksek enerji akışı gerektirir: Kennedy ile çalışma arkadaşlarının (2015) yaptığı bir araştırmaya göre 2011’de dünyadaki 27 megakent (küresel nüfusun yüzde 7’sinden azına sahip olmakla birlikte) bütün elektriğin yüzde 9’unu, bütün benzinin yüzde 10’unu tüketiyordu.

Fosil yakıtlı (başta yakıtı sadece kömür olan) kentlerin yükselişi hızlı oldu. 1800’de dünyanın on büyük kentinden sadece bir tanesi, ikinci sıradaki Londra, enerji kullanımına kömürün hakim olduğu bir ülkede bulunuyordu. Bundan bir asır sonra on kentten dokuzu bu kategorideydi: Londra, New York, Paris, Berlin, Chicago, Viyana, Sen Petersburg, Philadelphia ve Manchester. Tokyo ise biyokütle yakıtların hâlâ bütün asli enerjinin yaklaşık yarısını sağladığı bir ülkenin başkentiydi (Smil 2010a). 1900’de kentli nüfusun dünya nüfustaki payı sadece yüzde 15’ti, ama dünyanın üç büyük kömür üreticisinde bu oran çok daha yüksekti. Bu oran Britanya’da yüzde 70’in üstünde, Almanya’da yüzde 50’ye yakın, ABD’de yüzde 40 civarındaydı. Kentlerin büyümesinin devam etmesi çok büyük kentlerin toplam sayısında da dikkat çekici bir artışı beraberinde getirdi. 2015’e gelindiğinde yaklaşık 550 kent topluluğunda nüfus bir milyonu aşmıştı, nüfusun bu düzeyde olduğu kentlerin sayısı 1900’de 13, 1800’de ise sadece ikiydi: Pekin ve Büyük Londra (City Population 2015).

Fosil yakıtlar göçlerin itme ve çekme kuvvetlerine de enerji vermiştir: Kentlerin büyümesinin ardındaki itici güç tarımsal mekanikleşmenin itiş ve sanayileşmenin çekiş gücü olmuştur. Kentleşme ve sanayileşme elbette ki eşanlımlı değildir, ama bu iki süreç birbirini karşılıklı güçlendiren birçok bağla birbirine yakından bağlıdır. En dikkat çekicisi, Avrupa ve Kuzey Amerika’daki teknik yeniliklerin kökleri ağırlıklı olarak kentlere uzanır ve kentler yenilik kaynağı olmayı sürdürür (Bairoch 1988; Wolfe ve Bramwell 2008). Bettencourt ve West (2010) bir kentin nüfusu ikiye katlandıkça hem toplam hem kişi başına verimliliğin artmasıyla birlikte ekonomik verimliliğin ortalama yüzde 130 artacağı sonucuna varmıştır, Pan ve çalışma arkadaşları (2013) bu sonucu büyük ölçüde “süper çizgisel büyütme”ye bağlamıştır, kentli nüfus yoğunluğundaki artışlar kent sakinlerine daha fazla yüz yüze iletişim kurma fırsatı verir.

Kentteki işlerin hizmet sektörüne kayması yönündeki büyük değişim, büyük ölçüde İkinci Dünya Savaşı sonrasında yaşanmış bir gelişmedir.

2015'e gelindiğinde bu akışlar, kentli nüfusların toplamdaki payını sadece bütün Batı ülkelerinde değil, Brezilya ve Meksika'da da yüzde 75'in üstüne çıkardı (sırasıyla yüzde 90 ve yüzde 80). Sadece Afrika ve Asya ülkelerinde kentli nüfusun toplam nüfustaki payı yüzde 50'nin altındadır; bu oran Hindistan'da yüzde 35, Nijerya'da yüzde 47, Çin'de yüzde 55'tir. Çin'de bu rakamın nispeten düşük olması, Maoist Çin'de iç göçün yıllarca sıkı bir denetime tabi olmasının ağır etkisinden kaynaklanır; Çin'de hızlı kentleşme ancak 1990'da başlamıştır. İnsanların bu büyük yer değiştirmelerinin ekonomik, çevresel ve sosyal etkileri, modern tarihin en ilgiyle incelenen olguları arasında yer almıştır. Hızla büyüyen on dokuzuncu yüzyıl şehirlerinde yaygın olan sefalet, yoksulluk, pislik ve hastalıklar özellikle geniş bir literatüre yayılır. Bu yazılar betimleyici olmaktan (Kay 1832) tutun öfkeli olmaya (Engels 1845) bir dizi parlamento oturumundan çok satan romanlara (Dickens 1854; Gaskell 1855) geniş bir yelpazeye yayılır.

Benzer gerçeklikler (bugün aşılama sayesinde bertaraf edilmiş en bulaşıcı hastalıkların yarattığı tehdit dışında) bugün birçok Asya, Afrika ya da Latin Amerika kentinde gözlenebilir. Ama insanlar hâlâ kentlere göç etmektedir. Bugün de daha önceleri olduğu gibi, bilançoya vurulduğunda, çok daha kötü olan koşulları terk etmektedirler; hem ilk reformcu yazılarda hem de sonraki yıllarda kentleşmenin dezavantajlarını konu alan tartışmalarda genellikle görmezden geline bir konudur bu. Bugün de daha önce olduğu gibi kentli ortamların feci durumunu (estetik görünümünü, hava ve su kirliliğini, gürültü, kalabalık, gecekonduardaki berbat hayat koşulları) genellikle en az bir o kadar itiraz edilesi kırsal hayat koşulları karşısında tartmak gerekiyor.

Kırsal çevrede yaygın olan ağır koşullar arasında biyokütle yakmanın havalandırma yapılmayan koşullarda gerçekleştirilmesi nedeniyle ev içi hava kirliliği yoğunlaşmasının çok yüksek olması (özellikle de küçük madde parçacıkları) soğuk iklimlerde yetersiz ısıtma, su kaynaklarının güvenilir olmaması, kişisel hijyenin kötü olması, konutların sıkışık, aşırı kalabalık olması, çocukların gereği gibi eğitim görme imkanlarının az olması ya da hiç olmaması yer alır. Ayrıca açık havada yapılan tarla işleri angaryası bir fabrikada vasıfsız bir sanayi işine bile pek tercih edilemez. Genelde tipik fabrika işleri sıradan çiftlik işlerinden daha az enerji harcanmasını gerektirir, kentlerde sanayide kitlesel istihdamın başlamasından şaşırtıcı derecede kısa bir süre sonra fabrika işlerinin süresi makul bir düzene oturtulmuştur.

Bunu sağlık güvencesi ve emeklilik planlarıyla birlikte ücretlerin gide-
rek yükselmesi izlemiştir. Daha iyi eğitim fırsatlarıyla birlikte bu değişiklikler
tipik hayat standartlarında takdir edilebilir iyileştirmelere neden olmuştur.
Bu da nihayetinde bütün büyük bırakınız yapınlar ekonomilerinde ciddi bir
kentli orta sınıfın doğmasını beraberinde getirmiştir. Batı'nın bu büyük, ama
artık kesinlikle paslanmış başarısının cazibesi sanayileşen dünyanın tama-
mında kuvvetle hissedilmiştir. Benzer yararlar sağlamakta yavaş kaldığı an-
laşılan Komünist rejimlerin çökmesinde de bu hiç kuşkusuz önemli bir etken
olmuştur. Kentleşmenin enerji tüketimi açısından sonuçları hakkında hiçbir
kuşkuya yer yoktur; kentlerde yaşamak büyük sanayilerin ya da büyük li-
manların olmaması durumunda bile kişi başına enerji tedarikinde önemli
artışlar olmasını gerektirir: Asya'nın yeni büyümekte olan kentlerinden biri-
ne taşınmış birini ayakta tutmak için gerekli fosil yakıt ve elektrik, doğduğu
köyde yemek pişirmek ve (ihtiyaç halinde) bir odayı ısıtmak için kullanılan
biyokütle yakıt miktarından kolayca birkaç basamak daha yüksek olabilir.

Hayat Kalitesi

Enerji tüketiminin artması ortalama hayat kalitesi üzerinde genellikle ted-
rici (ama bazı örneklerde, 1990 sonrasında Çin'de olduğu gibi gayet ani)
ve büyük ölçüde istenir etkiler yaratmaktadır; eğitim ve kişisel özgürlükler
gibi somut olmayan kilit değişiklikleri de kapsadığından hayat standardı
teriminden daha kapsamlı bir terimdir hayat kalitesi. İkinci Dünya Savaşı
sonrasında hızlı ekonomik büyümenin yaşandığı yıllarda önceden yoksul
olan birçok ülke yurttaşlarının genel hayat kalitesi iyileştiği için orta dü-
zeyde enerji tüketen ülkeler sınıfına geçmiştir (gerçi bunun bedeli, genellikle
çevrenin bozulması olmuştur), ama küresel enerji kullanımının dağılımı hâlâ
son derece çarpıktır. 1950'de dünyanın en zengin ekonomilerinde yaşayan
sadece yaklaşık 250 milyon kişi, yani küresel nüfusun onda biri, yılda kişi
başına 2 ton petrole eş değer (84 GJ) enerji tüketiyordu, ama dünyadaki
asli enerjinin yüzde 60'ında pay sahibiydiler (geleneksel biyokütle dışında).
2000 yılına gelindiğinde bu nüfuslar bütün insanlığın yaklaşık dörtte birini
oluşturuyordu ve bütün fosil yakıtlar ve elektriğin yaklaşık dörtte üçünü tü-
ketiyordu. Oysa tersine insanlığın en yoksul dörtte birlik kesimi bütün ticari
enerjilerin yüzde 5'inden azını kullanır (Şekil 6.18).

2015'e gelindiğinde Çin'in hızlı ekonomik büyümesi sayesinde, 2 ton
petrole eşdeğer enerjiden fazlasını tüketen nüfusun küresel nüfustaki payı



Şekil 6.18 Nairobi'nin en büyük gecekondu mahallelerinden biri olan Kibera (Corbis). Kenya'da modern enerjilerin kişi başına kullanımı yılda yaklaşık 20 GJ düzeyindedir, ama Afrika ve Asya'daki gecekondu sakinleri yılda 5 GJ kadar ya da ABD ortalamasının yüzde 2'sini bile bulmayan az bir miktar tüketir.

yüzde 40'a çıkmıştı, tarihteki en büyük eşitleyici ilerlemeydi bu. Çarpıcı olmakla birlikte bu ortalamalar ortalama hayat kalitesindeki gerçek farklılıkları yansıtmaz, çünkü yoksul ülkeler toplam enerji tüketimlerinin çok daha küçük bir bölümünü özel konut ve ulaştırma alanlarına harcar ve bu enerjileri daha düşük verimliliklerle çevirir. Doğrudan kişi başına enerji kullanımında, insanlığın en zengin ve en yoksul kesimleri arasındaki gerçek fark, bu nedenle "sadece" 20 kat değil, 40 kata yakındır. Bu muazzam uyumsuzluk ekonomik başarılar ve hayat kaliteleri arasında gözlenen kronik uçurumun başlıca birkaç sebebinden biridir. Buna karşılık bu eşitsizlikler küresel siyasal istikrarsızlığın devam etmesinin önemli kaynaklarından biri olmuştur.

Ara tüketim kategorisine girmiş ülkeler çok farklı bir hızla benzer iyileşme aşamalarından geçmişlerdir: Batı Avrupa'da ilk sanayileşen ülkelere iki, hatta üç kuşakta gerçekleştirdikleri bir şeyi Güney Kore ve Çin bir kuşaklık sıkıştırılmış bir kalkınma süreciyle başarmıştır (sonradan başlayan kararlı sanayileşmecilerin avantajıdır bu). Ekonomik büyümenin ilk aşamalarında, bu yararlar biraz sınırlıdır, zira yakıtlar ve elektrik ezici miktarlar-

da bir sanayi temelini inşa edilmesine kanalizasyon yapılır. Konut ve kişisel mal alımının yavaş yavaş artması, temel diyetlerin daha iyileşmesi, kentlerden başlayıp tedricen kırsal kesime yayılarak iyileşmenin ilk işaretleri olmuştur.

Temel kap kacak ve mutfak eşyalarının daha büyük bir çeşitlilik kazanması ve daha iyi kalitede olması, daha fazla sayıda, genellikle daha renkli giysiler, daha iyi ayakkabılar, daha iyi kişisel hijyen (daha sık yıkanma ve çamaşır yıkama); ilave mobilyalar satın alınması; özel vesilelerle küçük hediyeler satın alınması; duvarlara resimler asılması (ucuz reproduksiyonlardan başlayarak) ilk kazanımlar arasında yer alır. Yirminci yüzyıl başında Kuzey Amerika ve Avrupa'da *burjuvazinin* bir sonraki aşamasında daha fazla sayıda elektrikli alete sahip olunurdu, ama yeni elektrikli (klima, mikrodalga fırınlar, TV'ler) ve elektronik aletler ve aygıtların (en önemlisi de cep telefonlarının) fiyatlarının ucuz olması birçok Asya ve bazı Afrika ülkelerinde ailelerin daha iyi eşyalara sahip olmadan evvel bunları edindiği anlamına gelmektedir.

Sonraki aşamalarda, gıda arzının çeşitliliği ve kalitesinde daha başka iyileşmeler olur ve daha iyi bir sağlık hizmeti sunulur, ilerleme kırsal kesime de yayılmaya başlar. Kentli kesimlerin eğitim seviyesi yükselmeye başlar, daha yüksek gelir gruplarında otomobil sahipliği, konutu daha rahat kılacak çeşitli eşyalar ve yurtdışına seyahat gibi varsıllık işareti denilebilecek şeylerin sayısı artar. Yine bu kazanımların bazıları, özellikle Asya'da son dönemde şişirilmiş ya da tersine çevrilmiştir. Son olarak birçok fiziksel konfor ve sık sık gösteriş imkanı sunan kitlesel tüketim aşaması gelir. Eğitim süreleri uzar, kişisel hareketlilik yüksektir, dinlenme ve sağlık harcamalarının artması bu değişikliğin bir parçasıdır.

Bu dizilimin kişi başına ortalama enerji tüketimiyle korelasyonu şaşırtıcı olmuştur, ama genellikle karşılaştırılan şey (bir ülkenin asli enerji arzını toplayıp toplam nüfusa bölerek hesaplanan kişi başına ortalama tüketim) en iyi değişken değildir. Toplam asli enerji arzının kişi başına ortalama tüketimi bize tüketimdeki paylar (ordu oransızca yüksek bir pay sahibi olabilir, SSC-B'de, Kuzey Kore ve Pakistan'da olduğu gibi) ya da tipik (ya da ortalama) enerji çevrimlerinin verimliliği (Japonya'da Hindistan'a göre daha yüksektir, dolayısıyla birim gayri safi enerji başına verilen nihai hizmet daha fazladır) hakkında bir şey söylemez. Konutlardaki ortalama enerji kullanımının karşılaştırılması daha iyi fikirler verebilir, ama bu da mükemmellikten uzaktır: Konutlarda tüketilen yakıt ve elektrik hesaba katılacak, ama (ev inşa etmek

ya da otomobil, ev aleti, elektronik aletler ve mobilya imal etmek için gerekli) hatırı sayılır miktarda dolaylı enerji girdisi dışarıda bırakılacaktır.

Bunu akılda tutarak ve ülkelerin kendilerine özgü özelliklerinin (iklimlerden ekonomik özelliklere varıncaya dek) basitçe sınıflandırılmalarını engellediğinin de bilincinde olarak, enerji kullanımı ile hayat kalitesi arasındaki ilişki üç temel kategoriye ayrılabilir. Yıllık asli ticari enerji tüketimi (genelensel biyoyakıtlar bir yana) kişi başına ortalama 5 GJ'den az olan (yani 120 kg petrole eşdeğer) hiçbir ülke temel gereklilikleri bile bütün yurttaşları için garantileyemez. 2010'da Etiyopya hâlâ bu asgari seviyenin çok altındaydı, Bangladeş zar zor üstüne çıkmıştı; Çin 1950'ye gelmeden bu noktaya varmıştı, Batı Avrupa'nın geniş bölgeleri ise 1800 öncesinde bu noktaya gelmişlerdi.

Ticari enerji kullanım oranı 1 ton petrole eşdeğer seviyeye (42 GJ) gelince sanayileşme ilerler, gelirler artar ve hayat kalitesi fark edilir derecede artar. 1980'lerin Çini, 1930'ların ve 1950'lerin Japonyası, 1870 ve 1890 arasında Batı Avrupa ve ABD hep bu gelişme aşamasına verilebilecek örneklerdir. Varsıllık başlangıcı aşaması gayet verimli bir enerji kullanımıyla bile olsa, yılda kişi başına en az 2 ton petrole eşdeğer (84 GJ) enerji kullanımı gerektirir. Fransa bu noktaya 1960'ta ulaştı, Japonya 1970'lerde. Çin 2012'de bu seviyeye geldi, ama Çin'deki oran Batı'daki oranlarla tam anlamıyla karşılaştırılabilir değildir, çünkü bu ülkenin enerji kullanımının çok büyük bir bölümü hâlâ sanayiye (2013'te neredeyse yüzde 30) pek azı özel enerji tüketim alanlarına gider (IEA 2015a).

Ama hem Fransa'nın hem Çin'in kazanımları son dönemdeki değişikliklerin hızını daha iyi anlamamızı sağlar. Fransa'da 1954'teki nüfus sayımı konut alanında çarpıcı eksiklikler bulunduğunu ortaya koyuyordu: Konutların yüzde 60'ından azında sürekli akan bir su bulunuyordu, sadece yüzde 25'inde tuvalet ev içindeydi, sadece yüzde 10'unda banyo ve merkezi ısıtma bulunuyordu (Prost 1991). 1970'lerin ortasına gelindiğinde evlerin neredeyse yüzde 90'ında buzdolabı bulunuyordu, yüzde 75'inde tuvalet, yüzde 70'inde banyo vardı, yaklaşık yüzde 60'ında da merkezi ısıtma ve çamaşır makinesi bulunuyordu. 1990'lara gelindiğinde bu imkanların hepsi de neredeyse genel bir hal almıştı, ailelerin yüzde 75'i ayrıca otomobil sahibiydi, 1960'ta ise yüzde 30'undan azında otomobil bulunuyordu. Böyle artan bir varsıllığın artan enerji kullanımına da yansıması gerekiyordu. 1950 ile 1960 arasında Fransa'da kişi başına ortalama enerji tüketimi yaklaşık yüzde 25

artmıştı, ama 1960 ile 1974 arasında yüzde 80 civarına tırmandı, 1950 ile 1990 arasında toplam yakıt arzında kişi başına düşen oran iki katına çıkmış olsa da benzin tüketimi yaklaşık altı kat artmış, elektrik kullanımıysa sekiz kat yükselmişti (Smil 2003).

Çin’de çok daha hızlı ilerlemeler oldu. 1980’de ekonomik reformlar başladığında (Mao Zedong’un ölümünden dört yıl sonra) kişi başına enerji tüketimi ortalama 19 GJ’ydi; 2000’e gelindiğinde yaklaşık 35 GJ olmuştu; 2010’da otuz yıl içinde dörde katlanarak kabaca 75 GJ’ye tırmanmıştı; 2015’teyse 90 GJ’nin biraz üstündeydi (Smil 1976; China Energy Group 2015) 1980’lerin başında İspanya’daki ortalamaya benzer bir ortalamaydı bu. Ayrıca bu kazanımlardan oransız paylar inşaatta kullanılmıştı. Bu durumu, hiçbir şey şu olgudan daha iyi ortaya koyamaz: ABD’nin çimento tüketimi yirminci yüzyıl boyunca toplam 4,5 Gt’yi buldu, oysa Çin 2008-2010 döneminde sadece üç yıl içinde bundan daha fazlasını (4,9 Gt) yeni inşaat projelerinde kullandı (Smil 2014b). Çin’in bugün dünyanın en büyük modern yüksek hızlı demiryolu ağlarına ve eyaletler arası otobanlara sahip olması hiç de şaşırtıcı değil.

Enerjinin başka hiçbir biçimi hayat kalitesinin artmasını, bütçeye uygun elektrik temininden daha geniş çapta etkileyememiştir: Kişisel düzeyde bu etkiler nüfuz edici ve ömür uzatıcı olmuştur (prematüre bebekler inkübatörlerde tutulmuş, onlara yapılacak aşılar buzdolaplarında saklanmış, tehlikeli hastalıklar girişimsel olmayan tekniklerle teşhis edilip zamanında tedavi edilmiş, kritik durumdaki hastalar elektronik monitörlere bağlanmıştır). Ama elektriğin toplumsal açıdan en büyük etkilerinden biri evlerde yapılan çok sayıda işi dönüştürmesi, böylece kadınlara herkesten fazla yararının dokunmuş olmasıdır. Bu değişiklik, Batı dünyasında bile, gayet yakın tarihte gerçekleşmiştir.

Artan enerji tüketimi kuşaklar boyunca gündelik ev işleri açısından büyük bir fark yaratmadı. Aslına bakılırsa işleri daha da kötüleştirmedi mümkündü. Daha iyi eğitimle birlikte hijyen standartları ve sosyal beklentiler yükselirken Batı ülkelerinde kadınların işi de sıklıkla daha zorlaştı. İster sıkışık İngiliz apartmanlarında çamaşır yıkamak, yemek pişirmek ve temizlik yapmak olsun (Spring-Rice 1939), ister Amerikan çiftliklerinde gündelik işleri yapmak olsun 1930’larda kadınların işi hâlâ son derece zordu. Nihayetinde onları kurtaran elektrik oldu. Diğer enerji biçimlerinin elde edilebilirliği bir yana, ancak elektriğin devreye girmesi yorucu ve sıklıkla da tehlikeli işlerin üstesinden gelebildi (Caro 1982; Kutu 6.12).

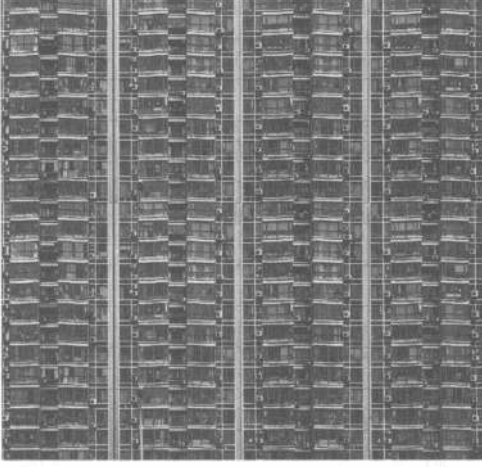
Kutu 6.12

Ev işlerinin kolaylaşmasında elektriğin önemi

Elektriğin özgürleştirici etkileri Robert Caro'nun (1982) kaleme aldığı Lyndon Johnson biyografisinin ilk cildinde unutulmaz bir dille örneklenmiştir. Caro'nun işaret ettiği üzere Texas Hill County'de hayatı bu kadar zorlaştıran şey enerji azlığı değil (evlerde bol miktarda odun ve kerosen bulunuyordu) elektrik yokluğuuydu. Caro etkileyici, neredeyse fiziksel bir acı veren anlatısında odun sobalarında ısıtılmış ağır metallerle ütü yapmanın nasıl yorucu, ne kadar tehlikeli bir iş olduğunu, yemek pişirmek, yıkamak ve hayvanlara vermek için su pompalayıp taşıma, yem öğütme, odun kesme işlerinin nasıl bitmek bilmediğini anlatır. Büyük ölçüde kadınların sırtına düşen bu işler yoksul ülkelerdeki tipik çalışma koşullarından çok daha zordu, çünkü 1930'larda Hill County çiftçileri Asya ya da Latin Amerika köylülerinden çok daha yüksek bir hayat standardını korumaya, çok daha büyük çiftlikler işletmeye çalışıyorlardı. Örneğin beş kişilik bir ailenin yıllık su ihtiyacı 300 tona yaklaşıyordu, bu ailenin su ihtiyacının karşılanması günde sekiz saatten 60 güne eşdeğer emek harcamayı, yaklaşık 2.500 km yürümeyi gerektiriyordu. Tahmin edileceği gibi, bu insanların hayatlarında hiçbir şey elektrik hatlarının çekilmesi kadar büyük bir devrim yaratamazdı.

Birçok elektrikli alet daha 1900'de bulunabiliyordu: General Electric 1890'larda elektrikli ütüler, vantilatörler, yarım litre suyu 12 dakikada kaynatabilen bir su ısıtıcı bobin satıyordu (Elektrik Konseyi 1973). Bu aletlerin yüksek maliyeti, evlerde kullanılmalarını sınırliyordu, kırsal kesime elektrik götürülmesinin yavaş ilerlemesi bu aygıtların yaygın olarak benimsenmesini hem Avrupa'da hem Kuzey Amerika'da 1930'lara dek geciktirdi. Buzdolapları gazlı ya da elektrikli ocaklardan çok daha önemli bir icat oldu (Pentzer 1966). İlk ev tipi buzdolapları 1914'te Kelvinator Şirketi tarafından piyasaya sürüldü. Amerika'da buzdolabı sahibi olmak ancak 1940'larda keskin bir artış gösterdi, buzdolapları Avrupa'da ancak 1960 sonrasında yaygınlık kazandı. Buzdolaplarının önemi fast food'a giderek daha bağımlı hale gelmesiyle birlikte arttı. Buzdolabı kullanımı bugün zengin ülkelerde evlerde kullanılan toplam elektriğin yüzde 10'unun harcamadığı yerdir.

Elektriğin ev içindeki işleri fethetmesi, zengin ülkelerde daha fazla zaman ve emek tasarrufu yaratmayı sürdürmektedir. Kendi kendilerini temizleyen fırınlar, yiyecek işleyen aletler ve mikrodalga pişirme (1945'te geliştirilmiş, ama ancak 1960'ların sonunda küçük ev modelleri kullanılmaya başlamıştır) zengin dünyada yaygınlık kazanmıştır. Buzdolabı, çamaşır makinesi ve mikrodalga fırın sahibi olmak, Asya ve Latin Amerika nüfuslarının hali vakti yerinde kesimlerinde bile doygunluk noktasına yaklaştı; bu nüfuslar havalandırma birimlerine de sahiplerdi. Patentini ilk kez Willis Carrier'in



Şekil 6.19 Şangay'da neredeyse bütün odalarında klima bulunan yüksek bir apartman binası (Corbis).

kullanılmaktadır, çoğu tek kişilik odalarda duvara yerleştirilen birimlerdir (Şekil 6.19).

Modern toplumlar ekonomik büyümeyi, dolayısıyla artan enerji kullanımını, daha fazla kullanmanın her zaman ödülleri de beraberinde getireceğini örtük olarak varsayarak sorgulanmaksızın kabul edilen arzu düzeyine çıkarmıştır. Ama ekonomik büyüme ve artan enerji kullanımı, ancak daha iyi bir hayat kalitesini güvence altına almanın yolu olarak görülmelidir, hayat kalitesi sadece temel fiziksel ihtiyaçların (sağlık, beslenme) değil, insan zekasının gelişimini (temel eğitimden tutun bireysel özgürlüklere) de içeren bir kavramdır. Böyle içkin olarak çok boyutlu bir kavram temsil edici tek bir göstergeye sıkıştırılamaz, ama öyle anlaşılıyor ki bir-iki değişken bu kavramın hassas göstergeleri olarak işe yarar.

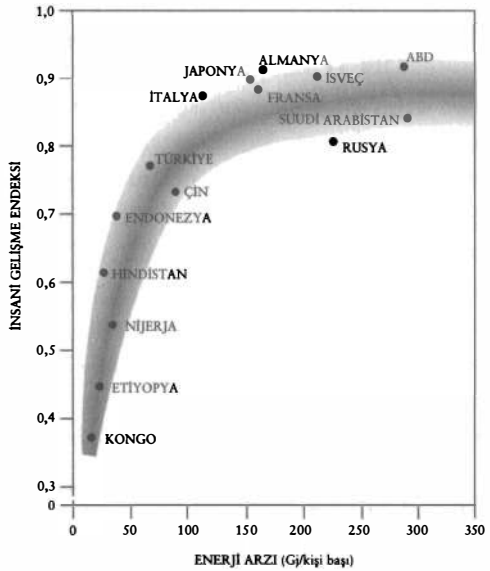
Bebek ölüm oranı (1.000 canlı doğumda ölen bebeklerin sayısı) ve doğumda ömür uzunluğu beklentisi, hayatın fiziksel kalitesini gösteren iki açık ve tartışmasız göstergedir. Bebek ölüm oranı, kullanılabilir gelir ve konut kalitesinden tutun yeterli beslenme, eğitim seviyesi ve devletin sağlık hizmetlerine yatırıma varıncaya dek birçok koşulu ifade eden mükemmel bir göstergedir: ailelerin iyi konutlarda oturduğu, iyi eğitilmiş (iyi beslenen) ebeveynlerin bebeklerini gereği gibi beslediği, tıbbi hizmetlere ulaşabildiği ülkelerde çok az sayıda bebek ölür. Doğal olarak doğumda ömür uzunluğu beklentisi de bu kritik etkenlerin uzun vadeli etkilerini nicelik olarak ifade

(1876-1950) 1902'de aldığı havalandırma cihazı (klima) yıllarca sanayi uygulamalarıyla sınırlı oldu. Evlerde kullanılmak üzere küçültülmüş ilk birimler 1950'lerde ABD'de piyasaya çıktı, klimaların yaygın olarak benimsenmesi Amerika'da Güneş Kuşağı'nı kuzey eyaletlerinden kitlesel göçe açtı, tropik altı ve tropikal turistik yerlerin cazibesini artırdı (Basile 2014). Ev tipi klimalar bugün sıcak ülkelerin kent bölgelerinde de yaygın olarak

eder. Eğitim ve okur yazarlık verileri o kadar açıklayıcı değildir: Okula kayıt oranları erişim hakkında bilgi verir, ama nitelik hakkında bir şey söylemez, başarıyla ilgili ayrıntılı araştırmalar (örneğin OECD'nin Uluslararası Öğrenci Değerlendirme Programı PISA gibi) çoğu ülkeyi kapsamaz. Bir diğer seçenekse UNDP'nin doğumda ömür beklentisi, yetişkin okur yazarlığı, eğitim kurumlarına kayıt oranlarını ve kişi başına GSYH'yi birleştiren İnsani Gelişim Endeksi'ni (Human Development Index / HDI) kullanmaktır.

Bu ölçütlerin ortalama enerji kullanımıyla karşılaştırılması bazı önemli sonuçlara varmamızı sağlar. Bazı toplumlar kişi başına yıllık 40-50 GJ gibi düşük bir enerji kullanımıyla yeterli beslenme, temel sağlık ve eğitim hizmetleri ve düzgün bir hayat kalitesi sağlamayı başarmıştır. Nispeten düşük bir bebek ölüm oranı olan 1.000 yenidoğanda 20 ölüm; kadınların ömür beklentisinin 75 yılın üstüne çıkarak nispeten yüksek olması ve HDI'de 0,8'in üstüne çıkmak kişi başına 60-65 GJ ile başarılabilir, dünya çapında en yüksek oranlar (bebek ölüm oranı olarak 10/1.000, kadınların ömür beklentilerinin 80 yaşın üstüne çıkması, HDI'nın 0,9'un üstünde olması) kişi başına en az 110 GJ enerji kullanımı gerektirir. Temel hayat kalitesinde bu seviyenin üstünde fark edilebilir bir iyileşme olmaz.

Dolayısıyla enerji kullanımı hayat kalitesiyle ancak gelişimin daha düşük aşamalarında gayet çizgisel bir ilişki içindedir (Nijer'de hayat kalitesinden, Malezya'da hayat kalitesine). Verilen değerler kişi başına 50 ile 70 GJ arasında en uyumlu çizgilerinde ayrışsı bir şişme olduğunu, bunun ardından getirilerin azaldığını, en yukarıda kişi başına 100-120 GJ üstünde bir plato bulunduğunu göstermektedir (incelenen hayat kalitesi değişkenine bağlı olarak) (Şekil 6.20). Bu da enerji tüketiminin hayat kalitesinin iyileştirilmesine etkisinin (yat sahipliğiyle değil, gerçekten



Şekil 6.20 2010'da kişi başına enerji tüketimi ve insani gelişim endeksi. UNDP'den (2015) ve Dünya Bankası'ndan (2015a) alınan veriler.

önemli değişkenlerle ölçülen) zengin ülkelerde baskın olan enerji kullanım oranlarının epeyce altında doygunluk noktasına ulaştığını, 2015'te önde gelen AB ülkeleri ve Japonya'da kişi başına 150 GJ, Avustralya'da kişi başına 230 GJ, ABD'de 300 GJ, Kanada'da 385 GJ civarında olduğunu göstermektedir (BP 2015). Özel enerji kullanımında ilave artışlar gösterişli konutlara (ortalama aile büyüklüğü gerilediğinden, ABD'de ortalama konut büyüklüğü 1950'lerden beri iki katına çıkmıştır) çok sayıda pahalı araca sahip olmaya ve sık sık uçak yolculuğu yapmaya harcanmaktadır.

Daha da dikkat çekicisi Amerika'da yüksek enerji kullanımına, sadece önde gelen AB ülkeleri ya da Japonya'nın (enerji kullanımı ABD'deki oranın yarısıdır) performansı ile değil, orta düzeyde enerji kullanan birçok ülkenin performansı ile karşılaştırıldığında bile düşük olan hayat kalitesi göstergeleri eşlik etmektedir. 2013'te doğan her 1.000 bebekten 6,6'sının ömürlerinin ilk yılında öldüğü ABD, bebek ölüm oranı açısından dünyada 31'inci sırada yer alıyordu; sadece Fransa (3,8), Almanya (3,5), Japonya'nın (2,6) gerisinde değildi, Yunanistan'daki bebek ölüm oranının iki katı kadar yüksek bir orana sahipti (CDC 2015). Daha da beteri ABD'de ömür uzunluğu beklentisi dünya çapında 36'ıncı sıradaydı, her iki cinsiyet de ortalama 79,8 yıl yaşıyordu, bu rakam Castro'nun Kübası'ndan (79,4) pek de iyi olmadığı gibi, Yunanistan, Portekiz ve Güney Kore'deki rakamın gerisinde kalıyordu (WHO 2015a).

OECD ülkelerinde öğrencilerin eğitsel başarıları PISA ile düzenli olarak değerlendirilir, son sonuçlar Amerika'da 15 yaşındaki öğrencilerin sıralamada Rusya, Slovakya ve İspanya'dakilerin gerisinde kaldığını, Alman, Kanadalı ya da Japon gençlerden çok çok geride olduklarını göstermektedir (PISA 2015). ABD'li çocuklar fen bilimlerinde OECD ortalamasının hemen altındadır (ortalama 501, ABD 497); okumada ortalamanın zar zor üstündedir (ortalama 496, ABD 498), nüfusu zengin bütün Batı ülkelerininse çok gerisinde yer almaktadır. Bütün incelemeler gibi PISA'nın da kendisine özgü zayıflıkları vardır, ama sıralamada büyük farklılıklar olduğu açıktır: Amerika'da yüksek enerji kullanımının ülkenin eğitsel başarıları üstünde yararlı bir etkisi olduğu yönünde en ufak bir emare bile yoktur.

Siyasal Etkiler

Modern toplumların (gerekli miktarda, bugün şaşmaz biçimde çok büyük miktarda dağıtılan) kesintisiz, güvenilir ve ucuz fosil yakıt ve elektrik kaynaklarına bağımlı olmaları, ülkelerin içlerinde ve uluslararası arenada çok sa-

yıda siyasal kaygı ve karşılığa yol açmıştır. Herhalde en genel kaygı, yüksek düzeyde bütünleşme sonucu karar alma gücünün hükümette, girişimlerde ya da orduda yoğunlaşmasıdır. Adams'ın (1975, 120-121) belirttiği üzere “daha fazla enerji yüklü süreçler ve biçimler bir topluma girdiğinde, bunlar üzerindeki denetim oransızca birkaç kişinin elinde yoğunlaşır, öyle ki büyük miktarda enerji salımının gerisinde giderek daha az sayıda bağımsız karar vardır.”

Fakat bu yoğunlaşmış denetim, tek bir bireyin elinde toplanır, o da bunları saldırgan ve yıkıcı bir biçimde kullanmaya karar verirse çok daha büyük tehlikeler doğar. Bu denetimlerin yanlış yönetilmesi insanların muazzam acılar çekmelerine, büyük bir emek ve kaynak israfına, çevrenin zarar görmesine, kültürel bir mirasın yıkılmasına neden olabilir. Denetimin yıkıcı güçleri serbest bırakacak şekilde, böyle aşırı bir biçimde yoğunlaşmasının örnekleri tarihte tekrarlanan bir olgudur; sırf verilen insan kayıplarıyla ölçüldüğünde, on altıncı yüzyılda İspanya krallarının aldığı kararlar, Napoléon Bonaparte'ın (1769-1821) kararları, Kaiser II. Wilhelm'in (1859-1941) ya da Adolf Hitler'in (1889-1945) kararları milyonlarca kişinin ölmesine neden olmuştur. İspanyolların Amerika kıtalarını fethetmesi nihayetinde doğrudan (savaş meydanındaki ölümler ve köleleştirme nedeniyle) ve dolaylı (bulaşıcı hastalıklar ve açlık nedeniyle) milyonlarca kişinin ölmesine neden olmuştur (López 2014); Napoléon'un seri saldırganlığı en az 2,5 milyon, en fazla 5 milyon kişinin hayatını kaybetmesine yol açmıştır (Gates 2011); Prusya'nın saldırganlığı Birinci Dünya Savaşı'nda 17 milyon kişinin ölmesiyle sonuçlanmıştır, İkinci Dünya Savaşı'nda verilen asker ve sivil toplam kayıp sayısı 50 milyona yaklaşmıştır (War Chronicle 2015).

Ama çılginlıklarını daha fazla fossil yakıt ve elektrik akışıyla korkunç gerçekliklere dönüştürebilmiş iki komünist diktatörün karşı konulmamış kararları, denetim yoğunlaşmasının yarattığı tehlikelere verilebilecek, eşi menendi görülmemiş örneklerdir. Stalin 1953'te öldüğünde SSCB'nin enerji kullanımı, ülkenin iç savaştan çıktığı 1921'deki toplamın 25 katını aşıyordu (Clarke ve Dubravko 1983). Ne var ki büyük generalin paranoyası on milyonlarca kişinin büyük tasfiyelerle öldürülmesine, koskoca nüfusların yeniden iskanına (Kırım Tatarları, Volga Almanları, Çeçenler), gulag imparatorluğuna ve dünyanın en zengini olma potansiyeline sahip bir ülkenin ekonomik olarak güçten düşmesine yol açtı; ölümlerin toplam sayısı asla kesin olarak hesaplanamayacak, ama en az 15-20 milyon olduğu tahmin edilmektedir (Conquest 2007).

Aynı şekilde Mao Zedong 1976'da öldüğünde, Çin'in enerji üretimi 1949'daki toplamdan 20 kat daha fazlaydı (Smil 1988). Ama Büyük Dümençi'nin sanrıları İleri Doğru Büyük Sıçrama sırasında peş peşe ölüm dalgalarını beraberinde getirdi, ardından insanlık tarihinin en korkunç açlığı yaşandı, 1959 ile 1961 arasında 30 milyon Çinli hayatını kaybetti (Yang 2012) – sonra da Kültür Devrimi'nin getirdiği yıkım yaşandı. Yine kesin toplamın kaç olduğu asla bilinemeyecek, ama 1949-1976 dönemindeki toplam ölü sayısı 50 milyona yakın olabilir (Dikötter 2010). Nihai tehdit (büyük güçler arasında termonükleer bir savaşın patlak vermesi) olasılığı, Amerikan ve Rus savaş başlıklarının azaltılması sayesinde büyük oranda azalmış olsa da varlığını hâlâ sürdürüyor, fırlatma kararı da her iki tarafta çok küçük bir grubun elinde bulunuyor.

Yoğunlaşmış enerji akışı kontrollerinin küresel çaptaki siyasal ve ekonomik sonuçlarını, OPEC'in (Petrol Üreten Ülkeler Örgütü) 1973'te aldığı kararlardan daha iyi gösterebilecek başka bir şey yoktur. Ham petrolün modern ekonomilerdeki önemi, birkaç Ortadoğu ülkesinin küresel ihraç piyasasına hakim olduğu düşünülürse birkaç bireyin, özellikle de muazzam petrol üretim kapasitesiyle OPEC'in yönüne hakim olan Suudi Arabistan'da bulunan birkaç bireyin kararlarının küresel refah açısından derinden etkileyici sonuçlar doğurması kaçınılmazdır. OPEC'in imtiyaz ücretlerinin düşüklüğünden memnun olmaması, sonrasında 1973-1974'te dünya petrol fiyatlarının beş katına çıkarılması, arkasından 1979-80'de neredeyse dört katına çıkarılması, tüm dünyada yüksek enflasyon ve ekonomik büyümenin ciddi bir biçimde azalmasının damgasını vurduğu ekonomik bir alt üst olma dönemi başlattı (Smil 1987; Yergin 2008).

Buna cevaben Batı'daki bütün büyük petrol ithalatçıları ve Japonya Uluslararası Enerji Ajansı'nın koordine ettiği, stratejik petrol rezervleri kurulmasını öngören (bazı ülkeler OPEC ülkeleriyle daha yakın ikili ilişkiler kurulmasını da teşvik etmiştir) acil enerji paylaşım anlaşmaları düzenlediler ve alternatif enerji kaynaklarını teşvik ederek ülke içinde yakıt bakımından kendi kendine yeterli olma çabasını sübvansettiler. Fransa'nın nükleer elektrik geliştirmesi ve Japonya'nın enerji tutumluluğu çabası özellikle dikkat çekici ve etkili hamleler oldu. Ama Çin'in hızlı ekonomik yükselişi (bu ülke 1994'te net petrol ithalatçısı haline geldi) ve gerek Alaska'da gerek Kuzey Denizi'nde geleneksel petrol havzalarının üretimlerinin gerilemesi dünya petrol fiyatlarının Temmuz 2008'de bir kez daha rekor bir düzeye çıkıp varil

başına 145 dolar olmasının ardındaki kilit nedenlerdi; 2008 Sonbaharı'nda yaşanan ekonomik krizle son bulan bir yükseliş oldu bu, Aralık 2008'de petrol fiyatı varil başına 30 dolar bile değildi.

Ekonomiler toparlanır, Çin'in talebi yükselmeye devam ederken petrol fiyatları Temmuz 2014'te bir kez daha varil başına 100 doların üstüne çıktı, ama sonra talebin gerilemesi ve arzın artması (büyük oranda, hidrolik parçalama sayesinde killi şistten petrol üretiminin hızla artması sonucu ABD'nin dünyanın en büyük petrol üreticisi olarak yeniden yükselmesi nedeniyle) derinden bir tersine dönüşe neden oldu. Ama bu kez kilit bir fark söz konusuydu: Suudi liderler ülkenin küresel pazardaki payını korumak için geçmişte olduğu gibi üretimi kesip fiyatı artırmak yerine, azami düzeyde üretimi sürdürmeye karar verdi. Bir kez daha birkaç kişinin aldığı kararlar, tüm dünyada petrol ihracatına ağırlıklı olarak bağımlı ülkelerin yanı sıra ABD ve Kanada da dâhil olmak üzere OPEC üyesi olmayan bütün petrol üreticilerinde de siyasal istikrar açısından önemli sonuçlar doğurdu.

Petrol fiyatlarının gerilemesi bir kez daha OPEC'in sonunun yakın olduğu beklentilerini gündeme getirmiştir; ama ham petrol rezervlerinin son derece eşitsiz bir biçimde dağılmış olması (yirmi birinci yüzyılda önemini yitirmemiş, yirminci yüzyıla özgü başlıca kaygılarından biridir bu) hâlâ Ortadoğulu üreticilerin lehinedir. Basra Körfezi bölgesi görülmemiş bir özelliğe sahiptir: Dünyanın en büyük 15 petrol havzasından 12'sini barındırmaktadır, 2015'te dünyanın sıvı petrol rezervlerinin yaklaşık yüzde 65'ine sahipti (BP 2015). Bu zenginlikler bölgenin istikrarına daima ilgi duyulmasını açıklar. Bu arzu, kadim etnik grupları kesen, karmaşık dinsel düşmanlıkları bir araya getiren keyfi sınırlarla birbirinden ayrılmış yapay devletlerden oluşan bölgenin neredeyse kronik bir istikrarsızlık içinde olması nedeniyle muazzam derecede karmaşık bir hal almıştır.

İkinci Dünya Savaşı sonrasında bölgeye dışarıdan yapılan müdahaleler Sovyetler'in İran'ın kuzeyini alma girişiminde bulunmasıyla başladı (1945-1946). Amerikalılar Lübnan'a iki kez, 1958 ve 1982'de çıkarma yaptılar, kararlılıkları Beyrut'taki karargâhlarının 1983'te tek bir terörist saldırıya maruz kalmasıyla kırıldı (Hammel 1985). Batı ülkeleri İran'ı (1979 öncesinde, Şah Rıza Pehlevi'nin hükümdarlığının son on yılında) ve ayrıca Suudi Arabistan'ı yoğun bir biçimde silahlandırıdılar, Sovyetler de aynı şeyi Mısır, Suriye ve Irak'ta yaptı. Batı'nın desteği (silahlar, istihbarat ve kredi) İran-Irak savaşı (1980-1988) sırasında Irak'a büyük yarar sağladı. Bu mü-

dahale örüntüsü 1990-1991’de Irak’ın Kuveyt’i işgal etmesine son vermek amacıyla ABD liderliğinde, BM’nin onayıyla gerçekleştirilen Çöl Kalkanı ve Çöl Fırtınası operasyonları ile zirveye tırmandı (CMI 2010).

Irak bu hamleyle kontrolü altındaki petrol rezervlerini iki katına çıkarmış, küresel toplamın yaklaşık yüzde 20’sine sahip olmuştu. Irak’ın ilerlemesi yakındaki Suudi petrol havzalarına, hatta belki de, dünya petrol rezervlerinin dörtte birini kontrol eden Suudi monarşisinin varlığına ciddi bir tehdit yöneltiyordu. Ama Saddam Hüseyin hızla yenilgiye uğratılmasının ardından iktidarda kaldı, 11 Eylül saldırıları sonrasında başka saldırılar olabileceği yönünde korkular (ki daha sonra Irak’ta hiç kitle imha silahı bulunamayınca yersiz oldukları anlaşıldı) ABD’nin Mart 2003’te Irak’ı işgal etmesine yol açtı, ardından yıllar süren ülke içi şiddeti takiben nihayetinde ülke sözüm ona İslam Devleti’ne kaptırıldı. Fakat bu bölümde biraz daha ileride, Lesser’le (1991) hemfikir olarak Ortadoğu’daki çatışmalarda görünürde bu kadar öne çıkan kaynaklarla ilgili amaçların tarihsel olarak, daha geniş çaplı stratejik amaçlarla belirlendiğini, tersinin geçerli olmadığını savunacağım. OPEC’teki Arap ülkelerinin petrolü siyasal bir silaha çevirme hatasına düşmeleri (Ekim 1973’teki Arap-İsrail Yom Kippur Savaşı sonrasında ABD ve Hollanda’ya karşı bir petrol ambargosu uygulamaları) ideolojik bir mesaj vermek için enerji arzını kullanmanın ilk örneği değildi.

Elektrik ışığının sembolik gücü büyük ABD şirketleri ve Almanya’nın Nazi partisi gibi çok farklı aktörler tarafından kullanılmıştır. Amerikalı sanayiciler ışığın gücünü ilk kez 1894’te Chicago’daki Columbia Fuarı’nda, sonra büyük şehirlerin merkezini “Beyaz Yollar”la kaplayarak gösterdi (Nye 1992). Naziler 1930’lardaki kitlesel parti gösterilerine katılan kişileri hayrete düşürmek için ışık duvarları kullanmışlardı (Speer 1970). Elektrik getirme, Lenin’in Komünist devlet biçimi arayışı ve Franklin Roosevelt’in Yeni Düzeni gibi birbirinden çok farklı siyasal idealleri temsil eder hale geldi. Lenin hedefini şu sloganda özetlemişti: “Komünizm Sovyetlerin iktidarı ve elektrikleendirme demektir.” Sovyetlerin devasa hidroelektrik projeleri inşa etme tercihleri SSCB’nin yıkılması sonrasında Mao sonrası Çin’de canlı tutuldu. Roosevelt ekonomik iyileşmenin bir aracı olarak baraj inşa etme ve kırsal kesime elektrik götürme faaliyetlerine federal kurumları da dâhil etti; bu projelerin bir bölümü ülkenin en geri bölgelerindeydi (Lilienthal 1944).

Silahlar ve Savaşlar

Silah üretimi önde gelen sanai faaliyetlerden biri haline gelmiştir, ağırlıklı olarak ileri araştırmalarla desteklenen bir faaliyettir ve bütün büyük ekonomiler büyük ölçekli silah ihracatçıları haline de gelmiştir. Bu harcamaların ancak bir bölümü gerçek güvenlik ihtiyacıyla açıklanabilir, yatırımlar ve vasıflı insan gücünün israfı ve yanlış yerlere harcanması (en başta da yeni savaş biçimleriyle ilgili olmayan silahların geliştirilmesi, örneğin ağır tanklar cihatçı terörizme verilecek en iyi karşılık değildir) modern silah tedariki tarihine damgasını vurmuştur. Tahmin edileceği üzere, yeni yakıtlar ve yeni aslı itici güçlerin sağladığı birçok teknik ilerleme hızla yıkıcı amaçlar için benimsenmiştir. Bunlar önce mevcut tekniklerin gücünü ve etkisini artırmıştır. Sonra görülmemiş bir menzil, hız ve yıkıcı güce ulaşabilecek yeni silah sınıfları tasarlanmasını mümkün kılmıştır.

Bu çabaların zirve noktası, muazzam büyüklükte nükleer silahların yapılması ve Dünya üzerinde herhangi bir hedefe ulaşma kapasitesine sahip kıtalar arası balistik füzelerin kullanılması olmuştur. Modern silahların yıkıcılığının ivme kazanması, on dokuzuncu yüzyıl ortası ve yirminci yüzyıl ortasına ait tipik silahları yarım yüzyıl önceki silahlarla karşılaştırdığımızda gayet iyi görülür. Amerikan İç Savaşı (1861-1865) sırasında kullanılan başlıca silahlar, piyade tüfeği ile 5 kiloluk ağır tüfekler (her ikisi de ağızdan yüklemeli, düz namlulu silahlardı) Napolyon Savaşı gazilerine epey tanıdık gelirdi (Mitchell 1931). Oysa tersine İkinci Dünya Savaşı'nda savaş meydanlarına hakim olan silahlardan (tanklar, savaş ve bombardıman uçakları, hava ikmal uçakları ve denizaltılar) sadece denizaltılar 1890'larda mevcuttu, o da daha deney aşamasında. Bu gelişmelerin enerji boyutuna örnekler vermenin aydınlatıcı bir yolu, sıklıkla kullanılan silahların fiili kinetik ve patlayıcı güçlerini karşılaştırmaktır.

Kinetik güç karşılaştırmasının dayanağı olarak (dördüncü bölümde gösterdiğimiz üzere), sanayi öncesi dönemde en yaygın el silahlarının, (yaylarla fırlatılan) oklar ile kılıçların kinetik enerjilerinin sadece 10^1 J düzeyinde olduğunu (çoğunlukla 15 ve 75 J arasında değiştiğini), ağır bir yaydan fırlatılan bir okun bir hedefi 100 J kinetik enerjiyle vurabileceğini hatırlamak yararlı olur. Ama tüfeklerin ağızdan fırlatılan kurşunların kinetik enerjileri 10^3 J seviyesindedir (10 ilâ 100 kat yüksektir); modern tüfeklerin fırlattığı toplarsa (tanklara yüklenenler de dâhil) 10^6 J düzeyinde performans gösterir. Yarım düzine kadar silah için yapılan hesaplamalar **Kutu 6.13**'te gösterilmiştir: Top-

lar için verilen değerler sadece fırlatılanların kinetik enerjisini yansıtmaktadır, taşıyabilecekleri patlayıcıların enerjileri hesaba katılmamıştır.

Katı ya da sıvı yakıtların itici gücüyle fırlatılan roketler ve füzeler verdikleri hasarın büyük bölümüne, kinetik enerjileri değil savaş başlıklarının hedef gözeterek patlaması nedeniyle yol açar, ama İkinci Dünya Savaşı sırasında kullanılan ilk (kılavuzsuz) Alman V-1 füzeleri patlamayınca, etkilerinin kinetik enerjisi 15-18 MJ düzeyinde gerçekleşti. Yüksek kinetik enerjiye sahip bir nesnenin olağanüstü bir hasar vermek için kullanılmasının yakın dönemdeki en meşhur örneğiyse, 11 Eylül 2001’de, büyük bir Boeing yolcu uçağının (767 ve 757) onu kaçırın cihatçı teröristler tarafından Dünya Ticaret Merkezi kulelerine yönlendirilmesi idi. Kuleler bir jet uçağı çarpmasını kaldıracabilecek şekilde tasarlanmıştı, ama Newark, La Guardia ya da JFK havaalanlarına yaklaşırken yolda kaybolmuş olabilecek, yavaş seyreden (saniyede 80 mil) bir Boeing 707 düşünölmüş bu hesaplamalarda. Boeing 767-200 707’den sadece yüzde 15 daha ağırdı, ama uçak kuleye en az saniyede 200 mil hızla çarptı, bu nedenle de kinetik enerjisi 707’ninkinden en az yedi kat daha yüksekti (3,5 GJ ile kabaca 480 MJ arası).

Böyle bile olsa kuleler çarpışmanın etkisiyle yıkılmadı, zira uçaklar koca bir ağaca çarpan kurşunlar gibi iş görmüştü: Devasa büyüklükte bir yapıyı itemezlerdi, ama önce dış sütunları yıkarak binaya girmişlerdi. Karim ve Fatt uçağın baştaki kinetik enerjisinin yüzde 46’sının dış sütunlara hasar vermekte kullanıldığını, sütunlar en az 20 mm kalınlığında olsa yıkılmayacaklarını göstermiştir. Dolayısıyla kulelerin yıkılmasına yakıtın yanması (50 tondan fazla kerosenin yanması, yani 2TJ’den fazla enerji) ve binanın içinde-

Kutu 6.13
Patlayıcılarla itilen topların kinetik enerjileri

Silah	Fırlatma	Kinetik enerjisi (J)
Amerikan İç Savaşı’nda kullanılan tüfekler	Kurşun	1×10^3
Saldırı tüfeğı (M16)	Kurşun	2×10^3
On sekizinci yüzyılda kullanılan toplar	Demir top	300×10^3
Birinci Dünya Savaşı havantopu	Şarapnel	1×10^6
İkinci Dünya Savaşı, ağır AA tüfeğı	Yüksek patlayıcı şarapnel	6×10^6
M1A1 Abrams tankı	Seyreltilmiş U top mermisi	6×10^6

ki yanıcı maddelerin yanması neden olmuş, bu da yapıda kullanılan çeliğin termal olarak zayıflamasına, uzun döşeme kirişlerinin tektip olmayan bir biçimde ısınmasına yol açmış, yer yer ısınma zeminin çökmesini beraberinde getirirken çöküşün serbest düşüş hızında gerçekleşmesine neden olmuş, böylece kuleler sadece 10 saniye içinde yıkılmıştır (Eagar ve Musso 2001).

Modern silahların patlayıcı gücü baruttan daha güçlü bileşiklerin icat edilmesiyle birlikte artmaya başladı: bunlar da kendi kendilerine oksitleniyordu, ama yüksek patlama ivmeleri bir şok dalgası yaratıyordu. Bu yeni kimsayasallar sınıfı, selüloz, gliserin, fenol ve toluen gibi organik bileşenlerin nitratlanmasıyla hazırlanmıştı (Urbanski 1967). Ascanio Sobrero 1846'da nitrogliserini yaptı, J. F. E. Schultze de 1865'te nitroselülozu geliştirdi, ama nitrogliserinin pratik kullanımı ancak Alfred Nobel'in iki icadı sayesinde mümkün oldu: Bu bileşiğin (kendiliğinden geçirgen bir madde olan) ince silisli toprakla karıştırılıp dinamitin elde edilmesi ve Nobel ateşleyicisi denilen kullanışlı bir ateşleyicinin keşfedilmesi (Fant 2014).

Bileşimine bağıli olarak barutun patlama ivmesi saniyede sadece bir-iki yüz mil olabilir, ama dinamitinki saniyede 6.800 mildir. Trinitrotoluen (TNT) 1863'te Joseph Wilbrand tarafından sentezlenmiş ve on dokuzuncu yüzyıl sonunda bir patlayıcı olarak kullanılmıştı (patlama ivmesi saniyede 6.700 mildi, nükleer öncesi en güçlü patlayıcı siklonit ise (siklotrimetilentritramin ya da patlama ivmesi saniyede 8.000 mil olan RDX, Royal Demolition Explosive) ilk kez 1899'da Hans Henning tarafından yapılmıştır. Bu patlayıcılar o zamandan beri top mermilerinde, mayınlarda, torpidolarda ve bombalarda kullanılır, son yıllarda intihar bombacılarının bedenlerine de sarılmaktadır. Ama otomobil ya da kamyonların bomba olarak kullanıldığı birçok terörist saldırı sıradan bir gübre (amonyum nitrat) ile fuel oil'in karıştırılması sonucu gerçekleştirilmiştir: ANFO'nun yüzde 94'ü (oksitleyici bir ajan olarak) NH_4NO_3 , yüzde 6'sı fuel oil'dir; ikisi de kolayca bulunabilen malzemelerdir ve etkileri de olağanüstü bir patlama ivmesine değil, kullanılan patlayıcının kütlesine bağılıdır (Kutu 6.14).

Daha iyi iticiler ile yüksek kalite çeliklerin birleşmesi kara ve donanma toplarının 1860'larda 2 km'nin altında olan menzillerini 1900'de 30 km'ye çıkarmıştır. Uzun menzilli toplar, ağır silahlar ve gemileri iten buhar türbinlerinin birleşmesi yeni ağır savaş gemileri yapmayı mümkün kılmıştır: 1906'da denize indirilen HMS *Dreadnought* bu ağır savaş gemilerinin prototipiydi (Blyth, Lambert ve Ruger 2011). Gemi, (Kraliyet Donanması'nın 1898'den kullanmaya başladığı) buhar türbinleriyle çalışıyordu, 1907'de

Kutu 6.14
Patlayıcı aygıtların kinetik enerjileri

Patlayıcı aygıt	Patlayıcı	Kinetik enerji (J)
El bombası	TNT	2×10^6
Kuşak sarılmış intihar bombacısı	RDX	100×10^6
İkinci Dünya Savaşı'nda kullanılan şarapnel	TNT	600×10^6
Kamyon bombası (500 kg)	ANFO	2×10^9

Mauretania ve *Lusitania*'dan başlayarak Birinci Dünya Savaşı öncesi yıllarda yapılan en büyük yolcu gemileri gibi ve bugün ABD'nin Nimitz sınıfı nükleer uçak gemileri gibi (Smil 2005). Birinci Dünya Savaşı öncesinde yapılmış, dikkat çekici diğer yıkıcı yenilikler arasında makineli tüfekler, denizaltılar ve askeri uçakların ilk prototipleri yer alır. Birinci Dünya Savaşı'nda siperlerde sürekli verilen korkunç kayıplar ağır toplar, makineli tüfekler ve havan toplarının yoğun kullanımının eseri idi. Ne zehirli gazlar (ilk kez 1915'te kullanılmıştır) ne savaş uçakları ve tanklarının ilk yoğun kullanımı (1916'da, sonra ağırlıklı olarak ancak 1918'de) ön cephe saldırılarında kullanılan bu büyük ateş gücünün etkisini kıramadı (Bishop 2014).

İki savaş arasındaki yıllarda tanklar, savaş uçakları ve bombardıman uçaklarının hızla geliştirilmesine tanık olundu. Tümüyle metal gövdeler ilk dönemlere özgü ahşap, kanvas, tel konstrüksiyonun yerini aldı, uçak taşıma amacıyla inşa edilmiş ilk gemilerse 1922'te çıktı (Polmar 2006). Bu silahlar İkinci Dünya Savaşı'nın saldırganlığını hayata geçirdi. Almanya'nın kazandığı ilk başarılar büyük ölçüde tankların öncülüğünde hızla ilerleyip girilen topraklardı; Japonya'nın 7 Aralık 1941'de Pearl Harbor'a düzenlediği sürpriz saldırı ancak uzun menzilli savaş (Mitsubishi A6M2 Zero, menzili 1.867 km) ve bombardıman uçaklarıyla (menzili 1.407 km olan Aichi 3A2 ile menzili 1.093 km olan Nakajima B5N2) düzenlenebilirdi (Hoyt 2000; National Geographic Society 2001; Smith 2015).

Aynı silah grubu Mihver güçlerinin yenilmesinde de temel önemde olmuştur. İlk olarak Ağustos ve Eylül 1940'ta mükemmel savaş uçakları (Supermarine Spitfires ve Hawker Hurricanes) ile radarlar birleştirildi (Collier 1962; Hough ve Richards 2007). Bunu Amerika'nın taşıyıcı uçakları (1942'deki Midway Savaşı'ndan itibaren) etkili bir biçimde kullanması ile Kızıl Ordu'nun

batıya doğru ilerlemesi sırasında Sovyetler'in yıkıcı tank üstünlüğüne (model T-42) sahip olması izledi. Savaş sonrasında silahlanma yarışı, savaş sırasında jet itiliminin geliştirilmesi, Alman balistik füzelerinin ateşlenmesi (V-2 ilk kez 1944'te kullanıldı) ve ilk nükleer bombaların patlatılmasıyla başladı: Trinity New Mexico'da 11 Temmuz'da denendi, Hiroşima 6 Ağustos 1945'te, Nagasaki de üç gün sonra bombalandı. İlk nükleer bombaların bıraktığı toplam enerji daha önceki patlayıcı silahlardan katbekat üstündü, ama sonraki yılların hidrojen bombası tasarımlarının da kat kat altındaydı.

İlk modern sahra topu, Fransız 1897 model 75 mm'lik havan topu yaklaşık 700 gram pikrik asit dolu, patlayıcı enerjileri 2,6 MJ'ye varabilecek toplar ateşliyordu (Benoît 1996). Herhalde İkinci Dünya Savaşı'nın en tanınmış topu Alman uçaksavar FlaK (*Flugzeugabwehrkanone*) 18'dir, bunun bir versiyonu Tiger tanklarında da kullanılmıştır (Hogg 1997); bu top 4 MJ patlayıcı güce sahip şarapneller fırlatıyordu. Ama İkinci Dünya Savaşı'nın en güçlü patlayıcıları şehirlerin üstüne atılan bombalardı. Flying Fortress'in (Boeing B-17) taşıdığı en güçlü bombanın patlayıcı enerjisi 3,8 GJ'ydi. Ama en büyük hasar 9-10 Mart 1945'te Tokyo'ya yangın bombaları atarak verildi (Kutu 6.15, Şekil 6.21).

Kutu 6.15

Tokyo'nun bombalanması, 9-10 Mart 1945

O zamana kadar düzenlenmiş, bu tür en büyük hava akını olan Tokyo bombardımanında bombalarını alçaktan (yaklaşık 600-750 metre) bırakan 334 tane B-29 bombardıman uçağı kullanıldı (Caidin 1960; Hoyt 2000). Bu bombaların çoğu 230 kg'lık parça tesirli bombaydı, her biri bir polisitiren, benzen ve benzin karışımı olan napalmla dolu 39 tane M-69 yangın bombası bırakıyordu (Mushrush vd. 2000); 45 kg'lık jöleleştirilmiş benzin ve fosfor bombaları da kullanıldı. Kentin üstüne yaklaşık 1.500 ton yangın bileşiğı atıldı, bunların toplam enerji içerikleri napalmin ortalama yoğunluğunun 42,8 GJ/t olduğunu varsayarsak) yaklaşık 60 TJ'ydi, Hiroşima bombasının gücüne yakındı.

Ama napalmin yakılmasıyla salınan enerji şehirde yanıp kül olan ahşap binaların bıraktığı toplam enerjinin sadece küçük bir bölümüydü. Tokyo Metropolitan Polis Departmanı'na göre bu yangında 286.358 bina ve yapı harap oldu (ABD Stratejik Bombardıman Araştırması 1947) ve ihtiyatlı tahminlere göre (250 bin ahşap bina, bina başına sadece 4 ton ahşap, 18 GJ/t kuru kereste) şehirdeki ahşap binaların yanmasının neden olduğu 18 PJ enerji salımı, yangın bombalarının saldığı enerjiden iki büyüklük kertes (300 kat) daha fazlaydı. Harap olan bölgenin büyüklüğü yaklaşık 4.100 hektardı, en az 100.000 kişi öldü. Hiroşima'da harap olan bölge ise toplam 800 hektar büyüklüğündeydi, en iyi tahminlere göre anında ölenlerin sayısıysa 66.000'di.



Şekil 6.21 Mart 1945'teki Tokyo bombardımanı sonrası (Corbis).

Hiroşima bombası, yarısı patlama enerjisi ve yüzde 35'i termal ışıma olan 63 TJ enerji bıraktı (Malik 1985). Bu iki etki çok sayıda kişinin anında ölmesine neden oldu, iyonlaştırıcı radyasyon ise hem anında hem sonradan ölümlere neden oldu. Bomba 7 Ağustos 1945'te saat 08.15'te, yerin 580 metre üstünde patlatıldı; patlama noktasında ısı birkaç milyon santigrattı, geleneksel patlayıcılardaysa bu ısı 5.000 santigrattır. Ateş topu bir saniye içinde azami boyutu olan 250 mile ulaştı, hipo-merkezdeki en yüksek patlama ivmesi saniyede 440 mildi, ulaşılan azami basınçsa $3,5 \text{ kg/cm}^2$ idi (Committee for the Compilation of Materials 1991 / Malzeme Derleme Komisyonu 1991). Nagasaki bombası yaklaşık 92 TJ enerji bıraktı.

Bu silahlar, SSCB'nin 30 Ekim 1961'de Novaya Zemlya üzerinde denediği en güçlü termonükleer bombayla karşılaştırıldığında küçük çaplı görünür: *Çar bombası* 209 PJ enerji salmıştı (Khalturin vd. 2005). Üstünden 15 ay geçmeden Nikita Kruşçev Sovyet bilim insanlarının ondan iki kat daha güçlü bir bomba yaptıklarını açıkladı. Patlayıcı güç karşılaştırmaları jul üzerinden değil TNT eşdeğerliğiyle yapılır (1 ton TNT = 4.184 GJ): Hiroşima

bombası 15 kt TNT'ye eşdeğer güçteydi, *Çar bombası* ise 50 Mt TNT'ye. Kıtalararası füzelerin tipik savaş başlıklarının gücü 100 kt ile 1 Mt arasında değişir, ama ABD denizaltılarından fırlatılan Poseidon ya da Rus SS-11 gibi füzelerde 10 kadar savaş başlığı taşınabilir. Patlayıcı silahların azami yıkıcılığının tırmanışını gösteren dehşet verici merdivende salınan enerjinin büyüklüğünü vurgulamak amacıyla bilimsel yazım biçimini (üsleri) kullanmadım (**Kutu 6.16**).

İki nükleer süper güç nihayetinde toplam yıkıcı enerjileri 20 EJ'yi bulan yaklaşık 5.000 nükleer savaş başlığı ve kısa menzilli füzelerde 15.000'i aşkın başka nükleer savaş başlıkları toplamıştır. Bu akıldışı bir aşırı beceridir. Victor Weisskopf'un dikkat çektiği üzere (1983, 25) "Nükleer silahlar savaş silahları değildir. Sahip olabilecekleri yegâne amaç, diğer tarafın kullanmasını caydırmaaktır, bu amaca hizmet etmeye çok daha azı da yeter." Ne var ki bu aşırılık aslında Batı için, kimsenin kazanmayacağı aşikâr küresel bir termonükleer savaş engelleyen kuvvetli bir caydırıcı olarak iyi bir iş görmüştür.

Gelgelelim nükleer bombaların geliştirilmesi muazzam bir yatırım ve çoğunlukla fizil uranyum izotopunu ayırmak için çok büyük miktarlarda enerji gerektirdiğinden ulusal hazineleri ciddi ölçüde boşaltmıştır (Kesaris 1977; WNA 2015a). Gazların yayılması yaklaşık 9 GJ / SWU (ayrı çalışma birimi) gerektiriyordu, ama modern gazlı santrifüj tesisleri sadece 180 MJ / SWU gerektirir ve silahlarda kullanılmaya yönelik 1 kg uranyum üretmek için 227 SWU gerektiğinden, bu ikinci oran yaklaşık 41 GJ/kg'ye tekabül

Kutu 6.16
Patlayıcı silahların azami enerjisi

Yıl	Silah	Enerji (J)
1900	Fransız 75 mm modüle 1897 toptakipikrit dolu bomba	2.600.000
1940	Alman 88 mm FlaK'takiAmatol/TNT dolu şarapnel	4.000.000
1944	Boeing B-17'nin taşıdığı en büyük bomba	3.800.000.000
1945	Hiroşima bombası	63.000.000.000.000
1945	Nagazaki bombası	92.400.000.000.000
1961	1961'de denenilen Sovyet Çar bombası	209.000.000.000.000.000

eder. Nükleer savaş başlıkları fırlatmak için kullanılan üçlü (uzun mesafeli bombardıman uçakları, kıtalar arası balistik füzeler ve nükleer denizaltılar) de üretimleri ve işletimleri son derece enerji yoğun olan asli itici güçlerden (jet ve roket motorları) oluşuyordu.

Konvansiyonel silahların üretimi de enerji yoğun malzemeler gerektirir, bu silahların kullanılması için gerekli enerji ikincil fosil yakıtların (benzin, kerosen ve mazot) yakılmasından, onları taşımakta kullanılan makinelere güç veren elektriği ve onları işleten askerlerin donatımı ile tedarikine harcanan enerjiyi de içerir. Sıradan çelik demir cevheri ve pik demirden 20 MJ/kg kadar az bir enerjiyle yapılabilirken, ağır silahlı donanımda kullanılan özel çelik 40-50 MJ/kg gerektirir, seyreltilmiş uranyum kullanımı (zırh delen bombalar ve güçlendirilmiş zırhlı korunum için) çok daha enerji yoğunudur. Modern uçak yapımında kullanılan başlıca malzemeler olan alüminyum ve titanyum (ile alaşımları) sırasıyla 170 ve 250 MJ/kg (alüminyum) ve 450 MJ/kg (titanyum) temsil eder, daha hafif ve güçlü kompozit fiberler genellikle 100 ila 150 MJ/kg gerektirir.

Bu gibi güçlü savaş makineleri açıktır ki asgari düzeyde enerji tüketimi değil, optimum savaş performansı gözetilerek yapılmıştır ve olağanüstü derecede enerji yoğun makinelerdir. Örneğin Amerika'nın 60 tonluk M1/A1 Abrams ana savaş tankı 1,1 MW AGT-1.500 Honeywell gaz türbiniyle çalışır ve (görevine, araziye ve hava durumuna bağlı olarak) 400-800 L/100 km tüketir (*Army Technology* 2015). Karşılaştırırsak, büyük bir Mercedes S600'un gereksinimi yaklaşık 15 L/100 km'dir, Honda Civic ise sadece 8 L/100 km ister. Lockheed'in Savaşçı Şahin'i F-16 ve McDonnell Douglas Hornet F/A-18 gibi manevra gücü son derece yüksek savaş uçaklarında süpersonik hızlarda (1,6-1,8 Mach) uçmak ise o kadar fazla uçak yakıtı gerektirir ki bu uçakların görevlerinin uzaması ancak KC-10, KC-135 ve Boeing 767 gibi büyük tanker uçaklardan uçuş sırasında yakıt yüklemesi yapılmasıyla mümkündür.

Modern savaşların yüksek enerji girdisi gerektiren bir diğer özelliği ise silahların muazzam bir sayıda kullanılmasıdır. 1918'deki en yoğun tank saldırısına yaklaşık 600 tank katılmıştı (o dönem nispeten hafif modellerdi), ama Kızıl Ordu'nun Nisan 1945'te Berlin'e düzenlediği nihai saldırıda yaklaşık 8.000 tank, 11.000 uçak ve 50.000'den fazla top ile roket fırlatıcı kullanılmıştı (Ziemke 1968). Modern savaşların yoğunluğuna bir örnek olarak, Körfez Savaşı sırasında (Çöl Fırtınası Harekatı, Ocak-Nisan 1991) ve

ondan önceki aylarda (Çöl Kalkanı Harekatı, Ağustos 1990-Ocak 1991) 1.300 uçak Irak üzerinde uçmuş, 116 bin sorti yapmıştı (Gulfink 1991).

Genel enerji maliyetlerine büyük katkıda bulunan bir başka olgu çok kısa sürelerde kitlesel askeri teçhizat üretimini artırma zorunluluğu olmuştur. İki dünya savaşı bunun en iyi örneklerini sunar. Ağustos 1914'te Britanya'nın elinde sadece 154 savaş uçağı bulunuyordu, ama dört yıl sonra ülkenin uçak fabrikalarında yaklaşık 350.000 kişi çalışıyor, yılda 30.000 uçak üretiliyordu (Taylor 1989). ABD Nisan 1917'de Almanya'ya savaş ilan ettiğinde, elinde 300'den daha az ikinci sınıf uçak bulunuyordu, bunların hiçbirini makineli tüfek ya da bomba taşıyabilecek çapta değildi, ama üç ay sonra ABD Kongresi yeni savaş uçakları için 22.500 tane Liberty motoru yapılması için görülmemiş düzeyde, 640 milyon dolarlık (2015'teki değeriyle yaklaşık 2 milyar dolar) bir satın alma işlemini onayladı (Dempsey 2015). Amerikan sanayiinin İkinci Dünya Savaşı sırasında ivme kazanması daha da etkileyici oldu.

1940'ın son çeyreğinde ABD Hava Kuvvetleri'ne sadece 514 uçak teslim edildi. 1941'de bu toplam 8.723'ü bulmuştu, 1942'de 26.448 olan bu toplam 1943'te 45.000'i aştı ve 1944'te Amerikan fabrikaları 51.547 yeni uçak teslim etti (Holley 1964). Amerika'nın uçak üretimi, savaş zamanı ekonomisinin en büyük imalat sektörüydü, iki milyon işçi çalışıyordu; savaş sırasında yapılan harcamaların neredeyse dörtte biri bu sektöre akmıştı ve toplam 295.959 uçak üretilmişti. Britanya'nın ürettiği uçak sayısı 117.479, Almanya'nın 111.784, Japonya'nın 68.057'ydi (Ordu Hava Kuvvetleri 1945; Yenne 2006). Nihayetinde müttefik kuvvetlerin zaferi yıkıcı enerjileri toplamakta gösterdikleri üstünlüğün bir sonucu oldu. 1944'e gelindiğinde ABD, SSCB, Birleşik Krallık ve Kanada Almanya ve Japonya'nın üç katı kadar savaş mühimmatı ürettiyordu (Goldsmith 1946). Silahların giderek artan yıkıcılığı ve patlayıcı bırakmanın daha yoğunlaşmış olması, birbirinden ayrı iki olayı ve çatışmada verilen genel kayıpları karşılaştırarak resmedilebilir (Kutu 6.17).

Büyük silahlı çatışmalara harcanan enerji maliyetinin hesaplanması, bu tür toplamlara dâhil edilmesi gerekenlerle ilgili önemli keyfi sınırlamalar yapmayı gerektirir. Nihayetinde, ölümcül tehlike içindeki toplumlar iki ayrı sivil ve askeri sektör çalıştırmaz, çünkü savaş zamanındaki ekonomik seferberlik hemen hemen bütün faaliyetleri etkiler. Eldeki mevcut toplamlara göre yirminci yüzyıldaki çatışmaların ABD'ye toplam maliyeti şöyle gerçek-

Kutu 6.17

Modern savaşlarda verilen kayıplar

Somme Savaşı (Temmuz-19 Kasım 1916) sırasında verilen kayıpların toplam sayısı 1 milyon 403 bindi. Stalingrad Savaşı'nda (23 Ağustos 1942-2 Şubat 1943) verilen kayıpların sayısı 2 milyon 100 bini aşmıştı (Beevor 1998). Savaşlardaki ölüm oranları (bir çatışmanın başlangıcında savaşa sürülen 1.000 askerde verilen kayıplar üzerinden ifade edilir) büyük güçlerin katıldığı ilk iki modern savaş sırasında 200'den az olmuştur (1853-1856'daki Kırım Savaşı ile 1870-1871'de Fransa-Prusya Savaşı); bu rakam Birinci Dünya Savaşı sırasında 1.500'ü, İkinci Dünya Savaşı sırasında 2.000'i geçmişti ve Rusya açısından 4.000'in üstüne tırmanmıştı (Singer ve Small 1972). Almanya Birinci Dünya Savaşı sırasında bir milyon kişide 27.000 savaşı kaybetmişti, ama İkinci Dünya Savaşı sırasında bu rakam 44.000 olmuştur. Modern savaşta verilen sivil kayıplar daha da hızlı artmıştı.

İkinci Dünya Savaşı sırasında sivil kayıpların sayısı yaklaşık 40 milyon olmuştur, toplam 55 milyon kaybın yüzde 70'ini siviller oluştuyordu. Büyük şehirlerin bombalanması birkaç gün ya da saat içinde büyük kayıplara yol açmıştı (Kloss 1963; Levine 1992). Almanya'nın bombardımanlardaki toplam kayıpları 600.000 ölü ve 900.000 yaralıya yaklaşmıştı. B-29 bombardıman uçaklarının geceleri düzenlediği, 10 Mart ile 20 Mart 1945 arasında Japonya'nın dört büyük şehrinde yaklaşık 83 km²'lik alanı dümdüz eden akınlarda 100.000 civarında insan ölmüştü. Tokyo'nun yangın bombalarıyla bombalanmasının ve Hiroşima'ya düzenlenen nükleer saldırının etkilerini daha önce anlatmıştık (bkz. **Kutu 6.15**).

leşt: Doların 2011'deki değeriyle Birinci Dünya Savaşı yaklaşık 334 milyar dolar, İkinci Dünya Savaşı 4,1 trilyon dolar, Vietnam Savaşı (1964-1972) 748 milyar dolar (Daggett 2010). Bu maliyetlerin doların bugünkü değeriyle ifade edilmesi ve bu toplamaların ülkenin GSYH'sinde (düzeltilmiş) baskın enerji yoğunluğu ortalamalarıyla çarpılması bu çatışmaların asgari enerji maliyetine ilişkin yaklaşık değerler verecektir.

Düzeltilmelere gerek duyulur, çünkü savaş zamanındaki sanayi üretimi ve nakliyat üretilen birim başına, ortalama GSYH birimi başına olandan daha fazla enerji tüketilmesine yol açıyordu. Yaklaşıklık olarak söz konusu üç çatışma için 1,5, 2 ve 3 çarpanlarını tercih ediyorum. Bunun sonucunda Birinci Dünya Savaşı'na katılım ABD'nin 1917 ve 1918'deki toplam enerji tüketiminin yaklaşık yüzde 15'ini gerektirmiş, İkinci Dünya Savaşı sırasında toplam enerji tüketiminin ortalama yüzde 40'ı düzeyinde gerçekleşmiş, ama Vietnam Savaşı döneminde toplam enerji tüketiminin yüzde 4'ünü aşmamıştır. Zirveye tırmanan paylar açıkçası daha yüksektir, ABD için 1944'te yüzde 54, SSCB için 1942'de yüzde 76 ve Almanya için 1943'te benzer büyüklükte bir pay arasında gezinir.

Toplam enerji kullanımı ile modern saldırganlık eylemlerinde başarı kazanma (ya da bunların önlenmesi) arasında açık bir korelasyon yoktur. Enerji harcaması ile nispeten hızlı kazanılan bir zafer arasında olumlu bir korelasyon olduğunu gösteren en açık örnek ABD'nin İkinci Dünya Savaşı için seferber olmasıdır; bu seferberliğe harcanan enerji 1939 ile 1944 arasında toplam asli enerji kullanımında yüzde 46'lık bir artışla sağlanmıştır. Ama konvansiyonel anlamda Amerika Vietnam Savaşı sırasında çok daha baskındı; kullanılan patlayıcı miktarı ABD Hava Kuvvetleri'nin İkinci Dünya Savaşı sırasında Almanya ve Japonya'ya attığı bütün bombalardan üç kat daha fazlaydı, ayrıca ABD son teknoloji savaş jetlerine, bombardıman uçaklarına, helikopterlerine, uçak gemilerine ve zehirli gazlara sahipti, ama çok çeşitli siyasal ve stratejik nedenler yüzünden bu baskınlığı bir başka zafere çeviremedi.

Harcanan enerji ile alınan sonuç arasında bir korelasyon bulunmamasının, en açık örnekleri terörist saldırılardır. Silah üretiminin son derece pahalı olduğu ve devletlerin silahları titizlikle koruduğu Soğuk Savaş paradigmasının tam anlamıyla tersine çevrildiği bu saldırılarda teröristler ucuz ve yaygın olarak bulunabilir silahlar kullanır. Birkaç yüz kilo ANFO'dan (amonyum nitrat/fuel oil) oluşan bir kamyonet bombası, elli-altmış kiloluk bir otomobil bombası ya da intihar bombacısının bedenine sarılmış (sıklıkla sivri metal parçalar taşıyan) birkaç kilo ağır patlayıcı onlarca, hatta yüzlerce kişiyi öldürmeye (1983'te Beyrut'taki kışlaya düzenlenen iki bombalı kamyonet saldırısında çoğu ABD'li asker 307 kişi ölmüştü) çok daha fazla sayıda kişiyi yaralamaya ve hedef nüfusu terörize etmeye yeter.

11 Eylül saldırısını düzenleyen 19 teröristin birkaç maket bıçağından başka bir silahı yoktu ve uçuş dersleri dâhil bütün operasyon 500.000 dolar-dan aza mal oldu (bin Ladin 2004, 3) – öte yandan saldırı, en düşük tahminle bile (saldırıdan bir yıl sonra yayınlanan New York City denetçi raporuna göre) kenti doğrudan 95 milyar dolarlık bir yük altına soktu ki buna binalar ve altyapının yenilenmesi için gerekli 22 milyar dolar ile 17 milyar dolarlık ücret kaybı da dâhildi. GSYH kaybı, hisse senedi değerlerindeki gerileme, uçak sanayii ve turizm sektörlerinin kayıpları, yüksek sigorta ve nakliyat bedelleri, artan güvenlik ve savunma harcamalarını da değerlendiren bir bakış açısına göreyse kayıp 500 milyar dolardan fazladır (Looney 2002). Saldırı sonrasında Irak'a müdahale ve ülkenin işgali kısmen bile eklense maliyet toplamı bir trilyon doların üstüne çıkar, saldırı sonrasındaki deneyimlerin gösterdiği üzere hem klasik güçlü silahlar hem son teknoloji akıllı makineler fanatik saiklerle

hareket eden, intihar saldırılarında ölmeye istekli bireyler ya da gruplara karşı sınırlı bir düzeyde kullanılabildiğinden askeri çözüm kolay değildir.

Karşılıklı yıkımın garanti olduğu düşüncesi, iki nükleer süpergücün termonükleer bir savaşa tutuşmamasının başlıca nedeni olmuştur, buna kuşku yoktur, ama öte yandan iki hasmın topladığı nükleer cephaneliğin büyüklüğü, dolayısıyla gömülü enerji maliyetleri akılcı olarak savunulabilecek caydırıcı düzeyin çok ötesine geçmiştir. Nükleer savaş başlıkları ve onları taşıyan aygıtlar (kıtalararası bombardıman uçakları ve balistik füzeler ile nükleer denizaltılar) enerji yoğunudur. Bir büyüklük tahminine göre 1950 ile 1990 arasında ABD ve Sovyetler'in tükettiği bütün ticari enerjinin en az yüzde 5'i bu silahlar ile onları taşıma araçlarının geliştirilmesine ve biriktirilmesine harcanmıştır (Smil 2004).

Ama bu yük iki kat bile yüksek olsa, sınırlı bir mukabele halinde bile patlama, yangın ve iyonlaştırıcı radyasyonun doğrudan etkileri nedeniyle on milyonlarca kayba neden olabilecek bir termonükleer kapışmaya kıyasla kabul edilebilir olduğu savunulabilir (Solomon ve Marston 1986). ABD ile SSCB arasında stratejik tesislerin hedef alınmasıyla sınırlı termonükleer bir kapışma, 1980'lerin sonunda en az 27 milyon, en fazla 59 milyon kişinin ölümüyle sonuçlanabilirdi (von Hippel vd. 1888). Böyle bir olasılık ilk saldırının yapılması, hatta 1960'lar sonrasında düşünülmesi karşısında çok güçlü bir caydırıcı olmuştur.

Maalesef nükleer silahlara atfedilebilecek maliyet, bunların derhal ortadan kaldırılmasıyla son bulmaz: Bu silahların sökülmesi, pahalı bir işlem olan korunmaları ve kirlenmiş üretim yerlerinin temizlenmesi, gelecek yıllarda da sürecektir ve bu operasyonların ABD'ye tahmini maliyeti artmaktadır. Eski SSCB'ye bağlı ülkelerde en ağır kirliliğe uğramış nükleer silah üretim yerlerinin temizlenmesi daha da pahalıya mal olabilir. Talihe bakın ki nükleer savaş başlıklarının sökülmesinin maliyetleri, geri kazanılan fisil malzemenin elektrik üretiminde yeniden kullanılmasıyla çok azaltılabilir (WNA 2014).

Son derece zenginleştirilmiş uranyum (en az yüzde 20-en fazla yüzde 90 U-235 içeren HEU) seyreltilmiş uranyum (çoğunlukla U-238), doğal uranyum (yüzde 0,7 U-235) ya da kısmen zenginleştirilmiş uranyumla karıştırılarak enerji santrallerinde kullanılan düşük miktarda zenginleştirilmiş uranyum (yüzde 5 U-235'ten az) elde edilir. ABD ile Rusya arasında 1993'te yapılan bir antlaşmaya göre (megawatt için megaton) Rusya savaş başlıkları ve stratejik mühimmatından 500 ton HEU'yu (20.000 nükleer bombaya eşdeğer bir mik-

tar) reaktörde kullanılmaya hazır yakıta çevirmiş (ortalama yüzde 4,4 U-235) ve ABD’de sivil enerji reaktörlerinde kullanılmak üzere satmıştır.

Enerji ile savaş hakkındaki bu bölümü, enerjinin savaş nedeni olması hakkında birkaç söz sarf etmeksizin bitiremem. Enerji ile savaş arasında böyle bir bağlantı olduğu yönündeki inançlar gayet yaygındır, ABD’nin 2003’te Irak’ı, Irak petrollerini elde etmek için işgal ettiğinden emin olmamız, bunun tekrar ettiği son örnektir. Tarihçilerin, bu bağlantı hakkında en sık verdikleri örnek Japonların Aralık 1941’de ABD’ye düzenledikleri saldırıdır. Roosevelt yönetimi 1911 tarihli Ticaret ve Seyrüsefer Anlaşması’nı önce (Ocak 1940’ta) feshetti, sonra (Temmuz 1940’ta) uçak benzini ve makine aygıtları ihracatına izni kaldırdı, ardından (Eylül 1940’ta) demir ve çelik parçacıkları ihracatına yasak getirdi. Bu da Japonların savunmayı bıraktığı gerekçeye hâlâ çok uzak düşen bir bakış açısına göre, ülkenin önünde, Sumatra ve Burma’da petrol yataklarıyla zengin Güneydoğu Asya’ya serbestçe saldırabilmek için ABD’ye saldırmaktan başka seçenek bırakmadı.

Ama Pearl Harbor saldırısının öncesinde on yıl kadar süren, 1933’te Mançurya’nın işgaliyle başlayan 1937’de Çin’e saldırıyla devam eden yoğun bir Japon militarizmi dikkat çeker: Japonya saldırgan Çin politikasını terk etseydi ABD petrolüne erişim imkanından yararlanmayı sürdürebilirdi (Ienaga 1978). Tahmin edileceği gibi, modern Japonya’nın tarihini yazan önde gelen isimlerden Marius Jansen ABD ile Japonya çatışmasının tuhaf bir biçimde kendi kendine ortaya çıktığını yazmıştır (Jansen 2000). Hitler’in giriştiği bir dizi saldırının (1938 ve 1939’da Çekoslovakya’ya, 1939’da Polonya’ya, 1939’dan itibaren Batı Avrupa’ya, 1941’de SSCB’ye) ve Yahudilere karşı yürüttüğü soykırımcı savaşın ardında bir enerji kaynakları arayışı olduğunu kim ileri sürebilir?

Stalin’in emirleriyle başlayan Kore Savaşı’nın, Vietnam Savaşı’nın (1954’e kadar Fransa, 1964 ile 1972 arasında ABD Komünist gerillalarla çatışmıştı), Sovyetler’in Afganistan’ı işgal etmesinin (1979-1980), ABD’nin Taliban’a karşı savaşının (2001’de başladı) ya da yirminci yüzyıldaki sınır çatışmaları (Çin-Hindistan, Hindistan-Pakistan, Eritre-Etiyopya ve daha nice) ile iç savaşların (Angola, Uganda, Sri Lanka, Kolombiya) ardında da enerjyle ilgili gerekçeler yoktu. Nijerya’nın ayrılıkçı Biafra’yla (1967-1970) savaşı, Sudan’ın bitmek bilmeyen iç savaşı (bugün artık Sudan-Güney Sudan çatışmasına ve Güney Sudan’ın içinde bir kabile savaşına dönüşmüştür) açıkça bir petrol bileşenine sahip olsa da, her iki çatışma da esasen dinsel ve

etnik düşmanlıklardan kaynaklanır ve Sudan'daki çatışma 1956'da, petrolün keşfedilmesinden yıllarca önce başlamıştır.

Sonunda geriye petrolün yaygın bir biçimde asıl gerekçe olarak görüldüğü iki savaş kaldı. Irak'ın Ağustos 1990'da Kuveyt'i işgal etmesi, Saddam Hüseyin'in kontrolü altındaki konvansiyonel petrol rezervlerini iki katına çıkararak Suudilerin yakında bulunan devasa petrol havzaları (Kuveyt'in hemen güneyinde sahilde ve açık denizdeki Safania, Zuluf, Marjan ve Manifa) açısından ve Suudi krallığının devamı açısından bir tehdit yarattı. Ama petrolden fazlası söz konusuydu ki bunlar arasında Irak'ın nükleer ve konvansiyonel olmayan diğer silahlara sahip olma arayışı (1990'da kimse bundan kuşku duymuyordu) ile yeni bir Arap-İsrail çatışması riski de vardı (Iraklıların İsrail'e düzenledikleri füze saldırıları böyle bir çatışma kışkırtmaya yönelikti). Petrol kaynaklarının kontrol altına alınması 1991'deki Körfez Savaşı'nın asıl amacı idiye, muzaffer ABD ordusu neden denetimsiz ilerlemesini durdurdu, neden en azından Irak'ın güneyindeki en zengin petrol yataklarını işgal etmedi?

Peki ABD'nin 2003'te Irak'ı işgal etmesinin sonuçları ne oldu? ABD'nin Irak petrolü ithalatı 2001'de Saddam Hüseyin hâlâ kontroldeyken 41 Mt ile zirveye tırmanmıştı, işgal sonrasında petrol ithalatı hızla gerilemeyi sürdürdü, 2015'e gelindiğinde 12 Mt'den azdı, ABD'nin yaptığı toplam ithalatın yüzde 3'ü bile değildi (ISEIA 2016b); hidrolik parçalama ABD'yi bir kez daha dünyanın en büyük ham petrol ve sıvı doğalgaz üreticisi haline getirdiğinden beri de hızla azalmaktadır (BP 2016). Hüküm basittir: ABD'nin Irak petrolüne ihtiyacı yoktur, Doğu Asya Irak petrolünün en büyük ihracatçısı olmuştur, yani ABD Çin'in petrol tedarikini güvence altına almak için mi Irak'a girdi? Birçoklarının enerjinin savaşların gerekçesi olduğuna apaçık bir örnek olarak gösterdikleri vaka bile böyle değildir! Sonuç açıktır: Bir kaynak arayışı değil, gerekçeleri haklı olsun olmasın daha geniş çaplı stratejik amaçlar ABD'nin İkinci Dünya Savaşı sonrasında çatışmalara girmesine neden olmuştur.

Çevresel Değişiklikler

Fosil yakıt temini ve kullanımı atmosferin insanlar nedeniyle kirlenmesinin ve sera gazı salımlarının en büyük nedenleridir ve suların kirlenmesine, arazi kullanımında değişiklikler olmasına yol açan başlıca etkenlerdir. Bütün fosil yakıtların yakılması, elbette ki içlerindeki karbonun hızla oksitlenmesi anla-

mına gelir, bu da artan bir CO₂ üretimine neden olur, doğal gaz üretimi ve nakliyatı sırasında daha güçlü bir sera gazı olan metan (CH₄) salınır; fosil yakıtların yakılması sırasında küçük miktarlarda nitroksit de (N₂O) salınır. Kömür yakılması büyük bir parçalı madde, sülfür ve nitrojen oksit (SO_x ve NO_x) kaynağıydı, ama bu gazların durağan salımları bugün artık büyük ölçüde elektronik çöktürücüler, kükürtten arındırma ve nitrojen oksit arıtma süreçleriyle kontrol edilmektedir (Smil 2008a). Böyle bile olsa kömür yakılması hâlâ sağlığa önemli etkilerde bulunmaktadır (Lockwood 2012).

Su kirlenmesinin en önemli nedeni (boru hatlarından, demiryolu vagonlarından, gemilerden, tankerlerden, rafinerilerden) petrol sızıntısına yol açan kazalar ve asit maden drenajıdır. Arazi kullanımındaki büyük değişikliklerin nedenleri yüzeyde kömür madenciliği, büyük hidroelektrik santraller için yaratılan rezervuarlar, yüksek voltajlı aktarım hatları için doğru yol koridorları, sıvı yakıtlar için büyük depolama, rafineri ve dağıtım tesislerinin inşa edilmesi ve daha yakın dönemde de büyük rüzgâr ve güneş enerjisi çiftliklerinin kurulmasıdır. Fosil yakıtlar ve elektrik dolaylı olarak çok daha fazla kirlilik akışından ve ekosistem bozulmasından sorumludur. En önemli kirlenmeler sanayi üretiminden (en başta da demir içerikli metalurji ve kimyasal sentezlerden), tarım kimyasallarından, kentleşmeden ve ulaştırmadan kaynaklanır. Bu etkilerin hem çapı hem yoğunluğu artmaktadır ve bu kirlenmeler çevreyi yerelden bölgeye uzanan bir yelpazede etkilemektedir. Bu kirlenmelerin maliyetleri bütün büyük ekonomileri çevre yönetimine daha fazla dikkat sarf etmeye yöneltmektedir.

1960'lara gelindiğinde bu bozulmalardan biri, Orta ve Batı Avrupa ile Kuzey Amerika'nın doğusunda, büyük ölçüde, kömür yakılan büyük enerji santrallerinin SO_x ve NO_x salımlarının yanı sıra otomotiv salımlarının da yol açtığı asit çökmesi kıtanın yarısı büyüklüğüne ulaştı, 1980'lerin ortasına dek bu çökme zengin ülkelerin karşı karşıya kaldığı en acil çevre sorunu olarak görüldü (Smil 1985, 1997). Bir dizi eylem (elektrik üretiminde sülfürü az kömürlere ve sülfürsüz doğalgaza geçmek, daha temiz benzin ve mazotun kullanılması, otomobil motorlarının daha verimli olması ve büyük kirlenme kaynaklarına gaz sülfürsüzleştirme bacalarının inşa edilmesi asitlenme sürecini durdurmakla kalmadı, ama 1990'lara gelindiğinde bu süreci tersine çevirdi, Avrupa ve Kuzey Amerika'da yağışlar daha az asitli hale geldi (Smil 1997). Ama bu sorun, Çin'in 1980 sonrasında kömür yakmayı büyük miktarda artırmasıyla birlikte Doğu Asya'da 1990 sonrasında yeniden ortaya çıktı.

Antarktika ile onu çevreleyen okyanus üstündeki ozon tabakasının kısmen delinmesi, enerji kullanımıyla ilgili çevresel kaygılar arasında kısa bir süreliğine ilk sırada yer aldı. Gezegeni aşırı düzeydeki ultraviyole ışı-
nımından koruyan stratosferik ozon konsantrasyonunun azalması olasılığı 1974'te doğru bir öngörüyle tahmin edilmiş, bu olgu ilk kez 1985'te An-
tarktika üstünde ölçülmüştü (Rowland 1989). Ozon kaybına büyük ölçüde
(çoğunlukla soğutucu olarak kullanılan) kloroflorokarbonların salımı neden
olur, ama 1987'de etkili bir uluslararası anlaşmanın, Montreal Protoko-
lü'nün imzalanması ve daha az zararlı bileşiklere geçilmesi, çok geçmeden
kaygıları yatıştırdı (Andersen ve Sarma 2002).

Stratosferik ozona yönelik tehdit, çevresel değişimin küresel sonuç-
larıyla ilgili birkaç yeni kaygıdan ilkiydi (Turner vd. 1990; McNeill 2001;
Freedman 2014). Başlıca kaygılar küresel biyoçeşitliliğin yitirilmesinden ok-
yanuslarda plastik birikimine uzanan bir yelpazeye yayılır, ama bir küresel
çevre sorunu 1980'lerin sonundan beri listenin en başında yer almaktadır:
insanların neden olduğu sera gazı salımlarının nispeten hızlı bir iklim de-
ğişikliğine, hepsinden önemlisi troposferik ısınmaya, okyanusların asitlenme-
sine ve deniz seviyesinin yükselmesine neden olması. Sera gazlarının davra-
nış biçimleri ve olası ısıtıcı etkileri on dokuzuncu yüzyıl sonuna gelindiğinde
gayet iyi anlaşılmıştı (Smil 1997). Salımına insanların en büyük katkıda
bulunduğu gaz CO₂'dir, bütün fosil ve biyokütle yakıtlarının verimli bir bi-
çimde yakılmasının nihai ürünü yani; (en başta yağışlı tropikal bölgelerde)
ormanların ve yeşil arazilerin yok edilmesi CO₂ salımlarının ikinci en önemli
kaynağı olmuştur (IPCC 2015).

1850'de, sadece 54 Mt C (CO₂'ye çevirmek için 3,667'yle çarpın)
olduğundan beri, yerküre çapında insanların CO₂ üretimi, fosil yakıtların
yakılmasıyla birlikte katlanarak artmaktadır: Daha önce belirttiğimiz üzere
1900'e gelindiğinde karbon seviyesi 534 Mt'ye yükselmiş, 2010'da 9 Gt'yi
geçmişti (Boden ve Andres 2015). 1957'de Hans Suess ve Roger Revelle şu
sonuca varmıştı:

... insanlar bugün, geçmişte olamayacak, gelecekte de tekrarlanamayacak
kadar büyük ölçekte bir jeofiziksel deney gerçekleştiriyorlar. Yüz milyonlar-
ca yıldır çökelti kayalarda depolanmış organik karbonu birkaç yüzyıl içinde
atmosfere ve okyanuslara geri döndürüyoruz (Revelle ve Suess 1957, 19).

Arka plandaki CO₂ seviyesinin arttığı yönünde, Charles Keeling'in
(1928-2005) örgütlediği ilk sistematik ölçümler 1958'de Hawaii'de Mauna

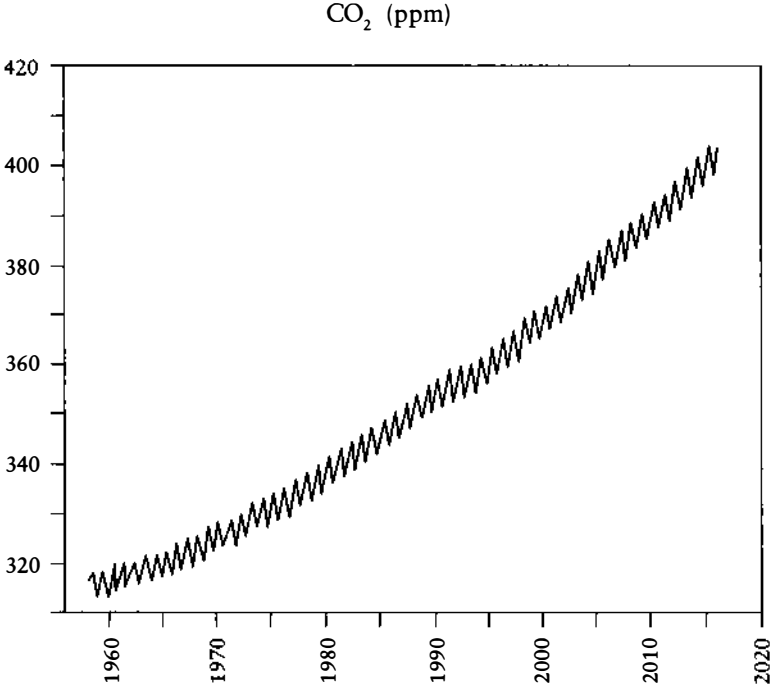
Loa zirvesi yakınlarında ve Güney Kutbu'nda başladı (Keeling 1998). Mauna Loa konsantrasyonları troposferik CO₂'nin artmakta olduğunun küresel bir emaresi olarak kullanılmıştı: Bu yoğunlaşmalar 1959'da yaklaşık 316 ppm'yd, 1988'de 350 ppm'yi geçti, 2014'teyse 398,55 ppm'yd (NOAA 2015; Şekil 6.22). İnsanların faaliyetleriyle salınan diğer sera gazları CO₂'den çok daha küçük miktarlardadır, ama molekülleri dışarı giden kızılaltı ışınları nispeten daha iyi emdiği için (metan son 20 yılda CO₂'den 86 kat, nitroz oksitler 268 kat daha fazla) bileşik katkıları bugün insan kaynaklı ışımsal zorlamanın yaklaşık yüzde 35'ini oluşturmaktadır (Kutu 6.18).

Kutu 6.18

Sera gazları ve troposferik ısının artması

2014'te küresel ölçekte insan kaynaklı ışımsal zorlama düzeyi (sera gazlarının gezegenin enerji dengesini etkileme kapasitesi) 2,936 W/m²'ye ulaştı, CO₂ katkısı yüzde 65'ti (Butler ve Montzka 2015). Bu düzeyde fosil yakıtların payı yüzde 60'tan fazla, arazi kullanımındaki değişikliklerin (en başta ormansızlaşma) payı yüzde 10 ve metan salımlarının (büyük oranda büyükbaş hayvanlardan) payı yüzde 20 olmuştur. Küresel yüzey ısı ortalama ısının artması (okyanus ve karalardan bileşik veriler) 1880 ile 2012 arasında 0,85°C (0,65-1,06°C) bir çizgisel artış olduğunu göstermektedir (IPCC 2015). Küresel salımların gelecekteki düzeyiyle ilgili belirsizlikler ve atmosferik, hidrosferik, biyosferik süreçler ile küresel karbon dengesini yönlendiren etkileşimlerin karmaşıklığı 2100 yılı için ısı ve deniz seviyesi artışlarını tahmin etmeye yönelik güvenilir modeller inşa etmeyi imkânsız kılmaktadır. En son fikir birliği değerlendirilmesine göre (büyük ölçüde gelecekteki salım oranlarına bağlı olarak) yirmi birinci yüzyıl sonuna gelindiğinde (2081-2100) ortalama küresel ısı 1986-2005'te olduğundan en az 0,3-1,7°C yüksek olacaktır, ama 2,6-4,8°C kadar da artabilir (IPCC 2015). Her halükârda Kuzey Kutbu bölgesi daha hızlı ısınmaya devam edecektir.

Açıktır ki oranların daha düşük olması, ayak uydurmayı kolaylaştırırdı, olası en büyük artışlar da birçok ciddi sorun yaratacaktır. Küresel ısınmaya bağlanabilecek çok sayıda değişiklik, yeni yağış örüntülerinin gözlenmesi ve sahil şeritlerinin su altında kalmasından tutun, ekosistem sınırlarının değişmesine, sıcak iklimlere özgü taşıyıcılı hastalıkların yaygınlaşmasına varıncaya dek geniş bir yelpazeye yayılır. Bitkilerin verimliliğinde değişiklikler, sahillere yakın mülklerin kaybedilmesi, sektörel işsizlik, etkilenen bölgelerden geniş ölçekli göçler de kilit ekonomik sonuçlar olacaktır. İnsan kaynaklı sera gazı salımları için kolay bir teknik çözüm yoktur (havadaki CO₂'nin tutulması ya da yeraltına CO₂ depolanması gibi; her ikisinin de etkili olabilmesi için yılda 10 Gt'den fazla CO₂'nin bu şekilde halledilmesi gerekir). Bu değişikliklerle baş etmekte başarılı olması olası yegâne yaklaşım önceden görülmemiş düzeyde bir işbirliği yapmaktır. Kaldı ki, bu kaygı verici sorun insan ilişkilerinin yönetilmesinde yeni bir başlangıç noktasının bulunması yönünde, önceden niyet edilmemiş, temel önemde bir gereğe de sunmaktadır.



Şekil 6.22 Hawaii'de Mauna Loa Gözlemevi'nde Ölçülmüş Atmosferik CO₂ (NOAA 2015).

Hemfikir olunan konum şudur ki küresel ısınmanın en kötü sonuçlarından kaçınmak için, ortalama ısı artışı 2°C'den azla sınırlı olmalıdır, ama bu fosil yakıt yakımının derhal ve ciddi bir biçimde kısılmasını, karbon dışı enerji kaynaklarına hızlı bir geçiş yapılmasını gerektirir; fosil yakıtların küresel enerji sistemindeki baskınlığı ve düşük gelirli toplumların muazzam düzeydeki enerji gereksinimleri dikkate alındığında imkânsız olmamakla birlikte, son derece ihtimal dışı bir gelişmedir bu: Düşük gelirli toplumların büyük çaptaki yeni ihtiyaçlarının bir bölümü yenilenebilir enerji üretiminden elde edilebilir, ama ulaştırma yakıtları, hammaddeler (amonyak, plastikler) ya da demir cevheri eritmek için kitlesel ölçekli, bütçeye uygun bir alternatif yoktur.

YEDİNCİ BÖLÜM

Dünya Tarihinde Enerji

Bütün doğal süreçler ve bütün insan eylemleri en temel fiziksel anlamda enerji dönüşümleridir. Medeniyetlerin ilerlemeleri yiyecek hasadını artırmak, daha büyük ve çeşitlilik içeren bir üretimi seferber edebilmek, daha fazla ve daha çeşitli mallar üretmek, daha büyük bir hareketlilik sağlamak, neredeyse sınırsız miktarda bilgiye ulaşabilmek için gerekli daha fazla enerji kullanımı arayışları olarak görülebilir. Bu başarılar daha büyük bir sosyal karmaşıklıkla örgütlenmiş geniş nüfusların ulus-devletlere ve ulus-üstü kolektiflere dönüşmesi, daha yüksek bir hayat kalitesine sahip olması sonucunu doğurmuştur. Tarihin dönüm noktalarını baskın enerji kaynakları ve başlıca asli itici güçler açısından özetlemek, bu kitapta göstermeyi umduğum üzere, umarım gayet doğrudan olmuştur. Bu teknik değişikliklerin en önemli sosyoekonomik sonuçlarını yeniden hesap etmek de güç değildir.

Bundan daha zor olan şey, tarihi enerji zorunlulukları prizmasından görmek ile insanların enerji kullanımını her zaman başlatmış, kontrol etmiş, şekillendirmiş ve dönüştürmüş çok sayıda enerji dışı etkeni de gereği gibi dikkate almaktır. Daha da temel önemde olan bir diğer noktaysa, enerjinin genel olarak hayatın evrimindeki, özelde insan tarihindeki rolünün temel bir paradoks oluşturduğuna dikkat çekmektir. Bütün canlı sistemler kesintisiz enerji akışıyla ayakta durur, bu bağımlılık da zorunlu olarak temel önemde birkaç kısıtlamayı devreye sokar. Ama hayatı ayakta tutan bu enerji akışları ne organizmaların var oluşunu ne de örgütlenmelerindeki özel karmaşıklıkları açıklayamaz.

BÜYÜK ENERJİ KULLANIM ÖRÜNTÜLERİ

İnsanların başarıları ile baskın enerji kaynakları ve değişen asli itici güçler arasındaki uzun vadeli ilişkiyi gözler önüne sermenin en iyi yolu herhalde bu ilişkiyi enerji çağları ve geçiş evreleri olarak görmekten geçiyor. Bu yaklaşımın katı dönemler belirlemekten kaçınması gerekir (zira bazı geçiş dönemleri ağır ağır gelişir); ayrıca belli dönemlerle ilgili genellemelerin kilit önemdeki temel süreçlerin başlangıcı ve hızı arasındaki farkları da değerlendirmeye alması gerekir: Herhalde son dönemden en iyi örnek, Çin'in 1990 sonrasında istisnai derecede hızlı bir gelişme göstermesi, birçok ülkenin sanayileşmenin ilk evrelerinde üç kuşakta yaptığı şeyi bir tek kuşakta başarmasıdır. Bu gibi karmaşık değişikliklerin itici gücü olan ve onları şekillendiren, ülkeler ve bölgelere özgü birçok ilginç nokta da bulunmaktadır.

Özel enerji çağlarının dikte ettiği en bariz tektiplikleri, enerjilerin çıkarılması, çevrimi ve dağıtılmasıyla ilgili faaliyetlerde görmek mümkündür. İnsan kasları ve koşuma bağlanmış öküzler, ister Pencap'ta olsun ister Picard-y'de bir günde ekilebilecek ya da hasat edilebilecek arazinin büyüklüğüne benzer sınırlar getiriyordu; (Kuzey Honşu'daki) Tohoku'daki geleneksel rezervlerden elde edilen odun kömürü ile (Kuzey İngiltere'de) Yorkshire'da üretilen odun kömürü miktarı arasında pek fark yoktu. Modern küresel medeniyette bu ortak yönler, mutlak kimlikler haline gelmiştir: Aynı enerji kaynakları ve aynı asli itici güçler artık tüm dünyada aynı süreçler ve makinelerle yönetilir, çıkarılır ve çevrilir. Çoğu sıklıkla, küresel hakimiyete sahip az sayıda şirket tarafından üretilir ya da kullanılır.

Bu tür küresel şirketlere şunları örnek verebiliriz: Petrol havzası hizmetleri için Schlumberger, Halliburton, Saipem, Transocean ve Baker; ağır inşaat makinelerinde Caterpillar, Komatsu, Volvo, Hitachi ve Liebherr; büyük buhar türbinleri General Electric, Siemens, Alstom, Weir Allen ve Elliott; büyük jet uçakları Boeing ve Airbus. Bu şirketlerin sunduğu hizmetler ve ürünlerin erimi gerçekten küresel bir hal aldıkça, performans ve güvenilirlik konusunda eskiden gözlenen uluslararası farklar büyük ölçüde azaltılmış ya da tümüyle ortadan kaldırılmıştır, bazı örneklerde sonradan başlayanlar, ileri tekniklerden sanayileşmenin öncü ülkelerine göre daha fazla pay almaktadır. Kültürel ve siyasal ortamlarda gözlenen büyük farklara rağmen, bu temel enerji değişikliklerinin sosyoekonomik sonuçları hakkında genellemeler yapma imkanı da şartırtıcı derecede geniştir.

Benzer enerji kaynaklarının ve asli itici güçlerin en ödüllendirici kullanım biçimleri aynı tekniklere başvurmayı gerektirdiğinden, bu tektiplik ekin yetiştirme (birkaç ticari ürünün hakim olması, hayvan yemlerinin kitlesel üretimi), sinai faaliyetler (uzmanlaşma, yoğunlaşma ve otomasyonun gerekli olması), kentlerin örgütlenmesi (şehir merkezlerinde işletmelerin yoğunlaştığı bölgelerin yükselmesi, banliyöleşme, sonrasında yeşil alanların istenir olması) ve ulaştırma düzenlemeleri (büyük şehirlerde metro, banliyö treni ihtiyacı, işe otomobille gitme ve taksi filoları olarak kendisini gösterir) konusunda değil, tüketim örüntüleri, dinlence faaliyetleri ve somut olmayan heveslerle ilgili olarak da aynı ya da benzer birçok iz bırakmıştır.

Bütün olgun yüksek enerji toplumlarında ve hâlâ nispeten hızlı gelişen birçok ekonominin kent bölgelerinde, hanelerin yüzde 90'ından fazlasında TV, buzdolabı ve çamaşır makinesi bulunur; edinilme oranının yüksek olduğu diğer eşyalar kişisel elektronik aygıtlardan tutun havalandırma birimlerine ve binek araçlarına uzanır. Küresel düzeyde ortak gıda tüketim eğilimleri arasında tatların uluslararasılaşması (*tikka masala*'nın İngiltere'de, *kare raisu*'nun Japonya'da en sevilen yiyecek olması), fast food'un popülerleşmesi, mevsimlik sebze ve meyvelerin bütün bir yıl boyunca bulunabilmesi yer alır; soğutulmuş konteynırlarda havayoluyla yapılan nakliyat nedeniyle enerji maliyeti ciddi boyutlarda olan bir rahatlıktır bu. Bugün artık evrensel bir nitelik kazanmış dinlence faaliyetleri arasında ılıman kumsallara uçak seyahatleri, tema parklarına ziyaretler (Amerikan Disneyland'lar artık Fransa, Çin, Hong Kong ve Japonya'da da bulunmaktadır), yolcu gemileriyle seyahatler yer almaktadır (eskiden Avrupalılar ve Amerikalıların eğlencesi olan bu seyahat biçimi artık Asya'da hızla yaygınlaşmaktadır). Bunu bir adım öteye taşıyan bir başka gelişme ise ortak enerji temellerinin nihayetinde, özellikle ileri (ve elit) eğitim açısından somut olmayan birçok hevesi etkilemesidir.

Ne var ki tekrar tekrar karşımıza çıkan bir şey vardır, o da (enerji temelleri geleneksel biyokütle yakıtlar ile canlı asli itici güçlerin bir karışımı olan, fosil yakıtlar ve elektriğin enerji tüketimindeki payının giderek arttığı) düşük gelirli ülkeler ile kişi başına fosil yakıt ve elektrik tüketiminin doygunluk seviyesine ulaştığı ya da yaklaştığı (sanayileşmiş ya da sanayileşme sonrası) yüksek enerji ülkeleri arasındaki muazzam uçurumdur. Bu uçurum her düzeyde, genel ekonomik üretime ya da ortalama hayat standardına bakarken, emek verimliliğinde ya da eğitime erişimde görülebilir. Bu uçurum uluslararası uyumsuzluklardan ziyade ayrıcalıklara (erişim, eğitim ve fırsatlar) dayalı bir

bölünme haline gelmiştir; bu gerçekliğin en iyi örneği Çin ve Hindistan'da varsıl sınıfların durumudur. 2013'te Çin'deki Spor Arabalar Kulübü'nün bir şubesi üyelerinin 440.000 dolarlık Porsche Carrera GT'den (Taylor 2013) daha iyi bir otomobile sahip olmalarını şart koşuyordu, Asya'nın en pahalı özel konutundan, Mukesh Ambani'nin Mumbai'nin merkezindeki 27 katlı, 2 milyar dolarlık gökdeleninin manzarasıysa gecekondlu mahalleleriydi.

Enerji Çağları ve Geçiş Dönemleri

İnsanların enerji kullanımını gerçekçi bir biçimde dönemlere ayırmaya yönelik çabalar, hem baskın yakıtları hem de başlıca asli itici güçleri dikkate almalıdır. Bu ihtiyaç, kavramsal olarak çekici olan iki tarihsel bölümlemeyi, sadece iki farklı enerji çağı haline getirir. Canlı enerji ile cansız enerji ayrımı insan ve hayvan kaslarının baskın asli itici güçler olduğu geleneksel toplumlar ile fosil yakıtlar ve elektrikle çalışan makinelerle dayalı modern medeniyeti birbirinden ayırır. Ama bu ayrım hem geçmiş hem şimdi hakkında yanıltıcıdır. Birkaç eski yüksek kültürde, iki cansız asli itici güç sınıfı, su tekerleri ve yel değirmenleri modern makinelerin ilerlemesinden yüzyıllar önce kritik farklar yaratıyorlardı.

Batı'nın yükselişi de iki cansız asli itici kuvvetin güçlü birlikteliğine çok şey borçludur: Rüzgârdan etkili bir biçimde yararlanma ve barutun benimsenmesidir bu iki kuvvet, ağır topraklarla donanmış, okyanuslar aşan yelkenli gemiler de bu birlikteliğin somutlaşmış halidir (McNeill 1989). Ayrıca canlı ve cansız asli itici güçler arasındaki ayrım, sadece insanlığın en zengin beşte birlik diliminde tam anlamıyla gerçekleşmiştir. Afrika ve Asya'nın en yoksul kırsal bölgelerinde ağır insan ve hayvan emeğine dayanılması hâlâ normdur, düşük gelirli ülkelerde bulunan (taşların parçalanıp çakıl elde edilmesinden tutun eski petrol tankerlerinin parçalanmasına varıncaya dek) birçok çıkarma, işleme ve imalat sanayiinde çalışan yüz milyonlarca işçi her gün yorucu (sıklıkla da riskli) el işleri yapar.

İkinci basitleştirme, yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları ayrımıysa canlı asli itici güçlerin ve biyokütle yakıtların hakim olduğu binlerce yıl ile ağırlıklı olarak fosil yakıtlar ve elektrige dayanan daha yakın geçmiş arasındaki temel ikiliği yakalar. Yine, fiili gelişmeler daha karmaşık olmuştur. Odun çağı toplumlarında biyokütle tedariki yenilenebilirliği güvence altına almıyordu: Aşırı düzeyde ağaç kesimi sonrasında tehlikelere açık yamaç arazilerinde meydana gelen yıkıcı erozyon Eski Dünya'nın geniş bölgelerinde, özel-

likle de Akdeniz çevresinde ve Kuzey Çin’de ormanların yetişmesini sürdürülebilir kılan koşulları ortadan kaldırmıştı. Bugün fosil yakıtların hakim olduğu dünyada, yenilenebilir bir kaynak olan su gücü kabaca bütün elektriğin altında birini üretir, (biraz önce belirttiğimiz üzere) yoksul ülkelerdeki çoğu çiftçi hâlâ tarla işlerinde ve sulama sistemlerinin ayakta tutulması için insan ve hayvan emeğine dayanmaktadır.

Özel enerji çağları arasında açık ayrımlar yapılması sadece yeni yakıtlar ve asli itici güçlerin yeni icatlarla kullanılmaya başlandığı tarih ve yaygın olarak benimsendiği tarih arasında ülkeler ve bölgeler arasında gözlenen farklar nedeniyle değil, enerji geçişlerinin evrimci bir nitelik göstermesi nedeniyle de gerçekçi değildir (Melosi 1982; Smil 2010a). Kullanımı oturmuş kaynaklar ve asli itici güçler şaşırtıcı derecede ısrarlı olabilir, yeni kaynaklar ya da teknikler ancak uzun süren tedrici yayılma dönemleri sonrasında hakimiyet kazanır. İşlevsellik, erişilebilirlik ve maliyetin bir bileşimi bu ataletin büyük bölümünü açıklayabilir. Kullanımı oturmuş kaynaklar ya da asli itici güçler, oturmuş bağlamlarda iyi işlediği sürece kolayca bulunabilirler, kârlıdırlar, muadilleri, onlardan üstün özelliklere sahip oldukları açık olanlar bile ağır bir ilerleme kaydeder. Ekonomistler bu gerçekleri David’in (1985) kavramsallaştırdığı üzere kilitleme ya da yola bağımlılığın örnekleri olarak görür; David argümanını QWERTY klavyenin (ondan üstün olduğu varsayılan Dvorak klavye karşısında) alaşağı edilmesine dayandırmıştı.

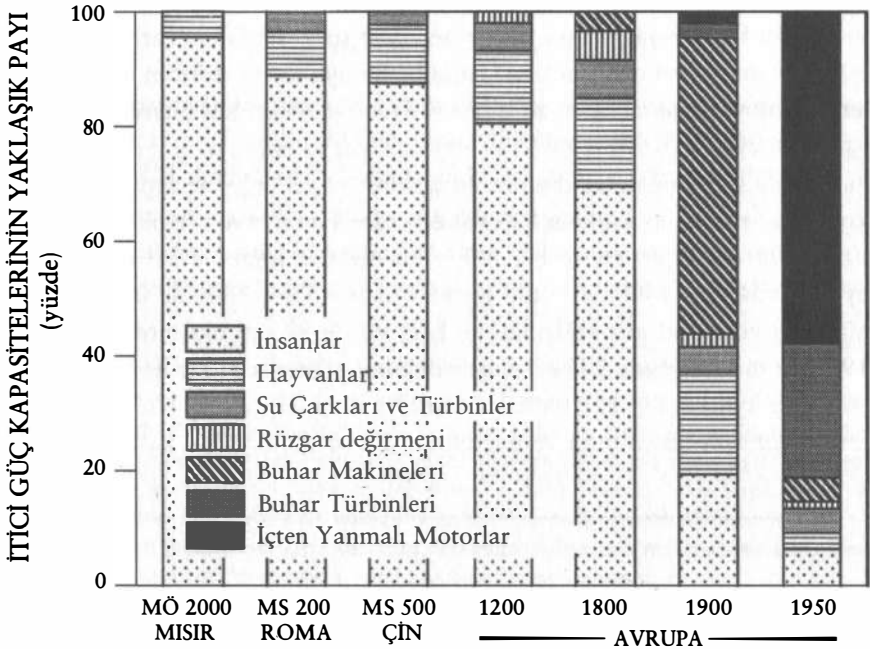
Ama teknik ilerlemeler ve ekonomi yönetiminin yanı sıra organizmaların evriminde ve kişisel karar oluşturmada fark edilebilir olan çok olağan ağır bir evrimsel ilerleme sürecini betimlemek için sorgulanabilir yeni yaftalara ihtiyacımız yok. Enerji tarihinden verebileceğimiz birçok örnek bulunuyor. Romalıların su değirmenleri ilk kez MÖ birinci yüzyılda kullanıldı, ama su değirmenleri ancak 500 yıl sonra gerçekten yaygın hale geldi. O zaman bile kullanımları neredeyse tümüyle tahıl öğütmekle sınırlıydı. Finley’nin (1965) belirttiği üzere kölelerin ve hayvanların angaryalarından özgürleştirilmesi, su değirmenlerinin hızla kullanılmaya başlamasını sağlayacak kadar güçlü bir teşvik olmamıştı. On altıncı yüzyıl sonuna gelindiğinde, Dünya’nın çevresinin yelkenli gemilerle dolaşılması neredeyse sıradan bir iş haline gelmişti, ama 1571’de Lepanto Savaşı’nda her iki taraf da 200’den fazla kalyona sahipti; İspanya Armadası 1588’de 2.000’den fazla hükümlü kürekçinin çalıştığı dört büyük kalyon ve dört tane üç direkli savaş gemisiyle İngiltere’yi işgal etmeye kalkmıştı; 1790’da Svensund’daki Rus filosunun büyük

bölümünü yıkmak için ağır silahlı İsveç kalyonları kullanılmıştı (Martin ve Parker 1988; Parker 1996).

Yük hayvanları, su gücü ve buhar motorları sanayileşen Avrupa ve Kuzey Amerika'da bir yüzyılı aşkın bir süre bir arada bulundular. Zengin ormanlara sahip ABD'de kömür tüketimi, yakacak odun tüketimini aştı ve kok kömürü ancak 1880'lerde odun kömüründen daha önemli hale geldi (Smil 2010a). Tarımda kullanılan mekanik güç ancak 1920'lerin sonunda at ve katır gücünü geride bıraktı, 1950'lerin başında ABD'nin güneyinde hâlâ milyonlarca katır bulunuyordu, ABD Tarım Bakanlığı çalışan hayvan sayımını ancak 1963'te bıraktı. İkinci Dünya Savaşı sırasında kitlesel olarak üretilen Liberty (EC2) sınıfı gemiler, en sık kullanılan ABD yük gemileri yeni etkili dizel motorlarla değil, petrol yakılan kazanlardan güç alan, kullanışlılığı gayet iyi bilinen üç silindirli buhar motorlarıyla çalışıyordu (Elphick 2001).

Eski Dünya'da sanayi öncesi toplumların asli itici güç kullanımlarının uzun vadeli örüntülerini çıkarırken ancak düşündürücü yaklaşıklıklar kullanmak mümkün olabilir. Bu toplumların en dikkat çekici özelliği insan emeğinin uzun zamandır baskın olmasıdır (Şekil 7.1). Hominin evriminin başlangıcından, ancak 10.000 yıl önce başlayan, yük hayvanlarının ehlileştirildiği dönemlere dek yegâne mekanik enerji kaynağı insan kasları olmuştur. İnsan gücü giderek artan sayıda, daha iyi aletlerin kullanılmasıyla artırılmıştır, Eski Dünya'da hayvanların çalışmasıyla binlerce yıl boyunca koşum takımlarının kötü, beslenmenin yetersiz olmasıyla sınırlandırılmıştır; yük hayvanları Amerika kıtaları ve Okyanusya'da da bulunmuyordu. Dolayısıyla insan kasları sanayi öncesi toplumların hepsinde vazgeçilmez asli itici güçler olarak kalmıştır.

Bütün antik medeniyetlerde insan emeğinin kullanımına dikkat çekici bir dikotomi damga vurmuştur. Göz alıcı ağır inşaat işlerinin gerçekleştirilmesi için insan emeğinin kitlesel olarak kullanılmasına rağmen, eski yüksek kültürler ister köle emeğine ister angarya işçilerine ya da çoğunlukla özgür emeğe başvursunlar, asla gerçekten geniş ölçekli mal üretimi gerçekleştirecek adımlar atmamışlardır. Üretimin atomlaştırılması norm olarak kalmıştır (Christ 1984). Han Hanedanı döneminde Çinliler potansiyel olarak geniş ölçekli bazı üretim yöntemlerinde ustalaşmışlardı. Herhalde en dikkat çekici şey de demir dökümünü, tek bir döküşte birbirinin aynı çok sayıda küçük metal eşyaları kitlesel olarak üretmeye uygun bir şekilde mükemmelleştirmiş olmalarıydı (Hua 1983). Ama Han dönemine ait, keşfedilmiş en büyük fırın sadece 3 metre genişliğindedir ve 8 metreden kısadır. Avrupa ile Kuzey Amerika dı-

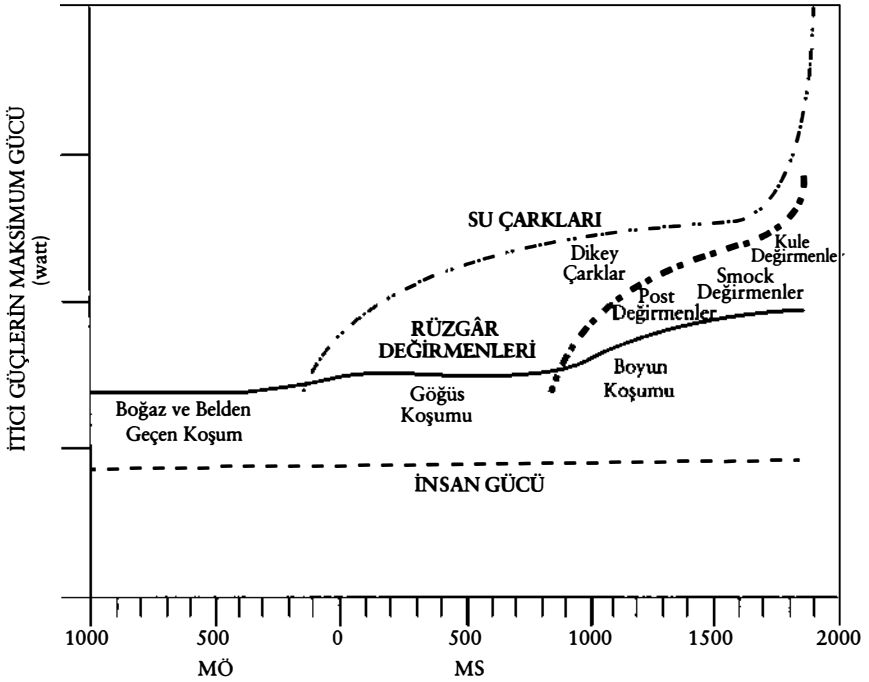


Şekil 7.1 İnsan emeğinin uzun bir süre boyunca hâkim kalması, su ve rüzgâr gücüyle çalışan makinelerin yavaş yaygınlaşması ve 1800 sonrasında motorlar ve türbinlerin hızla benimsenmesi aslı itici güçlerin tarihinde en dikkat çeken gelişmelerdir. Yaklaşık oranlar bu kitapta anılan çok çeşitli kaynaklara dayanarak tahmin edilmiş ve hesaplanmıştır.

şında, nispeten küçük ölçekli zanaat imalatı yirminci yüzyıla dek kural olarak kalmıştır. Ucuz kara ulaşımının eksikliği, açıktır ki kitlesel üretimi engelleyen başlıca etkenlerden biriydi.

Nispeten küçük bir yarıçapın ötesinde dağıtım yapmanın bedelleri, imalatın merkezileşmesinin kazandırdığı ölçek ekonomilerini aşmış olsa gerek. Birçok antik inşaat projesi aslında olağanüstü büyük emek girdisi gerektirmemişti. Sayıları birkaç yüz ile bir-iki bin arasında değişen angarya işçileri her yıl sadece iki ilâ beş ay çalışarak 20-50 yıllık bir süre zarfında muazzam dini yapılar ya da savunma duvarları dikebiliyor, uzun sulama ve ulaştırma kanalları kazabiliyor, büyük hendekler inşa edebiliyorlardı. Seylan'daki Kalawewa sulama sisteminin inşa edilmesi yaklaşık 1.400 yıl sürmüştür (Leach 1959). Çin Seddi'nin parça parça inşası ve onarımı çok daha uzun bir süreye yayılmıştı (Waldron 1990). Bir ya da iki yüzyıl bir katedralin tamamlanması için istisnai derecede uzun bir süre değildi.

İlk cansız asli itici güçler Avrupa ve Asya'nın bazı bölgelerinde dik-kat çekici farklar yaratmaya ancak MS 200 sonrasında (su çarkları) ve MS 900'den sonra (yel değirmenleri) başladı. Bu aygıtların tedricen iyileştirilmeleri birçok yorucu, tekrarlanan işin yerini aldı ve onları hızlandırdı, ama canlı işgücünün yerini cansız iş gücünün alması yavaş ve eşitsiz oldu (Şekil 7.2). Her halükârda su pompalama dışında, su çarkları ve yel değirmenleri tarla işlerini kolaylamaya pek az katkıda bulunabiliyordu. Fouquet'nin İngiltere için yaptığı (2008) yaklaşık hesaplamalar işte bu nedenle insan ve hayvanların güç uygulamalarının 1500'de bütün gücün yüzde 85'ini, 1800'de (su ve rüzgâr gücünün yüzde 12 güç sağladığı yıl) hâlâ yüzde 87'sini oluşturduğunu, ama 1900'de sadece yüzde 27'sini oluşturduğunu gösterir: O tarihe gelindiğinde buhar sanayilerde ağırlıklı bir hal almıştı. Ama buhar çağında bile cansız emek fosil yakıtların çıkarılması ve dağıtılması ile sayılamayacak kadar çok ima-



Şekil 7.2 Geleneksel asli itici güçlerin ortalama birim gücü erken modern devrin başında daha büyük su çarklarının benimsenmesi sonrasında bile sınırlı olmayı sürdürdü. Bu değişiklik ancak on dokuzuncu yüzyılın buhar motorlarıyla birlikte geldi. Maksimum kapasiteler bu kitapta anılan, asli itici güçlerle ilgili kaynaklardan derlenmiştir.

Kutu 7.1

Canlı gücün ısrarla varlığını sürdürmesi

On dokuzuncu yüzyılın son yıllarında ve yirminci yüzyıl başında Amerika kıtalarında at, katır ve öküz grupları ABD büyük düzlüklerini, Kanada düzlüklerini, Brezilya'da cerrado'nun, Arjantin'de pampaların büyük otlaklarını sabanla sürerek o zamanlar ekilip biçilen arazilerin büyük bölümünü dönüştürüyordu. ABD Tarım Bakanlığı ancak 1963'e gelindiğinde, Amerika'nın traktör gücü 1920'deki kayıtlı yük hayvanı kapasitesinin yaklaşık 12 katını bulduğunda yük hayvanlarını saymayı bıraktı. Çin'de hanedanlığın son, cumhuriyetin ilk dönemlerinde yel değirmenleri, su çarkları ve buharın katkısı toplam gücü yük hayvanlarınınkini çok geride bırakan insan emeğine kıyasla marjinal düzeydeydi. Benim en iyi tahminlerime göre 1970'te bile Çin'de insan emeği yaklaşık 200 PJ yararlı enerji katkısında bulunuyordu, ülkenin yük hayvanlarının katkısı ise 90 PJ'nin biraz üstündeydi (Smil 1976).

İnsan kaslarının hakimiyeti en sık kullanılan tekil emek birimlerini, 60-100 W'lik sürekli (gün boyu) yararlı emekle sınırlıyordu. Bu demektir ki birkaç istisnai koşul dışında bütün koşullarda insan emeğinin tek bir komuta çerçevesinde en yüksek güç yoğunlaşması (inşaat alanlarında çalışan yüzlerce, binlerce işçi) sürekli çalışma sırasında 10.000-100.000 W'yi aşmıyordu, gerçi kısa süreli zirve noktaların katları düzeyinde gerçekleşiyordu. Geleneksel bir usta mimar ya da kanal yapımcısı, bugünün küçük toprak kazı makinelerine güç veren tek bir motorun ürettiğini aşmayan enerji akışlarını kontrol ediyordu.

lat işi açısından vazgeçilmez olmayı sürdürüyordu, tarımdaysa on dokuzuncu yüzyıl boyunca tarla işlerine hâkim olmaya devam etmişti (Kutu 7.1).

Ama çalışan hayvanların azami gücünün (boyunduruklu güçlü atlar sayesinde) üç katına çıkmasından çok önce bile, su çarkları en güçlü asli iticiler haline gelmişti. Sonrasında bunların geliştirilmeleri yavaş ilerlemişti: En yüksek kapasitelerde on katlık ilk artış yaklaşık 1.000 yıl, ikincisi yaklaşık 800 yıl sürmüştü. Zirve düzeydeki birim güç en nihayet on sekizinci yüzyılın buhar motorlarının gerisinde kalmıştı, ama su çarklarının hâkimiyeti ancak içten yanmalı motorların ve buhar türbinlerinin çıkması ve gelişmesiyle son buldu; bunların ikisi de 1880'lerde kullanıma girdi, 1920'lerde baskın hale geldi ve yirmi birinci yüzyılın başlıca hareketli ve durağan asli itici güçleri olmayı sürdürdüler.

Bazı önemli kıtasal ve bölgesel farklara rağmen, eski yüksek kültürlerde tipik yakıt tüketimi düzeyi ve baskın asli itici güç kullanım biçimleri gayet benzerdi. Yakıt kullanımı ve asli itici güç geliştirmede dikkat çekici ilerlemeler kaydettiği için öne çıkarılması gereken antik bir toplum varsa o da Han hanedanlığı dönemi Çin'i olmalıdır (MÖ 207-MS 220). Bu dönem Çin'de yapılan yenilikler başka yerlerde ancak yüzyıllar, hatta bin yılı aşkın bir süre sonra benimsendi. Han Çinlilerinin en dikkat çekici katkıları demir üretiminde

kömür kullanılması, doğal gaz için sondaj yapılması, dökme demirden çelik üretilmesi, kavisli kulaklı demir pullukların geniş çapta kullanılması, boyun koşumunun başlangıcı ve çok tüplü tohum sondajının kullanılmasıydı. Bin yılı aşkın bir süre boyunca bu gibi kilit ilerlemelerin bir araya geldiği benzer bir yenilik topluluğu ortaya çıkmadı.

İslam'ın ilk dönemlerinde su kaldıran makineler ve yel değirmenleri için yenilikçi tasarımlar yapıldı, İslam âleminin deniz ticareti üçgen yelkenlerin etkili bir biçimde kullanılmasından yarar sağladı. Ama İslam dünyası yakıt kullanımı, metalurji ya da hayvanların koşuma bağlanması konusunda radikal yenilikler başlatmadı. Sadece Çin, Hint ve İslam dünyasının daha önceki başarılarından seçici olarak ödünç alan Ortaçağ Avrupası birkaç kritik biçimde yenilikler yapmaya başladı. Avrupa Ortaçağ toplumlarını enerji kullanımı açısından diğerlerinden ayıran asıl şey, su ve rüzgârın kinetik enerjilerine bağılılıklarının giderek artmasıdır. Bu akışlar çok sayıda uygulamaya görülmemiş yoğunlukta güç sağlayan, giderek karmaşılaşan makinelerle toplanır. İlk büyük Gotik katedrallerin inşa edildiği çağda, en büyük su tekerlerinin gücü 5 kW civarındaydı, altmış adamdan daha güçlüydü. Rönesans'tan çok önce Avrupa'da bazı bölgeler, önce tahıl öğütmek, sonra giysi dokumak ve demir metalurjisi için su ve rüzgâra kritik derecede bağımlı hale gelmişlerdi; bu bağımlılık birçok mekanik becerinin keskinleştirilmesine ve yayılmasına da katkıda bulunuyordu.

Dolayısıyla geç Ortaçağ'da ve erken modern dönemde Avrupa yeniliklerin çeperinin genişlediği bir yer haline gelmişti, ama Göklerin İmparatorluğu'nun zenginliklerini öven dönemin Avrupalı gezginlerinin verdiği haberlerin de ortaya koyduğu üzere, o dönemde Çin'in genel teknik gücü hiç kuşku yok ki daha etkileyiciydi. Bu gezginler tam tersinin ne kadar kısa süre içinde gerçeklik kazanacağını bilemezlerdi. On beşinci yüzyıl sonuna gelindiğinde Avrupa, yeniliklerin ve genişlemenin ivme kazandığı bir yoldaydı, incelikli Çin medeniyetiye uzun ve derin teknik ve sosyal içe kapanmasına başlamak üzereydi. Batı'nın teknik üstünlüğünün Avrupa toplumlarını dönüştürmesi, erimini genişletip başka kıtalara ulaşması çok zaman almadı.

1700'e gelindiğinde Çin'in ve Avrupa'nın tipik enerji kullanım düzeyleri, dolayısıyla da ortalama maddi varlıkları hâlâ genel hatlarıyla benzerdi. On sekizinci yüzyıla gelindiğinde Çin'deki inşaat işçilerinin reel gelirleri Avrupa'nın az gelişmiş bölgelerindeki inşaat işçilerinininkine benzer düzeydeydi, ama kıtanın önde gelen ekonomilerinin gerisinde kalıyordu (Allen vd. 2011).

Sonra Batı'nın ilerlemeleri hız kazandı. Enerji alanında bu ilerlemeler paraya çevrilen ürün getirisinin artması, kok kömürüne dayalı yeni demir metalurjisi, daha iyi navigasyon, yeni silah tasarımları, ticarete meyletmek ve deneyciliğin bileşimiyle ortaya konuyordu. Pomeranz (2002) bu kalkışa geçmenin Avrupa ve Çin'in merkezi ekonomik bölgelerindeki kurumlar, tutumlar ya da demografiden ziyade kömürün rastlantı sonucu bulunması ve bu merkezler ile çevre bölgeleri arasındaki ilişkilerin çok farklı olmasıyla, ayrıca icat sürecinin kendisiyle ilgili olduğunu savunmuştur.

Hıristiyanlığın genel olarak teknik ilerlemeler üstündeki olumlu etkisi (buna kritik bir kavram olan el emeğinin onuru da dâhildir), Ortaçağ manastır hayatının özel olarak öz yeterlilik arayışı içinde olması bu sürecin önemli bileşenleriydi (White 1978; Basalla 1988). Bu bağlantıların önemini sorgulayan Ovitt (1987) bile, manastır geleneğinin emeğin temel önemdeki onuru ve manevi yararını değerli gördüğü için önemli bir etken olduğu kanısındadır. Her halûkârda 1850'ye gelindiğinde Çin ve Avrupa'nın ekonomik olarak en ileri bölgeleri iki ayrı dünyaya aitti, 1900'e gelindiğinde ciddi bir performans açığıyla birbirlerinden ayrılmışlardı: Batı Avrupa'da enerji kullanımı Çin ortalamasının en az dört katıydı.

1700 sonrasında çok hızlı ilerlemelerin yaşandığı dönem dâhiyane pratik yenilikçilerle başlamıştır. Ama on dokuzuncu yüzyıldaki en büyük başarıların itici gücü, bilimsel bilginin gelişmesi ile yeni icatların tasarımı ve ticarileşmesi arasındaki yakın geri bildirimler olmuştur (Rosenberg ve Birdzell 1986; Mokyr 2002; Smil 2005). On dokuzuncu yüzyıldaki ilerlemelerin enerji dayanakları arasında buhar motorlarının geliştirilmesi, hem durağan hem hareketli asli itici güçler olarak yaygın şekilde benimsenmeleri, kok kömürüyle demir eritilmesi, geniş ölçekli çelik üretimi, içten yanmalı motorların çıkması ve elektrik üretimi yer alır. Yeni ulaştırma ve telekomünikasyon biçimlerinin saldırganca geliştirilmesi de hem üretimin artırılması hem ulusal ve uluslararası ticaretin teşvik edilmesi açısından temel önemdeydi.

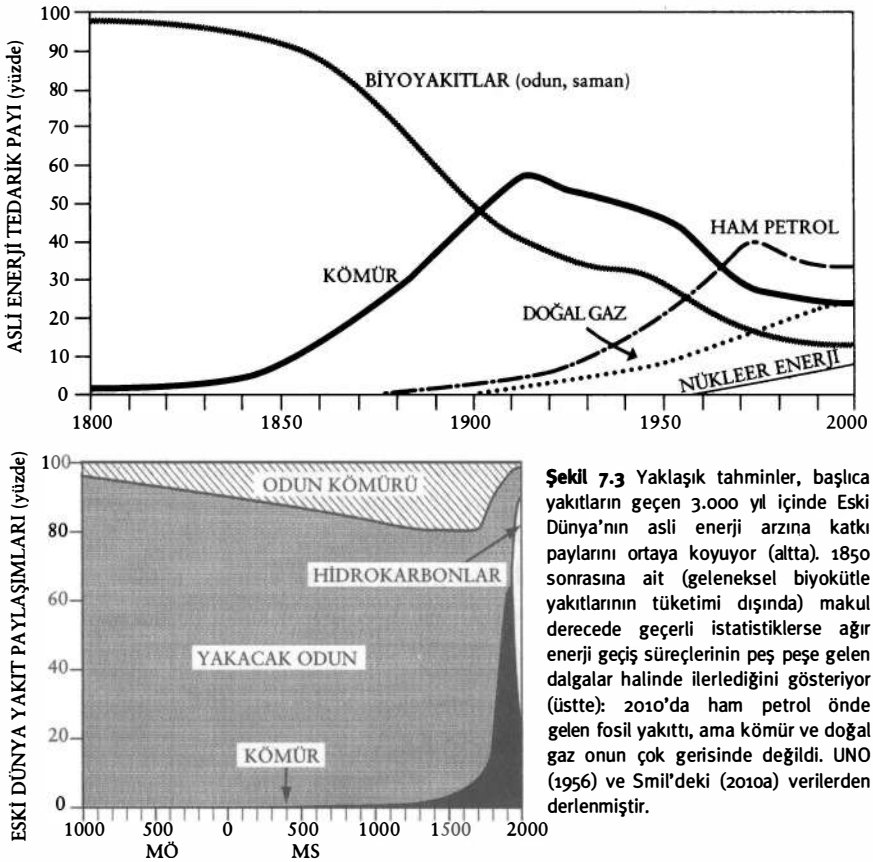
1900'e gelindiğinde teknik ve örgütsel yeniliklerin birikmesi, artık ABD'nin yeni gücünü de kapsayan Batı'ya küresel enerjiden görülmemiş düzeyde bir pay verdi. Batı ülkeleri dünya nüfusunun sadece yüzde 30'uyla fosil yakıtların yaklaşık yüzde 95'ini tüketiyordu. Batı dünyası yirminci yüzyılda toplam enerji kullanımını yaklaşık 15 kat artırdı. Küresel enerjiden aldığı pay kaçınılmaz olarak azaldı, ama yirminci yüzyıl sonuna gelindiğinde küresel nüfusun yüzde 15'inden azına sahip olan Batı (Avrupa ve Kuzey Amerika) bütün

asli ticari enerjinin yaklaşık yüzde 50'sini tüketti. Avrupa ve Kuzey Amerika kişi başına düşen miktar itibarıyla en başta gelen yakıt ve elektrik tüketicileridir ve teknik liderliklerini korumuşlardır. Çin'in hızlı ekonomik büyümesi mutlak sıralamayı değiştirmiştir: Ülke 2010'da dünyanın en büyük enerji tüketicisi haline geldi, 2015'e gelindiğinde yaklaşık yüzde 32 ABD'nin önündeydi, ama kişi başı enerji kullanımı ABD ortalamasının sadece üçte birine eşitti (BP 2016).

Eski Dünya'nın asli enerji tüketiminin uzun vadeli örüntülerinin sunumunda ancak kaba yaklaşıklıklar mümkündür (Şekil 7.3). Birleşik Krallık'ta kömür daha on yedinci yüzyılda odunun yerini almıştı; Fransa ve Almanya'da odun ancak 1850 sonrasında hızla önemini yitirdi, Rusya, İtalya ve İspanya'da biyokütle enerjileri yirminci yüzyıla kadar baskınlıklarını korudu (Gales vd. 2007; Smil 2010a). Temel enerji istatistikleri ulaşılabilir olursa, geçiş dönemlerine ait nicelikleri belirlemek ve uzun yer değiştirme dalgalarını ayırt etmek de mümkün olur (Smil 2010a; Kander, Malanima, and Warde 2013). Küresel terimlerle bu, on dokuzuncu yüzyıl ortasından itibaren gayet doğru bir biçimde yapılabilmektedir (Şekil 7.3). Yer değiştirme hızları ağır, ama araya giren etkenlerin çeşitliliği düşünüldüğünde, şaşırtıcı derecede benzer de olmuştur.

Küresel enerji geçişlerini yeniden kurgulamam, (odunun yerini alan) kömürün 1840'ta küresel piyasanın yüzde 5'ine, 1855'te yüzde 10'una, 1865'te yüzde 15'ine, 1870'te yüzde 20'sine, 1875'te yüzde 25'ine, 1885'te yüzde 33'üne, 1895'te yüzde 40'ına, 1900'de yüzde 50'sine ulaştığını göstermektedir (Smil 2010a). Bu köşetaşlarına ulaşmak için gerekli yılların sayısı sırasıyla 15-25-30-35-45-55-60'tı. Petrolün 1915'te küresel enerji arzının yüzde 5'ini oluşturduktan sonra kömürün yerini alması için geçen aralıklar da hemen hemen aynıydı: 15-20-35-40-50-60 (petrol arzı asla yüzde 50'yi bulmadı, payı azalmaktadır). Doğalgaz 1930'da küresel asli enerji arzının yüzde 5'i seviyesine ulaştı, 55 yıl sonra da yüzde 25 seviyesine geldi; doğalgazın bu paya ulaşması kömürden ya da petrolden ciddi oranda daha uzun sürdü.

Üç küresel geçiş sürecinin benzer şekilde ilerlemesi (yeni bir kaynağın küresel enerji piyasasında daha büyük bir pay sahibi olması iki ya da üç kuşak, yani 50 ilâ 70 yıl alması) dikkat çekicidir, çünkü bu üç yakıt farklı üretim, dağıtım ve çevirme teknikleri gerektirir ve ayrıca yer değiştirme ölçekleri de çok farklı olmuştur: Kömürün yüzde 10'dan yüzde 20'ye çıkması yakıtın yıllık üretiminin 4 EJ'den az artırılmasını gerektirmiştir, ama doğalgazın yüzde 10'dan yüzde 20'ye çıkması, kabaca her yıl ilave 55 EJ üretilmesini gerek-



Şekil 7.3 Yaklaşık tahminler, başlıca yakıtların geçen 3.000 yıl içinde Eski Dünya'nın asli enerji arzına katkı paylarını ortaya koyuyor (altta). 1850 sonrasına ait (geleneksel biyokütle yakıtlarının tüketimi dışında) makul derecede geçerli istatistiklerse ağır enerji geçiş süreçlerinin peş peşe gelen dalgalar halinde ilerlediğini gösteriyor (üstte): 2010'da ham petrol önde gelen fosil yakıttı, ama kömür ve doğal gaz onun çok gerisinde değildi. UNO (1956) ve Smil'deki (2010a) verilerden derlenmiştir.

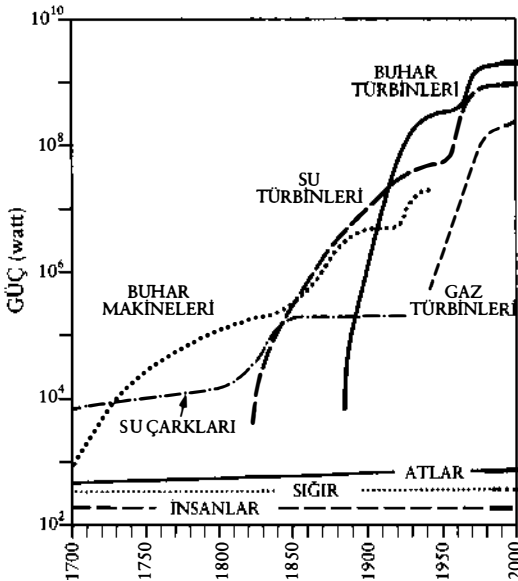
tirmiştir (Smil 2010a). Geçiş süreçlerinin hızındaki benzerlikleri açıklayan en önemli iki etken muazzam altyapı yatırımları için gerekli koşullar ve büyük oranda gömülü enerji sistemlerinin ataletidir.

Üç yer almanın sıralaması, bugün en erken aşamada olan dördüncü geçişin (fosil yakıtlar yerlerini yeni, yenilenebilir enerji çevrimlerine bırakmaktadır) benzer bir hızda ilerleyeceği anlamına gelmez, uzun sürecek bir başka sürecin yaşanması ihtimali hâlâ yüksektir. 2015'te iki yeni, yenilenebilir elektrik üretim biçimi, güneş enerjisi (yüzde 0,4) ve rüzgâr enerjisi (yüzde 1,4) hâlâ dünya asli enerji arzının yüzde 2'sinden azdı (BP 2016). İki erken atılım bu değişikliğe ivme kazandırmıştır: Eldeki en iyi tasarımlara dayalı yeni nükleer tesislerin hızla inşa edilmesi ile rüzgâr ve güneş enerjisiyle üretilen elektriği kitlesel ölçekte depolamanın yeni, ucuz yollarının ortaya çıkması. O zaman

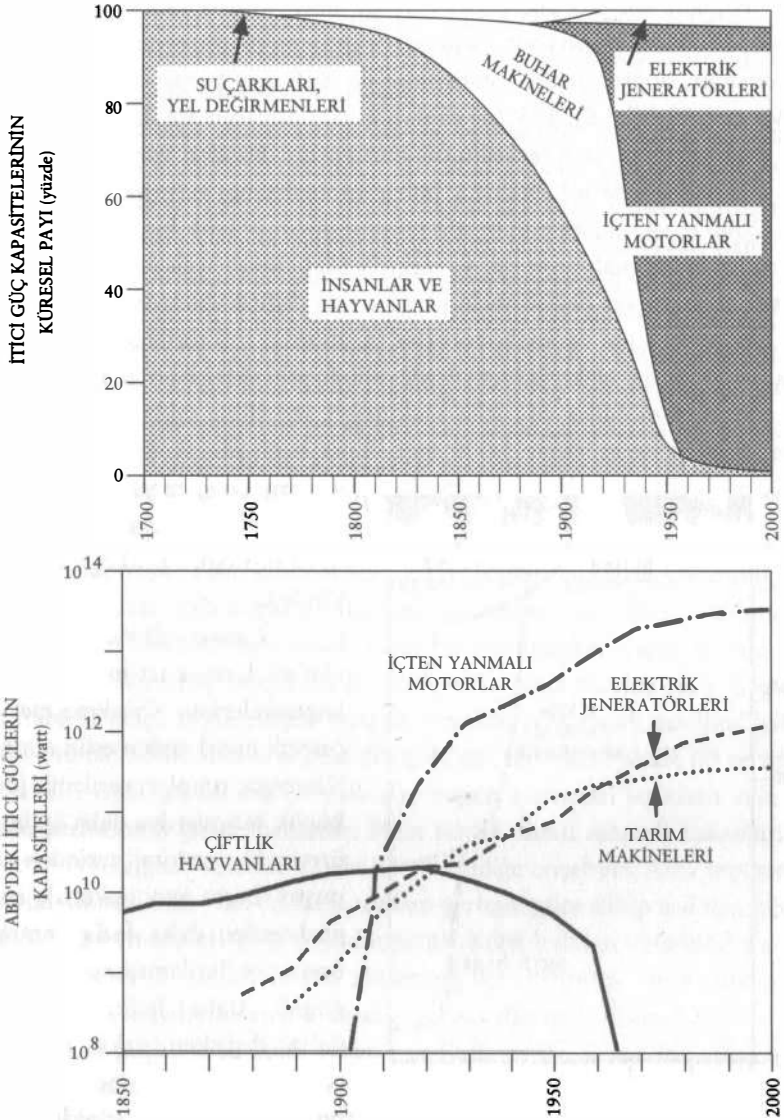
bile nakliyat alanında enerji yoğunluğu yüksek milyarlarca ton sıvı yakıtı yeni enerjiyle değiştirme ve hiç fosil karbon kullanmaksızın pik demir, çimento, plastik ve amonyak üretmenin zorluklarıyla karşı karşıya kalırdık.

Uzun Vadeli Eğilimler ve Maliyetlerin Düşmesi

Daha güçlü asli iticilere geçiş süreçleri hem tipik hem maksimum kapasiteler açısından gayet doğru bir biçimde izlenebilir (Şekil 7.4) Asli itici güçlerin zirve noktadaki kapasitelerini birleştiren güç zarfı, MÖ üçüncü bin yılda bir tarihte kabaca 100 W'lik sürekli insan emeğinden yük hayvanları için yaklaşık 300-400 W'lik emeğe geçmiştir; sonra bu çizgi milattan sonra birinci bin yılın sonlarında yatay su çarkları için yaklaşık 5.000 W'ye (5kW) yükselmiştir. 1800 civarında buhar motorlarında 100.000 W'yi (100 kW) aşmıştır ve buhar motorları on dokuzuncu yüzyıl ortasına dek en güçlü birimler olarak kalmıştır, o tarihlerde su türbinleri 1850 ile 1910 arasında kısa ömürlü bir üstünlük kazanmıştır (10 MW'ye ulaşmıştır). Bunun sonrasında buhar türbinleri en güçlü tek birimli asli itici güçler olarak kalmış, 1960 sonrasında tesis edilen en büyük birimlerde 1.000.000.000 W'nin (1GW) üstünde bir platoya ulaşmıştır.

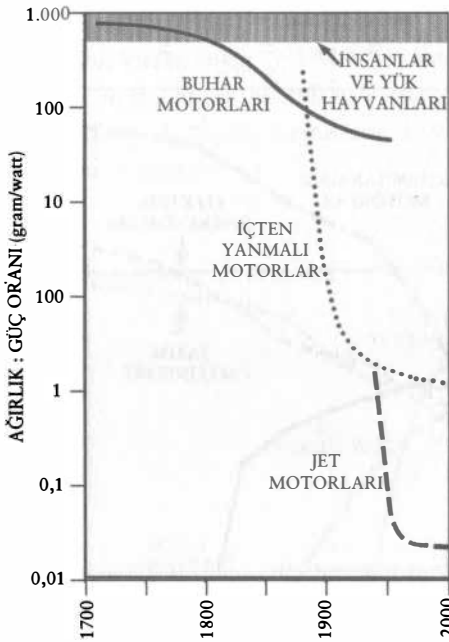


Şekil 7.4 1700 öncesindeki ve geçen üç yüzyıl içinde çıkan asli itici güçlerin azami kapasiteleri. En büyük turbojeneratörler bugün, en güçlü canlı asli itici güçlerden, ağır yük atlarından altı büyüklük kertes (yaklaşık iki milyon kat daha) güçlüdür. Su tekerinin oranları, 1750 öncesinde buhar motorlarının gerisinde kalmıştır, 1850'ye geldiğinde su türbinleri kısa bir süre boyunca en güçlü asli itici güçler haline geldi, buhar türbinleri ise yirminci yüzyılın ikinci on yılından beridir en güçlü asli iticilerdir. Özel asli itici güçlerle ilgili bölümlerde sunulan verilerden derlenmiştir.



Şekil 7.5 1700'de küresel aslı itici güçlerin payları 500, hatta 1.000 yıl önceki paylardan ancak marjinal düzeyde farklıydı. Oysa tersine 1950'ye gelindiğinde dünyadaki mevcut gücün küçük bir bölümü dışında tamamı içten yanmalı motorlarda (çoğunlukla binek otomobillerde) ve buhar ile su türbinlerinde (üstte) tesis edilmişti. Bölgelere ayrılmış ABD istatistikleri (altta) bu hızlı dönüşümü daha ayrıntılı ve doğru bir biçimde gösterir. Küresel oranlar UNO (1956), Smil (2010a) ve Palgrave Macmillan'daki (2013) verilere göre tahmin edilip değerlendirilmiştir; alttaki grafik USBC'nin (1975) verilerinden *The Statistical Abstract of the United States*'in sonraki nüshalarından alınmıştır.

Toplam asli itici güç kapasitelerine baktığımızda farklı bir bakış açısı ediniriz. 1700 sonrasında temel küresel örüntü makul düzeyde yaklaşık olarak belirlenebilir, doğru tarihsel istatistikler de ABD için geriye dönük bir bakışı kolaylaştırır (Şekil 7.5). 1850’de canlı iş gücü dünyanın asli itici güç kapasitesinin hâlâ yüzde 80’den fazlasını oluşturuyordu. Bundan yarım yüzyıl sonra payı yaklaşık yüzde 60 olmuştu, buhar motorlarının payıysa yaklaşık üçte birdi. 2000’e gelindiğinde dünyada mevcut gücün küçük bir bölümü dışında tamamı içten yanmalı motorlar ve elektrik üreticilerde tesis edilmişti. ABD’de asli itici güçlerin yer değiştirmeleri bu küresel değişiklikler öncesinde gerçekleşti. Elbette ki içten yanmalı motorlar (taşıtlarda, traktörlerde, kombinlerde ya da pompalarda) elektrik üreticilerde olduğu gibi sürekli bir biçimde nadiren kullanıldı. Otomobiller ve çiftlik makineleri genellikle yılda 500 saatten az çalışır, turbo jeneratörlerse 5.000 saat. Buna bağlı olarak fiili enerji üretimi



Şekil 7.6 Bütün yeni cansız enerji çeviriciler nihayetinde daha hafif ve daha verimli hale gelmiştir. Başlıca asli itici güçlerin ağırlık/güç oranlarındaki hızlı gerileme en iyi içten yanmalı motorların bugün aynı derecede güçlü yük hayvanları ve ilk buhar motorlarının ağırlığının 1/1.000’inden daha hafif çektiği anlamına gelir. Bu kitap boyunca anılan verilerden derlenmiştir.

anlamında içten yanmalı motorlar ile elektrik jeneratörleri arasındaki oran bugün yaklaşık 2:1 düzeyindedir.

Cansız asli itici güçlerin birim güçlerinin artışına ve toplam kapasitelerinin birikmesine iki önemli genel eğilim eşlik etmiştir: Kütle/güç oranları gerilemiş (daha küçük birimlerden daha fazla güç üreterek), çevrim verimleri artmıştır (başta aynı miktarda enerji girdisinden daha fazla yararlı iş üretmeye başlamıştır). İlk eğilim gitgide daha hafif, dolayısıyla daha değişken yakıt çeviriciler ortaya çıkarmıştır (Şekil 7.6). İlk buhar makineleri atlardan daha güçlü olmakla birlikte son derece ağırlardı, çünkü kütle/güç oranları yük hayvanlarınıninkine aynı büyüklük mertesindeydi. Sonrasında iki yüzyılı aşkın süre devam eden

gelişmeler buhar makinelerinin kütle/güç oranlarını baştaki değerlerin yaklaşıp onda birine düşürdü, bu yine de yollarda hizmet veren ya da uçaklara güç veren motorlar için yüksek bir düzeydi.

İçten yanmalı motorların kütle/güç oranları (önce benzinler, sonra dizeller) ilk ticari modellerin ardından 50 yıldan kısa bir süre içinde iki büyüklük kertesi geriledi, 1860'larda yakıtı kömür gazı olan yatay motorlar çıktı. Bu hızlı düşüş kara yoluyla ulaştırmanın (otomobiller, otobüsler, kamyonlar) bütçeye uygun bir biçimde mekanikleşmesinin önünü açtı ve havacılığı mümkün kıldı. 1930'lardan başlayarak (hem durağan kullanım için hem uçaklarda) gaz türbinleri bu yenilikleri neredeyse iki büyüklük kertesi daha ileri taşıdı, jet gücüyle çalışan hızlı hava yolculuğunu 1958'den itibaren ve 1969'da Boeing 747'nin öncülüğünde geniş gövdeli jetlerin çıkmasıyla birlikte kitlesel ölçekte mümkün kıldı. Bunun sonrasında gaz türbinleri esnek ve temiz elektrik üretiminde başlıca tercih olarak ortaya çıktı.

Asli itici güçlerin verimleri temel termodinamik değerlendirmeler nedeniyle sınırlanmıştı. Teknik ilerlemeler en iyi performanslarla kuramsal azami düzey arasındaki açığı kapatıyordu. Buharla çalışan makinelerin verimleri Savery'nin ilkel motorlarında yüzde birin bir bölümüyken yirmi birinci yüzyıl başında büyük turbojeneratörlerde yüzde 40'ın biraz üzerine çıktı. Bugün gerek buharla gerek suyla çalışan turbojeneratörler için ancak marjinal iyileştirmeler mümkündür, ama kombine döngülü gaz türbinleri yüzde 60 verimliliğe ulaşabilir. Aynı şekilde en iyi yakıcılar bugün kuramsal sınırlara yakın düzeyde performans göstermektedir. Hem büyük enerji santrali kazanları hem evlerdeki doğalgazlı ocaklar yüzde 97 verimliliğe erişebilir. Ama tersine içten yanmalı motorların, yani en fazla toplam yerleşik güce sahip asli itici güçlerin günlük performansları hâlâ çok düşüktür. Kötü bakılan otomobil motorlarının performansı sıklıkla azami güçlerinin üçte birinden azdır. Aydınlatma verimliliğindeki iyileşmeler çok daha etkileyici olmuştur (Kutu 7.2).

Daha güçlü, ama daha verimli ve hafif mekanik asli itici güçler uzun mesafeli seyahatte tipik hızları karada ve suda on kattan fazla artırmış, uçmayı mümkün hale getirmiştir (Şekil 7.7). 1800'de atların çektiği arabalar genellikle 10 km/h'den az bir hızla gidiyordu, ağır yük vagonlarıysa bu hızın yarısı kadar bir hızla gidiyordu. 2000'de otoban trafiği 100 km/h'nin üstünde hızlarla akabiliyordu ve yüksek hızlı yolcu trenleri 300 km/h'ye yaklaşan, hatta onu aşan hızlarda gidiyordu, jet uçaklarının standart yolculuk hızıysa yerin yaklaşık 11 km üstünde 880-920 km/h'ydi. Mallar ve eşyaların taşınmasında hız artışına kapasite ve menzil artışı da eşlik etmiştir.

Kutu 7.2

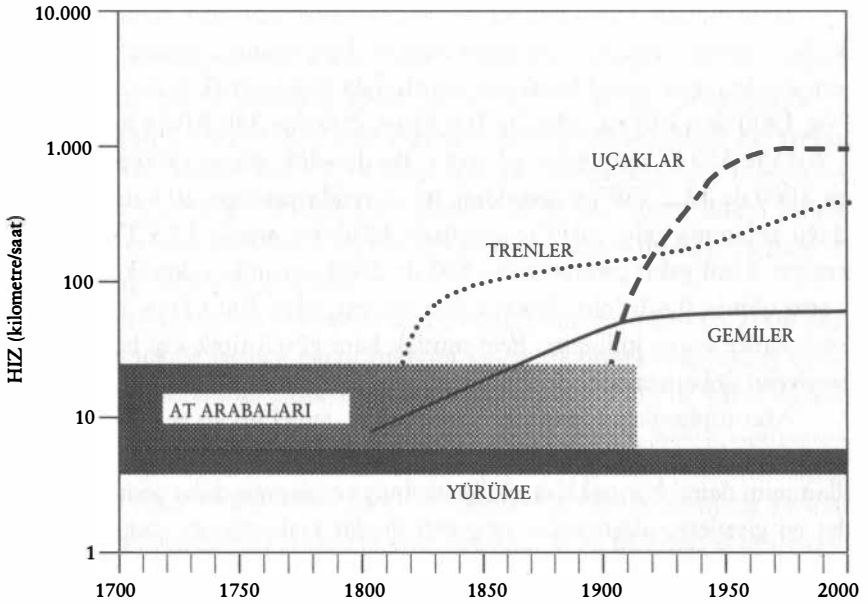
Işıklıandırmanın verimi ve etkisi

Mumlar yakılan bal mumu, donyağı ya da parafinin kimyasal enerjisinin en az yüzde 0,01'ini, en fazla yüzde 0,04'ü kadar az bir miktarını ışığa çevirir. Camın içine kapatılmış platin tellere platin kısaçlarla tutturulmuş oval karbonlaştırılmış kâğıt halkalarının kullanıldığı, ilk Edison ampulleri yüzde 0,2'yi ışığa çeviriyordu, mumlardan bir büyüklük kertesı daha fazlaydı bu oran, ama dönemin gaz lambalarından daha iyi değildi (yüzde 0,15-0,3). 1898'de kullanılmaya başlayan Osmiyum teller elektrik enerjisinin yaklaşık yüzde 0,6'sını ışığa çevirir. Bu oran 1905 sonrasında bir vakum içindeki tungsten tellerle iki katın üstüne çıkarılmış, sonra ampullerin içine soy gaz konmasıyla iki kat daha artırılmıştır. 1939'da ilk floresan ışığı bu verimliliği yüzde 7'nin üstüne çıkarmış, verimlilik oranları İkinci Dünya Savaşı sonrasında yüzde 10'un epeyce üstüne tırmanmıştır (Smil 2006).

Ama bu kazanımlar en iyi aydınlatma verimiyle takdir edilebilir. Bu aydınlık ve ısıma akışı (watt başına lumens, lm/w olarak ifade edilir) ısıtılı bir enerji kaynağının görünen ışık üretme verimini ölçer, azami seviyesi de 683 lm/W'dir. İşte size aydınlatma etkisinin tırmanışı, hepsi de lm/W birimine çevrilmiş olarak (Rea 2000): mum, 0,3; gaz ışığı, 1-2; ilk akkor ampuller, 5'ten az; modern akkor ışık 10-15; floresan ışıkları, 100'ü bulur. Bugün, düşük basınçlı sodyum lambaları en etkili ticari ışık kaynağıdır (azami düzeyleri 200 lm/W'nin hemen üstündedir), ama sarımsı ışıkları ancak sokakların aydınlatılmasında kullanılır. Bütün ev içi uygulamalara uygun olan, ışık saçan diyotlar (LED) zaten 100 lm/W'ye yakın ışık verir, çok geçmeden de 150 lm/W'nin üstüne çıkacaklardır (USDOE 2013).

Karada bu mekanik evrim, son dönemde çok dingilli kamyonetlerle, blok yük trenleriyle (yaklaşık 10.000 tonluk istiflenmiş malzeme taşırlar) ve hızlı elektrikli yolcu trenleriyle (1.000 kişiye kadar) zirveye tırmandı. Süper tankerler 500.000 ton ham petrol taşır, en büyük yolcu uçakları Boeing 747 ve Airbus 380 yaklaşık 500 kişi taşır ve en büyük kargo uçağı Antonov 225 ise 250 ton taşıyabilir. Menzil artışı da bir o kadar etkileyici olmuştur: Bir binek otomobilin yeniden yakıt doldurmadan alabileceğı en uzun mesafe bugün 2.600 km'nin üstüne çıkmıştır (dizel motorlu Passat TDI'nin 2012'de kırdığı rekor, Quick 2012), Boeing 777-200LR 17.500 km'den fazla uçabilir.

Yolcu ve mal nakliyatının hızı ve erimindeki artışa, silahların fırlattığı vurucu birimlerin hızı, menzili ve etki gücünün artması da eşlik etmiştir. Mızrakların öldürücü olduğu menzil sadece yirmi-otuz metreydi; sahaya uzmanca yerleşmiş bir mızrak atıcısı bu menzili 60 metrenin üstüne çıkarabiliyordu. İyi bileşik yaylar 500-700 metreden delici oklar atabiliyordu. Daha güçlü arbaletlerin menzili de buydu. Çeşitli mancınıklar 20-150 kg ağırlığındaki taşları 200-500 metre öteye fırlatabiliyordu. Kasların yerini barutun alması menzili hızla artırmıştır. 1500'den hemen önce en ağır toplar 140 kg ağırlığında demir



Şekil 7.7 Yolcu nakliyatında, demiryolu öncesi çağın at arabaları saatte azami 20 km hız yapabiliyorken, en iyi lokomotif tasarımlarından yirmi-otuz yıl sonra bu hız saatte 100 km'nin üstüne çıktı. Modern hızlı trenler genellikle saatte 200/300 km hızla yol alır, jet uçakları saatte 900 km'nin üstünde bir hıza sahiptir. Bu kitabın ulaştırma ile ilgili bölümlerinde bahsedilen çeşitli kaynaklarda yer alan verilerden derlenmiştir.

gülleleri 1.400 metre öteye, daha hafif taş güllelerini iki kat daha uzağa fırlatabiliyordu (Egg vd. 1971).

Yirminci yüzyıl başına gelindiğinde, savaş meydanında kullanılan büyük silahların menzili de elli-altmış kilometreye ulaşmış, tüfekler uzun menzilde yıkım yaratmaktaki üstünlüklerini bombardıman uçaklarına devretmişti. İkinci Dünya Savaşı son bulduğunda bombardıman uçaklarının menzili 6.000 km'yi aşmış, yaklaşık 9 ton bomba atılmıştı; ardından balistik füzeler de bombardıman uçaklarını geride bıraktı (Spinardi 2008). 1960'ların başından bu yana bu füzeler gerek karada bulunan füze rampalarından gerek denizaltılardan fırlatılarak Dünya'nın herhangi bir yerine daha büyük bir kesinlikle daha güçlü nükleer bombalar taşıyabilecek durumdadır. Antik Eski Dünya'nın bileşik yayından yirminci yüzyıl sonundaki balistik füzeyle menzil artışı 30.000 kat civarındadır, bir füzenin yıkıcı gücüyse bir okun yıkıcı gücünden 16 kerte daha büyüktür.

Hem mutlak hem görelî terimlerle uzun vadeli tüketim eğilimleri de bir o kadar etkileyici olmuştur. Küresel ölçekte değerlendirildiğinde, toplam aslî enerji akışları, geleneksel biyokütle yakıtları da dâhil olmak üzere 1800’de 20 EJ’ye, 1900’de 45 EJ’ye, 1950’de 100 EJ’ye, 2000’de 380 EJ’nin hemen üstüne, 2015’te 550 EJ’nin üstüne çıkmıştır. Bu da yıllık gücün 1800’de 650 GW iken 2000’de 12,2 TW’ye yükseldiği, iki yüzyılda yaklaşık 20 katlık bir artış olduğu anlamına gelir, 2015’te ise yüzde 40’lık bir artışla 17,5 TW civarına çıkmıştır. Fosil yakıt çıkarımında 1800 ile 2000 arasında yaklaşık 900 katlık bir artış olmuş, 0,4 EJ’nin altında kalan bir seviyeden 300 EJ’nin üstüne çıkmıştır. Artan enerji kullanımı hem mutlak hem görelî tipik kişi başı tüketim düzeylerini değiştirmiştir.

Avcı toplumların enerji ihtiyaçları gıda, temel giyim ve geçici barınak temininin hakimiyetindeydi. Antik yüksek kültürler yavaş yavaş artan enerji kullanımını daimi barınaklara, ekilip biçilmiş ve işlenmiş daha çeşitli gıdalara, daha iyi giysilere, ulaştırmaya ve çeşitli imalat faaliyetlerine (odun kömürü demir cevheri eritmek ve tuğla pişirmek için gerek duyulan ısının temin edildiği başlıca kaynaktı) kanallı etmişti. Erken sanayi toplumları (daha fazla sayıda evcil hayvana sahiplerdi, su tekerleri ve yel değirmenlerinin kinetik enerjisinden yararlanıyorlardı ve daha fazla miktarda kömür çıkarıyorlardı) Ortaçağ’ın zirve dönemlerinde ağırlık gösteren kişi başına enerji kullanımı düzeyini kolayca iki katına çıkardılar.

Başlarda bu artışın çok büyük bir bölümü yeni imalat alanlarına, inşaat ve ulaştırmaya gitti (kapsamlı altyapı geliştirme çalışmaları da buna dâhildi), ama nihayetinde özel enerji kullanımının artışı, sektörel enerji kullanımının standart bildirimine yansımamıştır: örneğin Uluslararası Enerji Ajansı istatistikleri 2013’te ABD’de aslî enerji kullanımının sadece yüzde 12’sinin konutlarda olduğunu gösterir, ABD Enerji Enformasyon Ajansı ise bu oranı yüzde 22 olarak verir (bütün elektrik ve üretimindeki kayıplar da dâhil olmak üzere), (ticaret ve nakliyat başlıkları altında sınıflandırılan büyük oranlardaki enerji kullanımı dâhil) fiili pay yüzde 30’un epey üzerindedir.

ABD’de kişi başına enerji arzı 1900’de zaten epeyce yüksekti, bu nedenle yirmi birinci yüzyılın ilk on yılında “sadece” 2,5 kat daha yükseldi (kişi başına 132 GJ’ye karşılık 330 GJ), Japonya’nın 1900 ile 2015 arasındaki enerji tüketimi ise 15 kat arttı, Çin’deyse yaklaşık 10 katlık bir artış oldu. Ortalama çevrim verimlerinin sürekli artışı sayesinde, kişi başına yararlı enerji tüketimindeki artışlar çok daha yüksek olmuştur: yirminci yüzyılda hangi ülkede

gerçekleştiğine bağlı olarak en az dört katla en fazla 50 kat arasında değişen düzeylerde artış gözlenmişti. Genel enerji verimliliğinin yüzde 20'den yüksek olmadığı düşünülürse, ABD'nin 1900'deki yararlı enerji tüketimi yaklaşık 25 GJ/t'yi aşmamıştı, ama 2000'e gelindiğinde yüzde 40'lık ortalama bir verimle, bu oran kişi başına 150 GJ'yi bulmuştu, bir asırda yedi katlık bir artış olmuştu. Çin için en iyi tahminlerime göre 1950'de kişi başına düşen yararlı enerjinin 0,3 GJ'den 2000'de 15 GJ'ye yükseldiğini, sadece iki kuşak içinde 50 katlık bir artış olduğunu gösterir.

Fouquet'nin (2008) Britanya'dan sunduğu veriler, 1750 ile 2000 arasında 250 yıl içinde başlıca enerji tüketim kategorilerindeki bu yararlı kazanımları aydınlatır. Bütün sanayi gücü için (ki bu güç 1750'de canlı işgücü, su tekerleri, yel değirmenleri ve birkaç buhar motoruyla temin ediliyordu; 2000'deyse çoğunlukla elektrikli motorlar ve içten yanmalı motorlarla sağlanıyordu) 250 yılda 13 katlık bir artış söz konusuydu; mekân ısıtmada 14 katlık, yolcu ulaştırmada 900 katlık bir artış olmuştu (1750'de atlar, at arabaları, tekneler ve yelkenli gemiler kullanılırken 2000'de ulaştırma içten yanmalı motorlardan güç alan araçlar ve gemilerle, çoğunlukla da jet motorlarıyla çalışan uçaklarla gerçekleştiriliyordu); (daha önce belirttiğimiz üzere) ışıklandırma alanındaki kazanımlar en üst sırada yer alıyordu, ortalama bir İngiliz 2000 yılında 1750'de olduğundan 11.000 kat daha fazla ışık tüketiyordu.

Yararlı enerji hizmetlerindeki kazanımların izinin bu katlanarak artışlarla sürülmesi, en yararlı enerji ölçüm biçimidir, çünkü üretim kapasitesinde, hayat kalitesinde gözlenen büyük kazanımları, görülmemiş düzeydeki hareketliliği ve (Dünya dışından birinin gözüyle) uydulardan alınan gece görüntülerinde Avrupa, Kuzey Amerika ve Asya'nın geniş bölümlerini kesintisiz bir ısıltı tarlası olarak görünmesine neden olacak kadar fazla ışık bulunmasını açıklar. Ama daha yüksek enerji verimlilikleri, talep artışı ve nüfus artışının birleşmesi nedeniyle yutulmuştur, küresel ekonomi nispeten daha az enerji yoğun bir hal alsa da toplam enerji kullanımı artmaktadır, ancak en ileri ekonomilerin bazılarında son otuz yılda kişi başına ortalama enerji talebinde doygunluk gözlenmektedir.

Bunun sonucunda bütün zengin ülkelerde, hayatın fiziksel gereklerini temin etmekte kullanılan enerjinin, artan tüketimdeki payı giderek küçülmektedir; çok çeşitli malların üretilmesi, sayılamayacak kadar fazla hizmetin sunulması, nakliyat ve dinlence faaliyetleri bugün çok büyük miktarda yakıt ve elektrik tüketmektedir; aynı örüntü kalabalık bir nüfusa sahip bütün modern-

leşen ülkelerde, en başta da Çin, Hindistan ve Brezilya'da sayıları giderek artan varsıl kentli kesimler için geçerlidir. Uzun vadede verimlilik artışları enerji fiyatlarında gözlenen ciddi gerilemelerin en önemli nedeni olmuştur (reel, enflasyona göre düzeltilmiş terimlerle düşünüldüğünde).

Kander (2013) yirminci yüzyılda Batı Avrupa'da reel enerji fiyatlarının Britanya'da yüzde 80'den, İtalya'da yüzde 33'e uzanan bir yelpazede yüzde 75 gerilediğini göstermektedir. En ilginç uzun vadeli eğilimlerden bazıları (sabit parasal değerlerle gereği gibi karşılaştırma yapılarak ya da belli bir performansın ya da verilen hizmetin birimi başına) Ortaçağ kadar gerilere uzanan İngiliz fiyat verilerinden yararlanan Fouquet (2008) tarafından sunulmuştur. 1500 ile 2000 arasında konut ışıklandırmanın maliyeti yaklaşık yüzde 90, sanayi gücünün maliyeti yüzde 92, yük nakliyatının maliyeti yüzde 95, okyanus aşırı yük taşımanın maliyeti yüzde 98 gerilemişti. Ama açık arayla en etkileyici gerileme aydınlatmada gözlenmişti.

Doğrudan ya da elektrik yoluyla ışık üretmekte kullanılan yakıtların maliyetinin gerilemesi ve aydınlatma aygıtlarının veriminin artışı birleşerek aydınlatma hizmetlerinin maliyetinde (parasal değer/lumen), başka hiçbir türde enerji çevrimine denk düşmeyen bir gerileme yaratmıştır. 2000 yılında Britanya'da bir lumen ışık, 1500'deki maliyetinin sadece yüzde 0,01'ine, 1900'deki maliyetinin yaklaşık yüzde 1'ine denk geliyordu (Fouquet 2008). Nordhaus (1998) yirminci yüzyıl sonuna gelindiğinde ABD'de aydınlatma maliyetinin 1800'de olduğundan dört kerte daha düşük olduğunu hesaplamıştı (fiili oran 0,0003 civarındaydı). Reel elektrik fiyatları yirminci yüzyılda hem Avrupa'da hem Kuzey Amerika'da yüzde 97-98 düzeyinde gerilemişti (Kander 2013), bu gerileme kişi başına kullanılabilir ortalama gelirden beş katlık artışla ve çevrim verimliliğinde yaklaşık bir kertilik artışla birleştiğinde, 2000 yılında ABD'de elektrik hizmetlerinde bir birimlik artışın, 1900'de olduğundan en az 200 kat, en fazla 600 kat daha fazla bütçeye uygun olduğu anlaşılır (Smil 2008a). 2000 yılından beri ortalama bir Amerikan ailesinin enerji harcamaları kullanılabilir gelirin sadece yüzde 4-5'i seviyesinde olmuştur, tipik konut büyüklüğü ve ulaştırma yoğunluğu düşünüldüğünde olağanüstü bir pazarlıktır bu (USEIA 2014).

Bütün bu uzun soluklu fiyat düşüşleri, tartışılmaz eğilimler çizer, ama öte yandan enerji fiyatları yakıtların çıkarılması, nakledilmesi, işlenmesi ve yakılması ile çeşitli elektrik üretim biçimlerinin çevre ve sağlık üzerindeki etkileri de dâhil olmak üzere çeşitli dış etkileri tam anlamıyla yansıtır olsaydı bu

Kutu 7.3

Enerji sübvansiyonları

Uluslararası Para Fonu (IMF 2015) 2011'deki ilk tahmininde 2 trilyon dolar olarak öngördüğü 2015 küresel enerji sübvansiyonları rakamını, iki katın üstüne çıkarıp 4,2 trilyon dolar, 2015 toplamını da 5,3 trilyon dolar, yani dünya ekonomik hasılasının yaklaşık yüzde 6,5'i olarak tahmin etmiştir. Bu sübvansiyonların çoğu, ülke içindeki çevre ve sağlıkla ilgili sorumluluklar ve diğer dış etkenler için (trafik tıkanıklığı ve kazalar dâhil) gerekenden az fiyat istenmesinden kaynaklanır. Muazzam miktarda kömür yakan Çin sübvansiyonlar konusunda kesinlikle başı çekmişti (2015'te 2,27 trilyon dolar); Ukrayna'da sübvansiyonlar ülkenin gayri safi yurtiçi hasılasının yüzde 60'ını buldu; Katar'ın kişi başı sübvansiyonları ülkenin her sakini için 6.000 dolarla ilk sırada yer alıyordu. Otomotiv için etanol üretmek amacıyla karbonhidrat ürünleri fermantasyonunu yaygınlaştırmak ve yenilenebilir elektrik üretiminin başlıca iki yolu olan güneş ve rüzgâr enerjisi üretimini tesis edip yaymak üzere yeni bir enerji sübvansiyonları dalgasına başvurulmuştur. (Charles ve Wooders 2011; Alberici vd. 2014; USEIA 2015c).

yörüngelerin hemen hepsinin farklı görünüyör olacağı da akılda tutulmalıdır. Hiçbir yerde böyle olmamıştır. Parçacık maddenin yakalanması ve baca gazı kükürtünün giderilmesi gibi bazı dış etkiler büyük ölçüde içselleştirilmiştir, bazı etkilerse görmezden gelinmiştir: En dikkat çekici noktaysa hiçbir fosil yakıt CO₂ güdümündeki küresel ısınmanın nihai maliyetini yüklenmemiştir. Bunun yanı sıra çoğu enerjinin fiyatları (ister sözüm ona serbest piyasa ekonomilerinde ister ağır devletçi politikaların izlendiği ülkelerde; gerek yüksek gelirli gerek düşük gelirli ülkelerde) çoğunlukla dış etkileri görmezden gelerek, sıklıkla düşük oranlarda vergi alarak ve başka kayırmacı muamelelerle ağırlıklı biçimde sübvansye edilmiştir (Kutu 7.3).

Değişmeyen Ne Olmuştur?

Enerjinin güdümündeki gelişmelerin temel niteliği dikkate alındığında, bu sorulması yerinde bir sorudur, apaçık basit cevap da yeni enerji kaynakları ile yeni asli itici güçlerin benimsenmesi ve yayılmasının ekonomik, sosyal ve çevresel değişikliklerin temel gerekçesi olduğu, modern toplumların neredeyse bütün veçhelerini değiştirdikleri olmalıdır: Bu süreç her zaman bizimleydi, ama hızı ivme kazanmıştır. Daha iyi aletler, ateşte ustalık ve daha iyi avlanma stratejilerinin beraberinde getirdiği tarih öncesi değişiklikler çok ağır yaşandı, on binlerce yıl içinde açılıp gelişti. Sonrasında kalıcı tarım tekniklerinin benimsenmesi ve yoğunlaşması binlerce yıl boyunca devam etti. Bunun en önemli sonucu da nüfus yoğunluklarında toplumsal tabakalanmaya, mesleki uzman-

laşmaya ve kentleşmenin başlamasına neden olan büyük artışlar yaşanması oldu. Fosil yakıt tüketimindeki artışın yarattığı yüksek enerji toplumları sürekli yenilik ihtiyacının yaygın bir takıntı halini almasına yol açarak değişimin örnekleri haline geldi.

Avcı nüfusların yoğunlukları geniş bir yelpazeye yayılır, ama bazı deniz kültürleri istisna olmak üzere bu yoğunluklar, kilometrekare başına bir kişi seviyesini asla geçmemiştir. Üretim düzeyi en düşük olan yer değiştirmeli tarım bile bu yoğunluk oranını en az on kat artırmıştır. Daimi tarım ise bir kez daha nüfus yoğunluğunda on katlık bir artışı beraberinde getirmiştir. Geleneksel tarımın yoğunlaşması daha yüksek enerji girdileri gerektiriyordu. Canlı iş gücü tarla işlerinde yegâne asli itici güç olarak kaldığı sürece, para getirecek ürün yetiştirme ve hayvan yetiştirmeye uğraşan nüfusun genel nüfusa oranının çok yüksek, yüzde 80'in üzerinde, genellikle de yüzde 90'dan fazla kalması gerekti. Sulama, teraslama, çoklu ekim, dönüşümlü ekim ve gübreleme içeren yoğun tarım uygulamalarının net enerji getirileri genelde kapsamlı tarımda olduğundan daha düşüktü, ama görülmemiş düzeyde nüfus yoğunluklarını mümkün kılıyordu.

En yoğun geleneksel tarım biçimi (en başta Asya'da yapılan, büyük ölçüde vejetaryen beslenme biçimlerini ayakta tutan, bir yıl içinde çok sayıda ürün ekimi) genellikle ekilen hektar başına beş kişiden fazlasını geçindirebiliyordu. Bu tür nüfus yoğunlukları tedrici bir kentleşmeyi beraberinde getirmiştir, ama kentlerin büyümesi, kapsamlı ticaret ve genişleyen imparatorlukların etkili bir biçimde entegrasyonu her şeyden önce karayoluyla nakliyat hızının yavaş, kapasitesinin düşük olmasıyla sınırlanmıştır. Denizci toplumlardaysa hem kazançlı kıtalararası ticarete, hem uzak mesafelere gücün yansıtılmasında kullanılan yelkenli gemilerin yetilerinin gelişmesi, bunlara katkıda bulunmuştur.

Geleneksel toplumlardaki ağır, birikimsel dönüşümlerin tersine, fosil yakıtı dayalı sanayileşmenin sosyoekonomik sonuçları neredeyse anında görülmüştür. Fosil yakıtların biyokütle yakıtların yerini alması, daha sonra canlı enerjilerin yerlerini elektrik ve içten yanmalı motorlara bırakmaları sadece birkaç kuşak içinde yeni bir dünya yaratmıştır (Smil 2005). Amerika'nın deneyimi bu sıkıştırılmış değişikliklerin en uç örneği olmuştur. ABD'nin gücü ve etkisi, başka modern ülkelerde olduğundan daha fazla, olağanüstü yüksek seviyede enerji kullanmasıyla yaratılmıştır (Schurr ve Netschert 1960; Jones 1971; Jones 2014; Smil 2014b). ABD 1850'de marjinal düzeyde küresel itha-

lat yapan, çok büyük bir ağırlıkla kırsal, yakıtı odun olan bir toplumdur. Bundan bir asır sonra, kişi başına yararlı enerji tüketimini üç kattan fazla artırıp dünyanın hem en büyük fosil yakıt üreticisi ve tüketicisi hem de bu avantajları İkinci Dünya Savaşı'nda tam bir zafere çevirmeyi başaran önde gelen teknik yenilikçisi haline geldi; hem ekonomik ve askeri bir süper gücü hem de dünyanın önde gelen teknik yenilikçisiydi.

Yeni fosil yakıtlara dayanan bu dünyadaki en bariz fiziksel dönüşümler, birbirleriyle iç içe geçmiş sanayileşme ve kentleşme süreçleriyle yaratılmıştı. En temel düzeyde, bu süreçler yüz milyonlarca insanı ağır fiziksel emek sarf etmekten kurtarmış, giderek artan ve çeşitlenen bir yiyecek arzı ve daha iyi barınma koşulları ortaya çıkarmışlardı. Daha üretken tarım biçimleriyle yeni iş fırsatlarının genişleyen sektörlerde bir araya gelmesi, bütün kıtalarda köylerden kitlesel göçü beraberinde getirmiş, sürekli hızlı kentleşmeye yol açmıştı. Bu değişiklik de küresel enerji kullanımını muazzam derecede olumlu yönde etkilemişti. Kent hayatının altyapı gereksinimleri kişi başına ortalama enerji kullanımını, kentler son derece sanayileşmiş olmasa da kırsal ortalamanın çok üstüne çıkarmıştı. Enerji yoğunluğu nispeten yüksek olan bu ihtiyaçları, uzun mesafeli gıda ve yakıt nakliyatının ucuz yollarından yararlanmaksızın, daha sonraları da elektrik aktarımı sağlanmaksızın desteklemek mümkün değildi.

Enerjisini fosil yakıtlar ve elektrikten alan kitlesel fabrika üretiminin mekanikleşmesi, sık kullanılan malların kitlesel üretimini mümkün kıldı, bütçeye uygun fiyatlara çeşitliliğin artmasını ve kalitenin iyileştirilmesini sağladı. Yeni malzemeleri (metaller, plastikler ve kompozitler) kullanıma soktu ve ticareti, nakliyatı, telekomünikasyonu, gerçekten küresel düzeyde ve makul miktarda kullanılabilir gelire sahip bütün bireylerin erişebileceği şekilde çok yoğunlaştırdı (turist ordularının dikkat çekici bütün mimari eserleri ve manzaralı yerleşimleri formalite icabı görmek ve bir sopayla birkaç selfie çekmek için kuşatmasından da anlaşılabilen üzere deneyimleri kalabalıklaştırdı ve metalaştırdı).

Bu gelişmeler toplumsal değişikliğin her veçhesine ivme kazandırdı. Sınırlı sosyal ve ekonomik ufukların geleneksel döngüsünü kırdı, (iletişim miktarıyla niteliği arasında kaçınılmaz olarak ters orantılı olan ilişkiyi bir kenara bırakırsak) önce "sosyal medya" kullanıcılarının sayısı milyarlarcaya ulaştı, sonra ikinci olarak genelde olumsuz etkiler doğuran bir gelişmeyle sanayi faaliyetleri (içkin olarak yüksek ulaştırma bedelleri ve gereğine uygun kalite kontrol süreçlerinin kaybolması nedeniyle) deniz aşırı vergisiz bankacılık ve taşeron-

lukla halledilmeye başladı. Söz konusu gelişmeler sağlık koşullarını iyileştirdi ve ömürleri uzattı, neredeyse genel denebilecek yararlar sağladı (bunun tam tersiye yaşlanan nüfuslarla uğraşmanın getirdiği yüküdür). Hem temel okur-yazarlığı hem yüksek eğitimi yaygınlaştırdı (gerçi bütün üniversite derecelerinin kitlesel olarak dağıtılması değerlerini düşürmüştür) ve dünya nüfusunun giderek büyüyen bir bölümü için bir parça varsıllığı mümkün kıldı. Demokrasi ve insan haklarına daha fazla alan açtı (ama hiç kuşku yok ki dünyayı gerçekten de daha demokratik kılmadı).

Birçok benzersiz rol oynadığı için elektrikten ayrıca bahsetmek gerekir. Enerjinin bu çok esnek ve uygun biçimine dayanmak, hızla her şeyi kapsayan bir bağımlılığa dönüşmüştür. Elektrik olmasaydı modern toplumlar tarım yapamaz ya da bugün yediklerini yiyemezlerdi: Elektrik hem amonyak fabrikalarındaki hem evlerdeki buzdolaplarındaki kompresörlere güç verir. Hastalıkları önleyemezlerdi (bugün hastalıklar buzdolaplarında soğutulan aşılarla kontrol altına alınır), hastalara bakamazlardı (teşhis emektar röntgen makinelerinden tutun en son MRI'ya, yoğun bakım ünitelerindeki kapsamlı izlemeye varıncaya dek elektrik enerjisiyle çalışan makinelere dayanır), ulaştırma ağlarını kontrol edemezlerdi ya da muazzam hacimdeki enformasyonla (veri merkezleri bugün en fazla elektrik tüketilen noktalar arasında yer almaktadır) ya da kentlerdeki kanalizasyonla başa çıkamazlardı.

Elbette ki elektrik olmasa modern toplumlar sanayilerini, giderek genişleyen bir yelpazede yer alan daha yüksek kaliteli, ama keseye daha uygun malları kitlesel olarak üretecek şekilde idare edemezlerdi. Bu üretim, en zengin birkaç kişi için az sayıda üretilen, takdir edilesi çeşitlilikteki rafine lüks mallar ile genelde bulunabilir olan, çeşitleri sınırlı ham mamuller arasında var olan eski ayrımın büyük bir bölümünü silmiştir. Bu ilerleyen üretimin giderek artan bir bölümü, dünya piyasalarına çıkmıştır. 2015'te dış ticaret gayrisafi dünya hasılasının yaklaşık yüzde 25'ini oluşturuyordu, 1900'de bu oran yüzde 5'ten azdı (Dünya Bankası 2015c). Bu eğilim daha hızlı ve daha güvenilir ulaştırma yöntemleriyle ve anında elektronik telekomünikasyonla ivme kazandı. Fosil yakıtlar ve elektrik dünyayı bir ekonomik otarşiler mozaigi olmaktan uzaklaştırdı ve kültürel ufukları sınırları karşılıklı bağımlılığı giderek artan bir bütünle sınırladı.

Fosil yakıt çağının getirdiği bir o kadar derin dönüşümler arasında, sosyal ilişkilerin yeni yapılar kazanması da yer alır. Herhalde bunlar arasında en önemlisi de yeni bir zenginlik dağıtma sisteminin ortaya çıkmış olmasıdır. Statünün yerini sözleşmeye bırakması kişisel ve siyasal bağımsızlığın artmasını

beraberinde getirmiştir. Bu dönüşüm, yeni çalışma rejimleri (genelde sabit çalışma saatleri ve çok katmanlı örgütlenme hiyerarşileri) ve özel çıkarları olan yeni sosyal gruplanmalar (işçi sendikaları, yönetim, yatırımcılar) da ortaya çıkarmıştır. Neredeyse başından beri yeni ulusal güçlükler, hepsinden de önemlisi bölgesel sanayilerin hızla gelişmesinin vardığı uç noktalar ve kronik ekonomik gerileme ile başa çıkma yönünde bir ihtiyaç doğurmuştur. Bu uyumsuzluk en zengin ülkelere bile musallat olmaya devam eder. Ticaret engelleri, sübvansiyonlar, gümrük vergileri ve yabancı mülkiyet uluslararası ilişkilerde yeni gerilimlere yol açmıştır.

Yeni asli enerji kaynaklarının ve yeni asli itici güçlerin ortaya çıkması da ekonomik büyüme ve teknik yenilik döngülerini derinden etkilemiştir. Yeni enerji kaynaklarını çıkarmak (ya da üretmek), yakıtlar ve elektriği nakletmek (ya da aktarmak), yakıtları işlemek ve yeni asli itici güçleri kitlesel olarak üretmek için gerekli kapsamlı alt yapıyı geliştirmek için ciddi yatırımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Buna karşılık bu yeni kaynaklar ve asli itici güçlerin ortaya çıkması, tedrici iyileşme ve temel teknik yenilik gruplarını beraberinde getirmiştir. Schumpeter'in (1939) sanayileşen Batı ülkelerinde işletme döngülerine ilişkin klasik değerlendirmesi bir yanda yeni enerji kaynakları ile asli itici güçler diğer yanda yatırımların ivme kazanması arasında şaşmaz bir korelasyon olduğunu gösteriyordu (Kutu 7.4, Şekil 7.8).

Bu uzun döngülerin daha sonraki yılları kapsayacak şekilde uzatılması gayet iyi işler. Savaş sonrasında ekonomik yükselme, küresel düzeyde hidrokarbonların yerini kömürün almasıyla, dünya çapında (nükleer fizyonla üretim de dâhil olmak üzere) elektrik üretiminin artmasıyla, kitlesel düzeyde otomobil sahipliğiyle ve tarımda kapsamlı enerji sübvansiyonlarıyla ilişkilendirilmiştir. Bu genişleme OPEC'in 1973'te petrol fiyatlarını beş katına çıkarmasıyla birlikte durdu. En son yenilik dalgası, sanayi tipi ve ev tipi son derece verimli çeşitli enerji çeviricileri ve fotovoltaik enerji üretiminde kaydedilen ilerlemeleri kapsar. Mikroçiplerin hızla yayılması, bilgisayar alanındaki ilerlemeler, optik fiberlerin daha fazla kullanılması, yeni malzemelerin ve yeni sanayi üretim biçimlerinin ortaya çıkması, her yerde rastlanan otomasyon ve robotlaşma enerji açısından daha büyük sonuçlar doğuracaktır.

Dünyanın olağanüstü enerji kullanımının ekonomik sonuçları, dünyanın en büyük şirketlerinin isim listesine de yansımıştır (Forbes 2015). 2015'te, dünyada finans dışında faaliyet gösteren zirvedeki 20 çokuluslu şirketten beş tanesi petrol şirketi idi: EXXON, PetroChina, Royal Dutch Shell, Chevron ve Sinopec. Üç tanesi ise otomobil ve kamyon üreticisiydi: Toyota, Volkswagen

Kutu 7.4

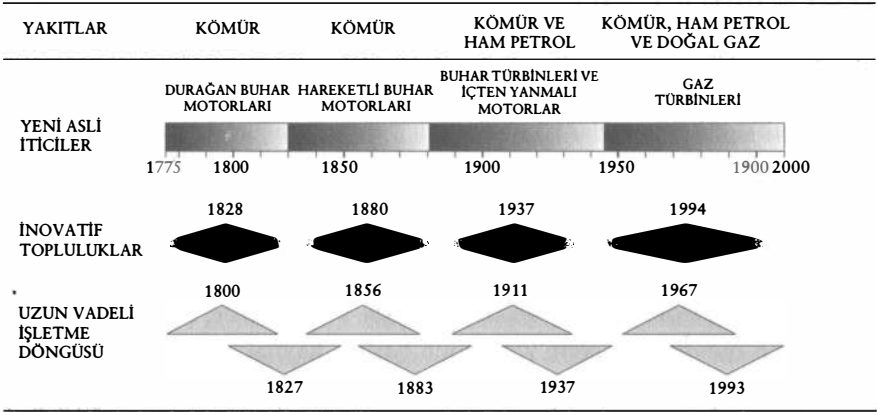
İşletme döngüleri ve enerji

İyi belgelenmiş ilk yükselme (1787-1814) kömür çıkarmanın yaygınlaşması ile durağan buhar motorlarının ilk çıkış tarihlerine denk gelir. İkinci genişleme dalgasının (1843-1869) itici gücüyle, açıktır ki hareketli buhar motorlarının (demiryolları ve buharlı gemiler) yaygınlaşması ve demir metalurjisindeki ilerlemeler olmuştur. Üçüncü yükselme (1898-1924) ticari elektrik üretiminin artması ve fabrika üretiminde mekanik güç üretiminin yerini elektrik motorlarına bırakması sayesinde gerçekleşmiştir. Bu yükselme dönemlerinin merkezi noktaları arasında 55 yıl vardır. 1945 sonrasında yapılan etkileyici araştırmalar, insani ilişkilerde yaklaşık 50 yıllık nabız atışlarının var olduğunu (Marchetti 1986) ve ekonomik hayatta, özel olarak da teknik yenilikler alanında bu tür uzun dalgaların tekrarlandığını büyük ölçüde doğrulamaktadır (van Duijn 1983; Vasko, Ayers ve Fontvieille 1990; Allianz 2010; Bernard vd. 2013).

Bu araştırmalar yeni asli enerjiler benimsemenin ilk aşamalarının büyük yenilik dalgalarının başlangıcıyla ciddi oranda örtüştüğünü göstermektedir. Enerji yeniliklerinin tarihi, ekonomik bunalımların yenilikçi faaliyetleri tetiklediğini söyleyen, hâlâ tartışmalı önermeyi de kuvvetle doğrulamaktadır. Mensch'in (1979) tanımladığı üç geçici yenilik topluluğunun merkezi noktaları, Schumpeter'in belirlediği gerileme dönemlerinin orta noktalarına neredeyse mükemmel bir biçimde oturur. 1828'de zirveye çıkan ilk topluluk açıktır ki durağan ve hareketli buhar makinelerinin kullanılmasıyla, odun kömürünün yerini kok kömürünün almasıyla ve kömürden gaz üretilmesiyle ilişkilidir. 1880'de zirveye tırmanan ikinci dalga devrimci yenilikler olan elektrik üretimi, elektrik ışığı, telefon, buhar türbini, elektrolitle alüminyum üretimi ve içten yanmalı motoru içerir. 1937 civarında gruplanan üçüncü dalga gaz türbini, jet motoru, floresan ışıkları, radar ve nükleer enerjiyi kapsar.

ve Daimler. Üretimin yoğunlaşması, uygun fiyata güvenilir bir enerji arzıyla sağlanmış, sanayi yoğunlaşmasında apaçık olan ölçek ekonomilerini teşvik etmiştir. Neredeyse bütün sektörler bu sürecin iyi örneklerini sunar. 1900'de ABD'de otomobil üreten 200 civarında şirket bulunuyordu, Fransa'da otomobil üreten şirketlerin sayısı 600'ün üstündeydi (Byrn 1900). 2000'e gelindiğinde ABD'de sadece üç şirket, GM, Ford ve Chrysler; Fransa'daysa sadece iki şirket, Renault ve Citroën-Peugeot kalmıştı. Britanya'daki bira üreticilerinin sayısı 1900'de 6.000'ken 1980'de sadece 142'ye düşmüştü (Mark 1985). Ama birkaç sanayide (mikro bira üreticileri de dâhil) 1970'lerden beri tam tersi yönde bir hareket söz konusudur. Bu değişiklik büyük ölçüde iletişimin daha iyi, teslimatın daha hızlı olmasıyla birlikte özel talepleri karşılayacak fırsatlar bulunmasına bağlanabilir.

Kişisel açıdan yüksek enerji çağının en önemli sonucu açık arayla, görülmemiş düzeyde bir varsılık ve hayat kalitesinin iyileşmesi olmuştur. En temel açıdan, bu başarı bol ve çeşitli gıda arzına dayanmaktadır. Zengin ülkelerdeki insanların, kişi başına düşen ortalama imkanları, gerçekçi beklentilerin



Şekil 7.8 Mensch (1979) ve Schumpeter'in tanımladığı Batı'daki uzun vadeli işletme döngülerine göre (başlıca yakıtlar ve asli itici güçlerle tanımlanan) büyük enerji çağlarının başlangıç tarihlerinin yenilik topluluklarıyla karşılaştırılması. Her iki dalgayı da 2000 yılına dek uzattım.

çok çok üstünde kalmaktadır. Bu fazlalığın ortasında yetersiz beslenmenin, hatta açlığın varlığını sürdürmesi (2015'te 45 milyon civarında Amerikalı yiyecek kartesi alıyordu) dağıtım eşitsizliğiyle ilgili bir meseledir. Fiziksel açıdan varsılığın artması, bebek ölüm oranlarının ciddi oranda azalmasında ve ömür uzunluğunun artmasında kendisini en inandırıcı biçimde gösterir. Entelektüel açıdan okuma yazma oranının yükselmesine, okulda geçirilen yılların artmasına ve çok çeşitli bilgilere daha kolay ulaşılmasına yansımıştır.

Bu varsılığın bir başka önemli bileşeni de zamandan tasarruf etmek için enerji kullanmak olmuştur. Bu kullanım alanları arasında, kamusal ulaşım araçlarından ziyade çok daha enerji yoğun, ama daha hızlı özel otomobillerin yaygın olmanın çok ötesinde tercih edilmesi de vardır. Buzdolabı kullanımı (her gün yiyecek alışverişi olmaması), elektrik ve gaz ayarları, mikrodalga fırınlar ve (yiyeceklerin pişirilmesini ya da yeniden ısıtılmasını basitleştiren ve hızlandıran) gıda işleyiciler ile merkezi ısıtma (ateşlerin tekrar tekrar canlandırması ve yakıt depolama ihtiyacının ortadan kaldırılması) bugün varsıl dünyada genel olarak benimsenmiş, zaman kazandıran mükemmel teknikler olmuştur. Buna karşılık bu enerji yatırımlarıyla kazanılan zaman, sıklıkla hatırı sayılır miktarda enerji girdisi gerektiren tatil seyahatlerine ve eğlencelere harcanmaktadır.

Ama değişmeyen temel bir gerçeklik vardır: Yeni kaynakların, yeni üstün performansların ve verimlilik artışlarının yükselişinin izini süren bu açık ve etkileyici tarihsel eğilimlerin hiçbirisi de insanlığın enerjiyi ilerici olarak daha

akılcı bir biçimde kullandığı anlamına gelmez. Kentlerde birçok kişinin sö- züm ona daha hızlı olduğu için tercih ettiği otomobil kullanımı, mantıksız enerji kullanımının mükemmel bir örneğidir. Otomobili satın almak (ya da kiralamak), yakıtını sağlamak, bakımını yapmak, sigortalatmak için gerekli parayı kazanmaya harcanan zaman hesaba katıldığında, ABD’de otomobille seyahatin ortalama hızı 1970’lerin başında saatte 8 km’den azdı (Illich 1974). Yoğunluk artışıyla birlikte 2000’lerin başında bu hız saatte 5 km’den fazla değildir; 1900 öncesinde atların çektiği arabaların ya da yürüme hızıyla benzer düzeydedir. Ayrıca kuyudan tekerleğe akışta verim yüzde 10’un epey altına indiğinden otomobiller çevre kirliliğinin başlıca kaynaklarından biridir hâlâ; daha önce belirttiğimiz üzere kaydadeğer sayıda ölüm ve yaralanmaya da yol açarlar (WHO 2015b).

Yakıtlar, elektrik ve daha hafif, daha güvenilir, daha esnek, daha ve- rimli çeviriciler fazlasıyla sık bir biçimde müsrifçe kullanılır, yegâne olumlu getirileri olarak gelip geçici bir kişisel tatmin (ya da bu yönden bir iddia) ya- ratırken çevre sorunlarına yol açar. Rose’un (1974, 359) vardığı sonuca göre “Şimdiye dek giderek daha fazla miktarda enerji, kaynakları çöpe çevirmekte kullanıldı, bu faaliyetten gelip geçici yararlar ve haz elde ettik; sicil pek de iyi değil.” Ama verimsiz enerji kullanımının hiçbir yeni yönü yok, ancak ve ancak insan toplumları, sadece türün hayatta kalmasıyla doğrudan ilişkili işler ya da süreçlere adanmış enerji kullanımını asgari seviyeye indirmek gibi, tek bir kap- sayıcı hedefin güdümünde olsalardı bu enerji kullanımlarını müsriflik olarak görmek mümkün olabilirdi.

Ne var ki, fiziksel dünya üzerindeki hakimiyetimiz ılımlı düzeyde enerji fazlaları vermeye başlar başlamaz, insan dehası da bu fazlaları insan elinden çıkmış bir çeşitlilik ve (bazılarına göre) eğlence dünyası yaratmak için kul- lanılmıştır, temel fiziksel ihtiyaçları güvence altına almak için daha fazla enerji kullanılabilecek olsa bile. Ağırlık taşıyan bir sütun, basit düz bir taş silindir ya da uzun bir prizmadan ibaret olabilirdi; antik Yunan mimarisinin üç üslubuna (Dor, İyon, Korint) yapısal ya da işlevsel bir ihtiyaç duyulmamıştı. Zengin bir akşam yemeği yeterli değildi: Roma ziyafetlerinin günlerce devam etmesi gere- kiyordu. Bu ayrıksılık, yenilik, çeşitlilik ve farklılık arayışı Rönesans ve erken modern çağda (1500-1800) yeni bir (görelî) aynı anda her yerdeliğe varmıştı, ama o zaman bile en gönül çelen görünümleri yine de pek azdı ve ağırlıklı olarak kamusal tüketim ve sonraki kuşaklar için tasarlanmıştı.

Ayrıca, modern öncesi toplumların anıtsal yapılarının israf edilmiş kıt

kaynak birikintileri olduğu sonucuna varmak kolaydır. Norenzayan (2013) yargılayıcı ilahlara (“büyük tanrılar”) duyulan inancın karmaşık toplumlar ve anıtsal yapılar inşa edip ayakta tutmak için gerekli işbirliğini güçlendirmek için kritik olduğunu savunmuştur. Bu tür inançların maddi ifadeleri olarak bu yapılar böylece toplumsal bütünleşmeye katkıda bulunmuş, huşu, saygı, alçakgönüllülük, tefekkür ve yardımseverlik uyandırmışlardır. Her halükârda anıtların gelecek kuşaklara kalması niyeti, her yıl Roma’daki St. Peter bazilikasını ya da Agra’daki Tac Mahal’i takdir etmek üzere ziyaret eden çok sayıda turist de ortaya koyduğu gibi sıklıkla mükemmel bir biçimde işlemiştir (Şekil 7.9). Buna karşılık, israf edilen enerji saptamaları etiketi paraları idare etmek ya da süslü topları tekmeleyen, fırlatan ya da atan modern gladyatörleri izlemek için inşa ettiğimiz abartılı, çoğu kez de ilham verici olmaktan uzak yapılara çok daha uygun değil midir?

Daha da önemlisi modern toplumlar bu çeşitlilik, boş zaman eğlencesi, gösterişli tüketim, mülkiyet ve çeşitlilikle farklılaşma arayışını saçma boyutlara taşımış, bunu da görülmemiş bir çapta yapmıştır. Bugün yüz milyonlarca



Şekil 7.9 İnşası 1626'da tamamlanan Saint Peter Bazilikası (Corbis).

insan vardır ki temel önemde olmayan eşyalara (lüks ürünlerin payının artması da buna dâhildir) yaptıkları yıllık özel harcama bir yüzyıl önce Batılı bir ailenin ortalama gelirinin çok çok üstüne çıkmaktadır. Bu aşırılıklara verilebilecek örneklerin sayısı çok fazladır. Varlıklı ülkelerde aileler giderek küçülmemektedir, ama ABD’de sipariş üzerine inşa edilen konutların ortalama büyüklüğü 500 m²’yi aşmıştır; gemi inşa edenlerin ellerinde helikopter pistine sahip yat isteyenlerin bekleme listeleri vardır, piyasadaki birçok otomobil o kadar aşırı bir güce sahiptir ki, kamusal yollarda tam anlamıyla test edilememektedirler: Koenigsegg Regera motoru 1.316 MW gücündedir, Lamborghini ve en üst düzey Mercedes-Benz’lerin gücüyse “sadece” 1.176 MW düzeyindedir ki bu değer 1.600 beygir gücü civarındadır, yani küçük bir otomobilden, örneğin benim kullandığım Honda Civic’ten 11 kat daha güçlüdür.

Daha sıradan bir düzeyde bakıldığında, her yıl milyonlarca insan kıtalararası uçaklarla birbirine benzeyen sahillere gidip deri kanserine daha hızlı yakalanmaktadır; sayıları giderek azalan klasik müzik hayranları Vivaldi’nin *Dört Mevsim*i’ni dinlemek için 100’den fazla kayıt arasından bir tercih yapar; 500’den fazla kahvaltı gevreği çeşidi, 700’den fazla binek otomobil modeli vardır. Böyle aşırı düzeyde bir çeşitlilik, hatırı sayılır düzeyde enerjinin yanlış yerlere tahsis edilmesiyle sonuçlanır, ama öyle görünüyor ki bunun bir sonucu yoktur: Küresel tüketim malları seçkisine elektronik erişim, internet üzerinden sipariş edilebilecek seçeneklerin sayısını birkaç kat artırmıştır, birçok tüketim eşyasının (bilgisayardaki tasarımlarda bireysel değişiklikler ve ek imalat yaparak) siparişe üretilmesi bunu başka bir aşırılık düzeyine taşıyacaktır. Aynı şey hız için de geçerlidir: Bir bilgisayarda sipariş verdikten birkaç saat sonra Çin’de yapılmış gelip geçici bir çöpe gerçekten ihtiyacımız var mı? Ya (çok yakında) insansız bir hava aracıyla teslim edilmesine ne demeli!

Ama kullanılan göstergeler bir yana, bu tür müsrif, verimsiz ve aşırıya varan nihai enerji kullanımı hâlâ küresel azınlığın elindedir. Kişi başına düşen ortalama enerji arzına bakıldığında, dünyadaki 200 ülkenin ancak beşte birinin yüksek enerji tüketiminin (kişi başına 120 GJ’den fazla) desteklediği olgun, varıl sanayi toplumlarına geçiş sürecini tamamladığı, nüfus açısından bakıldığında bu oranın daha da düşük olduğu, yüzde 18 civarında seyrettiği (2015’te 7,3 milyar kişi arasından 1,3 milyar kişi) görülür. Çin, Hindistan, Endonezya ve Brezilya gibi düşük ve orta gelirli ülkelerdeki zengin hanelerin de eklenmesi nüfusun payını ancak marjinal düzeyde artıracak, yüzde 20 civarına çıkaracaktır. Örneğin Çin varıl ailelerin sayısı bakımından bugün dünyada dördüncü sıradadır (ABD, Japonya ve Britanya’nın gerisindedir), ama 2015’te

bu tür ailelerin sayısı beş milyondan azdı (Atsmon ve Dixit 2009; Xie ve Jin 2015).

Bunun sonucunda Batı'daki hızlı teknik yenilik mucizesinin küresel çapta yayılması, kaygı verici bir küresel bölünmeye yol açmış, ülkeler arasında görülmemiş düzeyde bir ekonomik eşitsizlikle sonuçlanmıştır. 2015'e gelindiğinde insanlığın (25 ülkede yaşayan) en zengin yüzde 10'luk kesimi, dünyadaki enerjinin yaklaşık yüzde 35'ine sahipti. Kişisel açıdan bakıldığında, bu ABD'de kişi başına bir haftalık enerji kullanımının ortalama bir Nijeryalı'nın yıllık toplam asli enerji tüketimine ve ortalama bir Ugandalının iki yıllık enerji tedarikine eşit olduğu anlamına gelir. Tersinden düşünüldüğünde insanlığın (15 Afrika ülkesinde yaşayan) en yoksul yüzde 5'lik kesimi, dünyanın asli ticari enerji arzının en fazla yüzde 0,2'sini tüketir.

Bu uyumsuzlukların kolay çareleri yoktur, aradaki uçurumun kapatılması olağanüstü hızlı bir ekonomik büyümeyle bile zaman alır: 1980 ile 2015 arasındaki 35 yıllık hızlı modernleşme sırasında Çin, kişi başı ortalama enerji tüketimini neredeyse beş kat artırarak 90 GJ'nin üstüne çıkardı. Bu süreçte çevre ve sağlık açısından büyük bedeller ödedi ve küresel enerji ticaretini dizginledi, ama yine de rahat tedarik oranının yüzde 20-25 altındadır. En önemlisi de gerekli kaynaklar kolayca elde edilebilir olsa da dünyanın geri kalanını Batı'nın asli enerji tüketim düzeyine çıkarmanın çevreye etkileri kabul edilemez olurdu. Biyosferik bütünlükle ilgili kaygılar, yüksek enerji medeniyeti düşünülürken değerlendirilen başlıca noktalar arasına girmiştir çoktan. Bu kaygılar biyoçeşitliliğin korunmasından tutun insanlardan kaynaklanan hızlı iklim değişikliğine varıncaya dek geniş bir yelpazeye yayılır.

BELİRLENİMCİLİK VE SEÇİM ARASINDA

Birçok tarihsel gelişme, belli enerjilerin belli biçimlerde kullanılmasını izleyen sınırlı bir sonuç yelpazesinin ürünüdür. Farklı asli enerjilere dayanılması, gündelik çalışma ve dinlenme üzerinde farklı izler bırakır. Keseklerin ağır çapalarla kırılarak, damla fideler dikerek, bir avuç sapı kavrayıp orakla keserek, pişirmede kullanılacak samanları ayırarak, tahılı elde öğütürerek (bunların hepsi de on dokuzuncu yüzyılda Çin'in kırsal kesimlerinde hâlâ yaygın olarak yapılan işlerdi) geçirilen bir hayat, güçlü atların kavisli kulaklı pullukları, mekanik tohum atıcıları ve hasat makinelerini çektiği, odun olup yakılacak bir korunun büyük ocaklar için bol bol odun verdiği, unun buharla çalışan değirmenlerde

öğütüldüğü (bunların hepsi de ABD’de on dokuzuncu yüzyıl sonunda yaygın uygulamalardı) bir dünyadan farklı bir dünya yaratır.

Aynı şekilde farklı asli itici güçlere bağımlı olunması gündelik işler için de farklı bir ölçek ve tempo belirler. Atların yuva açma aletleri, burunluk, başlıklar, eğri tahtalar, boyunduruklar, sırtlıklar ve koşum kayışlarıyla titizlikle koşumlanması, at nallarının tıkırtısı, yayları zayıf arabaların sarsılması, dinlenen hayvanların yem torbalarına gömülmüş burunları, at pisliklerinin şehir sokaklarından süpürülmesi ve banliyölerdeki bahçeleri beslemek için arabalara yüklenmesi; bu görüntüler kontak anahtarının çalıştırılması, radyal lastiklerin hışırtısı, sedanlar ve SUV’ların kayarcasına hızlı ilerlemesi, benzin istasyonu ağları ve California ya da İspanya’dan gelen ağır kamyon dizilerinde ya da donduruculu konteynırlarda ve uçakların kargolarında başka kıtalardan taşınan sebzeler ve meyvelerin kolayca bulunabilir olmasının baskın olduğu bir hayattan kökten farklı bir hayat ritmini gözümüzde canlandırır.

Enerjinin insanlık tarihinin başlıca analitik kavramlarından biri olarak kullanılması, açık, kâr getiren ve istenen bir tercihtir. Ama bunu başlıca açıklayıcı etken olarak görmememiz gerekir. Tarihe enerji açısından yaklaşmanın açıklayıcı gücü abartılmamalıdır. Son derece genelleştirilmiş iddialar savunulamaz sonuçlara yol açar. Binyılları aşarak, yüksek sosyoekonomik karmaşıklığın enerji girdilerinin daha yüksek seviyede olmasını ve daha verimli kullanılmasını gerektirdiği yönünde bir genelleme yapmak tartışmasız gerçekliği betimlemek anlamına gelir. Fox’un (1988) yaptığı gibi, enerji akışlarının her seferinde daha rafine bir hal almasının kültürel mekanizmalarda da bir rafineleşme yarattığı sonucuna varmak koskoca bir çelişkili tarihsel kanıtlar yığınına görmezden gelmek anlamına gelir.

Enerjinin insanlık tarihindeki önemini değerlendirmenin yegâne ödüllendirici ve aydınlatıcı yolu ne enerjiyle ilgili sayılamayacak kadar çok zorunluluğun tekrarlanmasıyla desteklenen basite indirgeyici, belirlenimci açıklamalara gönül indirmekten ne de ister iklim değişiklikleri olsun ister salgınlar ister insanların kaprisleri ve tutkuları, tarihi şekillendiren başka birçok etkenin yanında enerjiye marjinal bir rol biçip onu önemsizleştirmekten geçer. Bir şeyin başarılması için enerji çevrimi her zaman gereklidir, ama insanların başlattığı ve denetlediği insan dışı çevrimlerin hiçbiri önceden belirlenmiş değildir, bunların ancak pek azı kaos ya da kaza yoluyla ortaya çıkmıştır. Bu ikilik geçmişin yorumlanması kadar gelecekteki olasılıkların anlaşılması açısından

da önemlidir. Bunlar da önceden belirlenmiş değildir, ama çapları kesinlikle sınırlıdır ve enerji akışları en temel sınırları dayatır.

Enerji İhtiyaçları ve Kullanımlarının Zorunlu Yönleri

Enerjinin fiziksel dünyadaki ve hayatın sürdürülmesindeki temel rolü, evrimsel ve tarihsel gelişmelere mutlaka yansımıştır. İnsan toplumlarının tarih öncesi gelişimi ve yüksek medeniyetlerin karmaşıklığının giderek artması, enerjiyle ilgili sayılamayacak kadar çok zorunluluğun damgasını taşır. En temel fiziksel sınır elbette ki dünyaya gelen güneş ışınlarıdır. Bu akış gezegendeki ısıları karbona dayalı hayata uygun aralıkta tutar ve gezegenin atmosferik dolaşımı ile su döngüsüne güç verir. Isı, yağış ve besinlerin bulunabilirliği bitkilerin verimliliğini belirleyen kilit etkenlerdir, ama yeni sentezlenmiş biyokütlenin ancak bir bölümü sindirilebilir. Bu gerçeklikler bütün avcı toplumların temel varoluş biçimlerini, nüfus yoğunluklarını ve sosyal karmaşıklıklarını şekillendirmiştir. Ezici sayıda örnekte bu grupların etobur olmaları gerekmişti. Yiyeceklerden aldıkları enerjinin büyük bölümünün bol miktarda tohum (nişastaları proteinler ve yağlarla birleştirmekten) ve (karbonhidrat bakımından zengin) yumru toplamaktan gelmesi gerekiyordu.

Toplanabilir bitkilerin bazı yerlerde bol miktarda yoğunlaşmış ve kolayca ulaşılabilir olmaları, genel biyokütleleri ve çeşitlerinden çok daha önemlidir. Otlak ve ormanlık alanlar yoğun ormanlardan daha iyi bir varoluş imkanı sunuyordu. Büyük (etli ve yağlı) memelilerin öldürülmesi, yüksek net enerji getirileri sağlamıştı, daha küçük türlerin avlanmasıyla neredeyse her zaman bitki toplamaya göre, enerji ödülü çok daha az bir uğraştı. Lipitler genellikle az miktarda bulunan en istenen besinlerdi. Bunların yüksek enerji yoğunluğu tatmin edici doygunluk duygusunu veriyordu. Enerjiyle ilgili bu zorunluluklar toplama ve avlanma stratejileri dayatıyor, sosyal karmaşıklığın doğmasına katkıda bulunuyordu.

İnsan, daha sonra da hayvan kasları yegâne asli itici güç olarak kaldığı sürece, işgücüyle ilgili bütün oranlar metabolik zorunluluklarla belirlendi: gıda ve yemlerin hazmedilme oranıyla, homeotermik bedenlerin temel metabolik ihtiyaçları ve büyümek için ihtiyaç duyduklarıyla ve kasların mekanik verimliliğiyle. Yetişkinler tarafından sürekli harcanan insan gücü 100 W'den fazla olamaz. Gıdanın mekanik enerjiye çevrilmesinde verim yüzde 20-25'i aşamaz. Ancak insanlar ya da yük hayvanlarının kümelenmesi bu sınırları aşabilir, tarih öncesi ve antik anıtsal yapıların da ortaya koyduğu üzere etkili,

koordine bir kontrol gerektiren bu işler İrlanda ve Brötanya'da menhir inşa edenler, Mısır'da ilk hanedanlar döneminde yaşayanlar ve Paskalya Adası'ndaki küçük nüfus kadar farklı halklar tarafından tekrar tekrar başarılmıştır.

Gücünü insan kaslarından alan saldırganlığın ya yüz yüze çarpışma sırasında ya da birkaç yüz metreyi geçmeyen bir mesafeden sinsice düzenlenen bir saldırıyla ortaya dökülmesi gerekiyordu. Binlerce yıl boyunca öldürmenin, gayet yakın mesafeden gerçekleştirilmesi gerekti. İnsan anatomisi, bir okçunun, uzatılmış bir kol ile bükülmüş bir kol arasındaki mesafe 70 cm'den fazlaysa azami düzeyde güç uygulamasını imkânsız kılar. Bu da ok çekmeyi sınırlar, okun menzili böylece belirlenir. Birçok elin çektiği mancınıklar fırlatılan nesne kitlesini yukarı ittiriyordu, ama saldırının menzilini artırmıyordu. Nihayetinde yüz yüze savaş devam etti, bireysel mücadelenin sonuçları ağırlıklı olarak beceri, deneyim ve şansa dayanıyordu.

Toplayıcılıktan çiftçiliğe geçişin ardında enerjiyle ilişkili (yani aslen beslenmeyle ilgili) ve sosyal etkenlerin bir bileşimi yatıyordu, ama sonrasında yerleşik tarımın yoğunlaşması, açıkça enerjiyle ilgili bir zorunluluk olarak açıklanabilir (Boserup 1965, 1976). Gıda üretiminin mevcut bir biçimi, performansının fiziksel sınırlarına yaklaştığında nüfus (doğumları kontrol ederek ya da dış göçle) büyüklüğünü sabit kılabilceği gibi daha verimli bir gıda üretim sistemi de benimseyebilir. Birbirini izleyen yoğunlaşma adımlarının başlangıcı ve süresi dünyanın dört bir yanında büyük farklar gösterir, ama bir yerleşimin fotosentetik potansiyelinden daha fazla yararlanabilmek için her ilerleme daha yüksek enerji girdileri gerektirmiştir. Buna karşılık daha büyük hasatlar daha yüksek bir nüfus yoğunluğunu destekleyebilmiştir.

Tarımın yoğunlaşması, yük hayvanlarının çiftleştirilmesi ve beslenmesine, giderek daha karmaşık aletler ve uygulamalar yapılmasına, takas edilmesine ya da satın alınmasına, teraslama ve sulama kanallarının, su tutma yerlerinin, ambarların ve yolların inşası gibi uzun vadeli altyapı projelerine daha fazla dolaylı enerji yatırımı yapılmasını gerektiriyordu. Buna karşılık bu yoğunlaşma insan kası dışında başka enerji kaynaklarına giderek daha fazla dayanmaya yol açtı. Yük hayvanları olmaksızın daha ağır toprakların sabanla sürülmesi ya son derece yorucu ya da düpedüz imkânsız bir iştir. Tahılların elle öğütülmesi o kadar emek yoğun bir iştir ki yoğunlaşmış hasatları işlemek için hayvanlara, daha sonra da su ve rüzgâr gücüne ihtiyaç duyulmuştur. Tahılların uzun mesafeler aşır kentlere götürülmesi işinin büyük ölçüde hayvan gücüne, bazen de rüzgâr gücüne dayanması gerekiyordu. Daha dayanıklı ve

daha verimli demir alet-edevat imalatı demir cevherinin eritilmesi işleminde odun kömürü tüketiyordu.

Enerjiyle ilgili bazı zorunluluklar geleneksel tarımların dünyasını şekillendirmiştir. Büyük otlak arazilerinin bulunmadığı, sürülebilir bütün toprakların yiyecek yetiştirmek için kullanılmasının gerektiği yerlerde insanların enerji ihtiyaçları yem üretiminin sınırlarını, dolayısıyla büyük yük hayvanlarının sayısını belirliyordu. Diğer bütün vakalarda (Amerika ve Avustralya kıtaları istisna olmak üzere) yük hayvanları daha fazla kullanılıyordu, ama genellikle sadece otlatılarak ve ekin artıklarıyla besleniyorlardı. Kişi başına elde edilebilir tahıl miktarı arttıkça, yeterince ekilebilir arazi iyi kalite hayvan yemi yetiştirmek için bir kenara ayrılabilirdi: ABD’de yem arzı nihayetinde bütün tarım arazilerinin yüzde 25’ine ulaşmıştır, oysa geleneksel Asya’nın nüfusu yoğun alçak arazilerinde yem arzı genellikle yüzde 5’in altındadır.

Ekip biçme yoğunluğu, yani yiyecek üretiminin enerji yoğunluğu da etkili olmuştur. Sulak (eğimli ve teraslı) arazide yoğun tarımla Asya tipi pirinç üretiminde otlayan büyük hayvanlara ayrılacak yer bulmak biraz zordur, mandalar genellikle dere kenarındaki otları, hatta suyun altındaki bitkileri yer. Ama tersine Avrupa’nın (ve on dokuzuncu yüzyılda Kuzey Amerika’nın) arazi bakımından zengin bölgelerinde çok sayıda sığır, at ve diğer evcil hayvanların bulunması hem kırsal nüfusların yoğunluğunu hem yerleşimlerin örgütlenmesini etkilemiştir. Ağillara, ahırlara ve tarlalara geri dönüşümle yeniden kazandırılmadan önce gübrenin depolanmasına çok miktarda yer ayrılması gerekiyordu.

Bu aşırı uçları temsil eden iki agro-ekosistem Çin’de Yangzi’nin güneyinde pirinç üretiminin ağırlıkta olduğu geleneksel çoklu ekim sistemi ile Batı Avrupa’da hem yiyecek (süt ürünleri ve et) hem iş gücü için hayvanlara ağırlıklı olarak bel bağlanan karma tarım olmuştur. Kolomb öncesindeki tarımlar da enerjiyle ilgili farklı zorunluluklarla şekillenmiştir. Her şey eşit olduğunda bir C₄ ekini olan mısır diğer kuru arazi tahıllarının (hepsi de C₃ ekini olan buğday, arpa, çavdarın) hepsinden fazla ürün verir ve bu avantaj mısır baklagil türleriyle birlikte ekildiğinde daha da artar: Kinoa ve patates üretiminin ağırlıkta olduğu And Dağları’nın yüksek bölgeleri dışında, Amerika kıtalarında her yerde Kolomb öncesi tarımın demirbaş ürünleri mısır ve fasulyelerdi. Bunun yanı sıra Amerika kıtalarında evcil hayvanların bulunmaması, diğer uğraşlara daha fazla enerji ve zaman ayrılmasını sağlıyordu.

Tarım dışı faaliyetleri ve geleneksel toplum yapılarını şekillendiren enerjiyle ilgili zorunluluklar yerle ilgili sınırlamalardan tutun etkili idarenin

zorluklarına uzanan bir yelpazeye yayılıyordu. Metallerin eritilmesi ve geniş çapta demircilik ancak su gücünün kullanılması, ocakların ve demir dökümhanelerinin yerlerinin cevher ve odun kömürünün ucuza nakliyatı mümkün olsa bile dağlık bölgelerle sınırlanması sayesinde mümkün kılınmıştı. Gerçekte yük hayvanlarının gücü ve yolların kötü olması ağır malzemelerin karayoluyla kâr getirecek şekilde taşınmasını büyük ölçüde sınırlanıyordu; dereler tercih ediyor, kanallar yapılıyordu. Odun kömürü üretmenin verimsiz yöntemleri (odun enerjisinin yüzde 20'sinden azı dumansız yakıtla çevriliyordu) geniş alanların ormansızlaşmasına yol açtı.

Uzak toprakların idaresi, ticaret ve askeri girişimler, hem karada hem denizde yolculuğun sadece yavaşlığı değil, güvenilmezliği nedeniyle de zorlaştı. Roma'dan Mısır'a imparatorluğun en büyük tahıl fazlasını üreten ülkeye deniz yolculuğu, bir hafta kadar kısa bir süre alabileceği gibi, üç ay ya da daha uzun da sürebiliyordu (Duncan-Jones 1990). İspanya Armadası'nın 1588'de İngiltere'de karaya çıkmayı başaramaması büyük ölçüde rüzgâra, ya eksikliğine ya da istenmeyen bir yerden esmesine bağlanabilir (Martin ve Parker 1988). 1800 gibi geç bir tarihte İngiliz gemilerinin onları Plymouth Körfezi'ne götürecek doğru rüzgârı yakalamak için bazen haftalarca beklemesi gerekiyordu (Chatterton 1926).

Enerjiyle ilgili zorunlulukların, modern enerji geçiş süreçleri sırasında ülkelerin ve bölgelerin servetleri üstünde derin etkileri olmuştur. Önceden baskın olarak kullanılan enerji kaynağına göre daha az enerjiyle üretilebilecek ve dağıtılabilecek yakıtlara nispeten kolay erişebilecek ülkeler ve yöreler, daha hızlı bir ekonomik büyümeden yararlanmıştır; ekonomik büyüme beraberinde daha fazla refah ve daha yüksek bir hayat kalitesi de getirmiştir. Bu avantajın ülke çapındaki ilk örneği, Hollanda'nın yer tezeğine (turba kömürüne) ağır bir bağımlılığı olmasıydı, on yedinci yüzyılda Hollanda cumhuriyetinin Altın Çağı bu sayede başlamıştı. Unger (1984) De Zeeuw'un (1978) yıllık yer tezeği çıkarma oranlarına ilişkin tahminlerinin yüksekliğini sorgulasa da o dönemde bu genç fosil yakıtın ülkenin en önemli asli enerji kaynağı olduğuna kuşku yoktur. Buna benzer çok daha uzun erimli bir avantaj, bundan ancak birkaç kuşak sonra, İngiltere'de odun ve odun kömürünün yerini bitümen kömürü ve kok kömürünün neredeyse tam anlamıyla almasıyla ortaya çıktı (King 2011). 1870 sonrasında, yakıtı ilk yıllarda mükemmel kömürler, sonra da hidrokarbonlar olan Amerikan ekonomisinin yükselişi, bu deneyimi büyük ölçüde geride bıraktı.

Şurası su götürmez ki Hollanda Cumhuriyeti, Büyük Britanya ve ABD'nin peş peşe ekonomik liderlik ve uluslararası nüfuz konumuna gelmeleri bir birim yararlı enerjinin daha az yatırımla (yani net enerji getirisi daha yüksek) elde edilebildiği yakıtları erken devirlerde kullanmaya başlamalarıyla yakından ilişkilidir. Fosil yakıtlar ve elektriğin hakimiyeti, görülmemiş derecede teknik ve tedrici bir yayılma ile, ekonomik ve sosyal bir tektiplik yaratmıştır (Şekil 7.10). Bir yüksek enerji medeniyetinin en temel genel altyapı listesi bile uzundur: Kömür madenleri, petrol ve doğalgaz havzaları, termal enerji istasyonları, hidroelektrik barajları, boru hattı ağları, limanlar, rafineriler, demir ve çelik fabrikaları, alüminyum eritme tesisleri, gübre fabrikaları, sayılmayacak kadar çok işleme ve imalat tesisleri, kimyasal tesisler, demiryolları, çok şeritli otoyollar, havaalanları, gökdelenlerin hakim olduğu kent merkezleri ve geniş banliyöler.

Aynı işleri gördükleri için dış görünüşleri aynı ya da çok benzer olmalıdır, bileşenlerinin birçoğunun inşası ve idaresi küresel piyasaya kritik makineler, süreçler ve yapma bilgisi sunan nispeten az sayıda şirketle başlamaktadır. Yüksek enerji akışlarına bağımlılığın en açık biçimde kaygı veren sonuçların-



Şekil 7.10 Brezilya'nın en büyük megalopolü, São Paulo, 2013'te çekilmiş bir fotoğraf. Megakentler yüksek yakıt ve enerji kullanımının dayattığı küresel tektipliğin en önemli örnekleridir (Corbis).

dan ikisi, seçeneklerin kısıtlanması (yani, mevcut pratikleri çok sayıda büyük yer değiştirmeye neden olmaksızın terk etmenin imkânsızlığı) ve çevrenin bozulmasıdır. İlk olgunun herhalde en iyi örneği, toplumun tamamını derinden dönüştürmeksizin modern tarıma yapılan yüksek enerji sübvansiyonlarını kesmenin imkânsız olmasıdır.

Örneğin Amerika'da tarlalarda kullanılan mevcut makinelerin yerine yük hayvanlarının geçirilmesi, yirminci yüzyıl başındaki rekor sayının en az on katı daha fazla bir at ve katır nüfusu gerektirirdi. Sırf bu hayvanları beslemek için 300 Mha, yani ABD'nin toplam ekilebilir arazisinin iki katı kadar arazi gerekir, kentli kitlelerin kentten ayrılıp çiftliklere göçmeleri gerekirdi. Bütün toplumu sanayi öncesi imgeye göre dönüştürmeksizin geleneksel tarıma dönemeyecek ülkeler sadece varsıl ülkeler değildir. Bunun nedeni de dünyada gübreleme ve sulama yoğunluğunun en yüksek olduğu ülkelerin bu ülkeler olmasıdır. Çin'in gıda üretiminde fosil yakıtlara bağımlılığı daha da yüksektir.

Seçeneklerin kısıtlanması, Jacques Ellul'un (1912-1994) basitçe ve her şeyi kapsayan bir terimle *la technique* dediği şeyin, yani "insan faaliyetinin bütün alanlarında (belli bir gelişme aşaması için) akılcı olarak varılmış ve mutlak verime sahip yöntemler toplamı"nın hakim olduğu bir dünyanın paradoksal sonucudur (Ellul 1954, xxv). Bu dünya bize görülmemiş yararlar ve neredeyse büyüleyici özgürlükler sunar, ama karşılığında modern toplumlar bunu benimsemekle kalmamalı, kurallarına ve kaidelerine de boyun eğmelidir. Artık herkes bu tekniklere dayanır, ama tek bir birey bile onları bütünlükleri içinde anlamaz; sadece gündelik hayattaki dayatmalarına uyarız.

Tekniklerin yayılma gücü insanlığın büyük bölümünü üretim süreçleriyle ilgisiz hale getirdiğinden, küresel çapta kitlesel tüketime sunulacak malların tasarlanması ve üretilmesi için artık işgücünün ancak küçük bir bölümüne gerek duyulduğundan (bilgisayarların giderek artan yardımıyla birlikte) bu durumun sonuçları cahilce itaatın ötesine geçer. Bunun sonucunda, bugün çok daha fazla sayıda insan genel olarak bir ürünün tasarlanması, iyileştirilmesi ve yapılmasından ziyade satılması işinde istihdam edilmektedir. İşgücünün büyüklüğüne göre sıralandığında, 1960'ta Amerika'nın en büyük 15 şirketinden (bunların başını GM, Ford, GE ve United States Steel çekiyordu) 11'i 2,1 milyon işçiye istihdam eden mal imalatçısıydı; 2010'daysa 600.000 kişiyi istihdam eden sadece iki imalatçı, HP ve GE zirvedeki 15 şirket arasına girmişti ve bu grubu artık ağırlıklı olarak perakendeciler ile hizmet sunan şirketler oluştuyordu (Walmart, UPS, McDonald's, Yum, Target).

Bundan sonraki mantıklı adım bu gerçekliği, nihayetinde karbona dayalı hayatın yerini makinelerin almasına yol açan sürecin bir parçası olarak görmektir (Wesley 1974). İki oluşum arasındaki evrimsel paralellikler ilgi çekicidir. Makineler termodinamik olarak canlıdır, yayılmaları da doğal seçilime uygun ilerler: Başarısızlıklar çoğalmaz, yeni türler yayılır ve azami düzeyde desteklenebilir kütleye meylederler; birbirini izleyen kuşaklar da ilerleyerek daha verimli (bütün o etkileyici düzeyde daha düşük kütle/güç oranlarını hatırlayalım), daha hareketli ve daha uzun ömürlü olur. Bu paralellikler sadece ilgi çekici biyo-şekillenmeler olarak görülüp bir kenara bırakılabilir, ama makinelerin yükselişi inkar edilemez bir gerçek olmuştur.

Makineler çoktan, muazzam büyüklükte doğal ekosistem alanlarının yerine yapılmaları, hareket etmeleri ve depolanmaları için ihtiyaç duyulan altyapıları (madenler, demiryolları, yollar, fabrikalar, park yerleri) geçirdiler; insanlar zamanlarının giderek daha büyük bir bölümünü onlara hizmet etmeye harcıyor; makinelerin atık ürünleri topraklar, sular ve atmosferin çok büyük oranda bozulmasına neden oldu; otomobillerin küresel çaptaki kütlesi bile tek başına bütün insanlığın kütlesinden çok daha fazla. Fosil yakıt kaynaklarının sonluluğu makinelerin yükselişini durduracak bir etken olmayabilir. Makineler kısa vadede daha verimli bir hal alarak duruma ayak uydurabilir, uzun vadede yenilenebilir akışlara dayanabilirler.

Her halûkârda ancak açık jeolojik kanıtların temelden yanlış yorumlanması, fosil yakıt kullanımının artışında erken tükenmelerinden ötürü bir kaygılanma nedeni görebilir. Fosil yakıt rezervleri mekânsal dağılımı ve elde edilme maliyeti (bugünkü fiyatlar ve mevcut tekniklerle) ticari olarak kullanılmalarını haklı çıkaracak kadar ayrıntılı olarak bilinen kaynak birikiminin küçük bir parçasını oluşturur. En başta elde edilebilir kaynaklardan daha büyük paylar elde ettikçe, bunların elde edilebilirliğini ölçmenin en iyi yolu bir mineralin marjinal bir birimini üretmenin maliyeti olur. Bu yaklaşım kullanma tekniklerimizdeki iyileşmeleri ve elde etme bedelini ödeme becerimizi de dikkate alır. 2005 sonrasında Amerika'nın bol miktardaki killi şist katmanlarından (yatay sondajlama ve hidrolik parçalamaya dayanarak) ham petrol çıkarılmasının artması (Smil 2015a) ve ülkenin bir kez daha dünyanın en büyük petrol ve doğalgaz üreticisi haline gelmesi, daha tam anlamıyla kullanılmamış muazzam fırsatlara örnektir.

Dolayısıyla kaynakların tüketilmesi fiilen fiziksel bir eksilmeyle değil, nihayetinde maliyet artışlarının taşınamayacak bir yük halini almasıyla ilgili

bir meseledir. Dikkat çekici bazı istisnalar bir kenara bırakılacak olursa (Hollanda'nın devasa büyüklükteki Gröningen doğalgaz yatağının keşfi sonrasında kömür çıkarmadan hızla uzaklaşması gibi) böyle ani sonlar yoktur, sadece uzun süren gerilemeler, ağır terkler ve yavaş yavaş yeni tedarik düzlemlerine geçişler söz konusudur (Britanya'da kömür madenciliği bu sürecin mükemmel bir örneğidir). Bu anlayış fosil yakıtlara dayalı medeniyetin yükselişini ve gelecekteki imkanlarını değerlendirmek açısından kritik önemdedir. Fosil yakıt kaynaklarının sonlu olması, kömürler ya da hidrokarbonların fiziksel tüketimi için değişmez bazı tarihler olduğu anlamına gelmediği gibi, bu kaynakları elde etmenin reel maliyetlerinin tahammül edilemez artışının erken başladığı ve dolayısıyla fosil yakıt sonrası çağa hızla geçiş yapma zorunluluğunun doğduğu anlamına da gelmez.

Rezervlerle ilgili tahminler ve kaynakların değerlendirilmesi, fosil yakıtların geleceği hakkında öngörülerde bulunmak için yeterli değildir. Küresel talep ve kullanım verimliliği de bir o kadar önemlidir: (Ekonomik büyüme ve nüfus artışının bileşiminin güdümündeki) talep öngörülebilir bir artış gösteriyor olabilir, ama aynı zamanda son derece değişkendir ve enerji çevriminin verimlilik düzeyleri kuşaklar süren iyileştirmeler sonrasında büyük iyileştirmeler yapılacak durumda olabilir. Buna bağlı olarak, dünyanın kömürler ve hidrokarbonlara bağımlı olmasından kaynaklanan, kısa ve uzun vadedeki en önemli mesele fosil yakıtların erken tüketimiyle ilgili (en başta da petrol üretiminin zirve noktada olduğunu savunanların ifade ettiği) kaygılar değil (Deffeyes 2001) bunun (en başta küresel iklim değişikliği nedeniyle) biyosferin yaşanabilirliğine etkisidir.

Kontrollerin Önemi

Geçmişte yeni enerji kaynaklarının ve yeni asli itici güçlerin benimsenmesi, bu enerjileri elde etmenin ve gerekli enerji hizmetlerini (ısı, ışık, hareket) tedarik etmek üzere çevrimlerini kontrol etmenin yeni biçimleri ortaya çıkmasaydı ve mükemmelleştirilmeseydi bu kadar uzun erimli sonuçlar doğuramazdı. Bu kontrol ve tetik mekanizmaları önceden kapalı olan kapıları açıp yeni enerji akışlarını serbest bırakabilecekleri gibi, yerleşik süreçlerin genel işleyiş hızlarını artırabilir ya da onları daha güvenilir, daha verimli hale getirebilir. Bunlar basit mekanik aygıtlar (su tekerleri) olabileceği gibi, hatırı sayılır enerji girdileri gerektiren incelikli düzenlemeler de olabilir: Modern otomobillerdeki mikroışlemciler bu kategoride yer alan mükemmel örneklerdir. Ya da daha

iyi idari usul grupları, yeni tanımlanmış ve geliştirilmiş piyasalar ya da temel siyasal ve ekonomik kararlar olabilirler.

Bir at ne kadar güçlü ve becerikli olursa olsun, ancak ve ancak ağzına bir gem vurulup bir binicinin elindeki dizginlere bağlandığında etkili bir biçimde kontrol edilen asli bir itici güç haline gelir; ancak hafif iyi bir koşum takımıyla bir savaş arabasını çekebilir; ancak eyerlenmiş ve üzengilerle donatılmışsa silahlı çatışmada kullanılabilir; ancak rahat bir boyunduruk takılmışsa ağır işlerde çalışabilir ve ancak farklı büyüklüklerdeki hayvanların çekişleri araba falakalarıyla eşitleniyorsa etkili bir grubun bir parçası olarak çalışabilir.

Uygun denetimlerin var olmaması, aksi takdirde takdir edilesi bu asli itici güçlerin performansını olumsuz yönde etkileyebilir. Bunun çaresi kimi zaman çok yavaş bulunmuştur. Böyle bir başarısızlığın herhalde en iyi örneği, boylamın bir türlü belirlenememiş olmasıdır. On sekizinci yüzyıl başlarında tam donanımlı yelkenli gemiler, rüzgâr enerjisinin etkili bir biçimde çevrilmesini sağlamışlar, Avrupa'nın en güçlü imparatorluk inşa aygıtları olmuşlardı, ama bu gemilerin kaptanları hâlâ hangi boylamda olduklarını bulamıyordu. İngiliz kaptanlar ve tüccarların 1714'te parlamentoya sundukları bir dilekçede özetlendiğine göre, çok fazla sayıda gemi gecikiyor, birçoğu da kayboluyordu. Dünya'nın dönme hızı Ekvator'da saniyede 460 metreyi bulduğundan, boylamın bulunması, geminin konumu iki-üç aylık bir yolculuktan sonra birkaç kilometreden daha küçük bir hata payıyla belirlenirken bir haftada bir saniyenin bir bölümünden fazlasını kaybetmeyecek kronometreler kullanılmasını gerektiriyordu. 1714'te Britanya Parlamentosu'nda çıkarılan bir yasayla böyle bir başarıya 20.000 sterlin ödül verileceği duyuruldu. Bu ödül sonunda 1773'te John Harrison'a (1693-1776) verildi (Sobel 1995).

Yakıtlarla ilgili olarak, kömür sadece açık ateşlerde odunun bir muadili olarak kullanılmış olsaydı ya da ham petrol aydınlatmada kerosenle sınırlı kalmış olsaydı tarih farklı bir yol izlemiş olabilirdi. Çoğu örnekte, uzun vadede fark yaratan şey bol miktardaki enerji kaynaklarına ya da belli asli itici güçlere erişim olmamıştır. Belirleyici etkenler daha ziyade, yenilik arayışı, yeni kaynaklar ve teknikler kullanıp mükemmelleştirmeye ve yeni kullanım alanları bulmaya bağlılık olmuştur. Bu etkenlerin bir araya gelmesi, koca koca ekonomilerin ya da belli süreçlerin enerji verimliliklerini, bunların yanı sıra yeni çevrim tekniklerinin güvenliği ve kabul edilebilirliğini belirlemiştir. Kimi zaman çarpıcı, ama sıklıkla incelikli olan bu katkıların örnekleri bütün enerji çağlarında, bütün yakıtlar ve asli itici güçlerle ilgili olarak görülebilir.

Dar bir teknik anlamda, en önemli kontroller sınıfında geri bildirim aygıtları ve sistemleri yer alır (Doyle, Francis ve Tannenbaum 1990; Åström ve Murray 2009). Bunlar belli bir süreçle ilgili enformasyonu, kontrol mekanizmasına geri iletir, sonrasında kontrol mekanizması işleyişi düzeltebilir. Erken modern Avrupa bu geri bildirimlerin geliştirilmesinde belirleyici bir liderlik elde etmiştir. İlk uygulamalar arasında termostatlar (ilk kez 1620 civarında, Hollandalı bir mühendis olan Cornelis Drebbel tarafından geliştirilmişti), yel değirmenlerinin çıkıntılı kısımlarla otomatik olarak düzeltilmesi (İngiliz demirci Edmund Lee 1745'te patentini almıştı), konutların içindeki sarnıçlarda ve buhar kazanlarında kullanılan şamandıralar (1746-1758) ve James Watt'ın buhar makinelerinin gücünü düzenlemek üzere geliştirdiği meşhur santrfüj regülatörü yer alıyordu (1789). Bugün bu kategoride yer alan, sayıca en fazla rastlanan örnek otomobil ve jet motorlarının işleyişini kontrol eden mikroişlemcilerdir.

Vazgeçilmez bir kontroller sınıfı, üretim ve yönetim süreçlerinin kop- yalanmasını ve standartlaşmış mallar ve hizmetler üretilmesini mümkün kılan talimatları içerir. Erken modern Avrupa'da matbaanın hızla gelişmesi, bu açı- dan muazzam bir katkıda bulunmuştu. 1500'e gelindiğinde, Batı Avrupa'da 40.000 farklı kitaptan 15 milyonu aşkın kopya basılmıştı (Johnson 1973). On altıncı yüzyılda ayrıntılı bakır oymabaskının ortaya çıkması ve aynı tarihlerde çeşitli harita projeksiyonlarının geliştirilmesi erken tarihlerdeki diğer dikkat çekici ilerlemeler oldu. Bu sınıfta yer alan, dikkat çekici bir diğer yenilikse Jo- seph Marie Jacquard'ın (1752-1834) dokuma tezgâhlarının işleyişini kontrol etmek üzere icat ettiği delikli bir kart aygıtıydı. 1900'e gelmeden delikli kartlar Herman Hollerith'in (1860-1929) nüfus sayımı verilerini işleyen makinelerin- de kullanıldı (Lubar 1992). 1940 sonrasında delikli girdiler, ilk elektromeka- nik, sonra da elektronik bilgisayarları kontrol etti, bütün bu bilgisayarlar artık elektronik veri depolamayla destekleniyor.

On dokuzuncu yüzyıl sonuna dek, yeni kontrol mekanizmaları büyük ölçüde mekanik olmayı sürdürdü. Yirminci yüzyılda uygulamalı matematik ve fiziğe dayalı, hepsinden de önemlisi transistörler, entegre devreler ve mikroiş- lemcilerin ortaya çıkmasına ve yaygın olarak kullanılmasına bağlı ilerlemeler elektrikli ve elektronik aygıtların kullanıldığı otomatik kontrolü yepyeni bir alan haline getirdi ve bu alan giderek sofistike bir hal aldı. Bu alandaki kritik yenilikler radarın (yangın kontrolünde, bombardımanda, füze güdümünde ve otomatik pilota bağlı navigasyonda) yaygın olarak kullanılmasından tutun

bilgisayarlar, elektronik eşyalar ve endüstriyel süreçlerde mikroçipin kullanıldığı çok sayıda kontrole dek uzanır.

Daha geniş bir anlamda bakıldığında, kontrolle ilgili en temel değerlendirme hiç kuşkusuz toplumların enerji kaynakları ve asli itici güçlerle ne yaptığı sorusunun cevaplanmasıdır. Toplumlar bunları, üretici kullanımlar ve özel kişisel tüketim arasında nasıl ayırır? Otarşı ile dış ticarete büyük bir bağımlılığın birbirine karşıt çekim güçleri arasında nasıl bir denge kurmaya çalışırlar? Hem mallara hem fikirlere ne kadar açık olmak isterler? Askeri harcamalar için ne kadar bedel ödemek isterler? Ne kadar merkezi kontrol icra etmek isterler? Bütün bu açılardan bakıldığında kültürel, dinsel, ideolojik ve siyasal sınırlamalar, itkiler ve eğilimler belirleyici önemde olmuştur. Yine, bütün enerji çağlarından çok sayıda örnek seçilebilir. Zamanlaması önemli iki büyük tezat özellikle aydınlatıcı değere sahiptir: Birincisi Batı ile Çin'in denizlerdeki keşif seyahatleri arasındaki tezat, diğeri ise Rusya ile Japonya'nın ekonomik modernleşme yaklaşımları arasındaki tezattır.

Okyanus aşırı seyahatler sadece gemiyi rüzgâra yaklaştırmaya yetisine sahip yelkenler değil, daha güçlü tekneler, iyi kuyruk dümenleri ve güvenilir navigasyon aygıtları da gerektiriyordu. Bu ilerlemelerin çoğunu Çinliler yaptı ve bunları büyük Ming filolarında bir arada kullandı. Marco Polo'nun Çin'den dönmesinden sadece bir yüzyıl sonra bu filolar Çin'in batısına, o dönem Avrupalıların doğuya ilerleyemediği kadar uzanmıştı. Ming filosu 1405 ile 1433 arasında Güneydoğu Asya sularında ve Hint Okyanusu'nda tekrar tekrar seferler düzenledi, Doğu Afrika sahilini ziyaret etti (Needham vd. 1971). Sonraları merkezi olarak yönetilen imparatorluğun aniden içe kapanması yeni deniz seferlerini imkânsız hale getirdi.

Geç Ortaçağ'da Avrupa gemileriye kesinlikle daha düşük seviyeden asli itici güçler olarak ortaya çıkmışlardı, ama keşif seferi girişimi, İspanya ve Portekiz hükümdarları ve denizcilerinin araştırmacı, saldırgan ve bağınaz tutumlarının bir bileşkesi sayesinde devam etti. On yedinci yüzyıla gelindiğinde İngilizler ve Hollandalıların ticari girişimleri öne çıkıyordu: 1600'de Londra'da Doğu Hindistan Şirketi kuruldu, 1602'de de Hollandalı VOC (Vereenigde Oost-Indische Compagnie) ticaret hayatına başladı (Keay 2010; Gaastra 2007). 1602 ile 1796 arasında VOC gemileri Doğu Hint Adaları'na yaklaşık 4.800 sefer yapmıştı ve Doğu Hindistan Şirketi de 1757 ile 1858 arasında alt kıtanın geniş bölgelerini yönetimi altında tuttu. Ekonomik, dinsel ve siyasal heveslerin bu bileşimi nihayetinde Avrupa'nın denizlere hakim olması ve büyük imparatorluklar kurmasıyla sonuçlandı.

Rusya ile Japonya'nın 1945 sonrasındaki ekonomik kaderlerinin karşılaştırılması nicelik ile niteliği, otarşi ile ticareti, devletin yegâne hakem olarak üstlendiği rolle modernleşmenin öncü katalizörü olarak rolünü karşı karşıya getirir. Japonya'nın kömür kaynaklarının küçük çaplı, hidroelektrik potansiyelinin sınırlı ve hidrokarbonlardan neredeyse yoksun olması onu büyük bir enerji ithalatçısı olmaya zorlamıştır, ülke yüksek yakıt fiyatlarına ve ithalat kesintilerine duyarlılığını azaltmak için dünyanın enerjisi en verimli kullanan ülkelerinden biri haline gelmiştir (Nagata 2014). Japonya'da yönetici bürokrasi devletin sanayile işbirliği yapmasını, teknik yenilikleri ve katma değerli ihracatı teşvik etmiştir.

Sovyetler Birliği ise tersine, Rusya'nın Avrupa'daki toprakları, Sibirya ve Orta Asya'da son derece zengin mineral kaynaklara hakim olduğundan bütün enerji biçimlerinde kendi kendisine yeterli olmakla kalmamış büyük bir yakıt ihracatçısı haline de gelmiştir. Ama kuşaklar boyunca devam eden katı merkezi planlama, diktatörün ölümünden çok sonra da devam eden Stalinci otarşik beş yıllık planlar, ekonominin aşırı derecede askerileşmesi ülkeyi sanayileşmiş dünyada enerjisi en verimsiz kullanan ülke haline getirmiştir: SSCB çöküşünün son yıllarında dünyanın en büyük ham petrol (Suudi Arabistan'ın 1,66 katı kadar ham petrol ürettiyordu) ve doğal gaz (ABD'nin 1,5 katı kadar fazla ürettiyordu) üreticisiydi, ama kişi başına GSYH'si ABD toplamının ancak yüzde 10'u kadardı (Kushnirs 2015).

Kritik enerji akışlarını belirleyen kontroller genellikle insani etkinin ötesine geçer ya da parazitlerden kaynaklanan sapmalarla gaspedilmiş ya da en azından bunların ağır etkisine maruz kalmıştır. McNeill (1980) bu düşünceleri mikro-parazitizm ve makro-parazitizm diye kavramsallaştırarak ele almıştı. Mikroparazitler (bakteriler, mantarlar, böcekler) insanların yeterince gıda enerjisi almaya yönelik çabalarını engeller. Ekinlere ve evcil hayvanlara zarar verir ya da insan bedenlerini doğrudan işgal ederek sindirilmiş besinlerin verimli bir biçimde kullanılmasını engeller; modern toplumlar her şeyden önce böcek ilaçlarına ve antibiyotiklere başvurarak mikroparazitlerin tarlalarda ve nüfuslar arasında yayılmasını sınırlamaya epeyce enerji harcamıştır.

Makroparazitizm ise eşitsiz insan grupları arasında hem zorlamaya (kölelik ve angarya işçiliğinden askeri fetihlere uzanan bir yelpazede) hem eşitsiz insan grupları arasında karmaşık (kısmen de gönüllü) ilişkilere dayanan çeşitli sosyal kontroller getirmiştir enerji akışlarına. Özel çıkar grupları hiç kuşkusuz modern varıl ülkelerdeki en önemli makroparazitlerdir. Bunlar

üyeliğin kısıtlı olduğu çeşitli meslek dernekleri ve sendikalardan oligopolcü sanayi kartelleri ve lobilere uzanır. Bu gruplar hükümet politikalarını şekillendirerek, veto ederek ya da engelleyerek, fiyatları sabitleyerek bütün kaynakların en iyi biçimde kullanılması aleyhine çalışır, enerji kaynaklarının geliştirilmesi ve kullanımlarının verimli olması üzerinde kaçınılmaz olarak dikkat çekici bir etki yaratır. Yıllardır çeşitli fosil yakıt ve nükleer elektrik üreticilerine giden ağır sübvansiyonların ardında bu gruplar olmuştur; şimdi de güneş enerjisine dayalı fotovoltaiik ve rüzgâr türbini inşasını teşvik eden yeni sübvansiyonların ardındadırlar (bkz. **Kutu 7.3**).

Olson (1982) gayet yerinde bir tabirle bu gibi gruplanmalara dağıtım koalisyonları demiş, istikrarlı toplumlarda bu tür ittifakların sayısının gide-rek fazlalaşacağına dikkat çekmişti. Bu argümanın kabul edilmesi, Britanya ve ABD'nin sanayi gerilemesini, ayrıca İkinci Dünya Savaşı sonrasında Almanya ve Japonya'nın başarısını açıklamaya yardımcı olur. 1945 sonrasında muzaffer güçlerin yenilmiş iki ülkede yarattığı örgütler, çok daha kapsayıcıydı, bu ülkelerin enerji performansı da bu görüşü destekler: Japon ve Alman ekonomileri İngiliz ve Amerikan ekonomilerine kıyasla daha az enerji yoğunlu. Bu sadece toplu bir değerlendirmede değil, neredeyse bütün büyük sektörlerin karşılaştırılmasında da geçerli bir durum olarak karşımıza çıkar.

Öte yandan bazı özel grupların eylemleri yeni enerji kapıları açmış, çevrimlerin verimliliğini iyileştirmiştir. On dokuzuncu yüzyılda İngiltere'den ülke dışına göçenlerin becerileri, ülke içinde göç edenlerin yerli nüfusa oranından yüksekti. Bu insanların ABD'ye akışı, besbelli ki daha yüksek enerji akışlarını tetikleyen önemli bir etken olmuştu (Adams 1982), ama nihayetinde dikkat çekici düzeyde enerji tasarrufu yapılmasını da sağlamıştı. 1990'lardan beri Hint mühendislerin genel olarak elektronik ve internet şirketlerine, özel olarak da Silikon Vadisi'ne geniş çaplı göçüyle benzer bir süreç yaşanıyor (Bapat 2012). Küresel ölçekte rekabet etmek zorunda bırakılan çokuluslu şirketler yeni teknikleri yaygınlaştırarak ve dünya çapında enerji çevrim verimliliklerini daha yükselterek üretimlerinin enerji yoğunluğunu azaltmaya çalışıyor.

Enerji Açıklamalarının Sınırları

Çoğu tarihçi temel bir açıklayıcı değişken olarak enerjiyi hiç kullanmamıştır. Maddi dünya ve ekonomik etkenlerin öneminde ısrarıyla tanınan Fernand Braudel (1902-1985) bile uzun medeniyet tanımında herhangi bir biçimiyle enerjiden bahsetmez:

Bir medeniyet her şeyden önce bir mekân, “kültürel bir alandır”, antropologların dediği gibi bir mahaldir. Bu mahal içinde... çok büyük bir “mal”, evlerin biçiminden tutun yapıldıkları malzemelere, çatılarına, okların tüylerini takmak gibi becerilere, bir diyalekte ya da diyalekt gruplarına, mutfaktaki tatlara, belli teknolojilere, bir inanç yapısına, bir sevişme biçimine, hatta pusula, kâğıt ve matbaaya varıncaya dek kültürel özellik çeşitliliği resmetmeniz gerekir. (Braudel 1982, 202)

Sanki malzemeler, evler, oklar ve matbaa hiç yoktan, hiç enerji sarf etmeksizin var olmuşlar gibi! İnsan tarihi şekillendiren bütün temel etkenleri anlama çabası içindeyse böyle bir atlama savunulamaz, ama enerji kaynaklarının ve asli itici güçlerin türleri ile enerji kullanım düzeylerinin insan toplumlarının hevesleri ve başarılarını belirlemediği not düşülürse mazur görülebilir. Bu gerçekliğin inkar edilemez doğal sebepleri vardır. Elbette ki enerji çevrimleri bütün organizmaların hayatta kalmaları ve evrimi açısından mutlaka temel önemdedir, ama enerji çevrimlerindeki değişiklikler ve farklı biçimlerde kullanılmaları organizmalara içkin özelliklerin hükmündedir.

Termodinamik yasaları kadar temel önemde bir şey de enerjinin biyosferin evrimini ya da genel olarak hayatı, özel olarak da insanların eylemlerini belirleyen tek etken olmadığıdır: Evrim kaçınılmaz olarak entropiktir, ama ya yeri doldurulamaz ya da geri dönüştürülemeyecek olan başka girdiler vardır. Radyasyona boğulmuş Dünya, biyokimyasal çevrimler için vazgeçilmez önemdeki elementler yeterli düzeyde değilse karbona dayalı hayata evsahipliği yapamaz; bu elementler arasında ATP'deki fosfor, proteinlerdeki azot ve sülfür, enzimlerdeki kobalt ve molibden, bitki saplarındaki silikon, hayvan kabukları ve kemiklerindeki kalsiyum vardır. Epigenetik enformasyon enerjiiyi bakım, büyüme, farklılaşma ve çoğalmaya kanalize eder; bu geri çevrilemez dönüşümler hem maddeyi hem enerjiyi yayar; toprak, su ve besinlerin bulunabilirliğinden, türler arası rekabet ve avcılığa ayak uydurma gereksiniminden etkilenir.

Enerji akışları herhangi bir ölçekte biyosferik örgütlenmeleri sınırlar, ama belirlemez. Brooks ve Wiley'nin (1986, 37-38) dile getirdiği üzere:

Enerji akışları, neden organizmaların bulunduğuna, neden farklılık gösterdiklerine ya da neden farklı türler bulunduğuna bir açıklama getirmez... Enerjinin nasıl akacağını belirleyen şey bir organizmanın içkin özellikleridir, bunun tersi geçerli değildir. Enerji akışı biyolojik sistemler açısından belirleyici olsaydı, yaşayan bir şeyin açlıktan ölmesi imkânsız olurdu... Biz

organizmaların genetik ve epigenetik olarak belirlenmiş, çevrede nispeten rastgele akan enerjiden yararlanan bireysel özelliklere sahip fiziksel sistemler olduklarını ileri sürüyoruz.

Ama bu temel gerçeklikler enerjinin tarihteki rolünün görmezden gelinmesini haklı çıkarmaz, daha ziyade, onun uygun sınırlar çerçevesinde dâhil edilmesini savunur. Modern karmaşık insan toplumlarında, enerji kullanımı açıktır ki salt fiziksel ihtiyaçlardan ziyade bir arzu ve gösteriş meselesidir. Bir toplumun kullanabileceği enerji miktarı, eylemin genel ölçeğine açık sınırlar getirir, ama bize grubun temel ekonomik başarıları ya da ethosu hakkında pek az bilgi verebilir. Baskın yakıtlar ve asli itici güçler, bir toplumu şekillendiren en önemli etkenler arasında yer alır, ama o toplumun başarılarının ya da başarısızlıklarının özel yönlerini belirlemez. Bu, özellikle de enerji-medeniyet denklemi incelendiğinde açıklık kazanır. Modern topluma bu kadar nüfuz etmiş bu kavrayış yüksek düzeyde enerji kullanımını yüksek düzeyde bir medeniyetle ilişkilendirir: Ostwald'ın çalışmasını ya da Fox'un "kültürel mekanizmaların rafine hale gelmesi, enerji akışının daha rafine bir hal almasının her seferinde beraberinde getirdiği bir şeydi," sonucuna vardığı hatırlamamız yeter (Fox 1988, 166).

Bu bağlantının doğuşu şaşırtıcı değildir. Ancak ve ancak fosil enerji tüketiminin artması, bu kadar geniş bir ölçekte bu kadar çok maddi arzuyu tatmin etmeyi başarmıştır. Daha fazla mala ve rahatlığa sahip olmak medeniyetlerin ilerlemeleriyle bir tutulur olmuştur. Bu yanıltıcı yaklaşım, belli düzeyler ya da biçimlerdeki enerji kullanımıyla açık bir bağlantısı olmayan koskoca bir yaratıcı (ahlaki, entelektüel ve estetik) başarılar evrenini dışlar: enerji kullanım biçimleri ve düzeyleri ile "kültürel mekanizmaların rafine hale gelmeleri" arasında hiçbir açık korelasyon olmamıştır. Ama enerjiye dayalı böyle bir belirlenimcilik de indirgeyici başka açıklamalar gibi son derece yanıltıcıdır.

Georgescu-Roegen (1980, 264) tarihsel açıklamaların karşı karşıya kaldığı zorluğu da yakalayan ince bir benzetme ileri sürmüştü: Geometri bir karenin içindeki köşegenlerin büyüklüğünü sınırlar, karenin rengini değil ve "bir karenin nasıl, söz gelimi, 'yeşil' olduğu farklı, neredeyse imkânsız bir sorudur." Bu nedenle bütün toplumların fiziksel eylem ve başarı alanları belli enerji akışlarına ve asli itici güçlere yaslanmaktan kaynaklanan zorunluluklarla doludur; ama ancak küçük alanlar yaratılmaları kolayca açıklanamayan parlak dokumalar sunabilir. Hem büyük hem küçük meselelerle ilgili bu sonucu destekleyen tarihsel kanıtlar toplamak kolaydır.

Antik düşünürler ve ahlakçıların, Ortadoğu, Hindistan ve Çin’de kalıcı dinler kuranların ortaya attığı evrensel ve kalıcı etik öncül formülasyonlarının hepsi de nüfusun çoğunluğunun temel fiziksel hayatta kalmayla meşgul olduğu düşük enerji toplumlarında ortaya çıkmıştır. Modern gidişatı muazzam ölçüde etkilemeyi sürdüren iki baskın tek tanrılı inanç olan Hristiyanlık ve İslam sırasıyla 20 ve 13 yüzyıl önce tarım toplumlarının bol miktarda güneş ışığını yararlı enerjiye çevirecek teknik araçlara sahip olmadığı kurak ortamlarda ortaya çıkmıştır. Klasik çağda Yunanlar, kölelerinden sıklıkla onları çalışan hayvanlar düzeyine indirerek bahsederlerdi (onlara *tetrapoda* dedikleri sığırlar yerine insan ayaklı anlamına gelen *andrapoda* derlerdi), ama bireysel özgürlük ve demokrasiyle ilgili temel fikirlerimiz de onlardan gelir. Özgürlük ve köleliğin birlikte ilerlemesi Yunan tarihinin en dikkat çekici yönlerinden biridir (Finley 1959), Amerikan cumhuriyetinin kuruluşunda insan eşitliği ve köleliğin olumlanması gibi.

ABD vizyoner anayasasını (“bütün insanlar eşit yaratılmıştır”) toplumun enerjisini esasen odundan aldığı, anayasayı kaleme alan başlıca kişi olan ülkenin dördüncü başkanı James Madison’un (1751-1836) birinci başkan George Washington (1732-1799) ve üçüncü başkan Thomas Jefferson (1743-1826) gibi köle sahibi olduğu bir dönemde benimsemişti. On dokuzuncu yüzyıl sonunda Almanya, kıta Avrupasının önde gelen enerji tüketicileri arasına girdiği sıralarda saldırgan militarizme, bundan iki kuşak sonra da faşizme kucak açtı; İtalya ve İspanya ise kişi başına enerji kullanımları kıtada en düşük seviyelerde, Almanya’daki oranın kuşaklarca gerisinde gezen ülkeler arasında oldukları dönemde (ilki 1920’lerde, ikincisi 1930’larda) diktatörlük oldular.

Sanatsal başarıların da belli bir enerji kullanım düzeyiyle ya da yaratıldıkları dönemde kullanılan belli bir enerji türüyle pek ilgileri yoktur: Zamanın ötesine geçen edebi eserlerin, resimlerin, heykellerin, mimari yapıların ya da müzik gösterilerinin yaratılması bir toplumun ortalama enerji tüketim seviyesindeki ilerlemelere tekabül etmez. On altıncı yüzyılın ilk on yılında, Floransa’da Piazza della Signoria’da gezinen biri birkaç gün içinde Leonardo da Vinci, Raphael, Michelangelo ve Botticelli’ye rastlayabilirdi; odun yakmakla, yük hayvanlarının koşumlanmasıyla, kısacası o dönem İtalya, Avrupa ya da Asya’da başka kentlerde görülebilecek yaygın faaliyetlerle kesinlikle açıklanamayacak bir yaratıcı yetenek yoğunlaşmasıydı bu.

Enerjiyle ilgili hiçbir değerlendirme Gluck, Haydn ve Mozart’ın 1780’lerde II. Joseph’in Viyanası’nda aynı salonda bulunmasını ya da 1890’larda, yüzyıl sonu Paris’inde Gustave Dore’tin yönetiminde Claude



Şekil 7.11 Camille Pissarro, *Le Boulevard de Montmartre, Matinée de Printemps*. Tuval üstüne yağlıboya, 1897 (Google Art Project).

Debussy'nin *L'Après-midi d'un faun*'unun dinlendiği bir gün, Claude Monet ya da Camille Pissarro'nun son tablolarını görmeden önce Émile Zola'nın son romanının okunmasını açıklayamaz (Şekil 7.11). Ayrıca sanat enerji çağlarına uygun bir ilerleme göstermez: Fransa'nın güneyindeki Neolitik mağaralarda bulunan hayvan resimleri, Yunanistan ve İtalya'nın güneyindeki klasik tapınakların oranları, Fransa'da kilise avlularından yükselen ortaçağ ilahilerinin sesi Joan Miró'nun renkli kompozisyonları, Kenzo Tange'nin yapılarının nefes kesen kavisleri ya da Rahmaninov'un müziğinin itkisi ve melankolisi kadar hoşnutluk verici, sarıcı ve moderndir.

Yirminci yüzyılda, enerji kullanım düzeyinin, siyasal ve kişisel özgürlüklerden yararlanmakla pek ilgisi olmamıştır: Bu özgürlükler enerji bakımından zengin ABD'de olduğu kadar enerji yoksulu Hindistan'da genişlemiş, bugün enerji yoksulu Pakistan'da hâlâ kısıtlı olduğu kadar enerji zengini SSCB'de de kısıtlanmıştır. İkinci Dünya Savaşı sonrasında Stalinist ve Stalinizm sonrası SSCB'de ve eski Sovyet imparatorluğunun bazı ülkelerinde Batı Avrupa demokrasilerinde olduğundan daha fazla enerji kullanılıyordu, yine de

bu ülkeler insanlarına benzer bir hayat kalitesi sunamıyorlardı; nihayetinde komünizmin çöküşüne yol açan kilit etkenlerden biri oldu bu. Bugün enerji zengini Suudi Arabistan, özgürlükler açısından enerji yoksulu Hindistan'ın çok gerisinde yer alır (Freedom House 2015).

Kişi başına enerji kullanımı ile hayattan memnun olmak ya da kişisel mutluluk gibi öznel duygular arasında da güçlü bağlar yoktur (Diener, Suh ve Oishi 1997; Layard 2005; Bruni ve Porta 2005). En yüksek memnuniyet endeksine sahip ilk yirmi ülke arasında sadece enerji zengini İsviçre ile İsveç değil, Butan, Kosta Rika ve Malezya gibi nispeten az enerji kullanan ülkeler de yer alır; Japonya ise (90. sırada) Özbekistan ve Filipinler'in gerisinde kalır (White 2007). 2015'teki Dünya Mutluluk Raporu (Helliwell, Layard ve Sachs 2015) nispeten ortalama düzeyde enerji kullanan Meksika, Brezilya, Venezuela ve Panama'yı ilk 25 ülke arasında, Almanya, Fransa, Japonya ve Suudi Arabistan'ın önünde saymaktadır.

Temel insani ihtiyaçların karşılanması besbelli ki ortalama düzeyde enerji girdisi gerektirir, ama uluslararası karşılaştırmalar hayat kalitesinde artışların enerji tüketiminin artmasıyla birlikte eşitlendiğini açıkça gösterir. Anlamsız tüketimden ziyade insanların refahına odaklanan toplumlar, daha müsrif ülkelerin kullandığı yakıtlar ve elektriğin bir bölümünü tüketerek daha yüksek bir hayat kalitesine sahip olabilir. Japonya ile Rusya, Kosta Rika ile Meksika ya da İsrail ile Suudi Arabistan arasındaki zıtlıklar bunu açıkça ortaya koymaktadır. Bütün bu durumlarda, enerji akışlarının dış gerçeklikleri, açıktır ki iç saikler ve kararların yanında ikinci derecede önemli olmuştur. Kişi başı enerji kullanım düzeyinin çok benzer olması (örneğin Rusya ile Yeni Zelanda) temelden farklı sonuçlar doğurabilir, son derece uyumsuz enerji tüketim oranlarıysa, şaşırtıcı derecede benzer düzeyde fiziksel hayat kalitesi yaratmıştır: Güney Kore ve İsrail'de insani gelişme endeksi neredeyse aynıdır, Kore'de ise kişi başına enerji kullanımı yüzde 80 daha yüksektir.

Ön cephedeki fiziksel gerçekliğin ardındaki ruhun görüntüsü, yüksek enerji yapıları ve süreçlerinin neredeyse dünya çapındaki kimliğine bakıldığında bir o kadar uyumludur. Enerjileri ve maddi girdileriyle ilgili genel zorunluluklar, işleyiş koşulları ABD'de Orta Batı, Almanya'da Ruhrgebiet, Ukrayna'da Donetsk bölgesini, Çin'in Hebei eyaletini, Japonya'nın Kyuşu ve Hindistan'ın Bihar bölgelerini dışarıdan bakıldığında neredeyse benzer kılmıştır, ama her şeyi kapsayan bir bağlamda düşünüldüğünde bu bölgeler birbirinin aynı değildir. Farklılıkları erittikleri metalden üretilmiş nihai ürünlerin

son hedefi ve kalitesiyle olduğu kadar, içinde doğdukları ve işlemeye devam ettikleri kültürel, siyasal, sosyal, ekonomik ve stratejik ortamlar bileşimiyle ilişkilidir.

Enerji açıklamalarının sınırlı düzeyde yararlı olduğu bir başka kritik bağsa enerji arzının nüfus artışı üstündeki etkisidir. Nispeten en güvenilir uzun vadeli demografik yeniden kurgularda, Avrupa ve Çin'i konu alanlarda peş peşe gelen genişleme dalgaları ile salgınlar ve savaşların neden olduğu krizlerden oluşan çok uzun süreli ağır büyüme dönemleri görülür (Livi-Bacci 2000, 2012). On sekizinci yüzyılın ilk yarısında Avrupa'nın toplam nüfusu, miladın başındaki nüfusunun yaklaşık üç katıydı, ama 1900'e gelindiğinde üç kattan da fazla artmıştı. Beslenmenin iyileşmesi bu yükselmenin başlıca gerekçelerinden biri olsa gerektir, ama bunun temeldeki tek etken yapılması (McKeown 1976) ortalama yiyecek enerjisi alımlarına ilişkin titiz yeniden kurgulamalarla bağdaşmaz (Livi-Bacci 1991).

Avrupa'da 1750 sonrasındaki nüfus artışını enerji tüketiminin daha yüksek olmasıyla ilişkilendirirsek (iyi konutlar, hijyen ve sağlık hizmetleri anlamında) Çin'de Qing hanedanlığı döneminde Çin nüfusunun artışını nasıl açıklamamız gerekir? 1700'de Çin'in toplam nüfusu, 145 yılında Han hanedanlığı döneminde zirveye tırmanan nüfusun sadece üç katı civarındaydı, ama 1900'de üç kat artıp yaklaşık 475 milyona çıkarak Avrupa'daki nüfus artışına hemen hemen yaklaştı. Oysa o dönemde yeni enerji kaynakları ya da asli itici güçlere yönelen büyük değişiklikler olmamış, kişi başına biyokütle yakıtları ve kömür kullanımı ortalamasında pek iyileşme yaşanmamış, kişi başına gıda arzı ortalamasında büyük artışlar olmamıştı: aslına bakılırsa bu dönemde Çin'in 1876-1879 döneminde yaşadığı en berbat açlıklardan birine tanık olunmuştu.

Tarihte tekrarlanan büyük muammaların bazılarının ya da karmaşık toplumların çöküşünün açıklanmasında, enerjiyle ilgili değerlendirmelerin sınırlı bir katkı sunması şaşırtıcı değildir. İnsanı büyüleyen bu zor soruyla ilgili araştırmalar (Tainter 1988; Ponting 2007; Diamond 2011; Faulseit 2015) ancak ve ancak yazarları uygunsuz karmaşıklıkları görmezden gelmeyi istediklerinde basit cevaplara varır. Enerjiyle ilgili en dikkat çekici açıklamalar sürdürülemez tarım yöntemlerinin, aşırı ormansızlaşmanın yol açtığı, gıda üretiminin azalmasıyla sonuçlanan yaygın ekosistem bozulmasının etkilerini de içermiştir. Kara yoluyla ulaştırmanın kötülüğü nedeniyle büyük imparatorlukların etkili bir biçimde bütünleşmesinin imkânsızlığı ve uzak toprakla-

rı korumakta kullanılacak kaynak yükünün artması (emperyal aşırı yayılma sendromu) diğer yaygın açıklamalardır.

Gelgelelim, Roma İmparatorluğu'nun düşüşünü açıklamak üzere (tarihte açık arayla en fazla incelenmiş “çöküş”tür) ortaya çok sayıda farklı gerekçenin atılmasında da tanık olunduğu gibi (Rollins 1983; Smil 2010c) toplumsal işlev bozukluğu, iç çatışma, işgaller, salgınlar ya da iklim değişikliğinden yana ağır basan açıklamalar çok daha yaygındır. Tartışmasız bir gerçek şudur ki birçok sosyopolitik çöküş örneği enerji dayanaklarının zayıfladığı yönünde ikna edici kanıtlar olmaksızın ortaya çıkmıştır. Batı Roma İmparatorluğu'nun yavaş yavaş çözülmesi de Teotihuacan'ın birden yıkılması da gıda üretim kapasitesinin feci şekilde bozulmasına, baskın asli itici güçlerde dikkat çekici değişiklikler olmasına ya da biyokütle yakıtlarının kullanımında büyük değişiklikler olmasına bağlanamaz. Tam tersine tarihsel olarak uzun erimli birkaç pekiştirme ve genişleme (Mısır'da Eski Krallık'ın ağır ağır yükselmesi, Roma Cumhuriyeti'nin İtalya'da baskın güç olarak ortaya çıkması, yedinci yüzyılda İslam'ın hızla yayılması ve Moğollar'ın on üçüncü yüzyıldaki işgalleri dâhil olmak üzere) asli itici güçler ve yakıtların kullanımındaki büyük değişikliklerle ilişkilendirilemez.

Aşırı uçlara giden gelecekleleri özetlemek kolaydır. Bir yanda, Batı medeniyetinin bugün ustalıkla kullandığı anlayış onu temel davranış kalıpları açısından diğerlerinin ötesine taşıyabilir. Bu bilginin yayılması, biyosferik sınırlar içinde yaşamayı öğrenecek ve gelecek binyıllarda serpilip gelişecek gerçek bir dünya medeniyeti yaratabilir. Biyosferin, hayatı destekleyen birçok temel süreç müdahale etmiş, hatta insanlığın güvenli bir biçimde işleyebileceği alanı tanımlayan gezegen çapındaki sınırları zorlamış insan eylemlerine çoktan maruz kaldığı argümanıysa bu düşüncenin tam karşısında yer alır (Stockholm Resilience Center 2015). Buna bağlı olarak topyekûn bir nükleer savaş olasılığını bir kenara bırakarak, küresel, yüksek enerji medeniyetinin kaynak sınırlarına yaklaşımadan çok önce çökebileceği de bir o kadar düşünülebilir bir sonuçtur. Bu iki aşırı uç arasındaki geniş alan, küresel eşitsizliğin geçici bir süre devam etmesinden, hatta derinleşmesinden tutun, daha akılcı ulusal ve küresel politikalara doğru ağır, ama önemli bir ilerleme kaydetmesine varıncaya dek birçok senaryoyla doldurulabilir.

Göktaşı çarpması, megavolkanların patlamaları ya da görülmemiş viral salgınlar gibi olasılıklar bir kenara bırakıldığında (bunlarla ilgili değerlendirmeler için bkz. Smil 2008b) biyosferin sürdürülebilir yaşayabilirliğin ötesinde

bozulmasının yarattığı tedrici yok oluşun gerçekleşme olasılığı, öyle görünüyordu ki Teotihuacan benzeri, ani bir çöküşten daha yüksektir. Yıkıcı sosyal işlev bozukluğu olasılığı, dünya çapında savaşlar ya da salgınlarla ilgili tahminler sunmayacağım, ama modern toplumun enerji dayanaklarıyla ilgili birbiriyle çelişen iki beklentinin bir arada var olduklarını söylemekle yetineceğim: Yeni enerji kaynaklarından yana tekrar tekrar ileri sürülen abartılı iddialar karşılarında, teknik yeniliklerin gücü konusunda kronik bir tutuculuk (hayalgücü eksikliği mi yoksa?) bulur.

Başarısız olmuş teknik öngörüler listesi uzundur (Gamarra 1969; Pogue 2012), içlerinde en seçkin olanlar da enerji çevrimlerinin gelişimi ve kullanımıyla ilgili olanlardır (Smil 2003). Günün uzman görüşü gazla aydınlatma, buharlı gemi, akkor ampul, benzinli motor, motorlu uçuş, alternatif akım, radyo, roketli itilim, nükleer enerji, iletişim uyduları ve kitlesel bilgisayar kullanımı olasılıklarını elinin tersiyle itmişti. Bu tutuculuk, yeniliklerin başarıyla ortaya çıkması sonrasında bile sıklıkla varlığını sürdürmüştür. Buharlı gemilerin Atlantik Okyanusu'nu aşan yolculuklar yapması mümkün görünmüyordu, çünkü o gemilerin bu tür uzun seyahatlere yetecek kadar yakıt taşıyamayacakları düşünülüyordu. 1896'da Lord Kelvin Kraliyet Havacılık Cemiyeti'ne katılmayı reddetti, askeri havacılığın ateşli savunucularından biri olan Baden F. S. Baden-Powell'a gönderdiği el yazısı notta "balonla uçuş dışında havada seyret ufacık bir zerre olsun inanç duymadığını" söylüyordu (Thomson 1896). Çok sayıda otomobil üreticisinin daha verimli ve daha güvenilir otomobiller ürettiği bir dönemde Byrn (1900, 271) "İnsanın at olmaksızın idare etmesinin asla mümkün olmadığını" düşünüyordu.

Yeni enerji mitlerinin ısrarla varlıklarını sürdürmeleri en azından dikkat çekicidir. Başta yeni enerjilerin bir-iki sorunu olduğu düşünülüyordu. Bol bulunan, ucuz bir kaynak vaat ediyor, handiyse ütopyacı bir sosyal değişim olasılığının önünü açıyorlardı (Basalla 1982; Smil 2003, 2010a). On dokuzuncu yüzyılda yaşamış birçok yazar binlerce yıl boyunca biyokütle yakıtlarına dayandıktan sonra, kömürü ideal bir enerji kaynağı, buhar motorunu da mucizevi denebilecek asli bir itici güç olarak görmüşlerdi. Ağır hava kirliliği, arazilerin yıkıma uğratılması, sağlıkla ilgili tehlikeler, madencilik kazaları ve giderek giderek daha verimsiz alanlarda ya da daha derinlerde bulunan kömür rezervlerinden yararlanma ihtiyacı çok geçmeden bu miti ortadan kaldırdı. Elektrik sınırsız olasılıkları beraberinde getiren bir sonraki taşıyıcı oldu, onun güçlerinin erimi o kadar genişti ki yoksulluk ve hastalıkları bile iyileştirecekti (Kutu 7.5).

Büyük bir kesinlikle öngörülebilecek şey şudur ki gelecek kuşaklarda, hâlâ artmakta olan küresel nüfusun, enerjiye erişimi düzgün bir hayat kalitesinin gerektirdiği asgari seviyenin epeyce altında kalan çoğunluğunun düzgün bir hayat sürebilmesini sağlamak için çok daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulacaktır. Bu ezici derecede büyük, hatta imkânsız bir iş gibi görünebilir. Küresel yüksek enerji medeniyeti hızla genişlemekten zaten ekonomik ve sosyal açıdan

Kutu 7.5

Elektriğin hiç bitmeyen vaadi

Elektrik en çok yönlü enerji biçimidir, çok yönlü vaadi de Edison, Westinghouse, Steinmetz, Ford gibi yenilikçilerin yanı sıra Lenin ve Roosevelt gibi sıklıkla değer yelpazesinin karşıt uçlarında yer alan siyasetçilere de esin kaynağı olmuştur. Daha Rusya'da İç Savaş'ın sona ermesinden önce Lenin (1920, 1) ekonomik başarının "ancak Rus proleter devleti güncel teknolojiye dayalı, ki bu da elektriğe bağlı devasa bir sanayi makinesini etkili bir biçimde kontrol ettiğinde güvence altına alınmış olabileceği" sonucuna varmıştır. Hidroelektriğin "beyaz kömür"ü, nükleer enerjinin görülmemiş vaaadinin gerisinde kaldığı 1950'lere kadar Batılı teknokratlar arasında özel bir cazibeye sahipti.

1954 yılında ABD Atom Enerjisi Komisyonu'nun başkanı (1953 ile 1958 arasında görev yapan) Lewis L. Strauss (1896-1974) New York'taki Ulusal Bilim Yazarları Derneği'ne şunları söylemişti:

Çocuklarımız evlerinde ölçülemeyecek kadar ucuz elektrik enerjisinden yararlanacak. Çocuklarımızın dünyada yaşanmış büyük dönemsel bölgesel açlıkları sadece tarihin bir parçası olarak öğrenmesini, denizlerin üstünde ve altında, havada asgari düzeyde tehlikeyle, büyük hızlarda zahmetsizce seyahat etmesini ve hastalıklar boyun eğer, insanlar yaşlanmalarına neyin neden olduğunu anlarken bizimkinden çok daha uzun ömürlere sahip olmalarını beklemek fazla olmaz. Bu bir barış çağı öngörüsüdür. (Strauss 1954, 5)

ABD Atom Enerjisi Komisyonu Başkanı Glen Seaborg 1971'de 2000 yılına gelindiğinde Amerika'da elektrik üretim kapasitesinin yarısının kirlilik yaratmayan güvenli reaktörlerden geleceği, nükleer enerjiyle çalışan uzay gemilerinin Mars'a insan taşıyacağı öngörüsünde bulunmuştu (Seaborg 1972). Gerçekte 1980'lerde Batı'da yeni nükleer tesis siparişleri neredeyse tamamen son buldu, nükleer fizyonun geleceğine ilişkin sıkıntı verici beklentiler 1986'da Çernobil kazasıyla, 2011'de Fukushima'da yaşanan çok sayıda patlamayla biraz daha hasar gördü. Ama fizyonun Batı'da geri çekilmesinden arda kalan mitsel boşluğu, rüzgâr türbinleri ve fotovoltaik hücreler çok kolay ve çok ucuza elektrik üretme vaadiyle doldurdu; o kadar kolay ve ucuza elektrik üreteceklerdi ki merkezlessiz güç (bütün merkezi istasyonları ortadan kaldırarak) modern dünyanın üstüne bir talih kuşu gibi konacaktı. (Dünya nüfusunun çoğunun kısa süre sonra megakentlerde yaşayacağı gerçeğini görmezden gelmeyi gerektiren bir hayaldi bu, megakentlerin de merkezlessiz güç için pek de iyi yerler olduğu söylenemezdi.) Sonra bir de ta 1945'ten beri olduğu gibi, nükleer fizyonla elektrik üretme vaadi vardı. (Gerçi pratik açıdan bakıldığında bugün bu hedefe bir kuşak öncesinde olduğundan daha yakın değiliz.)

mustarıptır, daha fazla büyümesi, hayatta kalmasının bağlı olduğu biyosferik bütünlüğü tehdit etmektedir (Smil 2013a; Rockström vd. 2009).

Ne var ki bir diğer büyük belirsizlik ise kentte yaşamının uzun vadede sürdürülebilir olmasıdır. Kırsal hayatın başlıca özelliği olan toplumsal bütünlük ve aile ortamından beslenme açıktır ki modern kentlerde baskın değildir. Kent hayatının uzun zamandır kırsal ve birbirine yapışık yaşamış nüfuslar üzerindeki etkileri hem zengin hem yoksul ülkelerde kendisini gösterir. Genelde suç oranları birçok ülkede gerilemiş olabilir, ama dünyanın en büyük kentlerinin birçoğunda geniş bölgeler şiddet, uyuşturucu bağımlılığı, evsizlik, çocukların terk edilmesi, fuhuş ve sefil hayat örnekleri olmayı sürdürmektedir. Yine de modern ekonomilerin beraberinde getirdiği zorluklar, belki de hiç olmadığı kadar sosyal istikrar ve sürekli etkili işbirliği gerektirmektedir. Kentler her zaman köylerden aldıkları göçle yenilenmiştir, peki ama kentlerin sosyal yapısı çözülmeye devam ederken köyler hemen hemen tümüyle gözden silinip gittiğinde, çoktan çoğunlukla kentli bir hal almış medeniyete ne olacaktır?

Ama ümit verici işaretler vardır. Tam da gayri safi enerji kullanımı tarihin akışını belirlemediğinden, bağılılığımız ve icatlara yatkınlığımız medeniyetin ilerlemeleri ile enerji arasındaki evrimsel bağın önce zayıflatılması, sonra tersine bile çevrilmesi yönünde uzun bir yol katedebilir. Artan enerji kullanımının etkili uyarlamalarla bir tutulamayacağını, bu eğilimi durdurmamız, hatta tersine çevirmemiz, Lotka'nın maksimum enerji kanununun buyruğunu (1925) kırmamız gerektiğinin artık farkındayız. Enerji çıktısını azami düzeye çıkarmanın ters etki yarattığı yönünde açık emareler olduğu dikkate alınırsa, bunun daha kolay olması gerekir.

Aslına bakılırsa daha fazla enerji kullanımı kendi başına, çevre açısından daha büyük sorumluluklar dışında başka bir şeyin garantisi değildir (Smil 1991). Tarihsel kanıtlar açıktır. Daha fazla enerji kullanımı güvenilir bir gıda arzı sağlamaz (odun yakan çarlık Rusyası tahıl ihracatçısıydı; hidrokarbon süper gücü olan SSCB ise tahıl ithal etmek zorundaydı); stratejik güvenlik sağlamaz (ABD'nin 1915'te 2015'te olduğundan daha güvenli bir konumda olduğu su götürmez); (Brezilya'da olsun, İtalya'da ya da Mısır'da olsun) siyasal istikrara güvenli bir dayanak sunmaz; ille de aydınlanmış bir yönetim biçimine yol açacak diye bir şey yoktur (Kuzey Kore ve İran'da böyle olmadığı kesindir); bir ülkenin hayat standartlarında yaygın olarak paylaşılan yükselmeleri beraberinde getirmez (Guatemala'da ya da Nijerya'da böyle olmamıştır).

Daha az enerji yoğun bir toplum olmaya doğru büyük bir geçiş sürecinin fırsatları en başta Batı Avrupa, Kuzey Amerika ve Japonya'da enerji ve maddelerin kötüye kullanımında dünyanın en önde gelen ülkeleri arasında bulunabilir. Bu yönde yapılacak tasarrufların birçoğunu gerçekleştirmek şaşırtıcı derecede kolay olabilir. Basalla'yla (1980, 40) şu konuda hemfikirim:

Enerji ve medeniyet eşitsizliği değersizse ve potansiyel olarak tehlikeliyse, ifşa edilmesi ve bir kenara bırakılması gerekir çünkü bu eşitlik, daha az düzeyde enerji tüketimine dayalı bir hayat tarzı benimseme yönündeki çabalara karşı sözüm ona bilimsel bir argüman ortaya atar. Büyük bir hakikat ve entelektüel zenginliğe ilişkin bir genellemeyse destekçilerinin bugüne dek yaptığından çok daha incelikli ve kuvvetli bir biçimde savunulmayı hak eder.

Bahsedilen kaynak ister enerji, ister yiyecek, ister su ya da metal olsun, modern medeniyetin kaynak kullanımında muazzam verimsizlikler olduğunu bilen biri olarak her zaman daha akılcı tüketim biçimlerini savundum. Böyle bir yol, bir yüksek enerji medeniyetinin geleceğini değerlendirmek açısından derin sonuçlar doğuracaktır, ama belli kaynak kullanımlarının kasten azaltılması yönündeki tavsiyeler, sonu gelmeyen teknik ilerlemelerin sürekli artan talebi karşılayacağına inananlarca reddedilmiştir. Her halûkârda genel olarak kaynak tüketiminde, özel olarak enerji kullanımında akılcılık, ılımlılık ve tutumluluğun benimsenmesi olasılığını, hatta böyle bir yolda ısrarla devam etme olasılığını nicelik olarak ifade etmek imkânsızdır.

Hayatın iki büyük özelliği yayılma ve karmaşıklığın artması olmuştur. ılımlı düzeyde enerji kullanımı yönünde teknik olarak uygulanabilir, çevre açısından istenebilir bir değişikliği benimseyerek bu eğilimleri tersine çevirebilir miyiz? İnsan evrimini sadece enerji akışlarının azami seviyeye çıkarılmasını gerektirmeyen bu yönlelere yoğunlaşarak sürdürebilir miyiz, kesinkes kendi solar/ biyosferik sınırları içinde yaşayacak enerji açısından değişmez bir medeniyet yaratabilir miyiz? Nihayetinde hiçbir büyümeyi öngörmeyen bir ekonomiye geçerek, bugünkü küresel nüfusu azaltarak böyle bir değişiklik başarılabilir mi? Bireyler açısından bu, sosyal statü ile maddi tüketim arasındaki bağın bir o kadar devrimci bir biçimde koparılması anlamına gelecektir. Bu tür toplumların kurulması, bu geçişi gerçekleştiren kuşaklar için özellikle ağır bir yük olacaktır. Bu yeni düzenlemeler, uzun vadede Batı'daki ilerlemenin kaynaklarından birini, sosyal ve ekonomik hareketlilik arayışını da ortadan kaldıracaktır. Yoksa yeni teknik atılımlar, gelen güneş ışınlarının büyük bir bölümünü

doğrudan ve verimli bir biçimde toplamamızı ve çok sayıda ekstra somatik rahatlığa olan bağımlılığımızı korumamızı sağlar mı?

Bugünkü enerji sistemimiz kendi kendisini sınırlayan bir sistemdir: Yakıta dönüşmüş kadim güneş ışınları birikimini kullanan yüksek enerji medeniyetimiz tarihsel bir ölçekte bile bir geçiş toplumundan ibarettir, çünkü bu yakıtların yakılmasının çevreye hiçbir etkisi olmasa bile medeniyetimiz güneş enerjisi akışlarının neredeyse anında toplanmasına dayalı, kendisinden önceki medeniyetlerin tersine binlerce yıl boyunca varlığını sürdüremez. Ama fosil enerjilerin sonunda tüketilmesi de çok ihtimal dışıdır, çünkü kömür ve hidrokarbonların yakılması başlıca antropojenik CO₂ kaynağıdır ve mevcut fosil yakıt kaynaklarının yakılması troposferik ısıyı Antarktika'daki bütün buz tabakasını eritecek, deniz seviyesinin 58 metre yükselmesine neden olacak kadar artıracaktır (Winkelmann vd. 2015).

Dünya nüfusunun büyük çoğunluğunun sahil bölgelerinde yaşadığı düşünülürse böyle bir artış medeniyetin ayakta kalması açısından derin sonuçlar doğurabilir. Mevcut yenilenebilir enerji kaynakları böyle bir akıbetten kaçınmamızı sağlayacak kadar büyüktür, ama ağırlıkta olan enerji kullanım düzeylerini korumak, düşük gelirli ekonomilerde yaşayan milyarlarca kişi için yaygınlaştırmak için bunları yakalamamız, çevirmemiz, şimdiye kadar yaptığımızdan çok daha yüksek kerte de depolamamız gerekir. Fosil yakıtların hakimiyetindeki küresel enerji sisteminden sadece yenilenebilir enerji akışlarına dayalı yeni bir düzenlemeye doğru bu çıkış açıcı geçiş, muazzam (genellikle de yeterince takdir edilmemiş) bir zorluk yaratır: Her yerde ve her zaman fosil yakıtlara bağımlılığımız, bu bağımlılığın büyüklüğü ve küresel enerji kullanımında başka artışlar olması ihtiyacı çok kuvvetli bir hevesle, istekle tutulan değişim yolunun bile ancak birkaç kuşak içinde son bulacağı anlamına gelir.

Ayrıca bu geçiş sürecinin tamamlanması, sadece farklı türde enerjiler sunan baskın enerji kaynakları olarak değil, kritik hammadde kaynakları olarak da fosil yakıtların yerini başka yakıtların almasını gerektirecektir. Fosil yakıtlar şu açıdan da kritik hammadde kaynaklarıdır: Amonyak sentezinde (2015'te yılda yaklaşık 175 Mt'ydı, çoğunlukla da ekinler için azot sağlıyordu) ve diğer gübreler ile tarımsal kimyasallarda (bitki ve böcek ilaçları) kullanılan hammadde; artık her yerde rastlanan plastiklerde kullanılan hammadde (toplam çıktı yılda 300 Mt civarındadır); metalurjik kok kömürü (artık her yıl yaklaşık 1 Gt kok kömürü gerekmekte ve bu kömür sadece demir oksitlerin indirgenmesini sağlayan enerji kaynağı olarak değil, yılda 1Gt'den fazla demir

üreten yüksek ocaklarda yüklü demir cevheri ve eriyiği üretimini desteklemek-
teki yapısal rolü nedeniyle de kullanılmaktadır); (hem hareketsiz makinelerin
hem nakliyat araçlarının işleyişi açısından temel önem taşıyan) yağlar; ve dö-
şeme malzemeleri (ucuz asfalt).

Karmaşık ve parçaları karşılıklı bağımlı bütünlerin davranışını (biyos-
ferik süreçlerin etkileşimleri, enerji üretimi kullanımı, ekonomik faaliyetler,
teknik ilerlemeler, toplumsal değişiklikler, siyasal gelişmeler, silahlı saldırgan-
lık) anlamayı beceremeyişimiz özel (ve artık sık sık ortaya atılan) uzak gele-
cek senaryolarını birer tahminden ibaret kılar. Ama tersine uç noktalarının
anahatlarının çıkarılması kolaydır, zira gelecek hayalleri kasvet ile coşkulu
mutluluk arasında gidip gelmektedir. Georgescu-Roegen'in (1975, 379) hayali
ümitli değildi: "Belki de insanın kaderi uzun, olaysız ve bitkisel bir varoluştan
ziyade kısa, ama ateşli, heyecan verici ve gösterişli bir hayat sürmektir. Bıra-
kın da manevi hevesleri olmayan diğer türler, örneğin amipler hâlâ günışığı-
na boğulmuş Dünya'yı miras alsın." Oysa tersine tekno-iyimserler ister süper
verimli PV hücreleri ister nükleer füzyon ya da insanlığın Dünya'nın imgesine
gereği gibi bürünmüş diğer gezegenlerde koloni kurması nedeniyle enerjinin
sınırsız olduğu bir gelecek görür. Bu tür yayılmacı hayalleri, öngörülebilir ge-
lecek (iki-dört kuşak, 50-100 yıl) için peri masalından başka bir şey olarak
görmüyorum.

Kesin olan tek şey, yüksek enerji medeniyetinin uzun vadede ayakta
kalmasına uygun yeni bir enerji sistemi yaratma yönünde şimdiye dek benzeri
görülmemiş çabasında başarılı olma olasılığının belirsizliğini korumasıdır. Bü-
tün bunları ne derece anladığımız dikkate alınırsa, karşımızdaki zorluk nispe-
ten yasaklayıcı olmaktan ziyade geçmişte üstesinden geldiğimiz birkaç engelin
aşılmasıyla ilgili olabilir. Ama anlamak ne kadar etkileyici olursa olsun yeterli
değildir. İhtiyaç duyulan şey bir değişim kararlılığıdır, Senancour'la (1770-
1846) birlikte şunları söyleyebiliriz:

İnsan kaybolup gider. Böyle olabilir, ama kaybolup gitsek de mücadele ede-
lim ve payımıza düşen hiçlik olacaksa da hiçlik bize adil bir ödölmüş gibi
gelmesin (Senancour 1901 [1804], 2:187).

TEMEL ÖLÇÜLER

Uzunluk, kütle, zaman ve ısı bilimsel hesapların temel birimleridir. Metre (m) temel uzunluk ölçüsü birimidir. Boyları ortalama uzunluktaki insanlara göre, bellerinden yere kadar olan mesafe bir metreye eşittir. Çoğu insanın boyu 1,5 ile 1,8 metre arasındadır; Amerika'daki evlerin tavanları yaklaşık 2,5 metre yüksekliğindedir; bir Olimpiyat parkuru 400 metre uzunluğundadır; jet pistleri genellikle 3.000 metre civarındadır. Bilimsel birimlerin katlarını ifade ederken standart Yunanca örnekler kullanılır. Kilo 1.000'dir, bu nedenle 3.000 metre 3 kilometredir (km). Maraton koşusu 42,195 km'dir, sahilden sahile uçuş 4.000 km'dir, ekvatorun çevresi yaklaşık 40.000 km'dir, ışık bir saniyede 300.000 km yol alır ve Dünya ile Güneş arasında 150 milyon km vardır. Kesir birimler için standart Latince örnekler kullanılır. Bir santimetre metrenin yüzde biridir. Başparmağı bükülmüş parmakların yanında tutarak masaya konmuş bir yumruk yaklaşık 10 cm'dir (0,1 m). Yeni kurşunkalemler yaklaşık 20 cm uzunluğundadır (0,2 m), yeni doğmuş bebeklerse 50 cm (0,5 m).

Sık rastlanan alan birimleri cm^2 ile km^2 arasında değişir. Bir bardak altlığının alanı yaklaşık 10 cm^2 'dir, bir yatağınki yaklaşık 2 m^2 , Amerika'da küçük bir kulübenin temelleri yaklaşık 100 m^2 'dir. Bu alana (10 x 10 m) bir *ar* denir ve 100 (*hecto*) tane böyle kare bir *hektar* (ha) yapar, hektar tarım arazilerini ölçmekte kullanılan temel metrik birimdir. Çinliler ve Bangladeşliler kendilerini kişi başına 0,1 hektardan daha az bir alanla beslemiş, Ame-

rikalılar kişi başına yaklaşık 1 hektar ekip biçmiştir. Tarım dışında daha geniş alanlar genellikle kilometrekareyle (km^2) ifade edilir. Kuzey Amerika'da nüfusu yaklaşık bir milyon olan kentler 500 km^2 'den küçük bir alanı kaplar; küçük Avrupa ülkelerinin yüzölçümü 100.000 km^2 'nin epeyce altındadır, ABD'nin yüzölçümü ise yaklaşık 10 milyon km^2 'dir.

Temel kütle birimleri küpleri suyla doldurarak kolayca elde edilebilir. Bir santrimetreküplük küçük bir küp (kenarları, küçük bir tırnak genişliğindeyse) suyla doldurulduğunda bir gram (g) ağırlığında olacaktır (daha doğrusu kütlesi bir gram olacaktır). Yumruk büyüklüğünde bir küp 1.000 cm^3 ($10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$) yani bir litre (L) hacme sahip olacaktır. Suyla doldurulduğunda kütlesi 1.000 gram (g) yani bir kilogram (kg) olacaktır. Kilogram temel kütle birimidir. Alkolsüz içecekler bir kilogramın üçte biri ağırlığındadır (350 g), yeni doğmuş bebekler 3 ilâ 4 kg'dır, Amerikalı olmayan yetişkinlerin çoğu 50 ilâ 90 kg'dır. Küçük ve ekonomik aile arabalarının kütlesi yaklaşık 1.000 kg 'dır, yani bir tondur (buna metrik ton (t) da denir, ABD'deki ton sadece 907 kg çeker). Büyük bir atın ağırlığı 1 t kadardır, demiryolu vagonlarının ağırlığı 30 ilâ 100 tondur, (tümüyle yüklü) gemilerin ağırlığı birkaç bin tonla 500.000 ton arasında değişir.

Saniye (s), ortalama bir kalp atışından biraz daha uzun bir zaman aralığını kaplar ve temel zaman birimidir. Dinlenirken her dört saniyede bir nefes alırız, bir bardak suyu içmemiz 10 saniye sürer. Metrik bilimsel birimler sisteminde daha büyük zaman birimleri istisnadır. Zaman birimleri 10'un katlarına göre ilerlemez, antik Sümer ve Babil'deki altmış tabanlı sayma sistemine dayanır. İşlek bir kavşaktaki bir kırmızı ışık 60 saniye yanar, yani 1 dakika. Kaynamış bir yumurtanın pişirilmesi sekiz dakika alır, klasik bir senfoni ortalama 40 dakika sürer. Normal bir hamilelik 280 gün sürer, artık olmayan her yılda 365 gün, yani 31.536 saniye vardır; Batı ülkelerinde kadınların ortalama ömürleri artık 80 yılı aşmıştır; tarım yaklaşık 10.000 yıl önce yayılmaya başlamıştır; dinazor sayısı 80 milyon yıl önce çok fazlaydı ve Yeryüzü de aşağı yukarı 4,5 milyar yaşındadır.

Bilimsel ısı ölçeği, Kelvin derecesi, mutlak sıfırda başlar. Celcius (C) ölçeği daha yaygındır: Suyun donma noktası ile kaynama noktası arasındaki aralık 100 dereceye bölünür ($^{\circ}\text{C}$). Bu ölçekte mutlak sıfır $-273,15^{\circ}\text{C}$ 'dir, su 0°C 'de donar, güzel bir bahar gününde ısı 20°C civarındadır, insan vücudunun normal sıcaklığı da 37°C 'dir. Su 100°C 'de kaynar, kâğıt 230°C 'de tutuşur, demir 1.535°C 'de erir ve Güneş'in termonükleer tepkimeleri 15 milyon $^{\circ}\text{C}$ 'de gerçekleşir.

Diğer bütün bilimsel birimlerin neredeyse hepsi uzunluk, kütle, zaman ve ısıdan türetilir. Enerji ve güç için türetmeler şöyledir: 1 kg'lık bir kütle üzerinde 1 m/s² ivmeyle etkili olan güç bir newton'a eşittir (N). 1 m'lik bir mesafeden uygulanan 1 N'lik bir kuvvet bir jule (J) eşittir, jul temel enerji birimidir. Beslenmeyle ilgili yazılarda sık kullanılan bir enerji birimi olan kalori 4,184 jule eşittir. Bunların ikisi de küçük miktarlardır: Faal bir yetişkin kadının günlük gıda tüketimi ancak 2.000 kalori (2 Mcal) ya da 8,36 MJ olacaktır. Kuvvet zaman başına uygulanan enerjidir, dolayısıyla 1 J/s bir watt'a (W) eşittir. Aşağıda "Tarihte Kuvvet" bölümünde çeşitli eylemler watt artışına göre sıralanmıştır.

Birçok birimin, örneğin hız birimlerinin –saniyede metre (m/sn) ya da saatte kilometre (km/saat)– ve verimlilik birimlerinin –saatte kilogram ya da ton (kg/s, t/s) ya da yılda ton (t/yıl)– özel bir ismi yoktur. Çalışan atlar yaklaşık 1 m/sn hızla hareket eder, otobanlarda çoğu hız limiti 100 km/s civarındadır. Taş bir değirmende tahıl öğüten bir köle 4 kg/s'yi aşmayan bir hızla un üretir, geç Ortaçağ'da mükemmel bir buğday hasadı 1 t/ha'ydı.

Burada betimlenen ölçülerin sadece bir-iki tanesi metindeki görünüm-lerin çoğunu açıklar. Enerji ve kuvvet birimleri dışında bunlar uzunluk ve kütle ölçen iki temel fiziksel birim (m ve kg), iki alan ölçüsü (ha ve km²), dört zaman birimidir (saniye, saat, gün ve yıl). Eksiksiz bir örnek listesi mevcuttur, ama bunların sadece birkaç tanesi (yukarı doğru: hekto, kilo, mega, giga; aşağı doğru: mili, mikro) sık kullanılır.

BİLİMSEL BİRİMLER, KATLARI VE ALTÇARPANLARI

Temel Bilimsel Birimler		
Nicelik	İsim	Sembol
Uzunluk	metre	m
Kütle	kilogram	kg
Zaman	saniye	s
Elektrik akımı	Amper	A
Isı	Kelvin	K
Madde miktarı	mol	mol
Işık yoğunluğu	mum	cd

Metinde Kullanılan Diğer Birimler		
Nicelik	İsim	Sembol
Alan	hektar	ha
	metrekare	m²
Elektrik potansiyeli	Volt	V
Enerji	Jul	J
Kuvvet	Newton	N
Kütle	gram	g
	ton	t
Güç	Watt	W
Basınç	Pascal	Pa
Isı	derece (Celsius)	°C
Hacim	metreküp	m³

Uluslararası Birim Sisteminde Kullanılan Çarpanlar		
Ön ek	Kısaltma	Bilimsel simge
deka	da	10 ¹
hekto	h	10 ²
kilo	k	10 ³
mega	M	10 ⁶
giga	G	10 ⁹
tera	T	10 ¹²
peta	P	10 ¹⁵
exa	E	10 ¹⁸
zeta	Z	10 ²¹
yota	Y	10 ²⁴

Uluslararası Birimler Sisteminde Kullanılan Altçarpınlar		
Ön ek	Kısaltma	Bilimsel simge
desi	d	10^{-1}
santi	c	10^{-2}
mili	m	10^{-3}
mikro	μ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
piko	p	10^{-12}
femto	f	10^{-15}
atto	a	10^{-18}
zepto	z	10^{-21}
yokto	y	10^{-24}

ENERJİYLE İLGİLİ GELİŞMELERİN KRONOLOJİSİ

Bu liste metinde ve bibliyografyada adı geçen çok çeşitli kaynaklardan derlenmiştir. Teknik ilerlemelerle ilgili daha kapsamlı kronolojiler Mumford (1934), Gille (1978), Taylor (1982), Williams (1987), Bunch ve Hellemans'ta (1993) bulunabilir; enerjiyle ilgili gelişmeleri (enerji kaynakları, uygulamalar ve etkilere göre sıralanmış) daha kapsamlı bir kronoloji halinde görmek isteyen okurlar Cleveland ve Morris'in (2014) yazdığı yaklaşık 1.000 sayfalık kitaba bakmalıdır. Yerimizin kısıtlı olması nedeniyle liste çoğunlukla pratik ilerlemelerle (ve bazı dikkat çekici başarısızlıklarla) sınırlandırılmıştır: temelde yatan entelektüel, bilimsel, siyasal ve ekonomik katkılar dışarıda bırakılmıştır. Erken tarihlerin hepsi kaçınılmaz olarak yaklaşık tarihlerdir ve farklı kaynaklarda farklı tarihler verilmiş olabilir. Modern ilerlemeler olmuşsa da uyumsuzluklar mevcuttur: Tarihler fikrin ilk doğduğu, patentin alındığı, ilk kez uygulandığı ya da başarıyla ticaretinin yapıldığı tarihi belirtiyor olabilir. İcatların tarihlerinin verilmesiyle ilgili sorunlar hakkında bkz. Petroski (1993).

MİLAT TAN ÖNCE

1.700.000 +	Oldowan taş aletleri (<0.5 m kenar/kg taş)
250.000 +	Acheulean taş aletleri
150.000 +	Mousterian çakmaktaşı aletleri
50.000 +	Kemik nesneler
30.000 +	Aurignacian taş aletler Yay ve taş oklar
15.000 +	Magdalenian taş aletler (12 m kenar/kg taş)
9.000 +	Ortadoğu'da koyunun evcilleştirilmesi
7.400 +	Oaxaca Vadisi'nde mısır
7.000 +	Mezopotamya'da buğday Ortadoğu'da domuzların evcilleştirilmesi
6.500 +	Ortadoğu'da sığırın evcilleştirilmesi
6.000 +	Bakır nesnelerin Ortadoğu'da yaygınlaşması
5.000 +	Mısır'da arpa Meksika havzasında mısır
4.400 +	Peru'nun yüksek bölgeleri ve Bolivya'da patates
4.000 +	Mezopotamya'da hafif ahşap pulluk
3.500 +	Ortadoğu'da yük eşekleri Akdeniz'de ahşap gemiler Mezopotamya'daki ocaklarda çömlek ve tuğla pişirilmesi Mezopotamya'da sulama
3.200 +	Uruk'ta tekerlekli araçlar
3.000 +	Mısır'da kare yelken Mezopotamya'da yük öküzleri Deve evcilleştirildi Mezopotamya'da seramik üretim tekeri
2.800 +	Mısır'da piramit inşası
2.500 +	Mezopotamya'da bronz Mısır'da küçük cam nesneler
2.000 +	Mezopotamya'da çubuklu tekerlek Mısır'da atların çektiği arabalar Mezopotamya'da şaduf
1.700 +	Ata binme

1.500 +	Çin'de bakır Çin'de pirinç tarlası Ortadoğu'da dingil yağlama
1.400 +	Mezopotamya'da demir
1.300 +	Mezopotamya'da tohumaker Çin'de atların çektiği savaş arabaları
1.200 +	Demir Hindistan, Ortadoğu ve Avrupa'da daha yaygın
800 +	Asya steplerinde binekli okçular Ortadoğu'da kandil
600 +	Yunanistan'da kalay Yunanistan'da <i>Pentekonteranın</i> (orta direkli yelkenli gemiler) yaygınlaşması Mısır'da sulamada Arşimet vidası kullanılır
500 +	Kuzey Arabistan'da deve eyerleri Yunanistan'da trirem
400 +	Çin'de arbalet
432	Partenon tamamlandı
300 +	Çin'de üzengi Mısır ve Yunanistan'da dişli
312	Romalıların Via Appia'sı ve Aqua Appia'sının tamamlanması
200 +	Çin'de göğüs koşumu Çin'de rüzgâra doğru yol almada ilerleme Çin'de tirizlerle sağlamlaştırılmış yelkenler Sichuan'da darbeli sondaj Çin'de krank kolu
150 +	Çin'de demir kulaklı pulluk
100 +	Çin'de boyun koşumunun başlangıcı Çin'de kömürle konutların ısıtılması Yunanistan ve Roma'da su tekerleri Çin'de el arabası Ortadoğu'da su çarkları
80 +	Roma'da yer altı ısıtma tertibatı

MİLATTAN SONRA

300	Roma'da kamu yollarının uzunluğunun 80.000 km'yi aşması
600 +	Yel değirmenleri (İran)
850 +	Akdeniz'de üçgen yelken
900 +	Avrupa'da boyunduruk ve at nalı yaygınlaşır Çin'de bambu meşale
980 +	Çin'de kanal göleti kilidi
1000 +	Batı Avrupa'da su tekerlerinin yaygın olarak benimsenmesi
1040	Çin'de barut hazırlama konusunda açık yönergeler
1100 +	İngiltere'de uzun yay
1150 +	Batı Avrupa'da yel değirmenlerinin yayılması
1200 +	İnka yolunun inşası
1280 +	Çin'de toplar
1300 +	Avrupa'da barut ve top
1327	Beijing-Hangzhou Büyük Kanalı'nın (1.800 km uzunluğunda) tamamlanması
1350 +	Avrupa'da elde taşınan tüfekler
1400 +	Avrupa'da ağır yük atları Hollanda'da drenaj yel değirmenleri Rhine bölgesinde yüksek ocaklar
1420 +	Portekiz karavelalarının daha uzun yolculuklara çıkması
1492	Kolomb'un Atlantik'i aşması
1497	Vasco da Gama'nın Hindistan'a gitmesi
1519	Macellan'ın <i>Victoria</i> 'sının Dünya'nın çevresini dolanması
1550 +	Batı Avrupa'da toplanan, tümüyle yelkenli büyük gemiler
1600 +	Batı Avrupa'da bilyeli rulman
1640 +	İngiltere'de kömür madencilığının yayılması
1690	Atmosferik buhar makinesiyle deneyler (Denis Papin)
1698	Basit, küçük buhar makinesi (Thomas Savery)
1709	Bitümen kömürden kok (Abraham Darby)
1712	Atmosferik buhar makinesi (Thomas Newcomen)
1745	Yel değirmenlerinin otomatik dönmeleri için kuyruk
1750 +	Batı Avrupa'da kanal inşası yoğunlaşır İngiltere'de demir üretiminde kok kullanımının yaygınlaşması Newcomen'in motoru İngiliz kömür madenlerinde daha sık kullanılır.

1757	Hassas kesim tornası (Henry Maudslay)
1769	James Watt buhar makinesi için ayrı bir yoğuşturucunun patentini alır.
1770'ler	Su tekerleriyle çalışan fabrikalar
1775	Watt'ın patentinin 1800'e dek uzatılması
1782	Sıcak hava balonu (Joseph ve Etienne Montgolfier)
1794	Fitilli, cam bacalı lambalar (Aimé Argand)
1800	Elektrik pili (Alessandro Volta)
1800'ler	Buhar tekneleri (<i>Charlotte Dundas, Clermont</i>) Yüksek basınçlı buhar motorları (R. Trevithick, O. Evans)
1805	Buhar gücüyle çalışan vinç (John Rennie) İngiltere'de kömür (şehir) gazı
1808	Ark lambası (Humphrey Davy)
1809	Şili nitratlarının keşfedilmesi
1816	Maden güvenlik lambası (Humphrey Davy)
1820'ler	Mekanik hesap makinesi tasarımları (Charles Babbage) Demir gemi tekneleri
1820	Elektromanyetizma (Hans C. Oersted)
1823	Silikonun yalıtılması (J. J. Berzelius)
1824	Portland çimentosu (Joseph Aspdin) Alüminyumun yalıtılması (Hans C. Oersted)
1825	Stockton-Darlington demiryolu
1828	Demir üretiminde sıcak üfleme (James Neilson)
1829	Roket lokomotif (Robert Stephenson)
1830'lar	İngiltere'de demiryolu inşasının kalkışa geçmesi Buharlı gemilerin Atlantik'i aşması Mekanik biçerdöver (Cyrus McCormick, Obed Hussey)
1830	Termostat (Andrew Ure) Liverpool-Manchester demiryolu
1832	Su türbini (Benoît Fourneyron)
1833	Çelik pulluk (John Lane) Buharlı gemi <i>Royal William</i> 'in Quebec'ten Londra'ya varması
1834	Ayaklı kuzine (Philo P. Stewart)
1837	Elektrikli telgrafın patenti alınır (William F. Cooke ve Charles Wheatstone).
1838	Buharlı gemilerde burgulu itilim (John Ericsson) Telgraf şifresi (Samuel Morse)
1840'lar	ABD'de balina avcılığının zirveye tırmanması

1841	Buharla çalışan harman dövme makinesi Thomas Cook'un tatil gezileri sunması
1847	İçe akışlı su türbini (James B. Francis)
1850'ler	Aydınlatma için petrolden parafin elde edilmesi Hızlı yelkenlilerin uzun seyahatlere çıkması
1852	Hidrojen doldurulan hava gemileri (Henri Giffard)
1854	<i>Great Eastern</i> buhar gemisi (Isambard K. Brunel)
1856	Çelik dönüştürücü (Henry Bessemer)
1858	Biçerdöver (C. W. ve W. W. Marsh)
1859	Pensilvanya'da petrol sondajı (E. L. Drake)
1860'lar	Amerika'da büyük arazilerin buharlı pullukla sürülmesi
1860	Yatay içten yanmalı motor (J. J. E. Lenoir) Süt sağma makinesi (L. O. Colvin)
1864	Açık ocaklarda demir yapım süreci (W. ve F. Siemens)
1865	Nitroselüloz (J. F. E. Schultze)
1866	Karbon-çinko pili (Georges Leclanche) Transatlantik kablonun daimi olarak kullanıma girmesi Torpedo (Robert Whitehead)
1867	Donduruculu tren vagonları hizmete girer.
1869	Süveyş Kanalı tamamlanır. ABD'de kıtayı bir boydan bir boya aşan demiryolunun tamamlanması
1870'ler	Okyanus aşan gemilerde etkin buzdolabında nakli Fosfatlı gübre sanayinin başlangıcı
1871	Kasnaklı dinamo armatürü (Z. T. Gramme)
1875	Dinamit (Alfred Nobel)
1874	Fotoğraf filmi (George Eastman)
1876	Dört zamanlı içten yanmalı motor (N. A. Otto) Telefonun patenti alınır (Alexander Graham Bell, Elisha Gray).
1877	Fonograf (Thomas A. Edison)
1878	İki zamanlı içten yanmalı motor (Dugald Clerk) Telli ampul (Joseph Swan) Biçerdöver için halat düğümleyici (John Appleby)
1879	Karbon telli ampul (Thomas A. Edison)

1880'ler	Atların çektiği hasat kombinleri (California) Modern bisikletler (J. K. Starley, William Sutton) Ham petrol tankerleri Askeri amaçlı güçlü patlayıcılar formüle edilir.
1882	Edison'un ilk elektrik üretim tesisi
1883	Tek basamaklı aksiyon türbini (Carl Gustaf de Laval) Dört zamanlı sıvı yakıtlı motor (Gottlieb Daimler) Makineli tüfek (Hiram S. Maxim)
1884	Buhar türbini (Charles Parsons)
1885	Dönüştürücü (William Stanley) Karl Benz'in ilk kullanışlı otomobili yapması
1886	Önceden baskılanmış beton (C. E. Doehring) Alüminyum üretimi (C. M. Hall ve P. L. T. Héroult)
1887	Texas'ta ham petrolün keşfi Elektromanyetik dalgaların üretilmesi (Heinrich Hertz)
1888	İndüklemeli elektrik motoru (Nikola Tesla) Gramofon (Emile Berliner) Havayla doldurulmuş kauçuk lastik (John B. Dunlop)
1889	Balmumu silindirler çalan fonograf (Thomas A. Edison) Tahrikli su türbini (Lester A. Pelton)
1890'lar	Batı'daki kentlerde atların sayısı zirveye tırmanması Elektrikli ev aygıtlarının piyasaya çıkması
1892	Dizel motoru (Rudolf Diesel)
1894	Açık denizde dalgakıranlarda sondajla petrol çıkarma (California)
1895	Hareketli resim (Louis ve August Lumière) X-ışınları (Wilhelm K. Roentgen)
1897	Katot ışını tüpü (Ferdinand Braun)
1898	Kayıt cihazı (Valdemar Poulsen)
1899	Radyo sinyallerinin Manş Denizi'ni aşması (Guglielmo Marconi)
1900'ler	ABD ve Britanya'da elektrik tüketiminin artması Hacimli otomobil üretiminin başlaması
1900	Güdümlü zeplin (Ferdinand von Zeppelin)

1901	Sanayi havalandırma sistemi (klima) (Willis H. Carrier) Döner sondaj (Spindletop, Texas) Radyo sinyallerinin Atlantik'i aşması (Guglielmo Marconi)
1903	Gücün sürekli kontrol altında olduğu uçuş (Oliver ve Wilbur Wright)
1904	Jeotermal elektrik üretimi (Lardarello, İtalya) Vakumlu diyot (John A. Fleming)
1905	Fotoelektrik pil (Arthur Korn) ABD'de ticari traktör üretimi
1906	İngiltere'de <i>Dreadnought</i> 'un (zırhlı savaş gemileri) suya indirilmesi Vakumlu triyot (Lee De Forest)
1908	Tungsten ampülü Ford Model T (1927'ye kadar üretildi)
1909	Döner matkap ucu (Howard Hughes) Louis Bleriot'nun Manş Denizi'ni uçakla aşması Bakalit, ilk önemli plastik (Leo Baekeland)
1910	Neon ışığı (Georges Claude) Kömürden sentetik gaz (Fischer-Tropsch, Germany)
1913	Hareketli üretim hattı (Ford Company) Panama Kanalı'nın tamamlanması Amonyak sentezi (Fritz Haber ve Carl Bosch) Yüksek basınçlı ham petrol ayırma (W. M. Burton)
1914	Birinci Dünya Savaşı (1918'e kadar): siperler ve gazlı savaş, uçaklar, tanklar
1919	Uçakla hiç mola vermeden Atlantik'in aşılması (J. Alcock ve A. W. Brown) Tarifeli uçak seferleri (Paris-Londra)
1920'ler	Kazanlarda toz haline getirilmiş kömür yakılıyor. Aerodinamik metal uçak gövdeleri Elektrikli plakçalarlar Radyo yayınları Kuzey Amerika ve Avrupa'da yaygınlaşır. Kömürün sıvılaştırılması (Friedrich Bergius)
1920	Düşey akışlı su türbini (Viktor Kaplan)
1922	Uçak gemisi <i>Hosho</i> Japonya'da suya indirildi.
1923	Elektronik kamera tüpü (Vladimir Zworykin) Electrolux elektrikli buzdolabı çıkardı.

1927	Sentetik kauçuk (Buna) Bir pilotun tek başına hiç mola vermeksizin Atlantik'i aştığı ilk uçuş (Charles A. Lindbergh) Irak Kerkük'te ham petrolün keşfi
1928	Pleksiglas (W. Bauer)
1929	DeneySEL TV yayınları (Birleşik Krallık)
1930'lar	Katalitik ham petrol çatlatma (Eugene Houdry) Büyük hidro-istasyonlar (ABD ve SSCB) Uzun mesafeler alabilen bombardıman uçakları Buzdolaplarında kloroflorokarbonlar
1933	Polietilen (Imperial Chemical Industries)
1935	Florasan ışığı (General Electric) Plastik mknatıslı bant (AEG Telefunken, I. G. Farben) Naylon (Wallace Carothers)
1936	Düzenli TV yayınları (BBC) Gaz türbini (Brown-Boveri)
1937	Tam basınçlı uçaklar (Lockheed XC-35)
1938	Jet uçağı prototipi (Hans Pabst von Ohain)
1939	Radar (Birleşik Krallık) İkinci Dünya Savaşı (1945'e kadar): Blitzkrieg
1940'lar	Askeri jet uçakları Elektronik bilgisayarlar
1940	Helikopter (Igor Sikorsky)
1942	V-1 roketleri (Wernher von Braun) Sanayi silikon üretimi Kontrollü zincirleme tepkime (Enrico Fermi, Chicago)
1944	V-2 roketleri DDT'nin piyasaya sürülmesi
1945	Nükleer bombalar (Trinity testi, Hiroşima ve Nagazaki) Elektronik bilgisayar (ENIAC, ABD) İlk zararlı bitki ilacının (2,4-D) piyasaya sürülmesi
1947	Transistör (J. Bardeen, W. H. Brattın ve W. B. Shockley) Karanın görünmediğı açık denizde sondaj (Louisiana) Sesten hızlı pilotlu uçuş (Bell X-1)

1948	Bazık oksijenli çelik üretim fırını (Linz-Donawitz) Dünyanın en büyük petrol yatağının (Gavar) keşfi
1949	İlk yolcu jeti (De Havilland Comet)
1950'ler	Ham petrol tüketiminin dünya çapında hızla artışı Sürekli çelik yapımı Elektrostatik çöktürücülerinyaygınlaşması Ticari bilgisayarlar Stereo kayıtlar Video kayıt cihazları
1951	Otomatik motor montajı (Ford Company) Renkli TV görüntülerinin aktarımı Hidrojen (füzyon) bombası
1952	Britanya üretimi Comet jeti ticari hizmette
1953	Mikrodalga fırın (Raytheon Manufacturing Company)
1954	ABD Donanması nükleer denizaltısı <i>Nautilus</i> suya indirildi
1955	Tam transistörlü Sony radyo
1956	İlk ticari nükleer enerji tesisi (Calder Hall, Birleşik Krallık) Transatlantik telefon kablosu ABD'de eyaletlerarası otoban inşasına başlanması
1957	<i>Sputnik 1</i> , Dünya'nın ilk yapay uydusu (SSCB) ABD'de ilk nükleer enerji tesisi (Shippingport, Pensilvanya)
1958	Entegre devre (Texas Instruments) ABD Boeing 707 jeti hizmette
1960'lar	Açık denizde sondaj için yarı gömülebilir platformlar Meteoroloji ve iletişim uyduları Çok büyük ham petrol tankerleri Geniş çaplı kıtalararası balistik füze konuşlanması (ICBM'ler) En büyük Sovyet füzyon bombalarının atmosferde testi Sentetik gübre ve böcek ilacı kullanımının yayılması Yüksek ürün veren ekin çeşitleri
1960	ABD Minuteman silah sistemi ICBM'le test edildi.
1961	ABD'de nükleer enerjiyle çalışan uçak gemisi <i>Enterprise</i> 'in suya indirilmesi İnsanlı uzay yolculuğu (Yuri Gagarin)
1962	Transatlantik televizyon yayını (Telstar)

1964	Shinkansen'in (Japonya Ulusal Demiryolları) çalışmaya başlaması
1966	Amerikan jumbo jet Boeing 747 siparişi
1969	Britanya-Fransa süpersonik uçak Concorde'un kalkış yapması Boeing 747'nin ticari hizmete girmesi ABD'nin <i>Apollo 11</i> uzay aracının Ay'a inşi
1970'ler	Radyo ve televizyon uydu yayınları Fosil yakıt kaynaklarıyla ilgili haberler Avrupa ve Kuzey Amerika üstünde asit yağmuru Japon otomobil satışlarında tırmanış
1971	İlk mikroişlemciler (Intel, Texas Instruments)
1973	OPEC'in ham petrol fiyatlarını ilk kez artırması (1974'e kadar)
1975	Brezilya'nın şeker kamışından otomotiv etanolü üretmeye başlaması
1976	Concorde'un ticari hizmete girmesi ABD'nin insansız <i>Viking</i> uzay aracının Mars'a inşi
1977	<i>Gossamer Condor</i> 'un insanlı uçuşu
1979	OPEC'in petrol fiyatlarını ikinci kez artırması (1981'e kadar)
1980s	Kişisel bilgisayar sahibi olmanın yaygınlaşması Daha etkili uygulamalar ve otomobiller Küresel çevre değişikliğiyle ilgili kaygılar Genetik mühendisliğinin yükselmesi
1982	CD çalar (Philips, Sony)
1983	Fransız TGV'nin çalışmaya başlaması (Paris-Lyon)
1985	Antarktika üstünde ozon deliğinin tanımlanışı
1986	Çernobil nükleer reaktörü felaketi
1989	World Wide Web'in başlangıcı (Tim Berners-Lee)
1990	Küresel nüfusun 5 milyarı aşması
1994	Netscape'in faaliyete başlaması
1999	Akıllı telefonlar kitlesel olarak benimsenmeye başlar.
2000'ler	Rüzgâr türbinleri ve PV hücrelerin yaygın tesisi
2000	Alman <i>Energiewende</i> 'nin başlaması
2003	Üç Boğaz Barajı'nın tamamlanması (Yangzi nehri, Çin)
2007	ABD'de hidrolik parçalamanın yükselişe geçişi
2009	Çin'in dünyanın en büyük enerji tüketicisi olması

2011	Tsunami ve hatalı yönetimin Fukuşima nükleer felaketine yol açması Küresel nüfusun 7 milyara ulaşması
2014	ABD'nin bir kez daha dünyanın en büyük doğalgaz üreticisi olması
2015	Atmosferde ortalama CO ₂ yoğunlaşmasının 400 ppm'ye ulaşması

TARİHTE ENERJİ

Enerji Oranları: Bir Mumdan Küresel Medeniyete

Eylemler, asli itici güçler, çeviriciler	Enerji (W)
Yanan küçük balmumu (MÖ 800)	5
Mısırlı bir çocuğun Arşimet burgusunu çevirmesi (MÖ 500)	25
ABD'de küçük yel değirmenleri (1880)	30
Çinli bir kadının bir harman savurma makinesini çevirmesi (MÖ 100)	50
Fransız cam parlaticıların sürekli çalışması (1700)	75
Güçlü bir adamın ahşap bir tekeri hızla çevirmesi (1400)	200
Bir eşeğin Roma'ya özgü kum saatli bir değirmeni çevirmesi (MÖ 100)	300
Çin'de bir çift zayıf öküzün saban sürmesi (1900)	600
İyi bir İngiliz atın bocurgat çevirmesi (1770)	750
Hollanda'da sekiz erkeğin çalıştırdığı ayak değirmeni (1500)	800
Amerika'da çok güçlü bir atın bir arabayı çekmesi (1890)	1.000
Olimpiyat Oyunları'nda uzun mesafe koşucusu (MÖ 600)	1.400
Roma'da dikey bir su çarkının bir değirmen taşını çevirmesi (MÖ 100)	1.800
Newcomen'in su pompalayan atmosferik motoru (1712)	3.750
Ransom Olds'un Curved Dash otomobilinin motoru (1904)	5.200
50 kürekçinin tam hızla çektiği Yunan orta direkli gemi (MÖ 600 BC)	6.000
Almanya'da yağ tohumlarını ezen büyük "post" yel değirmeni (1500)	6.500
Roma'da dörtlü giden ulak atı (MÖ 200)	7.200

Eylemler, asli itici güçler, çeviriciler	Enerji (W)
Hollanda'da denizden kazanılmış toprağı kurutan büyük yel değirmeni (1750)	12.000
Tam hız çalışan Ford Model T'nin motoru (1908)	14.900
170 kürekçinin tam hız çektiğı Yunan trirem (MÖ 500)	20.000
Watt'ın kömürle çalışan buhar motoru (1795)	20.000
California'da bir kombini çeken 40 at (1885)	28.000
Barbegal'de Roma'ya özgü 16 tane su değirmeni (MÖ 350)	30.000
Benoît Fourneyron'ın ilk su türbini (1832)	38.000
Marly'de Versailles için çalışan su pompaları (1685)	60.000
Honda Civic GL'in motoru (1985)	63.000
Charles Parsons'ın buhar türbini (1888)	75.000
Edison'un Pearl Street İstasyonu'nda buhar motoru (1882)	93.200
Watt'ın en büyük buhar motoru (1800)	100.000
ABD'de bir süpermarkette elektrik kullanımı (1980)	200.000
Bir Alman denizaltısının dizel motoru (1916)	400.000
Dünyanın en büyük su çarkı Lady Isabella (1854)	427.000
Tam hız yol alan büyük bir buharlı lokomotif (1890)	850.000
Elberfeld İstasyonu'nda Parsons'ın buhar türbini (1900)	1.000.000
İskoçya'da Greenock'ta Shaw'un su işleri (1840)	1.500.000
Büyük rüzgâr türbini (2015)	4.000.000
V-2 füzesi fırlatan roket motoru (1944)	6.200.000
Bir boru hattı kompresörünü çalıştıran gaz türbini (1970)	10.000.000
Japon ticaret gemisinin dizel motoru (1960)	30.000.000
Boeing 747'nin dört jet motoru (1969)	60.000.000
Calder Hall nükleer reaktörü (1956)	202.000.000
Chooz nükleer enerji santralinde turbojeneratör (1990)	1.457.000.000
Saturn C 5 fırlatan roket motorları (1969)	2.600.000.000
Kashiwazaki-kariwa nükleer enerji istasyonu (1997)	8.212.000.000

Eylemler, asli itici güçler, çeviriciler	Enerji (W)
Japonya'nın asli enerji tüketimi (2015)	63.200.000.000
ABD'de kömür ve biyokütle enerjisi tüketimi (1850)	79.000.000.000
ABD'de ticari enerji tüketimi (2010)	3.050.000.000.000
Küresel ticari enerji tüketimi (2015)	17.530.000.000.000

Tarla işlerinde asli itici güçlerin azami enerjileri (güçleri), 1700-2015

Yıl	Eylemler, asli itici güçler	Enerji (W)
1700	Çinli bir köylünün lahana tarlasını çapalaması	50
1750	İtalyan bir köylünün yaşlı zayıf bir öküzle tırpanlaması	200
1800	İngiliz bir çiftçinin iki küçük atla saban sürmesi	1.000
1870	Kuzey Dakotalı bir çiftçinin altı güçlü atla saban sürmesi	4.000
1900	California'lı bir çiftçinin 32 atla bir kombini çekmesi	22.000
1950	Fransız bir çiftçinin küçük bir traktörle hasat yapması	50.000
2015	Manitobalı bir çiftçinin büyük bir dizel traktörle tarla sürmesi	298.000

Karadan nakliyatla asli itici güçlerin azami gücü, 1700-2015

Yıl	Asli itici güçler	Güç (W)
1700	Bir arabayı çeken iki öküz	700
1750	Bir arabayı çeken dört at	2.500
1850	İngiltere'de buharlı lokomotif	200.000
1900	Amerika'da en hızlı buhar lokomotifi	1.000.000
1950	Güçlü Alman dizel lokomotifi	2.000.000
2006	Alstom üretimi Fransız TGV treni	9.600.000
2015	N700 serisi yüksek hızlı <i>shinkansen</i> treni	17.080.000

Yıllık ortalama (kişi başına GJ) asli enerji tüketimi

	1750	1800	1850	1900	1950	2000
Çin	10	10	10	<15	<20	40
Britanya	30	60	80	115	100	150
Fransa	<20	20	25	55	65	180
Japonya	10	10	10	10	25	170
ABD	<80	<100	105	135	245	345
Dünya	<20	20	25	35	40	65

Not: Bütün değerler en yakın 5'e yuvarlanmıştır ve bütün fitokütleyi (geleneksel ve modern biyoyakıtlar), fosil yakıtları ve asli elektriği içerir.

Kaynakça Notları

Enerji kullanımındaki ilerlemeler, Singer vd. (1954-1958), Forbes (1964-1972) ve Needham vd.'nin (1954-2015) kaleme aldığı teknik ilerlemeyi konu alan çok ciltli tarih kitaplarında sistematik olarak betimlenmiştir. İcatlar ve mühendislik pratiklerinin izini süren çok sayıda yazıda enerjiyle ilgili meseleler çeşitli düzeylerde ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bu temel liste Byrn (1900), Abbott (1932), Mumford (1934), Usher (1954), Derry ve Williams (1960), Burstall (1968), Kranzberg ve Pursell (1967), Daumas (1969), Lindsay (1975), Gille (1978), L. White (1978), Landels (1980), Taylor (1982), Hill (1984), K. D. White (1984), Williams (1987), Basalla (1988), Pacey (1990), Finniston vd. (1992), Constable ve Somerville (2003), Cleveland (2004), Smil (2005, 2006), McNeill vd. (2005), Billington ve Billington (2006), Oleson (2008), Burke (2009), Weissenbacher (2009), Coopersmith (2010), Sørensen (2011) ve Wei'yi (2012) de içerir.

Atlarn medeniyete katkıları için şu değerli kaynaklara danışılabilir: Lefebvre des Noëttes (1924), Smythe (1967), Dent (1974), Silver (1976), Villiers (1976), Telleen (1977), Langdon (1986), Hyland (1990), Anthony (2007), McShane ve Tarr (2007) ve Oleson (2008). Su tekerlerinin uzun tarihi ve sanayileşmenin ilk dönemlerindeki önemi şu kitaplardan izlenebilir: Bresse (1876), Forbes (1965), Reynolds (1970), Hindle (1975), Reynolds (1983), Wikander (1983), Lewis (1997), Walton (2006), Malone (2009) ve Mays (2010). Yel değirmenlerinin tarihi ve ekonomik önemleri şu kaynaklarda gayet iyi değerlendirilmiştir: Wolff (1900), Skilton (1947), Freese (1957), Stockhuyzen (1963), Needham vd. (1965), Husslage (1965), Reynolds (1970), Wailes (1975), Torrey (1976), Harverson (1991) ve Righter (2008). Yelkenli gemilerin gelişimini kapsamlı olarak izlemek için şu kaynaklara bakılabilir:

Chatterton (1914), Torr (1964), Armstrong (1969) ve Chapelle (1988). Kürekli gemileri konu alan kitaplar arasında şunlar yer alır: Morrison ve Gardiner (1995) ile Morrison, Coates ve Rankov (2000).

Buhar motorları ve kullanım alanlarının tarihiyle ilgili vazgeçilmez kaynaklar arasında şunlar yer alır: Farey (1827), Fry (1896), Croil (1898), Dalby (1920), Dickinson (1939), Watkins (1967), Jones (1973), von Tunzelmann (1978), Hunter (1979), Ellis (1981), O'Brien (1983), Hills (1989), Garrett ve Wade-Matthews (2015). İçten yanmalı motorlar ve gaz türbinlerinin gelişimi şu kaynaklarda değerlendirilmiştir: Diesel (1913), Constant (1981), Taylor (1984), Gunston (1986 ve 1999), Cumpsty (2006) ve Smil (2010b). Otomobil çağının tarihi için şu kaynaklara bakınız: Beaumont (1906), Kennedy (1941), Sittauer (1972), May (1975), Flower ve Jones (1981), Flink (1988), Cummins (1989), Ling (1990), Womack, Jones ve Roos (1990), Maxton ve Wormald (2004). Uçmanın tarihi şu kaynaklarda izlenebilir: Wright (1953), Constant (1981), Taylor (1989), Jakab (1990), Heppenheimer (1995), USA Centennial of Flight Commission (ABD Uçuş Komisyonu Yüzüncü Yıl Yıllığı) (2003), Blériot (2015) ve McCullough (2015).

Biyokütle enerjilerin özellikleri ve kullanım alanları şu kaynaklarda ele alınmıştır: Earl (1973), Smil (1983), Sieferle (2001) ve Perlin (2005). Kömür sanayinin tarihi için şu kaynaklara bakabilirsiniz: Bald (1812), Jevons (1865), Nef (1932), Eavenson (1942), Flinn vd. (1984-1993), Church, Hall ve Kanefsky (1986), Thomson (2003). Petrol ve doğalgaz sanayinin gelişimi şu kitaplarda ele alınmıştır: Brantly (1971), Perrodon (1985), Yergin (2008) ve Smil (2015a). Elektrik sanayinin ilk yılları ve sonrasındaki genişleme şu eserlerde incelenmiştir: Jehl (1937), MacLaren (1943), Lilienthal (1944), Josephson (1959), Dunsheath (1962), Elektrik Konseyi (1973), Hughes (1983), Cheney (1981), Friedel ve Israel (1986), Schurr vd. (1990), Cantelon, Hewlett ve Williams (1991), Nye (1992), Beauchamp (1997), Bowers (1998) ile Hausman, Hertner ve Wilkins (2008).

İnsanın üretken faaliyetlerinin tarihiyle ilgili literatür çok zengindir. Tarımın kökenlerinden yirminci yüzyıla tarımsal gelişimle ilgili perspektifler şu eserlerde bulunabilir: Bailey (1908), King (1927), Seeböhm (1927), Buck (1930, 1937), Leser (1931), Lizerand (1942), Haudricourt ve Delamarre (1955), Geertz (1963), Slicher van Bath (1963), Allan (1965), Boserup (1965, 1976), Perkins (1969), Titow (1969), Clark ve Haswell (1970), White (1970), Fussell (1972), Ho (1975), Schlebecker (1975), Cohen (1977), Abel (1962), Xu ve Dull (1980), Bray (1984), Rindos (1984), Mazoyer ve Roudart (2006),

Federico (2008), Tauger (2010). Su çekme ve sulamayla ilgili ayrıntılar için şu kaynaklara bakılabilir: Ewbank (1870), Molenaar (1956), Needham vd. (1965), Butzer (1976), Oleson (1984, 2008), Mays (2010). Modern tarımın enerji maliyetleri Pimentel (1980), Fluck (1992) ve Smil'de (2008a) incelenmiştir.

Sanayileşmenin kökenleri, süreçleri ve sonuçlarıyla ilgili disiplinler arası kavrayışlar için şu kaynaklara bakılabilir: Kay (1832), Clapham (1926), Ashton (1948), Landes (1969), Falkus (1972), Mokyr (1976, 2002), Clarkson (1985), Rosenberg ve Birdzell (1986), Blumer (1990), Stearns (2012). İnşaat faaliyetlerinin birçok yönü şu kaynaklarda tarihsel olarak ele alınıp açıklanmıştır: Ashby (1935), Fitchen (1961), Bandaranayke (1974), Baldwin (1977), Hodges (1989), Lepre (1990), Waldron (1990), Wilson (1990), Gies ve Gies (1995), Lehner (1997), Ching, Jarzombek ve Prakash (2011). Ulaştırmanın tarihine ilişkin katkılar şu kaynaklarda bulunur: Savage (1959), Hadfield (1969), Sitwell (1981), Piggott (1983), Ratcliffe (1985), Ville (1990), Gerhold (1993), Herlihy (2004), Levinson (2006) ve Smil (2010b).

Metallurjik ilerleme şu kitaplardan izlenebilir: Biringuccio (1559 [1540]), Agricola (1546 [1556]), Bell (1884), Greenwood (1907), King (1948), Needham (1964), Straker (1969), Hogan (1971), Hyde (1977), Gold vd. (1984), Haaland ve Shinnie (1985), Harris (1988), Geerdes, Toxopeus ve van der Vliet (2009), Smil (2016). Antik devirlerden modern zamanlara silahlar ve toplumlar üzerindeki etkileri şu kaynaklarda değerlendirilmiştir: Mitchell (1932), Kloss (1963), Cipolla (1965), Ziemke (1968), Egg (1971), Singer ve Small (1972), Kesaris (1977), McNeill (1989), Keegan (1994), Chase (2003), Parker (2005), Buchanan (2006), Archer vd. (2008).

Enerji kullanımının toplumsal etkileriyle ilgili yazılar şu kitaplarda bulunabilir: Ostwald (1912), Ellul (1964), Jones (1971), Odum (1971), Adams (1975, 1982), Smil (1991, 2008) ve Schobert (2014). Son olarak, tarihi aletler ve makinelerin evrimi üzerinden incelemek isteyenler gereği gibi resimlendirilmiş kitaplara danışmalıdır. Eşi benzeri bulunmayan, artık klasik olmuş iki eser şunlardır: Ramelli (1776 [1588]) ile Diderot ve d'Alembert (1769-1772). Ardrey (1894), Abbott (1932), Hommel (1937), Burstall (1968), Hopfen (1969), Williams (1987), Basalla (1988), Finniston vd. (1992), Smil (2005, 2006) ve DK Publishing (2012) de modern yazarların yaptığı birçok katkı arasında yer alır.

- Abbate, J., *Inventing the Internet*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1999.
- Abbott, C. G., *Great Inventions*, Washington, DC: Smithsonian Institution, 1932.
- Abel, W., *Geschichte der deutschen Landwirtschaft von frühen Mittelalter bis zum 19 Jahrhundert*, Stuttgart: Ulmer, 1962.
- Adam, J.-P., *Roman Building: Materials and Techniques*, Londra: Routledge, 1994.
- Adams, R. N., *Energy and Structure: A Theory of Social Power*, Austin: University of Texas Press, 1975.
- Adams, R. N., *Paradoxical Harvest: Energy and Explanation in British History, 1870–1914*, Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
- Adler, D., *Daimler & Benz: The Complete History: The Birth and Evolution of the Mercedes-Benz*, New York: Harper, 2006.
- Adshhead, S. A. M., *Salt and Civilization*, New York: St. Martin's Press, 1992.
- Agricola, G., *De re metallica*, (çev.) H. C. Hoover ve L. H. Hoover, Londra: The Mining Magazine, 1912 (1556).
- Aiello, L. C., “Terrestriality, bipedalism and the origin of language”, *Proceedings of the British Academy* 88:269–289, 1996.
- Aiello, L. C. ve J. C. K. Wells, “Energetics and the evolution of the genus Homo”, *Annual Review of Anthropology* 31:323–338, 2002.
- Aiello, L. C. ve P. Wheeler, “The expensive-tissue hypothesis”, *Current Anthropology* 36:199–221, 1995.
- Alberici, S. vd., *Subsidies and Costs of EU Energy*, Brüksel: AB Komisyonu, 2014. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/ECOFYS%202014%20Subsidies%20and%20costs%20of%20EU%20energy_11_Nov.pdf.
- Aldrich, L. J., *Cyrus McCormick and the Mechanical Reaper*, Greensboro, NC: Morgan Reynolds, 2002.
- Allan, W., *The African Husbandman*, Edinburgh: Oliver & Boyd, 1965.
- Allen, R., *Farm to Factory: A Reinterpretation of the Soviet Industrial Revolution*, Princeton, NJ: Princeton University Press, 2003.
- Allen, R. C., *How Prosperous Were the Romans? Evidence from Diocletian's Price Edict (301 AD)*, Oxford: Oxford Üniversitesi, Ekonomi Bölümü, 2007.
- Allen, R. C. vd., “Wages, prices, and living standards in China, 1738–1925: In comparison with Europe, Japan, and India”, *Economic History Review* 64 (S1): 8–38, 2011.
- Allianz, *The Sixth Kondratieff: Long Waves of Prosperity*, Frankfurt am Main: Allianz, 2010. https://www.allianz.com/v_1339501901000/media/press/document/other/kondratieff_en.pdf.
- Alvard, M. S. ve L. Kuznar, “Deferred harvests: The transition from hunting to animal husbandry”, *American Anthropologist* 103:295–311, 2001.
- Amitai, R. ve M. Biran (yay. haz.) *Mongols, Turks, and Others: Eurasian Nomads and the Sedentary World*, Leiden: Brill, 2005.
- Amontons, G., “Moyen de substituer commodement l'action du feu, à la force des hommes et des chevaux pour mouvoir les machines”, *Mémoires de l'Académie Royale* 1699:112–126, 1699.
- Andersen, S. O. ve K. M. Sarma, *Protecting the Ozone Layer*, Londra: Earthscan, 2002.
- Anderson, B. D., *The Physics of Sailing Explained*, Dobbs Ferry, New York: Sheridan House, 2003.
- Anderson, E. N., *The Food of China*, New Haven, Cincinnati: Yale University Press, 1988.

- Anderson, M. S., *War and Society in Europe of the Old regime, 1618–1789*, New York: St. Martin's Press, 1988.
- Anderson, R., *The Sailing Ship: Six Thousands Years of History*, Londra: George Harrap, 1926.
- Anderson, R. C., *Oared Fighting Ships: From Classical Times to the Coming of Steam*, Londra: Percival Marshall, 1962.
- Angelo, J. E., *Space Technology*, Westport, Cincinnati: Greenwood Press, 2003.
- Anthony, D. W., *The Horse, the Wheel, and Language: How Bronze-Age Riders from the Eurasian Steppes Shaped the Modern World*, Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 2007.
- Anthony, D., D. Y. Telegin ve D. Brown, "The origin of horseback riding", *Scientific American* 265 (6): 94–100, 1991.
- Apt, J. ve P. Jaramillo, *Variable Renewable Energy and the Electricity Grid*, Washington, DC: Resources for the Future, 2014.
- Archer, C. I. vd., *World History of Warfare*, Lincoln: University of Nebraska Press, 2008.
- Ardrey, L. R., *American Agricultural Implements*, Chicago: L. R. Ardrey, 1894.
- Arellano, C. J. ve R. Kram, "Partitioning the metabolic cost of human running: A task-by-task approach", *Integrative and Comparative Biology* 54:1084–1098, 2014.
- Armélagos, G. J. ve K. N. Harper, "Genomics at the origins of agriculture", birinci bölüm, *Evolutionary Anthropology* 14:68–77, 2005.
- Armstrong, R., *The Merchantmen*, Londra: Ernest Benn, 1969.
- Army Air Forces (Ordu Hava Kuvvetleri), Army Air Forces Statistical Digest, World War II, 1945. <http://www.afhra.af.mil/shared/media/document/AFD-090608-039.pdf>.
- Army Technology, M1A1/2 Abrams Main Battle Tank, United States of America, 2015. <http://www.army-technology.com/projects/abrams>.
- Ashby, T., *The Aqueducts of Ancient Rome*, Oxford: Oxford University Press, 1935.
- Ashton, Thomas S., *The Industrial Revolution, 1760–1830*, Oxford: Oxford University Press, 1948.
- Astill, G. ve J. Langdon (yay. haz.), *Medieval Farming and Technology: The Impact of Agricultural Change in Northwest Europe*, Leiden: Brill, 1997.
- Åström, K. J. ve R. M. Murray, *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*, Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 2009.
- http://www.cds.caltech.edu/~murray/books/AM05/pdf/am08-complete_22Feb09.pdf.
- Atalay, S. ve C. A. Hastorf, "Food, meals, and daily activities: Food habitus at Neolithic Çatalhöyük", *American Antiquity* 71:283–319, 2006.
- Atkins, S. E., *Historical Encyclopedia of Atomic Energy*, Westport, Cincinnati: Greenwood Press, 2000.
- Atsmon, Y. ve V. Dixit, "Understanding China's wealthy", *McKinsey Quarterly*, 2009. http://www.mckinsey.com/insights/marketing_sales/understanding_chinas_wealthy.
- Atwater, W. O. ve C. F. Langworthy, *A Digest of Metabolism Experiments in Which the Balance of Income and Outgo Was Determined*, Washington, DC: U.S. GPO, 1897.
- Atwood, C. P., *Encyclopedia of Mongolia and the Mongol Empire*, New York: Facts on File, 2004.
- Atwood, R., "Maya roots", *Archaeology* 62:18–66, 2009.
- Augarten, S., *Bit by Bit*, Boston: Ticknor & Fields, 1984.
- Axelsson, E. vd., "The genomic signature of dog domestication reveals adaptation to a starch-rich diet", *Nature* 495:360–364, 2013.
- Ayres, R. U., *The Bubble Economy: Is Sustainable Growth Possible?* Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2014.

- Ayres, R. U., L. W. Ayres ve B. Warr, "Exergy, power and work in the UA economy, 1900–1998", *Energy* 28:219–273, 2003.
- Baars, C., *De Geschiedenis van de Landbouw in de Bayerlanden*, Wageningen: PUDOC (Centrum voor Landbouwpublicaties en Landbouwdocumentatie), 1973.
- Bailey, L. H. (yay. haz.), *Cyclopedia of American Agriculture*, New York: Macmillan, 1908.
- Bailey, R. C., G. Head, M. Jenike vd., "Hunting and gathering in tropical rain forest: Is it possible?", *American Anthropologist* 91:59–82, 1989.
- Bailey, R. C. ve T. N. Headland, "The tropical rain forest: Is it a productive environment for human foragers?", *Human Ecology* 19:261285, 1991.
- Baines, D., *Emigration from Europe 1815–1930*, Londra: Macmillan, 1991.
- Bairoch, P., *Cities and Economic Development: From the Dawn of History to the Present*, Chicago: University of Chicago Press, 1988.
- Baker, T. L., *A Field Guide to America Windmills*, Tempe, AZ: ACMRS (Arizona Center for Medieval and Renaissance Studies), Arizona Üniversitesi, 2006.
- Bald, R., *A General View of the Coal Trade of Scotland, Chiefly that of the River Forth and Mid-Lothian. To Which is Added An Inquiry Into the Condition of the Women Who Carry Coals Under Ground in Scotland. Known by the Name of Bearers*, Edinburgh: Oliphant, Waugh and Innes, 1812.
- Baldwin, G. C., *Pyramids of the New World*, New York: G. P. Putnam's Sons, 1977.
- Bamford, P. W., *Fighting Ships and Prisons: The Mediterranean Galleys of France in the Age of Louis XIV*, Cambridge: Cambridge University Press, 1974.
- Bandaranayake, S., *Sinhalese Monastic Architecture*, Leiden: E. J. Brill, 1974.
- Nova Scotia Bankası, *Global Auto Report*, 2015. http://www.gbm.scotiabank.com/English/bns_econ/bns_auto.pdf.
- Bapat, N., *How Indians defied gravity and achieved success in Silicon Valley*, 2012. <http://www.forbes.com/sites/singularity/2012/10/15/how-indians-defied-gravity-and-achieved-success-in-silicon-valley>.
- Bar-Yosef, O., "The Upper Paleolithic revolution", *Annual Review of Anthropology* 31:363–393, 2002.
- Bardeen, J. ve W. H. Brattain, *Three-electron Circuit Element Utilizing Semiconductive Materials*, US Patent 2,524,035, 3 Ekim, Washington, DC: USPTO, 1950. <http://www.uspto.gov>.
- Barjot, D., *L'énergie aux XIXe et XXe siècles*, Paris: Presses de l'E.N.S., 1991.
- Barker, A. V. ve D. J. Pilbeam, *Handbook of Plant Nutrition*, Boca Raton, Florida: CRC Press, 2007.
- Barles, S., "Feeding the city: Food consumption and flow of nitrogen, Paris, 1801–1914", *Science of the Total Environment* 375:48–58, 2007.
- Barles, S. ve L. Lestel, "The nitrogen question: Urbanization, industrialization, and river quality in Paris 1830–1939", *Journal of Urban History* 33:794–812, 2007.
- Barnes, B. R., "Behavioural change, indoor air pollution and child respiratory health in developing countries: A review", *International Journal of Environmental Research and Public Health* 11:4607–4618, 2014.
- Barro, R. J., *Determinants of Economic Growth: A Cross-Country Empirical Study*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1997.
- Bartosiewicz, L. vd., *Draught Cattle: Their Osteological Identification and History*, Tervuren: Musée royal de l'Afrique central, 1997.
- Basalla, G., "Energy and civilization", *Science, Technology and the Human Prospect* içinde (yay. haz.) C. Starr ve P. C. Ritterbusch, 39–52, Oxford: Pergamon Press, 1980.
- Basalla, G., "Some persistent energy myths", *Energy and Transport* içinde (yay. haz.) G. H. Daniels ve M. H. Rose, 27–38, Beverley Hills, California: Sage, 1982.

- Basalla, G., *The Evolution of Technology*, Cambridge: Cambridge University Press, 1988.
- Basile, S., *Cool: How Air Conditioning Changed Everything*, New York: Fordham University Press, 2014.
- Basso, L. C., T. O. Basso ve S. N. Rocha, *Ethanol Production in Brazil: The Industrial Process and Its Impact on Yeast Fermentation, Biofuel Production: Recent Developments and Prospects*, 2011. http://cdn.intechopen.com/pdfs/20058/InTech-Ethanol_production_in_brazil_the_industrial_process_and_its_impact_on_yeast_fermentation.pdf.
- Bayley, J., D. Dungworth ve S. Paynter, *Archaeometallurgy*, Londra: English Heritage, 2001.
- Beauchamp, K. G., *Exhibiting Electricity*, Londra: Institution of Electrical Engineers, 1997.
- Beaumont, W. W., *Motor Vehicles and Motors: Their Design, Construction and Working by Steam, Oil and Electricity*, Westminster: Archibald Constable and Company, 1902.
- Beaumont, W. W., *Motor Vehicles and Motors: Their Design, Construction and Working by Steam, Oil and Electricity*, Westminster: Archibald Constable and Co., 1906.
- Beevor, A., *Stalingrad*, Londra: Viking, 1998.
- Behera, B. vd., "Household collection and use of biomass energy sources in South Asia", *Energy* 85:468-480, 2015.
- Bell, L., *Principles of the Manufacture of Iron and Steel*, Londra: George Routledge & Sons, 1884.
- Bell System Memorial, *Who really invented the transistor?*, 2011. http://www.porticus.org/bell/belllabs_transistor1.html.
- Bennett, M. K., "British wheat yield per acre for seven centuries", *Economy and History* 3:12-29, 1935.
- Benoît, C., *Le Canon de 75: Une gloire centenaire*, Vincennes, Fransa: Service Historique de l'Armée de Terre, 1996.
- Benoît, F., "L'usine de meunerie hydraulique de Barbegal (Arles)", *Review of Archaeology* 15:19-80, 1940.
- Beresford, M. W. ve J. G. Hurst, *Deserted Medieval Villages*, Londra: Littleworth, 1971.
- Berklian, Y. U. (yay. haz.), *Crop Rotation*, New York: Nova Science Publishers, 2008.
- Bernard, L., A. V. Gevorkyan, T. Palley ve W. Semmler, "Time scales and mechanisms of economic cycles: A review of theories of long waves", *Political Economy Research Institute Working Paper*, no.337, 1-21, Amherst, Massachusetts: Massachusetts Üniversitesi, 2013.
- Bessemer, H., *Sir Henry Bessemer, F.R.S.: An Autobiography*, Londra: Offices of Engineering, 1905.
- Bettencourt, L. ve G. West, "A unified theory of urban living", *Nature* 467:912-913, 2010.
- Bettinger, R. L., *Hunter-Gatherers: Archaeological and Evolutionary Theory*, New York: Plenum Press, 1991.
- Betz, A., *Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen*, Göttingen: Bandenhoeck & Ruprecht, 1926.
- Billington, D. P. ve D. P. Billington, Jr., *Power, Speed, and Form: Engineers and the Making of the Twentieth Century*, Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 2006.
- bin Laden, U., Amerikan halkına mesaj, 2004. <http://english.aljazeera.net/NR/exeres/79C6AF22-98FB-4A1C-B21F-2BC36E87F61F.htm>.
- Bird-David, N., Beyond "The Original Affluent Society", *Current Anthropology* 33:25-47, 1992.
- Biringuccio, V., *De la pirotechnia [The pirotechnia]*, çev. C. S. Smith ve M. T. Gnudi, New York: Basic Books, 1959 (1540).
- Bishop, C., *The Illustrated Encyclopedia of Weapons of World War I: The Comprehensive Guide to Weapons Systems, Including Tanks, Small Arms, Warplanes, Artillery*, Londra: Amber, 2014.

- Blériot, L., *Blériot: Flight into the XXth Century*, Londra: Austin Macauley, 2015.
- Blumenshine, R. J. ve J. A. Cavallo, "Scavenging and human evolution", *Scientific American* 267 (4): 90–95, 1992.
- Blumer, H., *Industrialization as an Agent of Social Change*, New York: Aldine de Gruyter, 1990.
- Blyth, R. J., A. Lambert ve J. Ruger (yay. haz.), *The Dreadnought and the Edwardian Age*, Farnham: Ashgate, 2011.
- Boden, T. ve B. Andres, *Global CO2 Emissions from Fossil-Fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring: 1751–2011*, Oak Ridge, Tennessee: CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center), Oak Ridge National Laboratory, 2015. http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/tre_glob_2011.html.
- Boden, T., B. Andres ve G. Marland, *Global CO2 emissions from fossil fuel burning, cement manufacture, and gas flaring: 1751–2013*, 2016. http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/global.1751_2013.ems.
- Boeing, *Boeing history*, 2015. <http://www.boeing.com/history>.
- Bogin, B., "Kung nutritional status and the original 'affluent society': A new analysis", *Anthropologischer Anzeiger* 68:349–366, 2011.
- Bono, P. ve C. Boni, "Water supply of Rome in antiquity and today", *Environmental Geology* 27:126–134, 1996.
- Boonenburg, K., *Windmills in Holland*, Lahey: Netherlands Government Information Service, 1952.
- Borghese, A. (yay. haz.), *Buffalo Production and Research*, Roma: FAO, 2005.
- Bos, M. G., *Water Requirements for Irrigation and the Environment*, Dordrecht: Springer, 2009.
- Bose, S. (yay. haz.), *Shifting Agriculture in India*, Kalküta: Anthropological Survey of India, 1991.
- Boserup, E., *The Conditions of Agricultural Growth: The Economics of Agrarian Change under Population Pressure*, Chicago: Aldine, 1965.
- Boserup, E., "Environment, population, and technology in primitive societies", *Population and Development Review* 2:21–36, 1976.
- Bott, R. D., *Evolution of Canada's Oil and Gas Industry*, Calgary, AB: Canadian Centre for Energy Information, 2004.
- Boulding, K. E., "The social system and the energy crisis", *Science* 184:255–257, 1974.
- Bowers, B., *Lengthening the Day: A History of Lighting Technology*, Oxford: Oxford University Press, 1998.
- Bowers, B., *Sir Charles Wheatstone: 1802–1875*, ikinci basım, Londra: Institution of Engineering and Technology, 2001.
- Boxer, C. R., *The Portuguese Seaborne Empire 1415–1825*, Londra: Hutchinson, 1969.
- BP (British Petroleum), *Statistical Review of World Energy 2016*, 2016. <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>.
- Bramanti, B. vd., "Genetic discontinuity between local hunter-gatherers and Central Europe's first farmers", *Science* 326:137–140, 2009.
- Bramble, D. M. ve D. E. Lieberman, "Endurance running and the evolution of Homo", *Nature* 432:345–352, 2004.
- Brandstetter, T., "The most wonderful piece of machinery the world can boast of: The water-works at Marly, 1680–1830", *History and Technology* 21:205–220, 2005.
- Brantly, J. E., *History of Oil Well Drilling*, Houston, Texas: Gulf Publishing, 1971.
- Braudel, F., *On History*, Chicago: University of Chicago Press, 1982.

- Braun, D. R. vd., "Early hominin diet included diverse terrestrial and aquatic animals 1.95 Ma in East Turkana, Kenya", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107:10002–10007, 2010.
- Braun, G. W. ve D. R. Smith, "Commercial wind power: Recent experience in the United States", *Annual Review of Energy and the Environment* 17:97–121, 1992.
- Bray, F., *Science and Civilisation in China*, cilt 6, kısım II, *Agriculture*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Bresse, M., *Water-Wheels or Hydraulic Motors*, New York: John Wiley, 1876.
- Brodhead, M. J., *The Panama Canal: Writings of the U. S. Army Corps of Engineers Officers Who Conceived and Built It*, Alexandria, VA: U.S. Army Corps of Engineers History Office, 2012.
- Brody, S., *Bioenergetics and Growth*, New York: Reinhold, 1945.
- Bronson, B., "The earliest farming: Demography as cause and consequence", *Origins of Agriculture içinde*, (yay. haz.) C. Reed, 23–48, Lahey: Mouton, 1977.
- Brooks, D. R. ve E. O. Wiley, *Evolution as Entropy*, Chicago: University of Chicago Press, 1986.
- Brown, G. I., *Count Rumford: The Extraordinary Life of a Scientific Genius*, Stroud: Sutton Publishing, 1999.
- Brown, K. S. vd., "Fire as an engineering tool of early modern humans", *Science* 325:859–862, 2009.
- Brown, K. S. vd., "An early and enduring advanced technology originating 71,000 years ago in South Africa", *Nature* 491:590–593, 2012.
- Brown, S., P. Schroeder ve R. Birdsey, "Above ground biomass distribution of US eastern hardwood forests and the use of large trees as an indicator of forest development", *Forest Ecology and Management* 96:31–47, 1997.
- Bruce, A. W., *The Steam Locomotive in America*, New York: Norton, 1952.
- Brunck, R. F. P., *Analecta Veterum Poetarum Graecorum*, Strasbourg: I. G. Bauer & Socium, 1776.
- Bruni, L. ve P. L. Porta, *Economics and Happiness*, New York: Oxford University Press, 2006.
- Brunner, K., "Continuity and discontinuity of Roman agricultural knowledge in the early Middle Ages", *Agriculture in the Middle Ages içinde*, (yay. haz.) D. Sweeney, 21–39. Philadelphia: University of Pennsylvania Press, 1995.
- Brunt, L., *Estimating English Wheat Production in the Industrial Revolution*, Oxford: University of Oxford, 1999. <http://www.nuffield.ox.ac.uk/economics/history/paper35/dp35a4.pdf>.
- Buchanan, B. J. (yay. haz.), *Gunpowder, Explosives and the State: A Technological History*, Aldershot: Ashgate, 2006.
- Buck, J. L., *Chinese Farm Economy*, Nanking: University of Nanking, 1930.
- Buck, J. L., *Land Utilization in China*, Nanking: University of Nanking, 1937.
- Buckley, T. A., *The Works of Horace*, New York: Harper & Brothers, 1855.
- Budge, E. A. W., *An Egyptian Hieroglyphic Dictionary*, Londra: John Murray, 1920.
- Bulliet, R. W., *The Camel and the Wheel*, Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1975.
- Bulliet, R. W., *The Wheel: Inventions and Reinventions*, New York: Columbia University Press, 2016.
- Bunch, B. H. ve A. Hellemans, *The Timetables of Technology: A Chronology of the Most Important People and Events in the History of Technology*, New York: Simon & Schuster, 1993.

- Burke, E., III., "Human history, energy regimes and the environment", *The Environment and World History* içinde, (yay. haz.) E. Burke III ve K. Pomeranz, 33–53. Berkeley: University of California Press, 2009.
- Burstall, A. F., *Simple Working Models of Historic Machines*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1968.
- Burton, R. F., *The Lusiads*, Londra: Tinsley Brothers, 1880.
- Butler, J. H. ve S. A. Montzka, The NOAA Annual Greenhouse Gas Index, Boulder, Colorado: NOAA, 2015. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>.
- Butzer, K. W., *Early Hydraulic Civilization in Egypt*, Chicago: University of Chicago Press, 1976.
- Butzer, K. W., "Long-term Nile flood variation and political discontinuities in Pharaonic Egypt", *From Hunters to Farmers* içinde, (yay. haz.) J. D. Clark ve S. A. Brandt, 102–112. Berkeley: University of California Press.
- Byrn, E. W., *The Progress of Invention in the Nineteenth Century*, New York: Munn & Co., 1900.
- Caidin, M., *A Torch to the Enemy: The Fire Raid on Tokyo*, New York: Balantine Books, 1960.
- Cairns, M. F. (yay. haz.), *Shifting Cultivation and Environmental Change: Indigenous People, Agriculture and Forest Conservation*, Londra: Earthscan Routledge, 2015.
- Cameron, R., "The Industrial Revolution: A misnomer", *History Teacher* 15 (3): 377–384, 1982.
- Cameron, R., "A new view of European industrialization", *Economic History Review* 3:1–23, 1985.
- Campbell, B. M. S. ve M. Overton, "A new perspective on medieval and early modern agriculture: Six centuries of Norfolk farming, c. 1250–c. 1850", *Past & Present* 141 (1): 38–105, 1993.
- Campbell, H. R., *The Manufacture and Properties of Iron and Steel*, New York: Hill Publishing, 1907.
- Cantelon, P. L., R. G. Hewlett ve R. C. Williams (yay. haz.), *The American Atom: A Documentary History of Nuclear Policies from the Discovery of Fission to the Present*, Philadelphia: University of Pennsylvania Press, 1991.
- Capulli, M., *Le Navi della Serenissima: La Galea Veneziana di Lazise*, Venedik: Marsilio Editore, 2003.
- Cardwell, D. S. L., *From Watt to Clausius: The Rise of Thermodynamics in the Early Industrial Age*, Ithaca, New York: Cornell University Press, 1971.
- Caro, R. A., *The Years of Lyndon Johnson: The Path to Power*, New York: Knopf, 1982.
- Caron, F., *Dynamics of Innovation: The Expansion of Technology in Modern Times*, New York: Berghahn, 2013.
- Carrier, D. R., "The energetic paradox of human running and hominid evolution", *Current Anthropology* 25:483–495, 1984.
- Carter, R. A., *Buffalo Bill Cody: The Man behind the Legend*, New York: John Wiley, 2000.
- Carter, W. E., *New Lands and Old Traditions: Kekchi Cultivators in the Guatemala Lowlands*, Gainesville: University of Florida Press, 1969.
- Casson, L., *Ships and Seafaring in Ancient Times*, Austin: University of Texas Press, 1994.
- CDC (Centers for Disease Control and Prevention), Overweight & Obesity, 2015. <http://www.cdc.gov/nchs/fastats/obesity-overweight.htm>.
- CDDA (Clean Diesel Fuel Alliance), Ultra Low Sulfur Diesel (ULSD), 2015. <http://www.clean-diesel.org/index.htm>.
- Centre des Recherches Historiques, *Villages Desertes et Histoire Economique*, Paris: SEV-PEN, 1965.

- Ceruzzi, P. E., *A History of Modern Computing*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2003.
- CFM International, *Discover CFM*, 2015. http://www.cfmaeroengines.com/files/Brochure_CFM_2015.pdf.
- Chandler, T., *Four Thousand Years of Urban Growth: An Historical Census*, Lewiston, New York: Edwin Mellen Press.
- Chapelle, H. I., *The History of American Sailing Ships*, Modesto, California: Bonanza Books, 1988.
- Charette, R. N., "This car runs on code", *IEEE Spectrum* 2009 (Şubat), 2009. <http://spectrum.ieee.org/green-tech/advanced-cars/this-car-runs-on-code/0>.
- Charles, C. ve P. Wooders, *Subsidies to Liquid Transport Fuels: A comparative review of estimates*, Cenevre: IISD, 2011.
- Chartrand, R., *Napoleon's Guns 1792–1815*, Botley, Osprey Publishing, 2003.
- Chase, K., *Firearms: A Global History to 1700*, Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- Chatterton, E. K., *Sailing Ships: The Story of Their Development from the Earliest Times to the Present Day*, Londra: Sidgwick & Jackson, 1914.
- Chatterton, E. K., *The Ship Under Sail*, Londra: Fisher Unwin, 1926.
- Chauvois, L., *Histoire merveilleuse de Zénobe Gramme*, Paris: Albert Blanchard, 1967.
- Cheney, Margaret, *Tesla: Man out of Time*, New York: Dorset Press, 1981.
- Chevedden, P. E. vd., "The trebuchet", *Scientific American* 273 (1): 66–71, 1995.
- China Energy Group, *Key China Energy Statistics 2014*, Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2014.
- Chincold, *Three Gorges Project*, 2015. <http://www.chincold.org.cn/dams/rootfiles/2010/07/20/1279253974143251-1279253974145520.pdf>.
- Ching, F. D. K., M. Jarzombek ve V. Prakash, *A Global History of Architecture*, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.
- Chorley, G. P. H., "The agricultural revolution in Northern Europe, 1750–1880: Nitrogen, legumes, and crop productivity", *Economic History Review* 34 (1):71–93, 1981.
- Choudhury, P. C., *Hastividyarnava*, Gauhati: Publication Board of Assam, 1976.
- Christ, K., *The Romans*, Berkeley: University of California Press, 1984.
- Church, R., Hall, A. ve J. Kanefsky, *History of the British Coal Industry*, cilt 3, *Victorian Pre-Eminence*, Oxford: Oxford University Press, 1986.
- Cipolla, C. M., *Guns, Sails and Empires: Technological Innovation and the Early Phases of European Expansion, 1400–1700*, New York: Pantheon Books, 1965.
- City Population, *Major agglomerations of the world*, 2015. <http://www.citypopulation.de/world/Agglomerations.html>.
- Clapham, J. H., *An Economic History of Modern Britain*, Cambridge: Cambridge University Press, 1926.
- Clark, C. ve M. Haswell, *The Economics of Subsistence Agriculture*, Londra: Macmillan, 1970.
- Clark, G., "Productivity growth without technical change in European agriculture before 1850", *Journal of Economic History* 47:419–432, 1987.
- Clark, G., "Yields per acre in English agriculture, 1250–1850: Evidence from labour inputs", *Economic History Review* 44:445–460, 1991.
- Clark, G., M. Huberman ve P. H. Lindert, "A British food puzzle, 1770–1850", *Economic History Review* 48:215–237, 1995.
- Clarke, R., ve M. Dubravko, *Soviet Economic Facts, 1917–1981*, Londra: Palgrave Macmillan, 1983.
- Clarkson, L. A., *Proto-Industrialization: The First Phase of Industrialization?*, Londra: Macmillan, 1985.

- Clavering, E., "The coal mills of Northeast England: The use of waterwheels for draining coal mines, 1600–1750", *Technology and Culture* 36:211–241, 1995.
- Clerk, D., *The Gas, Petrol, and Oil Engine*, Londra: Longmans, Green and Co., 1909.
- Cleveland, C. J. (yay. haz.), *Encyclopedia of Energy*, 6 cilt, Amsterdam: Elsevier, 2004.
- Cleveland, C. J. ve C. Morris, *Handbook of Energy*, cilt 2, *Chronologies, Top Ten Lists, and World Clouds*, Amsterdam: Elsevier, 2014.
- CMI (Center for Military History), *War in the Persian Gulf: Operations Desert Shield and Desert Storm, August 1990–March 1991*, 2010. http://www.history.army.mil/html/bosoks/070/70-117-1/cmh_70-117-1.pdf.
- Coates, J. F., "The trireme sails again", *Scientific American* 261 (4): 68–75, 1989.
- Cobbett, J. P., *A Ride of Eight Hundred Miles in France*, Londra: Charles Clement, 1824.
- Cochrane, W. W., *The Development of American Agriculture: A Historical Analysis*, Minneapolis: University of Minnesota Press, 1993.
- Cockrill, W. R. (yay. haz.), *The Husbandry and Health of the Domestic Buffalo*, Roma: FAO, 1974.
- Cohen, B., *Benjamin Franklin's Science*, Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1990.
- Cohen, N. M., *The Food Crisis in Prehistory*, New Haven, CT: Yale University Press, 1977.
- Collier, B., *The Battle of Britain*, Londra: Batsford, 1962.
- Collins, E. V. ve A. B. Caine, "Testing Draft Horses", *Iowa Experimental Station Bulletin* 240, 1926.
- Coltman, J. W., "The transformer", *Scientific American* 258 (1): 86–95, 1988.
- Committee for the Compilation of Materials on Damage Caused by the Atomic bombs in Hiroshima and Nagasaki (Hiroşima ve Nagazaki'ye atılan atom bombalarının neden olduğu hasarla ilgili malzemeleri derlemekle görevli komisyon), *Hiroshima and Nagasaki: The Physical, Medical and Social Effects of the Atomic Bombing*, New York: Basic Books, 1991.
- Conklin, H. C., *Hanunoo Agriculture*, Roma: FAO, 1957.
- Conquest, Robert, *The Great Terror: A Reassessment, 40th Anniversary Edition*, Oxford: Oxford University Press, 2007.
- Constable, G. ve B. Somerville, *A Century of Innovation*, Washington, DC: Joseph Henry Press, 2003.
- Constant, E. W., *The Origins of Turbojet Revolution*, Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press, 1981.
- Coomes, O. T., F. Grimard ve G. J. Burt, "Tropical forests and shifting cultivation: Secondary forest fallow dynamics among traditional farmers of the Peruvian Amazon", *Ecological Economics* 32:109–124, 2000.
- Coopersmith, J., *Energy, the Subtle Concept: The Discovery of Feynman's Blocks from Leibniz to Einstein*, Oxford: Oxford University Press, 2010.
- Copley, Frank B., *Frederick W. Taylor: Father of Scientific Management*, New York: Harper & Brothers, 1923.
- Cornways, *Combine*, 2015. http://www.cornways.de/hi_combine.html.
- Cotterell, B. ve J. Kammaing, *Machines of Pre-industrial Technology*, Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- Coulomb, C. A., Résultat de plusieurs expériences destinées à déterminer la quantité d'action que les hommes peuvent fournir par leur travail journalier. ... *Mémoires de l'Institut national des sciences et arts—Sciences mathématiques et physique* 2:380–428, 1799.
- Coulton, J. J., *Ancient Greek Architects at Work*, Ithaca, New York: Cornell University Press, 1977.
- Cowan, R., "Nuclear power reactors: A study in technological lock-in", *Journal of Economic History* 50:541–567, 1990.

- Craddock, P. T., *Early Metal Mining and Production*, Edinburgh: Edinburgh University Press, 1995.
- Crafts, N. F. R. ve C. K. Harley, "Output growth and the British Industrial Revolution", *Economic History Review* 45:703-730, 1992.
- Crafts, N. ve T. Mills, "Was 19th century British growth steam-powered? The climacteric revisited", *Explorations in Economic History* 41:156-171, 2004.
- Croil, J., *Steam Navigation*, Toronto: William Briggs, 1898.
- Crossley, D., *Post-medieval Archaeology in Britain*, Leicester: Leicester University Press, 1990.
- Cummins, C. L., *Internal Fire*, Warrendale, Philadelphia: Society of Automotive Engineers, 1989.
- Cumpsty, N., *Jet Propulsion*, Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- Cuomo, S., "The sinews of war: Ancient catapults", *Science* 303:771-772.
- Curtis, W. H., *Wood Ship Construction*, New York: McGraw-Hill, 1919.
- Daggett, S., *Costs of Major U.S. Wars*, Washington, DC: Congressional Research Service, 2010. <http://cironline.org/sites/default/files/legacy/files/June2010CRScostofuswars.pdf>.
- Dalby, W. E., *Steam Power*, Londra: Edward Arnold, 1920.
- Darby, H. C., "The clearing of the woodland of Europe", *Man's Role in Changing the Face of the Earth* içinde, (yay. haz.) W. L. Thomas, 183-216, Chicago: University of Chicago Press, 1956.
- Darling, K., *Concorde*, Marlborough: Crowood Press, 2004.
- Daugherty, C. R., "The development of horse-power equipment in the United States", *Power Capacity and Production in the United States* içinde, (yay. haz.) C. R. Daugherty, A. H. Horton ve R. W. Davenport, 5-112, Washington, DC: U.S. Geological Survey, 1927.
- Daumas, M. (yay. haz.), *A History of Technology and Invention*, New York: Crown Publishers, 1969.
- David, P., "Clio and the economics of QWERTY", *American Economic Review* 75:332-337, 1985.
- David, P. A., "The hero and the herd in technological history: Reflections on Thomas Edison and the Battle of the Systems", *Favorites of Fortune: Technology, Growth and Economic Development since the Industrial Revolution* içinde, (yay. haz.) P. Higonett, D. S. Landes ve H. Rosovsky, 72-119, Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1991.
- Davids, K., "River control and the evolution of knowledge: A comparison between regions in China and Europe, c. 1400-1850", *Journal of Global History* 1:59-79, 2006.
- Davies, N., *The Aztec Empire: The Toltec Resurgence*, Norman: University of Oklahoma Press, 1987.
- Davis, M., *Late Victorian Holocausts*, New York: Verso, 2001.
- de Beaune, S. A. ve R. White, "Ice age lamps", *Scientific American* 266 (3): 108-113, 1993.
- de la Torre, I., "The origins of stone tool technology in Africa: A historical perspective. Philosophical Transactions of the Royal Society of London", Series B, *Biological Sciences* 366 (1567): 1028-1037, 2011.
- De Zeeuw, J. W., *Peat and the Dutch Golden Age: The historical meaning of energy-attainability*, A.A.G. Bijdragen 21:3-31, 1978.
- Deffeyes, K. S., *Hubbert's Peak: The Impending World Oil Shortage*, Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 2001.
- Demarest, A., *Ancient Maya: The Rise and Fall of a Rainforest Civilization*, Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

- Dempsey, P., *Notes on the Liberty aircraft engine*, 2015. <http://www.enginehistory.org/Before1925/Liberty/LibertyNotes.shtml>.
- Denevan, W. H., "Hydraulic agriculture in the American tropics: Forms, measures, and recent research", *Maya Subsistence* içinde, (yay. haz.) K. V. Flannery, 181–203. New York: Academic Press, 1982.
- Denny, M., "The efficiency of overshot and undershot waterwheels", *European Journal of Physics* 25:193–202, 2004.
- Denny, M., *Ingenium: Five Machines That Changed the World*, Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press, 2007.
- Dent, A., *The Horse*, New York: Holt, Rinehart and Winston, 1974.
- Department of Energy & Climate Change, UK Government, *Historical coal data: Coal production, availability and consumption 1853 to 2014*, 2015. <https://www.gov.uk/government/statistical-data-sets/historical-coal-data-coal-production-availability-and-consumption-1853-to-2011>.
- Derry, T. K. ve T. I. Williams, *A Short History of Technology*, Oxford: Oxford University Press, 1960.
- Diamond, J., *Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed*, New York: Penguin Books, 2011.
- Dickens, C., *Hard Times*, Londra: Bradbury & Evans, 1854.
- Dickey, P. A., "The first oil well", *Journal of Petroleum Technology* 59:14–25, 1959.
- Dickinson, H. W., *A Short History of the Steam Engine*, Cambridge: Cambridge University Press, 1939.
- Dickinson, H. W. ve R. Jenkins, *James Watt and the Steam Engine*, Oxford: Oxford University Press, 1927.
- Diderot, D. ve J.L.R. D'Alembert, *L'Encyclopedie ou dictionnaire raisonne des sciences des arts et des metiers*, Paris: Avec approbation et privilege du roy, 1769–1772.
- Dieffenbach, E. M. ve R. B. Gray, "The development of the tractor", *Power to Produce: 1960 Yearbook of Agriculture* içinde, 24–45, Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, 1960.
- Dien, A., *The stirrup and its effect on Chinese military history*, 2000. <http://www.silk-road.com/artl/stirrup.shtml>.
- Diener, E., E. Suh ve S. Oishi, "Recent findings on subjective well-being", *Indian Journal of Clinical Psychology* 24:25–41, 1997.
- Diesel, E., *Diesel: Der Mensch, das Werk, das Schicksal*, Hamburg: Hanseatische Verlagsanstalt, 1937.
- Diesel, R., Arbeitsverfahren und Ausführungsart für Verbrennungskraftmaschinen, 1893a. <https://www.dhm.de/lemo/bestand/objekt/patentschrift-von-rudolf-diesel-1893.html>.
- Diesel, R., *Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors zum Ersatz der Dampfmaschinen und der heute bekannten Verbrennungsmotoren*, Berlin: Julius Springer, 1893b.
- Diesel, R., *Solidarismus: Natürliche wirtschaftliche Erlösung des Menschen*, Münih, 1903 (yeniden basım, Augsburg: Maro Verlag, 2007).
- Diesel, R., *Die Entstehung des Dieselmotors*, Berlin: Julius Springer, 1913.
- Dikötter, F., *Mao's Great Famine: The History of China's Most Devastating Catastrophe, 1958–1962*, Londra: Walker Books, 2010.
- DK Publishing, *Military History: The Definitive Visual Guide to the Objects of Warfare*, New York: DK Publishing, 2012.
- Domínguez-Rodrigo, M., "Hunting and scavenging by early humans: The state of the debate", *Journal of World Prehistory* 16:1–54, 2002.

- Donnelly, J. S., *The Great Irish Potato Famine*, Stroud: Sutton Publishing, 2005.
- Doorenbos, J. vd., *Yield Response to Water*, Roma: FAO, 1979.
- Dowson, D., "Tribology before Columbus", *Mechanical Engineering* 95 (4): 12–20, 1973.
- Doyle, J., B. Francis ve A. Tannenbaum, *Feedback Control Theory*, Londra: Macmillan, 1990.
- Draws, R., *Early Riders: The Beginnings of Mounted Warfare in Asia and Europe*, New York: Routledge, 2004.
- Duby, G., *Rural Economy and Country Life in the Medieval West*, Londra: Edward Arnold, 1968.
- Duby, G., *Rural Economy and Country Life in the Medieval West*, Philadelphia: University of Pennsylvania Press, 1998.
- Dukes, J. S., "Burning buried sunshine: Human consumption of ancient solar energy", *Climatic Change* 61:31–44, 2003.
- Duncan-Jones, R., *Structure and Scale in the Roman Economy*, Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- Dunsheath, P., *A History of Electrical Industry*, Londra: Faber and Faber, 1962.
- Dupont, B., D. Keeling ve T. Weiss, "Passenger fares for overseas travel in the 19th and 20th centuries", Economic History Association (Ekonomik Tarih Derneği) yıllık toplantısında yapılmış sunum, Vancouver, British Columbia, 21–23 Eylül, 2012. <http://eh.net/eha/wp-content/uploads/2013/11/Weissetal.pdf>.
- Dyer, Frank L. ve Thomas C. Martin, *Edison: His Life and Inventions*, New York: Harper & Brothers, 1929.
- Eagar, T. W. ve C. Musso, "Why did the World Trade Center collapse? Science, engineering, and speculation", *JOM* 53:8–11, 2001. <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0112/Eagar/Eagar-0112.html>.
- Earl, D., *Charcoal and Forest Management*, Oxford: Oxford University Press, 1973.
- Eavenson, H. N., *The First Century and a Quarter of American Coal Industry*, Pittsburgh, Philadelphia: Özel basım, 1942.
- Eckermann, E., *World History of the Automobile*, Warrendale, Philadelphia: SAE Press, 2001.
- ECRI (Economic Cycle Research Institute), Economic cycles, 2015. <https://www.businesscycle.com>.
- Eden, F. M., *The State of the Poor*, Londra: J. Davis, 1797.
- Edison, T. A., "Electric Light", 4 Mayıs 1880 tarihli Patent No. 227/229'un mektuplarının bir bölümünü oluşturan tanımlama, Washington, DC: U.S. Patent Office. <http://www.uspto.gov>.
- Edison, T. A., "The dangers of electric lighting", *North American Review* 149:625–634, 1889.
- Edgerton, D., *The Shock of the Old: Technology and Global History since 1900*, Oxford: Oxford University Press, 2007.
- Edgerton, S. Y., "Heat and style: Eighteenth-century house warming by stoves", *The Journal of the Society of Architectural Historians* 20:20–26, 1961.
- Edwards, J. F., "Building the Great Pyramid: Probable construction methods employed at Giza", *Technology and Culture* 44:340–354, 2003.
- Egerton, W., *Indian and Oriental Armour*, Londra: W. H. Allen, 1896.
- Egg, E. vd., *Guns*, Greenwich, CT: New York Graphic Society, 1971.
- Electricity Council, *Electricity Supply in Great Britain: A Chronology—From the Beginnings of the Industry to 31 December 1972*, Londra: Electricity Council, 1973.
- Elliott, D., *Fukushima: Impacts and Implications*, Houndmills: Palgrave Macmillan, 2013.
- Ellis, C. H., *The Lore of the Train*, New York: Crescent Books, 1983.

- Ellison, R., "Diet in Mesopotamia: The evidence of the barley ration texts", *Iraq* 45:35–45, 1981.
- Ellul, J., *La Technique ou l'enjeu du siècle*, Paris: Armand Colin, 1954.
- Elphick, P., *Liberty: The Ships That Won the War*, Annapolis, MD: Naval Institute Press, 2001.
- Elton, A., "Gas for light and heat", *A History of Technology* içinde, cilt 4, (yay. haz.) C. Singer vd., 258–275, Oxford: Oxford University Press, 1958.
- Engels, F., *Die Lage der arbeitenden Klasse in England*, Leipzig: Otto Wigand, 1845.
- Erdkamp, P., *The Grain Market in the Roman Empire: A Social, Political and Economic Study*, Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- Erickson, C. L., "Raised field agriculture in the Lake Titicaca Basin", *Expedition* 30 (1): 8–16, 1988.
- Erlande-Brandenburg, A., *The Cathedral: The Social and Architectural Dynamics of Construction*, Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- Esmay, M. L. ve C. W. Hall (yay. haz.), *Agricultural Mechanization in Developing Countries*, Tokyo: Shin-Norinsha, 1968.
- Evangelou, P., *Livestock Development in Kenya's Maasailand*, Boulder, Colorado: Westview Press, 1984.
- Evans, O., *The Young Millwright and Miller's Guide*, Philadelphia: O. Evans, 1795.
- Evelyn, J., *Silva*, Londra: R. Scott, 1607.
- Ewbank, T., *A Descriptive and Historical Account of Hydraulic and Other Machines for Raising Water*, New York: Scribner, 1870.
- Executive Office of the President, *Economic Benefits of Increasing Electric Grid Resilience to Weather Outages*, Washington, DC: Beyaz Saray, 2013.
- Fairlie, S., *Notes on the history of the scythe and its manufacture*, 2011. <http://scytheassociation.org/history>.
- Faith, J. T., "Eland, buffalo, and wild pigs: Were Middle Stone Age humans ineffective hunters?", *Journal of Human Evolution* 55:24–36.
- Falkenstein, A., *Zehnter vorläufiger Bericht über die von der Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaft in Uruk-Warka unternommen Ausgrabungen*, Berlin: Verlag Akademie der Wissenschaften, 1939.
- Falkus, M. E., *The Industrialization of Russia, 1700–1914*, Londra: Macmillan, 1972.
- Fant, K., *Alfred Nobel: A Biography*, New York: Arcade Publishing, 2014.
- FAO (Food and Agriculture Organization / Gıda ve Tarım Örgütü), *Human Energy Requirements, Report of a Joint FAO/WHO/UNU Consultation* (FAO/WHO/UNU ortak danışmanlık raporu), Roma: FAO, 2004.
- FAO, FAOSTAT, 2015a. <http://faostat3.fao.org/home/E>.
- FAO, *The state of food insecurity in the world 2015*, 2015b. <http://www.fao.org/hunger/key-messages/en>.
- Faraday, M., "Experimental researches in electricity", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 122:125–162, 1832.
- Farey, J., *A Treatise on the Steam Engine*, Londra: Longman, Rees, Orme, Brown and Green, 1827.
- Faulstich, R. K. (yay. haz.), *Beyond Collapse: Archaeological Perspectives on Resilience, Revitalization, and Transformation in Complex Societies*, Carbondale, Illinois: Southern Illinois University Press, 2015.
- Federico, G., *Feeding the World: An Economic History of Agriculture, 1800–2000*, Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 2008.
- Ferguson, E. F., "The measurement of the 'man-day'", *Scientific American* 225 (4): 96–103, 1971.

- Fernández-Armesto, F., *The Spanish Armada: The Experience of War in 1588*, New York: Oxford University Press, 1988.
- Feuerbach, A., "Crucible Damascus steel: A fascination for almost 2,000 years", *Journal of Metals* (Mayıs): 48–50, 2006.
- Feugang, J. M., P. Konarski, D. Zou, F. C. Stintzing ve C. Zou, "Nutritional and medicinal use of cactus pear (*Opuntia* spp.) cladodes and fruits", *Frontiers in Bioscience* 11:2574–2589, 2006.
- Feynman, R., *The Feynman Lectures on Physics*, Redwood City, California: Addison-Wesley, 1988.
- Fiedel, S. ve G. Haynes, "A premature burial: Comments on Grayson and Meltzer's 'Requiem for overkill'", *Journal of Archaeological Science* 31:121–131.
- Figuier, L., *Les nouvelles conquêtes de la science: L'électricité*, Paris: Manpir Flammarion, 1888.
- Finley, M. I., "Was Greek civilization based on slave labour?", *Historia*, Einzelschriften 1959:145–164, 1959.
- Finley, M. I., "Technical innovation and economic progress in the ancient world", *Economic History Review* 18:29–45, 1965.
- Finniston, M. vd., *Oxford Illustrated Encyclopedia of Invention and Technology*, Oxford: Oxford University Press, 1992.
- Fish, J. L. ve C. A. Lockwood, "Dietary constraints on encephalization in primates", *American Journal of Physical Anthropology* 120:171–181, 2003.
- Fitchen, J., *The Construction of Gothic Cathedrals: A Study of Medieval Vault Erection*, Chicago: University of Chicago Press, 1961.
- Fitzhugh, B. ve J. Habu (yay. haz.), *Beyond Foraging and Collecting: Evolutionary Change in Hunter-Gatherer Settlement Systems*, Berlin: Springer, 2002.
- Flannery, K.V. (yay. haz.), *Maya Subsistence*, New York: Academic Press, 1982.
- Flink, J. J., *The Automobile Age*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1988.
- Flinn, M. W. vd., *History of the British Coal Industry*, 5 cilt, Oxford: Oxford University Press, 1984–1993.
- Flower, R. ve M. W. Jones, *100 Years of Motoring: An RAC Social History of Car*, Maidenhead: McGraw-Hill, 1981.
- Fluck, R. C. (yay. haz.), *Energy in Farm Production*, Amsterdam: Elsevier, 1992.
- Fogel, R. W., "The conquest of high mortality and hunger in Europe and America: Timing and mechanisms", *Favorites of Fortune* içinde, (yay. haz.) P. Higgonet vd., 33–71. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
- Foley, R. A. ve P. C. Lee, "Ecology and energetics of encephalization in hominid evolution", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 334:223–232, 1991.
- Fontana, D., *Della trasportatione dell'obelisco Vaticano et delle fabriche di nostro signore Papa Sisto V.*, Roma: Domenico Basa, 1590. <http://www.rarebookroom.org/Control/ftaobc/index.html>.
- Forbes, R. J., "Power to 1850", *A History of Technology* içinde, cilt 4, (yay. haz.) C. Singer vd., 148–167, Oxford: Oxford University Press, 1958.
- Forbes, R. J., *Studies in Ancient Technology*, 9 cilt, Leiden: E. J. Brill, 1964–1972.
- Forbes, R. J., "Bitumen and petroleum in antiquity", *Studies in Ancient Technology* içinde, cilt 1, 1–124, Leiden: E. J. Brill, 1964.
- Forbes, R. J., *Studies in Ancient Technology*, c. 2., Leiden: E. J. Brill, 1965.
- Forbes, R. J., "Heat and heating", *Studies in Ancient Technology* içinde, c. 6, 1–103, Leiden: E. J. Brill, 1966.
- Forbes, R., "Copper", *Studies in Ancient Technology* içinde, c. 6, 1–133. Leiden: E. J. Brill, 1972.

- Forbes*, "The world's biggest public companies", 2015. <http://www.forbes.com/global2000/list/#tab:overall>.
- Fores, M., "The Myth of a British Industrial Revolution", *History* 66:181–198, 1981.
- Foster, D. R. ve J. D. Aber, *Forests in Time: The Environmental Consequences of 1,000 Years of Change in New England*, New Haven, CT: Yale University Press, 2004.
- Foster, N. ve L. D. Cordell, *Chilies to Chocolate: Food the Americas Gave the World*, Tucson: University of Arizona Press, 1992.
- Fouquet, R., *Heat, Power and Light: Revolutions in Energy Services*, Londra: Edward Elgar, 2008.
- Fouquet, R., "The slow search for solutions: Lessons from historical energy transitions by sector and service", *Energy Policy* 38:6586–6596, 2010.
- Fouquet, R. ve P. J. G. Pearson, "Seven centuries of energy services: The price and use of light in the United Kingdom (1300–2000)", *Energy Journal* 27:139–177, 2006.
- Fox, R. F., *Energy and the Evolution of Life*, San Francisco: W. H. Freeman, 1988.
- Francis, D., *The Great Chase: A History of World Whaling*, Toronto: Penguin Books, 1990.
- Frankenfield, D. C., E. R. Muth ve W. A. Rowe, "The Harris-Benedict studies of human basal metabolism: History and limitations", *Journal of the American Dietetic Association* 98:439–445, 1998.
- FRED (Federal Reserve Economic Data), "Real gross domestic product per capita", 2015. <https://research.stlouisfed.org/fred2/series/A939RX0Q048SBEA>.
- Freedman, B., *Global Environmental Change*, Amsterdam: Springer Netherlands, 2014.
- Freedom House, *Freedom in the world 2015*, 2015. <https://freedomhouse.org/report/freedom-world/freedom-world-2015#.Vfcs74dRGM8>.
- Freese, S., *Windmills and Millwrighting*, Cambridge: Cambridge University Press, 1957.
- French, J. C. ve C. Collins, "Upper Palaeolithic population histories of southwestern France: A comparison of the demographic signatures of ^{14}C date distributions and archaeological site counts", *Journal of Archaeological Science* 55:122–134, 2015.
- Friedel, R. ve P. Israel, *Edison's Electric Light*, New Brunswick, New Jersey: Rutgers University Press, 1986.
- Friedman, H. B., "DDT (dichlorodiphenyltrichloroethane): A chemist's tale", *Journal of Chemical Education* 69:362–365, 1992.
- Frison, G. C., "Prehistoric hunting strategies", *The Evolution of Human Hunting* içinde, (yay. haz.) M. H. Nitecki ve D. V. Nitecki, 177–223, New York: Plenum Press, 1987.
- Froment, A., "Evolutionary biology and health of hunter-gatherer populations", *Hunter-gatherers: An Interdisciplinary Perspective* içinde, (yay. haz.) C. Panter-Brick, R. Layton ve P. Rowley-Conwy, 239–266, Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- Fry, H., *History of North Atlantic Steam Navigation*, Londra: Sampson, Low, Marston & Company, 1896.
- Fujimoto, T., *The Evolution of a Manufacturing System at Toyota*, New York: Oxford University Press, 1999.
- Fussell, G. E., *The Farmer's Tools, 1500–1900*, Londra: A. Melrose, 1952.
- Fussell, G. E., *The Classical Tradition in West European Farming*, Rutherford: Fairleigh Dickinson University Press, 1972.
- Gaastera, F. S., *The Dutch East India Company*, Zutphen: Walburg Press, 2007.
- Gaier, C., "The origin of Mons Meg", *Journal of the Arms and Armour Society*, Londra 5:425–431, 1967.
- Galaty, J. G. ve P. C. Salzman (yay. haz.), *Change and Development in Nomadic and Pastoral Societies*, Leiden: E. J. Brill, 1981.
- Gales, B. vd., "North versus South: Energy transition and energy intensity in Europe over 200 years", *European Review of Economic History* 2:219–253, 2007.

- Galloway, J. A., D. Keene ve M. Murphy, "Fuelling the city: Production and distribution of firewood and fuel in London's region, 1290–1400", *Economic History Review* 49:447–472, 1996.
- Galor, O., *From Stagnation to Growth: Unified Growth Theory*, Amsterdam: Elsevier, 2005.
- Gamarra, N. T., *Erroneous Predictions and Negative Comments*, Washington, DC: Library of Congress, 1969.
- Gans, P. J., "The medieval horse harness: Revolution or evolution? A case study in technological change", *Villard's Legacy: Studies in Medieval Technology, Science and Art in Memory of Jean Gimpel* içinde, yay. haz. M.-T. Zenner, 175–187, Londra: Routledge, 2004.
- Garcke, E., "Electric lighting", *Encyclopaedia Britannica* içinde, 11. basım, c. 9., 651–673. Cambridge: Cambridge University Press, 1911.
- Gardiner, R., *The Heyday of Sail: The Merchant Sailing Ship 1650–1830*, New York: Chartwell Books.
- Gardner, J. (yay. haz.), *Gilgamesh*, New York: Knopf Doubleday, 2011.
- Garrett, C. ve M. Wade-Matthews, *The Ultimate Encyclopedia of Steam and Rail*, Londra: Southwater Publishing, 2015.
- Gartner, "Gartner says Smartphone sales surpassed one billion units in 2014", 2015. <http://www.gartner.com/newsroom/id/2996817>.
- Gaskell, E., *North and South*, Londra: Chapman & Hall, 1855.
- Gates, D., *The Napoleonic Wars 1803–1815*, New York: Random House, 2011.
- Geerdes, M., H. Toxopeus ve C. van der Vliet, *Modern Blast Furnace Ironmaking*, Amsterdam: IOS Press, 2009.
- Geertz, C., *Agricultural Involution*, Berkeley: University of California Press, 1963.
- Gehlsen, D., *Social Complexity and the Origins of Agriculture*, Saarbrücken: VDM Verlag, 2009.
- Georgescu-Roegen, N., "Energy and economic myths", *Ecologist* 5:164–174, 242–252, 1975.
- Georgescu-Roegen, N., "Afterword", *Entropy: A New World View* içinde, (yay. haz.) J. Rifkin, 261–269. New York: Viking Press, 1980.
- Geothermal Energy Association, *2014 Annual U.S. & Global Geothermal Power Production Report*, 2014. <http://geo-energy.org/events/2014%20Annual%20US%20&%20Global%20Geothermal%20Power%20Production%20Report%20Final.pdf>.
- Gerhold, D., *Road Transport before the Railways*, Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- Gesner, J. M. (yay. haz.), *Scriptores rei rusticae*, Leipzig: Fritsch, 1735.
- Giampietro, M. ve K. Mayumi, *The Biofuel Delusion*, Londra: Earthscan, 2009.
- Gies, F. ve J. Gies, *Cathedral Forge and Waterwheel: Technology and Invention in the Middle Ages*, New York: Harper, 1995.
- Gill, R. B., *The Great Maya Droughts: Water, Life, and Death*, Albuquerque: University of New Mexico Press, 2000.
- Gille, B., *Histoire des techniques*, Paris: Gallimard, 1978.
- Gimpel, J., *The Medieval Machine*, New York: Penguin Books, 1997.
- Ginouès, R., *Balanéutikè: Recherches sur le bain dans l'antiquité grecque*, Paris: de Boccard, 1962.
- Glaser, B., "Prehistorically modified soils of central Amazonia: A model for sustainable agriculture in the twenty-first century", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 362:187–196, 2007.
- Global Wind Energy Council, *Global wind statistics 2014*, 2015. http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2015/02/GWEC_GlobalWindStats2014_FINAL_10.2.2015.pdf.

- Godfrey, F. P., *An International History of the Sewing Machine*, Londra: R. Hale, 1982.
- Goe, M. R. ve R. E. Dowell, *Animal Traction: Guidelines for Utilization*, Ithaca, New York: Cornell University, Department of Animal Science, 1980.
- Gold, B. vd., *Technological Progress and Industrial Leadership: The Growth of the U.S. Steel Industry, 1900-1970*, Lexington, Massachusetts: D. C. Heath and Co, 1984.
- Goldsmith. R. W., "The power of Victory: Munitions output in World War II", *Military Affairs* 10:69-80, 1946.
- Goldstein, D. B., S. Martinez ve R. Roy, "Are there rebound effects from energy efficiency? An analysis of empirical data, internal consistency, and solutions", *Electricity Policy* 2011:1-18, 2011.
- Gómez, J. J. H., V. Marquina ve R. W. Gómez, "On the performance of Usain Bolt in the 100 m sprint", *European Journal of Phycology* 34:1227-1233, 2013.
- Goren-Inbar, N. vd., "Evidence of hominin control of fire at Gesher Benot Ya'aqov, Israel", *Science* 304:725-727, 2004.
- Goudsblom, J., *Fire and Civilization*, Londra: Allen Lane, 1992.
- Grayson, D. K. ve F. Delpach, "Specialized early Upper Paleolithic hunters in southwestern France?", *Journal of Archaeological Science* 29:1439-1449, 2002.
- Greene, A. N., *Horses at Work*, Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 2008.
- Greene, K., "Technological innovation and economic progress in the ancient world: M. I. Finley re-considered", *Economic History Review* 53:29-59, 2000.
- Greeno, F. L. (yay. haz.), *Obed Hussey Who, of All Inventors, Made Bread Cheap*, Rochester, New York: Rochester Herald Publishing Co., 1912.
- Greenwood, W. H., *Iron*, Londra: Cassell, 1907.
- Griffiths, J., *The Third Man: The Life and Times of William Murdoch 1754-1839*, Londra: Andre Deutsch, 1992.
- Grigg, D. B., *The Agricultural Systems of the World*, Cambridge: Cambridge University Press, 1974.
- Grigg, D. B., *The Transformation of Agriculture in the West*, Oxford: Blackwell, 1992.
- Grimal, N., *A History of Ancient Egypt*, Oxford: Blackwell, 1992.
- Gronow, P. ve I. Saunio, *International History of the Recording Industry*, Londra: Bloomsbury Academic, 1999.
- Grousset, R., *L'empire des steppes*, Paris: Payot, 1938.
- Grousset, R., *The Epic of the Crusades*, New York: Orion Press, 1970.
- GSI (Global Subsidies Initiative), *Global Subsidies Initiative*, 2015. <https://www.iisd.org/gsi/fossil-fuel-subsidies>.
- Gulfink, *Fast facts about operations Desert Shield/Desert Storm*, 1991. http://www.gulf-link.osd.mil/timeline/fast_facts.htm.
- Gunston, B., *World Encyclopedia of Aero Engines*, Wellingborough: Patrick Stephens, 1986.
- Gunston, B., *The Development of Piston Aero Engines*, Yeovil: Patrick Stephens, 1999.
- Gunston, B., *Aviation: The First 100 Years*, Hauppauge, New York: Barron's Educational Series, 2002.
- Haaland, R. ve P. Shinnie (yay. haz.), *African Iron Working: Ancient and Traditional*, Oslo: Norwegian University Press, 1985.
- Hadfield, C., *The Canal Age*, New York: Praeger, 1969.
- Hadland, T. ve H.-E. Lessing, *Bicycle Design: An Illustrated History*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2014.
- Haile-Selassie, Y. vd., "New species from Ethiopia further expands Middle Pliocene hominin diversity", *Nature* 521:483-488, 2015.

- Hair, T. H., *Sketches of the Coal Mines in Northumberland and Durham*, Londra: J. Madden & Co., 1844.
- Hammel, E. M., *The Root: The Marines in Beirut, August 1982–February 1984*, New York: Harcourt Brace Jovanovich, 1985.
- Hansell, M. H., *Animal Architecture*, Oxford: Oxford University Press, 2005.
- Hansen, P. V., “Experimental reconstruction of the medieval trebuchet”, *Acta Archaeologica* 63:189–208, 1992.
- Hanson, N., *The Confident Hope of a Miracle: The True History of the Spanish Armada*, New York: Random House, 2011.
- Harlan, J. R., *Crops and Man*, Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, 1975.
- Harlow, J. H., *Electric Power Transformer Engineering*, Boca Raton, Florida: CRC Press, 2012.
- Harmand, S. vd., “3.3-Million-year-old stone tools from Lomekwi 3, West Turkana, Kenya”, *Nature* 521:310–315, 2015.
- Harris, J. R., *The British Iron Industry 1700–1850*, Londra: Macmillan, 1988.
- Harris, M., “The cultural ecology of India’s sacred cattle”, *Current Anthropology* 7:51–66, 1966.
- Harrison, P. D. ve B. L. Turner (yay. haz.), *Pre-Hispanic Maya Agriculture*, Albuquerque: University of New Mexico Press, 1978.
- Harris, J. A. ve F. G. Benedict, *A Biometric Study of Basal Metabolism in Man*, Washington, DC: Carnegie Institution, 1919.
- Hart, J. F., *The Changing Scale of American Agriculture*, Charlottesville: University of Virginia Press, 2004.
- Hartmann, F., *L’agriculture dans l’ancienne Egypte*, Paris: Libraire-Imprimerie Réunies, 1923.
- Harverson, M., *Persian Windmills*, Lahey: International Molinological Society, 1991.
- Hashimoto, T. vd., “Hand before foot? Cortical somatotopy suggests manual dexterity is primitive and evolved independently of bipedalism”, *Philosophical Transactions B* 368 (1630): 1–12, 2013.
- Hassan, F. A., “Environment and subsistence in Predynastic Egypt”, *From Hunters to Farmers* içinde, (yay. haz.) J. D. Clark ve S. A. Brandt, 57–64, Berkeley: University of California Press, 1984.
- Haudricourt, A. G. ve M. J. B. Delamarre, *L’Homme et la Charrue à travers le Monde*, Paris: Gallimard, 1955.
- Haug, G. H. vd., “Climate and collapse of Maya civilization”, *Science* 299:1731–1735, 2003.
- Haugaasen, J. M. T. vd., “Seed dispersal of the Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa*) by scatter-hoarding rodents in a central Amazonian forest”, *Journal of Tropical Ecology* 26:251–262, 2010.
- Hausman, W. J., P. Hertner ve M. Wilkins, *Global Electrification: Multinational Enterprise and International Finance in the History of Light and Power, 1878–2007*, Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- Hawkes, K., J. F. O’Connell ve N. G. Blurton Jones, “Hadza meat sharing”, *Evolution and Human Behavior* 22:113–142, 2001.
- Hayden, B., “Subsistence and ecological adaptations of modern hunter/ gatherers”, *Omnivorous Primates* içinde, (yay. haz.) R. S. O. Harding ve G. Teleki, 344–421, New York: Columbia University Press, 1981.
- Haynie, D., *Biological Thermodynamics*, Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- Headland, T. N. ve L. A. Reid, “Hunter-gatherers and their neighbors from prehistory to the present”, *Current Anthropology* 30:43–66, 1989.

- Heidenreich, C., *Huron: A History and Geography of the Huron Indians*, Toronto: McClelland and Stewart, 1971.
- Heinrich, B., *Racing the Antelope: What Animals Can Teach Us about Running and Life*, New York: HarperCollins, 2001.
- Heizer, R. F., "Ancient heavy transport, methods and achievements", *Science* 153:821-830, 1966.
- Helland, J., *Five Essays on the Study of Pastoralists and the Development of Pastoralism*, Bergen: Universitet i Bergen, 1980.
- Helliwell, J. F., R. Layard ve J. Sachs (yay. haz.), *World Happiness Report 2015*, 2015. <http://worldhappiness.report/wp-content/uploads/sites/2/2015/04/WHR15-Apr29-update.pdf>.
- Hemphill, R., "Le transport de l'obélisque du Vatican", *Etudes Francaises* 26 (3): 111-116, 1990.
- Henry, A. G., A. S. Brooks ve D. R. Piperno, Plant foods and the dietary ecology of Neanderthals and early modern humans, *Journal of Human Evolution* 69:44-54, 2014.
- Heppenheimer, T. A., *Turbulent Skies: The History of Commercial Aviation*, New York: John Wiley, 1995.
- Herlihy, D. V., *Bicycle: The History*, New Haven, CT: Yale University Press, 2004.
- Herodotus (tarih yok), *Book of Histories*, <http://www.cheops-pyramide.ch/khufu-pyramid/herodotus.html>. adresinde parçalar.
- Herring, H., "Rebound effect in energy conservation", *Encyclopedia of Energy* içinde, (yay. haz.) C. Cleveland vd., c. 5, s. 411-423, Amsterdam: Elsevier, 2004.
- Herring, H., "Energy efficiency: A critical view", *Energy* 31:10-20, 2006.
- Heston, A., "An approach to the sacred cow of India", *Current Anthropology* 12:191-209, 1971.
- Heyne, E. G. (yay. haz.), *Wheat and Wheat Improvement*, Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, 1987.
- Hildinger, E., *Warriors of the Steppe: A Military History of Central Asia, 500 B.C. to A.D. 1700*, New York: Sarpedon Publishers, 1997.
- Hill, A. V., "The maximum work and mechanical efficiency of human muscles and their most economical speed", *Journal of Physiology* 56:19-41, 1922.
- Hill, D., *A History of Engineering in Classical and Medieval Times*, La Salle, Illinois: Open Court Publishing, 1984.
- Hills, R., *Power from Steam: A History of the Stationary Steam Engine*, Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- Hindle, B. (yay. haz.), *America's Wooden Age: Aspects of Its Early Technology*, Tarrytown, NY: Sleepy Hollow Restorations, 1975.
- Hippisley, J. C., *Prison Treadmills*, Londra: W Nicol, 1823.
- Hitchcock, R. K. ve J. I. Ebert, "Foraging and food production among Kalahari hunter/gatherers", *From Hunters to Farmers* içinde, (yay. haz.) J. D. Clark ve S. A. Brandt, 328-348, Berkeley: University of California Press, 1984.
- Ho, P., *The Cradle of the East*, Hong Kong: Chinese University of Hong Kong Press, 1975.
- Hodge, A. T., "A Roman factory", *Scientific American* 263 (5): 106-111, 1990.
- Hodge, A. T., *Roman Aqueducts & Water Supply*, Londra: Duckworth, 2001.
- Hodges, P., *How the Pyramids Were Built*, Longmead: Element Books, 1989.
- Hoffmann, H., *Die chemische Veredlung der Steinkohle durch Verkokung*, 1953. <http://epic.awi.de/23532/1/Hof1953a.pdf>.
- Hogan, W. T., *Economic History of the Iron and Steel Industry in the United States*, 5 cilt Lexington, MA: Lexington Books, 1971.

- Hogg, I. V., *German Artillery of World War Two*, Mechanicsville, Pennsylvania: Stackpole Books, 1997.
- Holley, I. B., *Buying Aircraft: Matériel Procurement for the Army Air Forces*, Washington, DC: Department of the Army, 1964.
- Holliday, M. A., "Body ww and energy needs during growth", *Human Growth: A Comprehensive Treatise* içinde, (yay. haz.) F. Falkner ve J. M. Tanner, c. 2, 101–117, New York: Plenum Press, 1986.
- Holt, P. M., *The Age of the Crusades: The Near East from the Eleventh Century to 1517*, Londra: Routledge, 2014.
- Holt, R., *The Mills of Medieval England*, Oxford: Oxford University Press, 1988.
- Homewood, K., *Ecology of African Pastoralist Societies*, Oxford: James Curry, 2008.
- Hommel, R. P., *China at Work*, Doylestown, Pennsylvania: Bucks County Historical Society, 1937.
- Hong, S., *Wireless: From Marconi's Black-Box to the Audio*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2001.
- Hopfen, H. J., *Farm Implements for Arid and Tropical Regions*, Roma: FAO, 1969.
- Hough, R. ve D. Richards, *Battle of Britain*, Barnsley: Pen & Sword Aviation, 2007.
- Hounshell, D. A., "Two paths to the telephone", *Scientific American* 244 (1): 157–163, 1981.
- Howell, J. M., "Early farming in Northwestern Europe", *Scientific American* 257 (5): 118–126, 1987.
- Howell, J. W. ve H. Schroeder, *The History of the Incandescent Lamp*, Schenectady, New York: Maqua Co., 1927.
- Hoyt, E. P., *Inferno: The Fire Bombing of Japan, March 9–August 15, 1945*, New York: Madison Books, 2000.
- Hua, J., "The mass production of iron castings in ancient China", *Scientific American* 248:120–128, 1983.
- Huang, N., *China Will Overtake Britain*, Beijing: Foreign Languages Press, 1958.
- Hubbard, F. H., *Encyclopedia of North American railroading: 150 years of railroading in the United States and Canada*, New York: McGraw-Hill, 1981.
- Hublin, J.-J. ve M. P. Richards (yay. haz.), *The Evolution of Hominin Diets: Integrating Approaches to the Study of Palaeolithic Subsistence*, Berlin: Springer, 2009.
- Hudson, P., *Proto-industrialisation. Recent Findings of Research in Economics and Social History* 10:1–4, 1990.
- Hughes, Thomas P., *Networks of Power*, Baltimore, Maryland: Johns Hopkins University Press, 1983.
- Hugill, P. J., *World Trade Since 1431*, Baltimore, Maryland: Johns Hopkins University Press, 1993.
- Humphrey, W. S. ve J. Stanislaw, "Economic growth and energy consumption in the UK, 1700–1975", *Energy Policy* 7:29–42, 1979.
- Hunley, J. D., "The Enigma of Robert H. Goddard", *Technology and Culture* 36:327–350, 1995.
- Hunter, L. C., "Water power in the century of steam", *America's Wooden Age: Aspects of Its Early Technology* içinde, (yay. haz.) B. Hindle, 160–192, Tarrytown, PA: Sleepy Hollow Restorations, 1975.
- Hunter, L., *A History of Industrial Power in the US, 1780–1930*, c. 1, Charlottesville: University of Virginia Press, 1979.
- Hunter, L. C. ve L. Bryant, "A History of Industrial Power in the United States, 1780–1930", c. 3, *The Transmission of Power*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1991.
- Husslage, G., *Windmolens: Een overzicht van de verschillende molensoorten en hun werkwijze*, Amsterdam: Heijnis, 1965.

- Huurdeman, A. A., *The Worldwide History of Telecommunications*, New York: John Wiley & Sons, 2003.
- Hyde, C. K., *Technological Change and the British Iron Industry 1700–1870*, Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1977.
- Hyland, A., *Equus: The Horse in the Roman World*, New Haven, CT: Yale University Press, 1990.
- IBIS World, *Bicycle manufacturing in China*, 2015. <http://www.ibisworld.com/industry/china/bicycle-manufacturing.html>.
- IEA (International Energy Agency), *Energy Balances of Non-OECD Countries*, Paris: IEA, 2015a.
- IEA, World balance, 2015b. <http://www.iea.org/sankey>.
- Ienaga, S., *The Pacific War, 1931-1945*, New York: Pantheon Books, 1978.
- ICCT (International Council on Clean Transportation), *European Vehicle Market Statistics, Pocketbook 2014*, 2014. http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/EU-pocketbook_2014.pdf.
- IFIA (International Fertilizer Industry Association), *Market outlook reports*, 2015. <http://www.fertilizer.org/MarketOutlooks>.
- Illich, I., *Energy and Equity*, New York: Harper and Row, 1974.
- IMF (International Monetary Fund / Uluslararası Para Fonu), *Counting the cost of energy subsidies*, 2015. <http://www.imf.org/external/pubs/ft/survey/so/2015/new070215a.htm>.
- Intel, *Moore's law and Intel innovation*, 2015. <http://www.intel.com/content/www/us/en/history/museum-gordon-moore-law.html>.
- International Labour Organization (Uluslararası Çalışma Örgütü), *Forced labour, human trafficking and slavery*, 2015. <http://www.ilo.org/global/topics/forced-labour/lang-en/index.htm>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change / Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli), [Synthesis Report Summary for Policymakers, Cenevre: IPCC.] Climatic Change: 2014.
- Irons, W. Ve N. Dyson-Hudson (yay. haz.), *Perspective on Nomadism*, Leiden: E. J. Brill, 1972.
- IRRI (International Rice Research Institute / Uluslararası Pirinç Araştırma Enstitüsü), *Rice milling*, 2015. http://www.knowledgebank.irri.org/ericeproduction/PDF_&_Docs/Teaching_Manual_Rice_Milling.pdf.
- Jakab, P. L., *Visions of a Flying Machine: The Wright Brothers and the Process of Invention*, Washington, DC: Smithsonian Institution Press, 1990.
- Jamasmie, C., *End of an era for UK coal mining: Last mines close up shop*, 2015. <http://www.mining.com/end-of-an-era-for-uk-coal-mining-last-mines-close-up-shop>.
- James, A., *Global PV Demand Outlook 2015–2020: Exploring Risk in Downstream Solar Markets*, GTM Research, Haziran, 2015. <http://www.greentechmedia.com/research/report/global-pv-demand-outlook-2015-2020>.
- Janick, J., “Ancient Egyptian agriculture and the origins of horticulture”, *Acta Horticulturae* 582:23–39, 2002.
- Jansen, M. B., *The Making of Modern Japan*. Cambridge, Massachusetts: Belknap Press of Harvard University Press, 2000.
- Jehl, F., *Menlo Park Reminiscences*, Dearborn, Minnesota: Edison Institute, 1937.
- Jenkins, B., *Properties of Biomass, Appendix to Biomass Energy Fundamentals*, Palo Alto, California: EPRI, 1993.
- Jenkins, R., *Links in the History of Engineering and Technology from Tudor Times*, Cambridge: Cambridge University Press, 1936.
- Jensen, H., *Sign, Symbol and Script*, New York: G. P. Putnam's Sons, 1969.

- Jevons, W. S., *The Coal Question: An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of our Coal Mines*, Londra: Macmillan, 1865.
- Jing, Y. ve R. K. Flad, "Pig domestication in ancient China", *Antiquity* 76:724–732, 2002.
- Johannsen, O., *Geschichte des Eisens*, Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 1953.
- Johanson, D., "How bipedalism arose", PBS, Nova, 1 Ekim, 2006. <http://www.pbs.org/wgbh/nova/evolution/what-evidence-suggests.html>.
- Johnson, E. D., *Communication: An Introduction to the History of the Alphabet, Writing, Printing, Books, and Libraries*, Metuchen, New Jersey: Scarecrow Press, 1973.
- Jones, C. F., *Routes of Power*, Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 2014.
- Jones, H. M., *The Age of Energy*, New York: Viking Press, 1971.
- Jones, H., *Steam Engines*, Londra: Ernest Benn, 1973.
- Josephson, M., *Edison: A Biography*, New York: McGraw-Hill, 1959.
- J.P. Morgan, *A Brave New World: Deep Decarbonization of Electricity Grids*, New York: J. P. Morgan, 2015.
- Juleff, G., "Technology and evolution: A root and branch view of Asian iron from first-millennium BC Sri Lanka to Japanese steel", *World Archaeology* 41:557–577, 2009.
- Junqueira, A. B, G. H. Shepard ve C. R. Clement, "Secondary forests on anthropogenic soils in Brazilian Amazonia conserve agrobiodiversity", *Biodiversity and Conservation* 19:1933–1961, 2010.
- Kander, A., "The second and third industrial revolutions", *Power to the People: Energy in Europe Over the Last Five Centuries* içinde, A. Kander, P. Malanima ve P. Warde, 249–386, Princeton, NJ: Princeton University Press, 2013.
- Kander, A., P. Malanima ve P. Warde, *Power to the People: Energy in Europe over the Last Five Centuries*, Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 2013.
- Kander, A. ve P. Warde, "Energy availability from livestock and agricultural productivity in Europe, 1815–1913: A new comparison", *The Economic History Review* 64:1–29, 2011.
- Kanigel, R., *The One Best Way: Frederick Winslow Taylor and the Enigma of Efficiency*, New York: Viking, 1997.
- Kaplan, D., "The darker side of the 'Original Affluent Society'", *Journal of Anthropological Research* 56:301–324.
- Karim, M. R. ve M. S. H. Fatt, "Impact of the Boeing 767 aircraft into the World Trade Center", *Journal of Engineering Mechanics* 131:1066–1072, 2005.
- Karkanas, P. vd., "Evidence for habitual use of fire at the end of the Lower Paleolithic: Site-formation processes at Qesem Cave, Israel", *Journal of Human Evolution* 53:197–212, 2007.
- Kaufer, D. S. ve K. M. Carley, *Communication at a Distance: The Influence of Print on Sociocultural Organization and Change*, Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, 1993.
- Kaufmann, R. K., "A biophysical analysis of the energy/real GDP ratio: Implications for substitution and technical change", *Ecological Economics* 6:35–56.
- Kay, J. P., *The Moral and Physical Condition of the Working Classes Employed in the Cotton Manufacture in Manchester*, Londra: Ridgway, 1832.
- Keay, J., *The Honourable Company: A History of the English East India Company*, Londra: HarperCollins UK, 2010.
- Keegan, J., *A History of Warfare*, New York: Vintage, 1994.
- Keeling, C. D., "Rewards and penalties of monitoring the Earth", *Annual Review of Energy and the Environment* 23: 25–82, 1998.
- Kelly, R. L., "Hunter-gatherer mobility strategies", *Journal of Anthropological Research* 39:277–306.

- Kendall, A., *Everyday Life of Incas*, Londra: B. T. Batsford, 1973.
- Kennedy, C. A. vd., Energy and material flows of megacities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112:5985–5990, 2015.
- Kennedy, E., *The Automobile Industry: The Coming of Age of Capitalism's Favorite Child*, New York: Reynal & Hitchcock, 1941.
- Kesaris, P., *Manhattan Project: Official History and Documents*, Washington, DC: University Publications of America, 1977.
- Khaira, G., "Coal transportation logistics", *Annual Community Coal Forum*, Tumbler Ridge, BC.
- Khalturin, V. I., vd., "A review of nuclear testing by the Soviet Union at Novaya Zemlya, 1955–1990", *Science & Global Security* 13 (1): 1–42.
- Khazanov, A. M., *Nomads and the Outside World*, Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- Khazanov, A. M., *Nomads in the Sedentary World*, Londra: Curzon, 2001.
- Kilby, Jack S., *Miniaturized Electronic Circuits*, U.S. Patent 3,138,743, 23 Haziran 1964, Washington, DC: USPTO, 1964.
- King, C. D., *Seventy-five Years of Progress in Iron and Steel*, New York: American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1948.
- King, F. H., *Farmers of Forty Centuries*, New York: Harcourt, Brace & Co., 1927.
- King, P., "The choice of fuel in the eighteenth century iron industry: The Coalbrookdale accounts reconsidered", *Economic History Review* 64:132–156, 2011.
- King, R., *Brunelleschi's Dome: How a Renaissance Genius Reinvented Architecture*, Londra: Chatto & Windus, 2000.
- King, P., "The production and consumption of bar iron in early modern England and Wales", *Economic History Review* 58:1–33, 2005.
- Kingdon, J., *Lowly Origin: Where, When, and Why Our Ancestors First Stood Up*, Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 2003.
- Klein, H. A., "Pieter Bruegel the Elder as a guide to 16th-century technology", *Scientific American* 238 (3): 134–140.
- Klima, B., "Paleolithic huts at Dolní Vestonice, Czechoslovakia", *Antiquity* 28:4–14.
- Kloss, E., *Der Luftkrieg über Deutschland, 1939–1945*, Münih: DTV, 1963.
- Komlos, J., "Agricultural productivity in America and Eastern Europe: A comment", *Journal of Economic History* 48:664–665.
- Konrad, T., MV Mont, Knock Nevis, "Jahre Viking—World's largest supertanker", *gCaptain*, 18 Temmuz 2020, <http://gcaptain.com/mont-knock-nevis-jahre-viking-worlds-largest-tanker-ship/#.Vc3zB4dRGM8>, 2010.
- Kongshaug, G., *Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions in Fertilizer Production*, Paris: International Fertilizer Association, 1998.
- Kopparapu, R. K. vd., "Habitable zones around main sequence stars: Dependence on planetary mass", *Astrophysical Journal, Letters* 787:L29.
- Kranzberg, M. ve C. W. Pursell (yay. haz.), *Technology in Western Civilization*, c. 1, New York: Oxford University Press, 1967.
- Krausmann, F. ve H. Haberl, "The process of Industrialization from an energetic metabolism point of view: Socio-economic energy flows in Austria 1830–1995", *Ecological Economics* 41:177–201, 2002.
- Kumar, S. N., "Tanker transportation", *Encyclopedia of Energy* içinde, c. 6, (yay. haz.) C. Cleveland vd., 1–12. Amsterdam: Elsevier.
- Kushnirs, I., *Gross Domestic Product (GDP) in USSR*, 2015. http://kushnirs.org/macroeconomics/gdp/gdp_ussr.html#leader1.

- Kuthan, J. ve J. Royt, *Katedrála sv. Víta, Václava a Vojtěcha: Svatyn esk ch patron a král*, Prag: Nakladatelství Lidové noviny, 2011.
- Kuthan, M. vd., "Domestication of wild *Saccharomyces cerevisiae* is accompanied by changes in gene expression and colony morphology", *Molecular Microbiology* 47:745–754, 2003.
- Kuznets, S. S., *Economic Growth of Nations: Total Output and Production Structure*, Cambridge, Massachusetts: Belknap Press of Harvard University Press, 1971.
- Lacey, J. M., *A Comprehensive Treatise on Practical Mechanics*, Londra: Technical Press, 1935.
- Laloux, R., vd., "Nutrition and fertilization of wheat", *Wheat* içinde, 19–24. Basel: CI-BA-Geigy, 1980.
- Lancaster, L. C., *Concrete Vaulted Construction in Imperial Rome: Innovations in Context*, Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- Landels, J. G., *Engineering in the Ancient World*, Londra: Chatto & Windus, 1980.
- Landes, David, *The Unbound Prometheus: Technological Change and Industrial Development in Western Europe from 1750 to the Present*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Langdon, J., *Horses, Oxen, and Technological Innovation*, Cambridge: Cambridge University Press, 1986.
- Lannoo, B., *Energy consumption of ICT Networks*, Brüksel: TREND Final Workshop, 2013. <http://www.fp7-trend.eu/.../energyconsumptionincentives-energy-efficient-net>.
- Lardy, N., *Agriculture in China's Modern Economic Development*, Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
- Latimer, B., "The perils of being bipedal", *Annals of Biomedical Engineering* 33:3–6, 2005.
- Lawler, A., "Megaproject asks: What drove the Vikings?", *Science* 352:280–281, 2016.
- Layard, A. H., *Discoveries among the Ruins of Nineveh and Babylon*, New York: G.P. Putnam & Company, 1853.
- Layard, R., *Happiness: Lessons from a New Science*, New York: Penguin Press, 2005.
- Layton, E. T., "Scientific technology, 1845–1900: The hydraulic turbine and the origins of American industrial research", *Technology and Culture* 20:64–89, 1979.
- Leach, E. R., "Hydraulic society in Ceylon", *Past & Present* 15:2–26, 1959.
- Lécuyer, C. ve D. C. Brock, *Makers of the Microchip*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2010.
- Lee, R. B. ve R. Daly (yay. haz.), *The Cambridge Encyclopaedia of Hunters and Gatherers*, Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- Lee, R. B. ve I. DeVore (yay. haz.), *Man the Hunter*, New York: Aldine de Gruyter, 1968.
- Lefebvre des Noëttes, R., *La Force Motrice animale à travers les Âges*, Paris: Berger-Levrault, 1924.
- Legge, A. J. ve P. A. Rowley-Conwy, "Gazelle killing in Stone Age Syria", *Scientific American* 257 (2): 88–95, 1987.
- Lehner, M., *The Complete Pyramids*, Londra: Thames and Hudson, 1997.
- Lenin, V. I., *Speech delivered to the Moscow Gubernia Conference of the R.C.P. (B.)*, 21 Kasım 1920, 1920. <https://www.marxists.org/archive/lenin/works/1920/nov/21.htm>.
- Lenstra, J. A. ve D. G. Bradley, "Systematics and phylogeny of cattle", *The Genetics of Cattle* içinde, (yay. haz.) R. Fries ve A. Ruvinsky, 1–14, Wallingford: CABI, 1999.
- Leon, P., *The Discovery and Conquest of Peru, Chronicles of the New World Encounter*, (yay. haz. ve çev.) A. P. Cook ve N. D. Cook, Durham, NC: Duke University Press, 1998.
- Leonard, W. R., J. J. Snodgrass ve M. L. Robertson, "Effects of brain evolution on human nutrition and metabolism", *Annual Review of Nutrition* 27:311–327, 2007.

- Leonard, W. R. vd., "Metabolic correlates of hominid brain evolution", *Comparative Biochemistry and Physiology Part A* 136:5–15, 2003.
- Lepre, J. P., *The Egyptian Pyramids*, Jefferson, NC: McFarland & Co., 1990.
- Lerche, G., *Ploughing Implements and Tillage Practices in Denmark from the Viking Period to about 1800: Experimentally Substantiated*, Herning: P. Kristensen, 1994.
- Leser, P., *Entstehung und Verbreitung des Pfluges*, Münster: Aschendorff, 1931.
- Lesser, I. O., *Oil, the Persian Gulf, and Grand Strategy*, Santa Monica, California: Rand Corp., 1991.
- Leveau, P., *Les moulins de Barbegal* (1986–2006), 2006. <http://traianus.rediris.es>.
- Levine, A. J., *The Strategic Bombing of Germany, 1940–1945*, Londra: Greenwood, 1992.
- Levinson, M., *The Box: How the Shipping Container Made the World Smaller and the World Economy Bigger*, Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 2006.
- Levinson, M., *U.S. Manufacturing in International Perspective*, Washington, DC: Congressional Research Service; 2012. <http://www.fas.org/sgp/crs/misc/R42135.pdf>.
- Lewin, R., *Human Evolution: An Illustrated Introduction*, Oxford: Wiley, 2004.
- Lewis, M. J. T., "The Greeks and the early windmill", *History and Technology* 15:141–189, 1993.
- Lewis, M. J. T., "The origins of the wheelbarrow", *Technology and Culture* 35:453–475, 1994.
- Lewis, M. J. T., *Millstone and Hammer: The Origins of Water-Power*, Hull: University of Hull Press, 1997.
- Li, L., *Fighting Famine in North China: State, Market, and Environmental Decline, 1690s-1990s*, Stanford, California: Stanford University Press, 2007.
- Liebenberg, L., "Persistence hunting by modern hunter-gatherers", *Current Anthropology* 47:1017–1025, 2006.
- Lighting Industry Association, *Lamp history*, 2009. <http://www.thelia.org.uk/lighting-guides/lamp-guide/lamp-history>.
- Lilienfeld, E. J., *Method and apparatus for controlling electric currents*, US Patent 1,745,175, 28 Ocak 1930, Washington, DC: USPTO, 1930.
- Lilienthal, D. E., *TVA: Democracy on the March*, New York: Harper and Brothers, 1944.
- Lindgren, M., *Glory and Failure*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1990.
- Lindsay, R. B., *Energy: Historical Development of the Concept*, Stroudsburg, Pennsylvania: Dowden, Hutchinson & Ross, 1975.
- Ling, P. J., *America and the Automobile: Technology, Reform and Social Change*, Manchester: Manchester University Press, 1990.
- Linsley, J. W., E. W. Rienstra ve J. A. Stiles, *Giant under the Hill: History of the Spindletop Oil Discovery at Beaumont, Texas, in 1901*, Austin: Texas State Historical Association, 2002.
- Livi-Bacci, M., *Population and Nutrition*, Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- Livi-Bacci, M., *The Population of Europe*, Oxford: Blackwell, 2000.
- Livi-Bacci, M., *A Concise History of World Population*, Oxford: Wiley-Blackwell, 2012.
- Lizerand, G., *Le régime rural de l'ancienne France*, Paris: Presses Universitaires, 1942.
- Lizot, J., "Population, resources and warfare among the Yanomami", *Man*, 12:497–517, 1977.
- Lockwood, A. H., *The Silent Epidemic: Coal and the Hidden Threat to Health*, Cambridge, MA: MIT Press, 2012.
- Looney, R., *Economic Costs to the United States Stemming from the 9/11 Attacks*, Monterey, California: Center for Contemporary Conflict, 2002.
- López, A. E., *La conquista de América*, Barcelona: RBA Libros, 2014.
- Lotka, A. J., "Contribution to the energetics of evolution", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 8:147–151, 1922.

- Lotka, A., *Elements of Physical Biology*, Baltimore, Maryland: Williams and Wilkins, 1925.
- Lovejoy, C. O., "Evolution of human walking", *Scientific American* 259 (5): 82–89, 1988.
- Lowrance, R. vd. (yay. haz.), *Agricultural Ecosystems*, New York: John Wiley, 1984.
- Lubar, S., "'Do not fold, spindle or mutilate': A cultural history of the punch card", *Journal of American Culture* 15 (4): 43–55, 1992.
- Lucas, A. R., "Industrial milling in the ancient and medieval Worlds. A survey of the evidence for an industrial revolution in medieval Europe", *Technology and Culture* 4: 1–30, 2005.
- Lucassen, J. ve R. W. Unger, "Shipping, productivity and economic growth", *Shipping Efficiency and Economic Growth 1350–1850* içinde, (yay. haz.) R. W. Unger, 3–44. Leiden: Brill, 2011.
- Lucchini, F., *Pantheon*, Roma: Nova Italia Scientifica, 1996.
- Luknatskii, N.N., *Podnyatie Aleksandrovskoi kolonny v 1832. Stroitel'naya Promyshlennost'* 1936 (13) :31–34, 1936.
- Lüngen, H. B., *Trends for reducing agents in blast furnace operation*, 2013. http://www.dkg.de/akk-vortraege/2013-_2rd_polnisch_deutsches_symposium/abstract-luengen-reducing-agents.pdf.
- MacDonald, W. L., *The Pantheon Design, Meaning, and Progeny*, Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1976.
- Macedo, I. C., M. R. L. V. Leal ve J. E. A. R. da Silva, *Assessment of Greenhouse Gas Emissions in the Production and Use of Fuel Ethanol in Brazil*, São Paulo: Government of the State of São Paulo; 2004. http://unica.com.br/i_pages/files/pdf_ingles.pdf.
- Machiavello, C. M., *La construcción del sistema agrario en la civilización andina*, Lima: Editorial Econgraf, 1991.
- MacLaren, M., *The Rise of the Electrical Industry During the Nineteenth Century*, Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1943.
- Madden, J., *How much software is in your car? From the 1977 Toronado to the Tesla P85D*, 2015. <http://www.qsm.com/blog/2015/how-much-software-your-car-1977-toronado-tesla-p85d>.
- Maddison Project, *Maddison Project*, 2013. <http://www.ggdc.net/maddison/maddison-project/home.htm>.
- Madureira, N. L., "The iron industry energy transition", *Energy Policy* 50:24–34, 2012.
- Magee, D., *The John Deere Way: Performance That Endures*, New York: Wiley, 2005.
- Mak, S., *Rice Cultivation—The Traditional Way*, Solo, Java: CRBOM (Center for River Basin Organizations and Management), 2010.
- Malanima, P., "Energy crisis and growth 1650–1850: The European deviation in a comparative perspective", *Journal of Global History* 1:101–121, 2006.
- Malanima, P., "Energy consumption in the Roman world", *The Ancient Mediterranean Environment between Science and History* içinde, (yay. haz.) W. V. Harris, 13–36. Leiden: Brill, 2013a.
- Malanima, P., "Pre-industrial economies", *Power to the People: Energy in Europe Over the Last Five Centuries*, (yay. haz.) A. Kander, P. Malanima ve P. Warde, 35–127, Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 2013b.
- Malik, J., *The Yields of Hiroshima and Nagasaki Explosions*, Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory, 1985. <http://atomicarchive.com/Docs/pdfs/00313791.pdf>.
- Malone, P. M., *Waterpower in Lowell: Engineering and Industry in Nineteenth Century America*, Baltimore, Maryland: Johns Hopkins University Press, 2009.
- Manx National Heritage, *The Great Laxey Wheel*, 2015. <http://www.manxnationalheritage.im/attractions/laxey-wheel>.

- Marchetti, C., "Fifty-year pulsation in human affairs", *Futures* 18:376–388, 1986.
- Marder, T. A. ve M. W. Jones, *The Pantheon: From Antiquity to the Present*, Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- Mark, J., "Changes in the British brewing industry in the twentieth century", *Diet and Health in Modern Britain* içinde, (yay. haz.) D. J. Oddy ve D. P. Miller, 81–101, Londra: Croom Helm, 1985.
- Marlowe, F. W., "Hunter-gatherers and human evolution", *Evolutionary Anthropology* 14:54–67, 2005.
- Marshall, R., *Storm from the East: From Genghis Khan to Khublai Khan*, Berkeley: University of California Press, 1993.
- Martin, C. ve G. Parker, *The Spanish Armada*, Londra: Hamish Hamilton, 1988.
- Martin, P. S., "Pleistocene ecology and biogeography of North America", *Zoogeography* 151:375–420, 1958.
- Martin, P. S., *Twilight of the Mammoths*, Berkeley: University of California Press, 2005.
- Martin, T. C., *Forty Years of Edison Service, 1882–1922: Outlining the Growth and Development of the Edison System in New York City*, New York: New York Edison Company, 1922.
- Mason, S. L. R., "Fire and Mesolithic subsistence: Managing oaks for acorns in northwest Europe?", *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 164:139–150, 2000.
- Mauthner, F. ve W. Weiss, *Solar Heat Worldwide 2012*, Paris: IEA, 2014.
- Maxton, G. P. ve J. Wormald, *Time for a Model Change: Re-engineering the Global Automotive Industry*, Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- Maxwell, J. C., "A dynamical theory of the electromagnetic field", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 155:459–512.
- May, G. S., *A Most Unique Machine: The Michigan Origins of the American Automobile Industry*, Grand Rapids, Mississippi: William B. Eerdmans Publishing, 1975.
- May, T., *The Mongol Conquests in World History*, Londra: Reaktion Books, 2013.
- Mayhew, H. ve J. Binny, *The Criminal Prisons of London: And Scenes of Prison Life*, Londra: Griffin, Bohn, and Co., 1862.
- Mays, L. W. (yay.haz.), *Ancient Water Technologies*, Berlin: Springer, 2010.
- Mays, L. W. ve Y. Gorokhovich, "Water technology in the ancient American Societies", *Ancient Water Technologies*, (yay. haz.) L. W. Mays, 171–200. Berlin: Springer, 2010.
- Mazoyer, M. ve L. Roudart, *A History of World Agriculture: From the Neolithic Age to the Current Crisis*, New York: Monthly Review Press, 2006.
- McCalley, B., *Model T Ford: The Car That Changed the World*, Iola, Wisconsin: Krause Publications, 1994.
- McCartney, A. P., (yay. haz.), "Hunting the Largest Animals: Native Whaling in the Western Arctic and Subarctic", *Studies in Whaling* 3, Edmonton, AB: Canadian Circumpolar Institute, 1995.
- McCloy, S. T., *French Inventions of the Eighteenth Century*, Lexington: University of Kentucky Press, 1952.
- McCullough, D., *The Wright Brothers*, New York: Simon & Schuster, 2015.
- McDougall, I., F. H. Brown ve J. G. Fleagle, "Stratigraphic placement and age of modern humans from Kibish, Ethiopia", *Nature* 433:733–736, 2005.
- McGranahan, G. ve F. Murray (yay. haz.), *Air Pollution and Health in Rapidly Developing Countries*, Londra: Routledge, 2003.
- McHenry, H. M. ve K. Coffing, "Australopithecus to Homo: Transformations in body and mind", *Annual Review of Anthropology* 29:125–146, 2000.
- McKeown, T., *The Modern Rise of Population*, Londra: Arnold, 1976.

- McNeill, J. R., *Something New Under the Sun: An Environmental History of the Twentieth-Century*, New York: W. W. Norton, 2001.
- McNeill, W. H., *The Human Condition*, Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1980.
- McNeill, W. H., *The Age of Gunpowder Empires, 1450–1800*, Washington, DC: American Historical Association, 1989.
- McNeill, W. H., *Berkshire Encyclopedia of World History*, 5 cilt, Great Barrington, Massachusetts: Berkshire Publishing, 2005.
- McShane, C. ve J. A. Tarr, *The Horse in the City*, Baltimore, Maryland: Johns Hopkins University Press, 2007.
- Medeiros, L. C. vd., *Nutritional Content of Game Meat*, Laramie: University of Wyoming, 2001. <http://www.wyomingextension.org/agpubs/pubs/B920R.pdf>.
- Meldrum, R. A. ve C. E. Hilton (yay. haz.), *From Biped to Strider: The Emergence of Modern Human Walking, Running, and Resource Transport*, Berlin: Springer, 2004.
- Mellars, P. A., "The ecological basis of social complexity in the Upper Paleolithic of Southwestern France", *Prehistoric Hunter-Gatherers* içinde, (yay. haz.) T. D. Price ve J. A. Brown, 271–297, Orlando, FL: Academic Press, 1985.
- Mellars, P., "Why did modern human populations disperse from Africa ca. 60000 years ago? A new model", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103:9381–9386, 2006.
- Melosi, M. V., "Energy transition in the nineteenth-century economy", *Energy and Transport* içinde, (yay. haz.) G. H. Daniels ve M. H. Rose, 55–67, Beverly Hills, California: Sage Publications, 1982.
- Melville, H., *Moby-Dick or the Whale*, New York: Harper & Brothers, 1851.
- Mendels, F. F., "Proto-industrialization: The first phase of the industrialization process", *Journal of Economic History* 32:241–261, 1972.
- Mendelssohn, K., *The Riddle of the Pyramids*, Londra: Thames and Hudson, 1974.
- Mensch, Gerhard, *Stalemate in Technology*, Cambridge, Massachusetts: Ballinger, 1979.
- Mercer, D., *The Telephone: The Life Story of a Technology*, New York: Greenwood Publishing Group, 2006.
- Merrill, A. L. ve B. K. Watt, *Energy Value of Foods: Basis and Derivation*, Washington, DC: United States Department of Agriculture, 1973.
- Meyer, J. H., *Kraft aus Wasser: Vom Wasserrad zur Pumpturbine*, Innertkirchen: Kraftwerke Oberhasli, 1975.
- Mill, J. S., *The Panama Canal: A History and Description of the Enterprise*, New York: Sully & Kleinteich, 1913.
- Minchinton, W., "Wind power", *History Today* 30 (3): 31–36, 1980.
- Minchinton, W. ve P. Meigs, "Power from the sea", *History Today* 30 (3): 42–46, 1980.
- Minetti, A. E., "Efficiency of equine express postal systems", *Nature* 426: 785–786, 2003.
- Minetti, A. E. vd., "Energy cost of walking and running at extreme uphill and downhill slopes", *Journal of Applied Physiology* 93:1039–1046, 2002.
- Mir-Babaev, M. F., *Kratkaia khronologiia istorii azerbaidzhanskogo neftiianogo dela. Baku: Sabakh*, 2004.
- Mitchell, W. A., *Outlines of the World's Military History*, Harrisburg, Pennsylvania: Military Service Publishing, 1931.
- mobForge, *Global mobile statistics 2014*, 2015. <https://mobiforge.com/research-analysis/global-mobile-statistics-2014-part-a-mobile-subscribers-handset-market-share-mobile-operators>.
- Mokyr, J., *Industrialization in the Low Countries, 1795–1850*, 1976. New Haven, CT: Yale University Press, 1976.

- Mokyr, J., *The Gifts of Athena: Historical Origins of the Knowledge Economy*, Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 2002.
- Mokyr, J., *The Enlightened Economy: An Economic History of Britain 1700–1850*, New Haven, CT: Yale University Press, 2009.
- Molenaar, A., *Water Lifting Devices for Irrigation*, Roma: FAO, 1956.
- Moore, G., “Cramming more components onto integrated circuits”, *Electronics* 38 (8): 114–117, 1965.
- Moore, G. E., “Progress in digital integrated electronics”, *Technical Digest, IEEE International Electron Devices Meeting*, 11–13, 1975.
- Morgan, R., *Farm Tools, Implements, and Machines in Britain: Pre-history to 1945*, Reading: University of Reading and the British Agricultural History Society, 1984.
- Moritz, L. A., *Grain-Mills and Flour in Classical Antiquity*, Oxford: Clarendon Press, 1958.
- Moritz, M., *The Little Kingdom: The Private Story of Apple Computer*, New York: W. Morrow, 1984.
- Morrison, J. S. ve J. F. Coates, *The Athenian Trireme*, Cambridge: Cambridge University Press, 1986.
- Morrison, J. S., J. F. Coates ve B. Rankov, *The Athenian Trireme: The History and Reconstruction of an Ancient Greek Warship*, Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- Morrison, J. S. ve R. Gardiner (yay. haz.), *The Age of the Galley: Mediterranean Oared Vessels since Pre-Classical Times*, Londra: Conway Maritime, 1995.
- Morton, H., *The Wind Commands: Sailors and Sailing Ships in the Pacific*, Vancouver: University of British Columbia Press, 1975.
- Mozley, J. H., *Statius, Silvae: Thebaid I–IV*, Londra: William Heinemann, 1928.
- Mukerji, C., *From Graven Images: Patterns of Modern Materialism*, New York: Columbia University Press, 1981.
- Muldrew, C., *Food, Energy and the Creation of Industriousness: Work and Material Culture in Agrarian England, 1550–1780*, Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- Muller, G. ve K. Kauppert, “Performance characteristics of water wheels”, *Journal of Hydraulic Research* 42:451–460, 2004.
- Müller, L., *A History of Thermodynamics: The Doctrine of Energy and Entropy*, Berlin: Springer, 2007.
- Müller, W., *Die Wasserräder*, Detmold: Moritz Schäfer, 1939.
- Mumford, L., *Technics and Civilization*, New York: Harcourt, Brace & Company, 1934.
- Mumford, L., *The City in History: Its Origins, Its Transformations, and Its Prospects*, New York: Harcourt, Brace & World, 1961.
- Mumford, L., *Technics and Human Development*, New York: Harcourt, Brace & World, 1967.
- Mundlak, Y., “Economic growth: Lessons from two centuries of American agriculture”, *Journal of Economic Literature* 43:989–1024, 2005.
- Murdock, G. P., “Ethnographic atlas”, *Ethnology* 6:109–236, 1967.
- Murphy, D. J., *People, Plants, and Genes: The Story of Crops and Humanity*, Oxford: Oxford University Press, 2007.
- Murphy, D. J. ve C. A. S. Hall, “EROI or energy return on (energy) invested”, *Annals of the New York Academy of Sciences* 1185:102–118, 2010.
- Murra, J. V., *The Economic Organization of the Inka State*, Greenwood, CT: JAO Press, 1980.
- Musket, D., “Experiments on wootz or Indian steel”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences* 95:175, 1804.
- Mushrush, G. W. vd., “Use of surplus napalm as an energy source”, *Energy Sources* 22:147–155, 2000.

- Mussatti, D. C., *Coke Ovens: Industry Profile*, Research Triangle Park, NC: U.S. Environmental Protection Agency, 1998.
- Musson, A. E., *The Growth of British Industry*, New York: Holmes & Meier, 1978.
- Nagata, T., *Japan's Policy on Energy Conservation*, Tokyo: Ministry of Economy, Trade and Industry, 2014. http://www.meti.go.jp/english/policy/energy_environment/.
- Napier, J. R., *The Roots of Mankind*, Washington, DC: Smithsonian Institution Press, 1970.
- National Coal Mining Museum, *National Coal Mining Museum for England*, 2015. <https://www.ncm.org.uk>.
- National Geographic Society, *Pearl Harbor ships and planes*, 2001. http://www.nationalgeographic.com/pearlharbor/history/pearlharbor_facts.html.
- Naville, E., *The Temple of Deir el Bahari*, VI. kısım, Londra: The Egyptian Exploration Fund, 1908.
- Needham, J., *The Development of Iron and Steel in China*, Londra: The Newcomen Society, 1964.
- Needham, J., *Science and Civilisation in China*, c. 4, II. kısım, *Physics and Physical Technology*, Cambridge: Cambridge University Press, 1965.
- Needham, J. vd., *Science and Civilisation in China*, 7 cilt, Cambridge: Cambridge University Press, 1954–2015.
- Needham, J., vd., *Science and Civilisation in China*, c. 4, III. kısım, *Civil Engineering and Nautics*, Cambridge: Cambridge University Press, 1971.
- Needham, J., vd., *Science and Civilisation in China*, c. 5, VII. kısım, *Military Technology: The Gunpowder Epic*, Cambridge: Cambridge University Press, 1986.
- Nef, J. U., *The Rise of the British Coal Industry*, Londra: G. Routledge, 1932.
- Nelson, W. H., *Small Wonder: The Amazing Story of the Volkswagen Beetle*, Cambridge, Massachusetts: Robert Bentley, 1998.
- Nesbitt, M. ve G. Prance, *The Cultural History of Plants*, Londra: Taylor & Francis, 2005.
- Newhall, B., *The History of Photography: From 1839 to the Present*, New York: Museum of Modern Art, 1982.
- Newitt, M., *A History of Portuguese Overseas Expansion, 1400–1668*, Londra: Routledge, 2005.
- Nicholson, J., *Operative Mechanic, and British Machinist*, Londra: Knight and Lacey, 1825.
- Niel, F., *Dolmens et menhirs*, Paris: Presses Universitaires de France, 1961.
- Nishiyama, M. ve G. Groemer, *Edo Culture: Daily Life and Diversions in Urban Japan, 1600–1868*, Honolulu: University of Hawaii Press, 1997.
- NOAA, *Trends in atmospheric carbon dioxide*, 2015. ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/co2_annmean_mlo.txt.
- Noelker, K. ve J. Ruether, *Low energy consumption ammonia production: Baseline energy consumption, options for energy optimization*. Nitrogen + Syngas Conference 2011, Düsseldorf, 2011. http://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/fileadmin/documents/publications/Nitrogen-Syngas-2011/Low_Energy_Consumption_Ammonia_Production_2011_paper.pdf.
- Noguchi, Tatsuo ve Toshishige Fujii, "Minimizing the effect of natural disasters", *Japan Railway & Transport Review* 23:52–59, 2000.
- Nordhaus, W. D., *Do Real-Output and Real-Wage Measures Capture Reality? The History of Lighting Suggests Not*, New Haven, CT: Cowles Foundation for Research in Economics at Yale University, 1998.
- Norenzayan, A., *Big Gods: How Religion Transformed Cooperation and Conflict*, Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 2013.
- Norgan, N. G., vd., "The energy and nutrient intake and the energy expenditure of 204 New Guinean adults", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences* 268:309–348.

- Norris, J., *Early Gunpowder Artillery: 1300–1600*, Marlborough: Crowood Press, 2003.
- North American Electric Reliability Corporation, *State of Reliability 2015*, 2015. <http://www.nerc.com/pa/RAPA/PA/Performance%20Analysis%20DL/2015%20State%20of%20Reliability.pdf>.
- Noyce, Robert N., *Semiconductor Device-and-Lead Structure*, U.S. Patent 2,981,877, 25 Nisan 1961, Washington, DC: USPTO, 1961.
- Nutrition Value, *Nutrition value*, 2015. <http://www.nutritionvalue.org>.
- Nye, D. E., *Electrifying America: Social Meaning of a New Technology*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1992.
- Nye, D. E., *America's Assembly Line*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2013.
- Oberg, E., vd., *Machinery's Handbook*, 29. basım, South Norwalk, CT: Industrial Press, 2012.
- O'Brien, P. (yay. haz.), *Railways and the Economic Development of Western Europe, 1830–1914*, New York: St. Martin's Press, 1983.
- Odend'hal, S., "Energetics of Indian cattle in their environment", *Human Ecology* 1:3–22, 1972.
- Odum, H. T., *Environment, Power, and Society*, New York: Wiley-Interscience, 1971.
- Okigbo, B. N., *Improved Production Systems as an Alternative to Shifting Cultivation*, Roma: FAO, 1984.
- Oklahoma State University, *Horses*, 2015. <http://www.ansi.okstate.edu/breeds/horses>.
- Oleson, J. P., *Greek and Roman Mechanical Water-Lifting Devices: The History of a Technology*, Toronto: University of Toronto Press, 1984.
- Oleson, J. P. (yay. haz.), *The Oxford Handbook of Engineering and Technology in the Classical World*, Oxford: Oxford University Press, 2008.
- Oliveira, A. R. E., *A History of the Work Concept: From Physics to Economics*, Dordrecht: Springer, 2014.
- Olivier, J. G. J., *Trends in Global CO₂ Emissions: 2014 Report*, Lahey: Netherlands Environmental Assessment Agency, 2014. http://edgar.jrc.ec.europa.eu/news_docs/jrc-2014-trends-in-global-co2-emissions-2014-report-93171.pdf.
- Olson, M., *The Rise and Fall of Nations*, New Haven, CT: Yale University Press, 1982.
- Olsson, F., *Järnhantens dynamik: Produktion, lokalisering och agglomerationer i Bergslagen och Mellansverige 1368–1910*, Umeå: Umeå Studies in Economic History, 2007.
- Olsson, M. ve P. Svensson (yay. haz.), *Growth and Stagnation in European Historical Agriculture*, Turnhout: Brepols, 2011.
- Ohno, T., *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*, Cambridge, Massachusetts: Productivity Press, 1988.
- OPEC (Organization of Petroleum Exporting Countries), *Who gets what from imported oil?*, 2015. http://www.opec.org/opec_web/en/publications/341.htm.
- Orme, B., "The advantages of agriculture", *Hunters, Gatherers and First Farmers beyond Europe*, (yay. haz.) J. V. S. Megaw, 41–49, Leicester: Leicester University Press, 1977.
- Orwell, G., *The Road to Wigan Pier*, Londra: Victor Gollancz, 1937.
- Osirisnet, *Djehutyhotep*, 2015. http://www.osirisnet.net/tombes/el_bersheh/djehoutyhotep/e_djehoutyhotep_02.htm.
- Ostwald, W., *Der energetische Imperativ*, Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft, 1912.
- Outram, A. K., vd., "The earliest horse harnessing and milking", *Science* 323:1332–1335, 2009.
- Ovitt, G., *The Restoration of Perfection: Labor and Technology in Medieval Culture*, New Brunswick, New Jersey: Rutgers University Press, 1987.
- Owen, D., *Copies in Seconds*, New York: Simon and Schuster, 2004.
- Pacey, A., *Technology in World Civilization*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1990.

- Palgrave Macmillan (yay. haz.), *International Historical Statistics*, Londra: Palgrave Macmillan, 2013. <http://www.palgraveconnect.com/pc/connect/archives/ihs.html>.
- Pan, W. vd., "Urban characteristics attributable to density-driven tie formation", *Nature Communications*, 2013. <http://hdl.handle.net/1721.1/92362>.
- Park, J. ve T. Rehren, "Large-scale 2nd and 3rd century AD bloomery iron smelting in Korea", *Journal of Archaeological Science* 38:1180–1190, 2011.
- Parker, G., *The Military Revolution: Military Innovation and the Rise of the West, 1500–1800*, Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- Parker, G. (yay. haz.), *The Cambridge History of Warfare*, Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- Parris, H. S., M.-C. Daunay ve J. Janick, "Occidental diffusion of cucumber (*Cucumis sativus*) 500–1300 CE: Two routes to Europe", *Annals of Botany* 109: 117–126, 2012.
- Parrott, A., *The Tower of Babel*, Londra: SCM Press, 1955.
- Parsons, J. T., "The role of chinampa agriculture in the food supply of Aztec Tenochtitlan", *Cultural Change and Continuity* içinde, (yay. haz.) C. Clelland, 233–257, New York: Academic Press, 1976.
- Parsons, R. H., *The Development of Parsons Steam Turbine*, Londra: Constable & Co., 1936.
- Patton, P., *Bug: The Strange Mutations of the World's Most Famous Automobile*, Cambridge, Massachusetts: Da Capo Press, 2004.
- Patwardhan, S., *Change among India's Harijans*, New Delhi: Orient Longman, 1973.
- Pearson, P. J. G. ve T. J. Foxon, "A low carbon industrial revolution? Insights and challenges from past technological and economic transformations", *Energy Policy* 50:117–127, 2012.
- Pentzer, W. T., "The giant job of refrigeration", *USDA Yearbook* içinde, 123–138, Washington, DC: USDA, 1966.
- Perdue, P. C., *Exhausting the Earth: State and Peasant in Hunan, 1500–1850*, Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1987.
- Perdue, P. C., *China Marches West: The Qing Conquest of Central Asia*, Cambridge, Massachusetts: Belknap Press of Harvard University Press, 2005.
- Perkins, D. S., *Agricultural Development in China, 1368–1968*, Chicago: University of Chicago Press, 1969.
- Perkins, S., "Earth is only just within the Sun's habitable zone", *Nature*, 2013. doi:10.1038/nature.2013.14353
- Perlin, J., *Forest Journey: The Story of Wood and Civilization*, Woodstock, VT: Countryman Press, 2005.
- Perrodon, A., *Histoire des Grandes Decouvertes Petrolieres*, Paris: Elf Aquitaine, 1985.
- Pessaroff, N., "An electric idea. ... Edison's electric pen", *Pen World International* 15 (5): 1–4, 2002.
- Pétillon, J.-M. vd., "Hard core and cutting edge: Experimental manufacture and use of Magdalenian composite projectile tips", *Journal of Archaeological Science* 38:1266–1283, 2011.
- Petroski, H., "On dating inventions", *American Scientist* 81:314–318, 1993.
- Petroski, H., "Moving obelisks", *American Scientist* 99:448–451, 2011.
- Pfau, T. vd., "Modern riding style improves horse racing times", *Science* 325:289–291, 2009.
- Phocaides, A., *Handbook on Pressurized Irrigation Techniques*, Roma: FAO, 2007.
- Piggott, S., *The Earliest Wheeled Transport*, Ithaca, New York: Cornell University Press, 1983.

- Pimentel, D. vd., *Handbook of Energy Utilization in Agriculture*, Boca Raton, Florida: CRC Press, 1980.
- Pinhasi, R., J. Fort ve A. J. Ammerman, "Tracing the origin and spread of agriculture in Europe", *PLoS Biology* 3:2220–2228, 2005.
- PISA, *PISA 2012 Results*, 2015. <http://www.oecd.org/pisa/keyfindings/pisa-2012-results.htm>.
- Plutarch, *Plutarch's Lives*, çev. B. Perrin, Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1961.
- Pobiner, B. L., "New actualistic data on the ecology and energetics of hominin scavenging opportunities", *Journal of Human Evolution* 80:1–16, 2015.
- Pogue, S., "Use it better: The worst tech predictions of all time", *Scientific American*, 2012. <http://www.scientificamerican.com/article/pogue-all-time-worst-tech-predictions>.
- Polimeni, J. M. vd., *The Jevons Paradox and the Myth of Resource Efficiency Improvements*, Londra: Earthscan, 2008.
- Polmar, N., *Aircraft Carriers: A History of Carrier Aviation and Its Influence on World Events*, c. 1., 1909–1945, Lincoln, NB: Potomac Press, 2006.
- Polmar, N. ve T. B. Allen, *Rickover: Controversy and Genius*, New York: Simon and Schuster.
- Pomeranz, K., "Political economy and ecology on the eve of industrialization: Europe, China, and the global conjuncture", *American Historical Review* 107:425–446, 2002.
- Ponting, C., *A New Green History of the World: The Environment and the Collapse of Great Civilizations*, New York: Penguin Books, 2007.
- Pope, F. L., *Evolution of the Electric Incandescent Lamp*, New York: Bosch & Wefer, 1894.
- Pope, S. T., "A study of bows and arrows", University of California Publications, *American Archaeology and Ethnology* 13:329–414 içinde, 1923.
- Prager, F. D. ve G. Scaglia, Brunelleschi: Studies of His Technology and Inventions, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1970.
- Pratap, A. ve J. Kumar, *Biology and Breeding of Food Legumes*, Wallingford: CAB, 2011.
- Price, T., "The Mesolithic of Northern Europe", *Annual Review of Anthropology* 20:211–233, 1991.
- Price, T. D. ve O. Bar-Yosef, "The origins of agriculture: New data, new ideas", *Current Anthropology* 52 (Ek): S163–S174, 2011.
- Prigogine, I., *Étude thermodynamique des phénomènes irréversibles*, Paris: Dunod, 1947.
- Prigogine, I., *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*, New York: Interscience, 1961.
- Prost, Antoine, "Public and private spheres in France", *A History of Private Life* içinde, c. 5, (yay. haz.) Antoine Prost ve Gérard Vincent., 1–103. Cambridge, Massachusetts: Belknap Press of Harvard University Press, 1991.
- Protzen, J.-P., *Inca Architecture and Construction at Ollantaytambo*, Oxford: Oxford University Press, 1993.
- Pryor, F. L., "Causal theories about the origin of agriculture", *Research in Economic History* 8:93–124, 1983.
- Pryor, A. J. E. vd., "Plant foods in the Upper Palaeolithic at Dolní Vestonice? Parenchyma redux", *Antiquity* 87 (338): 971–984, 2013.
- Quick, D., *World record 1,626 miles on one tank of diesel*, 2012. <http://www.gizmag.com/tank-diesel-distance-world-record/22488>.
- Raepsaet, G., "Land transport, part 2: Riding, harnesses, and vehicles", *The Oxford Handbook of Engineering and Technology in the Classical World* içinde, (yay. haz.) J. P. Oleson, 580–605. Oxford: Oxford University Press, 2008.

- Rafique, I., vd., "Energy efficiency improvements in ammonia production: Perspectives and uncertainties", *Energy* 30:2487–2504, 2005.
- Raghavan, B. ve J. Ma, "The energy and emergy of the Internet", *Hotnets '11*: 1–6, 2011. <http://www1.icsi.berkeley.edu/~barath/papers/emergy-hotnets11.pdf>.
- Ramelli, A., *Le diverse et artificiose machine*, çev. M. Teach Gnudi, Baltimore, Maryland: Johns Hopkins University Press, 1976 (1588).
- Ranaweera, M. P., "Ancient stupas in Sri Lanka: Largest brick structure sin the world", *Construction History Society Newsletter* 70:1–19, 2004.
- Rankine, W. J. M., *Useful Rules and Tables Relating to Mensuration, Engineering Structures and Machines*, Londra: G. Griffin & Co., 1866.
- Rapoport, B. I., "Metabolic factors limiting performance in marathon runners", *PLoS Computational Biology* 6:1–13, 2010.
- Rappaport, R. A., *Pigs for the Ancestors*, New Haven, CT: Yale University Press, 1968.
- Ratcliffe, M., *Liquid Gold Ships: A History of the Tanker, 1859–1984*, Londra: Lloyd's of London Press, 1985.
- Rea, M. S. (yay. haz.), *IESNA Handbook*, New York: Illuminating Engineering Society of North America, 2000.
- Reader, J., *Propitious Esculent: The Potato in World History*, New York: Random House, 2008.
- Recht, R., *Believing and Seeing: The Art of Gothic Cathedrals*, Chicago: University of Chicago Press, 2008.
- Reid, T. R., *The Chip: How Two Americans Invented the Microchip and Launched a Revolution*, New York: Simon and Schuster, 2001.
- REN21, *Renewables 2016 Global Status Report*, Paris: REN21, 2016. http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_KeyFindings1.pdf.
- Revel, J., "Capital city's privileges: Food supply in early-modern Rome", *Food and Drink in History* içinde, (yay. haz.) R. Foster ve O. Ranum, 37–49, Baltimore, Maryland: Johns Hopkins University Press.
- Revelle, R. ve H. E. Suess, "Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO₂ during the past decades", *Tellus* 9:18–27, 1957.
- Reynolds, J., *Windmills and Watermills*, Londra: Hugh Evelyn, 1970.
- Reynolds, S. C. ve A. Gallagher (yay. haz.), *African Genesis: Perspectives on Hominin Evolution*, Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- Reynolds, T. S., "Scientific influences on technology: The case of the overshot waterwheel, 1752–1754", *Technology and Culture* 20:270–295, 1979.
- Reynolds, T. S., *Stronger Than a Hundred Men: A History of the Vertical Water Wheel*, Baltimore, Maryland: Johns Hopkins University Press, 1983.
- Rhodes, J. A. ve S. E. "Churchill, Throwing in the Middle and Upper Paleolithic: inferences from an analysis of humeral retroversion", *Journal of Human Evolution* 56:1–10, 2009.
- Ricci, M., *Il genio di Brunelleschi e la costruzione della Cupola di Santa Maria del Fiore*, Livorno: Casa Editrice Sillabe, 2014.
- Richerson, P.J., R. Boyd ve R. L. Bettinger, "Was agriculture impossible during the Pleistocene but mandatory during the Holocene? A climate change hypothesis", *American Antiquity* 66:387–411, 2001.
- Richmond, B. G. vd., "Origin of human bipedalism: The knuckle-walking hypothesis revisited", *Yearbook of Physical Anthropology* 44:71–105, 2001.
- Rickman, G. E., "The grain trade under the Roman Empire", *Memoirs from the American Academy in Rome* 36:261–276, 1980.

- Riehl, S., M. Zeidi ve N. J. Conard, "Emergence of agriculture in the foothills of the Zagros Mountains of Iran", *Science* 341:65–67, 2013.
- Righter, R. W., *Wind Energy in America: A History*, Norman: University of Oklahoma Press, 2008.
- Rindos, D., *The Origins of Agriculture: An Evolutionary Perspective*, Orlando, Florida: Academic Press, 1984.
- Robson, G., *Magnificent Mercedes: The History of the Marque*, New York: Bonanza Books, 1983.
- Roche, D., *A History of Everyday Things: The Birth of Consumption in France, 1600–1800*, Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- Rockström, J. vd., "A safe operating space for humanity", *Nature* 461:472–475, 2009.
- Rogin, L., *The Introduction of Farm Machinery*, Berkeley: University of California Press, 1931.
- Rollins, A., *The Fall of Rome: A Reference Guide*, Jefferson, NC: McFarland & Co., 1983.
- Rolt, L.T.C., *Thomas Newcomen: The Prehistory of the Steam Engine*, Dawlish: David and Charles, 1963.
- Rose, D. J., "Nuclear eclectic power", *Science* 184:351–359, 1974.
- Rosen, W., *The Most Powerful Idea in the World: The Story of Steam, Industry, and Invention*, Chicago: University of Chicago Press, 2012.
- Rosenberg, N., "America's rise to woodworking leadership", *America's Wooden Age: Aspects of Its Early Technology* içinde, (yay. haz.) B. Hindle, 37–62, Tarrytown, Philadelphia: Sleepy Hollow Restorations.
- Rosenberg, N. ve L. E. Birdzell, *How the West Grew Rich: The Economic Transformation of the Industrial World*, New York: Basic Books, 1986.
- Rosenblum, N., *A World History of Photography*, New York: Abbeville Press, 1997.
- Rostow, W. W., *The Stages of Economic Growth*, Cambridge: Cambridge University Press, 1965.
- Rostow, W. W., *The Stages of Economic Growth: A Non-Communist Manifesto*, Cambridge: Cambridge University Press, 1971.
- Rothenberg, B. ve F. G. Palomero, "The Rio Tinto enigma—no more", *IAMS* 8:1–6, 1986. https://www.ucl.ac.uk/iams/newsletter/accordion/journals/iams_08/iams_8_1986_rothenberg_palomero.
- Rouse, J. E., *World Cattle*, Norman: University of Oklahoma Press, 1970.
- Rousmaniere, P. ve N. Raj, "Shipbreaking in the developing world: Problems and prospects", *International Journal of Occupational and Environmental Health* 13:359–368, 2007.
- Rowland, F. S., "Chlorofluorocarbons and the depletion of stratospheric ozone", *American Scientist* 77:36–45, 1989.
- Rubio, M. ve M. Folchi, "Will small energy consumers be faster in transition? Evidence from early shift from coal to oil in Latin America", *Energy Policy* 50:50–61, 2012.
- Ruddle, K. ve G. Zhong, *Integrated Agriculture-Aquaculture in South China*, Cambridge: Cambridge University Press, 1988.
- Ruff, C. B. vd., "Gradual decline in mobility with the adoption of food production in Europe", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112:7147–7152.
- RWEDP (Regional Wood Energy Development Programme in Asia), *Regional Study of Wood Energy Today and Tomorrow*, Roma: FAO-RWEDP, 1997. <http://www.rwedp.org/fd50.html>.
- Ryder, H. W., H. J. Carr ve P. Herget, "Future performance in footracing", *Scientific American* 224 (6): 109–119, 1976.

- Sagui, C. L., "Le meunerie de Barbegal (France) et les roués hydrauliques les anciens et au moyen âge", *Isis* 38:225-231, 1948.
- Sahlins, M., *Stone Age Economics*, Chicago: Aldine, 1972.
- Salkield, L. U., "Ancient slags in the wouth west of the Iberian Peninsula", Altıncı Uluslararası Madencilik Kongresi'ne sunum, Madrid, Haziran 1970.
- Salzman, P. C., *Pastoralists: Equality, Hierarchy, and the State*, Boulder, Colorado: West-view Press, 2004.
- Samedov, V. A., *Neft i ekonomika Rossii: 80-90e gody XIX veka*, Baku: Elm, 1988.
- Sanders, W. T., J. R. Parsons ve R. S. Santley, *The Basin of Mexico: Ecological Processes in the Evolution of a Civilization*, New York: Academic Press, 1979.
- Sanz, M., J. Call ve C. Boesch (yay. haz.), *Tool Use in Animals: Cognition and Ecology*, Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- Sarkar, D., *Thermal Power Plant: Design and Operation*, Amsterdam: Elsevier, 2015.
- Sasada, T. ve A. Chunag, "İrom smelting in the nomadic empire of Xiongnu in ancient Mongolia", *ISIJ International* 54:1017-1023, 2014.
- Savage, C. I., *An Economic History of Transport*, Londra: Hutchinson, 1959.
- Schlebecker, J. T., *Whereby We Thrive*, Ames: Iowa State University Press, 1975.
- Schmidt, M. J., "Working elephants", *Scientific American* 274 (1): 82-87, 1996.
- Schmidt, P. ve D. H. Avery, "Complex iron smelting and prehistoric culture in Tanzania", *Science* 201:1085-1089, 1978.
- Schobert, H. H., *Energy and Society: An Introduction*, Boca Raton, Florida: CRC Press, 2014.
- Schram, W. D., *Greek and Roman Siphons*, 2014. <http://www.romanaqueducts.info/siphons/siphons.htm>.
- Schumpeter, J. A., *Business Cycle: A Theoretical and Statistical Analysis of the Capitalist Processes*, New York: McGraw-Hill, 1939.
- Schurr, S. H. ve B. C. Netschert, *Energy in the American Economy 1850-1975*, Baltimore, Maryland: Johns Hopkins University Press, 1960.
- Schurr, S. H. vd., *Electricity in the American Economy: Agent of Technological Progress*, New York: Greenwood Press, 1990.
- Schurz, W. L., *The Manila Galleon*, New York: E. P. Dutton, 1939.
- Scott, D. A., *Copper and Bronze in Art: Corrosion, Colorants, Conservation*, Los Angeles: Getty Conservation Institute, 2002.
- Scott, R. A., *Gothic Enterprise A Guide to Understanding the Medieval Cathedral*, Berkeley: University of California Press, 2011.
- Seaborg, G. T., "Opening Address", *Peaceful Uses of Atomic Energy: Proceedings of the Fourth International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy* içinde, 29-35. New York: Birleşmiş Milletler, 1972.
- Seavoy, R. E., *Famine in Peasant Societies*, New York: Greenwood Press, 1986.
- Seeböhm, M. E., *The Evolution of the English Farm*, Londra: Allen & Unwin, 1927.
- comte de Ségur, P.-P., *History of the Expedition to Russia, Undertaken by Emperor Napoleon, in the Year 1812*, Londra: Treuttel and Würtz, 1825.
- Self, *Nuts, brazilnuts. Dried, unblanched*, Self.com, 2015. <http://nutritiondata.self.com/facts/nut-and-seed-products/3091/2>.
- Sellin, H. J., "The large Roman water mill at Barbégal (France)", *History and Technology* 8:91-109, 1983.
- Senancour, E. P., *Obermann*, çev. J. D. Frothingham, Cambridge: Riverside Press, 1901 (1804).
- Sexton, A. H., *Fuel and Refractory Materials*, Londra: Vlackie and Son, 1897.
- Sharma, R., *Wheat Cultivation Practices: With Special Reference to Nitrogen and Weed Management*, Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2012.

- Shannon, C. E., "A mathematical theory of communication", *Bell System Technical Journal* 27:379–423, 623–656, 1948.
- Sheehan, G. W., "Whaling as an organizing focus in Northwestern Eskimo society", *Prehistoric Hunter-Gatherers* içinde, (yay. haz.) T. D. Price ve J. A. Brown, 123–154, Orlando, Florida: Academic Press, 1985.
- Sheldon, C. D., *The Rise of the Merchant Class in Tokugawa Japan, 1600–1868: An Introductory Survey*, New York: J. J. Augustin, 1958.
- Shen, T. H., *Agricultural Resources of China*, Ithaca, NY: Cornell University Press, 1951.
- Shift Project, *Redesigning Economy to Achieve Carbon Transition*, 2015. <http://www.theshiftproject.org>.
- Shockley, W., "Transistor technology evokes new physics", *Nobel Lectures: Physics 1942–1962* içinde, 344–374, Amsterdam: Elsevier, 1964.
- Shulman, P. A., *Coal and Empire: The Birth of Energy Security in Industrial America*, Baltimore, Maryland: Johns Hopkins University Press, 2015.
- Sieferle, R. P., *The Subterranean Forest*, Cambridge: White Horse Press, 2001.
- Siemens, C. W., "Electric lighting, the transmission of force by electricity", *Nature* 27:67–71, 1882.
- Sierra-Macías, M. vd., "Caracterización agronómica, calidad industrial y nutricional de maíz para el trópico mexicano", *Agronomía Mesoamericana* 21:21–29, 2010.
- Sillitoe, P., "Always been farmer-foragers? Hunting and gathering in the Papua New Guinea Highlands", *Anthropological Forum* 12:45–76, 2002.
- Silver, C., *Guide to the Horses of the World*, Oxford: Elsevier Phaidon, 1976.
- Simons, G., *Comet! The World's First Jet Airliner*, Barnsley: Pen and Sword Books, 2014.
- Singer, C. vd., (yay. haz.) *A History of Technology*, 5 cilt, Oxford: Oxford University Press, 1954–1958.
- Singer, J. D. ve M. Small, *The Wages of War 1816–1965: A Statistical Handbook*, New York: John Wiley, 1972.
- Sinor, D., "The Mongols in the West", *Journal of Asian History* 33:1–44, 1999.
- Sittauer, H. L., *Gebändigte Explosionen*, Berlin: Transpress Verlag für Verkehrswesen, 1972.
- Sitwell, N. H., *Roman Roads of Europe*, New York: St. Martin's Press, 1981.
- Siuru, B., "Horsepower to the people", *Mechanical Engineering (New York)* 111 (2): 42–46, 1989.
- Skilton, C. P., *British Windmills and Watermills*, Londra: Collins, 1947.
- Slicher van Bath, B. H., *The Agrarian History of Western Europe, A.D. 500–1850*, Londra: Arnold, 1963.
- Smeaton, J., "An experimental enquiry concerning the natural power of water and wind to turn mills, and other machines, depending on a circular motion", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 51:100–174, 1759.
- Smil, V., *China's Energy*, New York: Praeger, 1976.
- Smil, V., "China's food", *Food Policy* 6:67–77, 1981.
- Smil, V., *Biomass Energies*, New York: Plenum Press, 1983.
- Smil, V., *Carbon Nitrogen Sulfur: Human Interference in Grand Biospheric Cycles*, New York: Plenum Press, 1985.
- Smil, V., *Energy Food Environment*, Oxford: Oxford University Press, 1987.
- Smil, V., *Energy in China's Modernization*, Armonk, New York: M. E. Sharpe, 1988.
- Smil, V., *General Energetics*, New York: John Wiley, 1991.
- Smil, V., *Energy in World History*, Boulder, Colorado: Westview, 1994.
- Smil, V., *Cycles of Life*, New York: Scientific American Library, 1997.
- Smil, V., "Energy in the twentieth century: Resources, conversions, costs, uses, and consequences", *Annual Review of Energy and the Environment* 25:21–51, 2000a.

- Smil, V., *Feeding the World*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2000b.
- Smil, V., "Jumbo", *Nature* 406:239, 2000c.
- Smil, V., *Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch and the Transformation of World Food Production*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2001.
- Smil, V., *Energy at the Crossroads: Global Perspectives and Uncertainties*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Smil, V., "War and energy", *Encyclopedia of Energy* içinde, (yay. haz.) C. Cleveland vd., c. 6, 363–371. Amsterdam: Elsevier, 2004.
- Smil, V., *Creating the Twentieth Century: Technical Innovations of 1867–1914 and Their Lasting Impact*, New York: Oxford University Press, 2005.
- Smil, V., *Transforming the Twentieth Century: Technical Innovations and Their Consequences*, New York: Oxford University Press, 2006.
- Smil, V., *Energy in Nature and Society: General Energetics of Complex Systems*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2008a.
- Smil, V., *Global Catastrophes and Trends*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2008b.
- Smil, V., *Oil*, Oxford: Oneworld Press, 2008c.
- Smil, V., *Energy Transitions: History, Requirements, Prospects*, Santa Barbara, California: Praeger, 2010a.
- Smil, V., *Prime Movers of Globalization: The History and Impact of Diesel Engines and Gas Turbines*, Cambridge: MIT Press, 2010b.
- Smil, V., *Why America Is Not a New Rome*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2010c.
- Smil, V., *Harvesting the Biosphere: What We Have Taken from Nature*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2013a.
- Smil, V., "Just how polluted is China, anyway?", *The American*, 31 Ocak 2013, 2013b. <http://www.vaclavsmil.com/wp-content/uploads/smil-article-20130131.pdf>.
- Smil, V., *Made in the USA: The Rise and Retreat of American Manufacturing*, Cambridge, MA: MIT Press, 2013c.
- Smil, V., *Should We Eat Meat?*, Chichester: Wiley Blackwell, 2013d.
- Smil, V., "Fifty years of the Shinkansen", *Asia-Pacific Journal: Japan Focus*, 1 Aralık 2014, 2014a. <http://www.vaclavsmil.com/wp-content/uploads/shinkansen.pdf>.
- Smil, V., *Making the Modern World: Materials and Dematerialization*, Chichester: Wiley, 2014b.
- Smil, V., *Natural Gas: Fuel for the 21st Century*, Chichester: Wiley, 2015a.
- Smil, V., *Power Density: A Key to Understanding Energy Sources and Uses*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2015b.
- Smil, V., "Real price of oil", *IEEE Spectrum* 26 (Ekim), 2015c. http://www.vaclavsmil.com/wp-content/uploads/10.OIL_.pdf.
- Smil, V., *Still the Iron Age: Iron and Steel in the Modern World*, Amsterdam: Elsevier, 2016.
- Smith, K., *Biofuels, Air Pollution, and Health: A Global Review*, Berlin: Springer, 2013.
- Smith, K. P. ve A. Ailankumar, *Rice Farming*, Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2012.
- Smith, N., "The origins of the water turbine", *Scientific American* 242 (1): 138–148, 1980.
- Smith, P. C., *Mitsubishi Zero: Japan's Legendary Fighter*, Barnsley: Pen & Sword Books, 2015.
- Smith, N., "Roman hydraulic technology", *Scientific American* 238:154–161, 1978.
- Smythe, R. H., *The Structure of the Horse*, Londra: J. A. Allen & Co., 1967.
- Sobel, D., *Longitude: The True Story of a Lone Genius Who Solved the Greatest Scientific Problem of His Time*, New York: Penguin, 1995.
- Sockol, M. D., D. A. Raichlen ve H. Pontzer, "Chimpanzee locomotor energetics and the origin of human bipedalism", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104:12265–12269, 2007.

- Soddy, F., *Money versus Man: A Statement of the World Problem from the Standpoint of the New Economics*, New York: E. P. Dutton, 1933.
- Soedel, W. ve V. Foley, "Ancient catapults", *Scientific American* 240 (3): 150–160, 1979.
- Solomon, B. D., J. R. Barnes ve K. E. Halvorsen, "Grain and cellulosic ethanol: History, economics, and energy policy", *Biomass and Bioenergy* 31:416–425, 2007.
- Solomon, F. ve R. Q. Marston (yay. haz.), *The Medical Implications of Nuclear War*, Washington, DC: National Academies Press, 1986.
- Sørensen, B., *History of Energy: Northern Europe from the Stone Age to the Present Day*, Londra: Routledge, 2011.
- Speer, A., *Inside the Third Reich: Memoirs*, New York: Macmillan, 1970.
- Spence, K., "Ancient Egyptian chronology and the astronomical orientation of pyramids", *Nature* 408:320–324, 2000.
- Spencer, J. E., *Shifting Cultivation in Southeastern Asia*, Berkeley: University of California Press, 1966.
- Spinardi, G., *From Polaris to Trident: The Development of US Fleet Ballistic Missile Technology*, Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- Sponheimer, M. vd., "Isotopic evidence of early hominin diets", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110:10513–10518, 2013.
- Sprague, G. F. ve J. W. Dudley (yay. haz.), *Corn and Corn Improvement*, Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, 1988.
- Spring-Rice, M., *Working-Class Wives*, Hardmonsworth: Penguin, 1939.
- Spruytte, J., *Études expérimentales sur l'attelage: Contribution à l'histoire du cheval*, Paris: Crépin-Lebond, 1987.
- Stanhill, G., "Trends and deviations in the yield of the English wheat crop during the last 750 years", *Agro-ecosystems* 3:1–10, 1976.
- Stanley, W., "Alternating-current development in America", *Journal of the Franklin Institute* 173:561–580, 1912.
- Starbuck, A., *History of the American Whale Fishery*, Waltham, Massachusetts: A. Starbuck, 1878.
- Stearns, P. N., *The Industrial Revolution in World History*, Boulder, Colorado: Westview Press, 2012.
- Stern, D. I., "Economic growth and energy", *Encyclopedia of Energy* içinde, (yay. haz.) C. Cleveland et al., c. 2, 35–51. Amsterdam: Elsevier, 2004.
- Stern, D. I., *The Role of Energy in Economic Growth*, Canberra: Australian National University, 2010.
- Stewart, I., D. De ve A. Cole, Technology and people: The great job-creating machine, Deloitte, 2015. <http://www2.deloitte.com/uk/en/pages/finance/articles/technology-and-people.html>.
- Stockholm Resilience Center, *The nine planetary boundaries*, 2015. <http://www.stockholm-resilience.org/research/planetary-boundaries/planetary-boundaries/about-the-research/the-nine-planetary-boundaries.html>.
- Stockhuyzen, F., *The Dutch Windmill*, New York: Universe Books, 1963.
- Stoltzenberg, D., *Fritz Haber: Chemist, Nobel Laureate, German, Jew*, Philadelphia: Chemical Heritage Press, 2004.
- Stopford, M., *Maritime Economics*, Londra: Routledge, 2009.
- Straker, E., *Wealden Iron*, New York: Augustus M. Kelley, 1969.
- Strauss, L. L., "Speech to the National Association of Science Writers, New York City", 16 Eylül, aktaran *New York Times*, 17 Eylül, 5, 1954.
- Stross, R. E., *The Microsoft Way: The Real Story of How the Company Outsmarts its Competition*, Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1996.

- Subcommittee on Horse Nutrition (Atların Beslenmesi Alt Komisyonu), *Nutrient Requirements of Horses*, Washington, DC: NAS, 1978.
- Sullivan, R. J., "The revolution of ideas: Widespread patenting and invention during the English Industrial Revolution", *Journal of Economic History* 50:349–362, 1990.
- Swade, D., *Charles Babbage and His Calculating Engines*, Londra: Science Museum, 1991
- Taeuber, I. B., *The Population of Japan*, Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1958.
- Tainter, J. A., *The Collapse of Complex Societies*, New York: Cambridge University Press, 1988.
- Takamatsu, N. vd., "Steel recycling circuit in the world", *Tetsu To Hagane* 100:740–749, 2014.
- Tanaka, Y., "The cyclical sensibility of Edo-period Japan", *Japan Echo* 25 (2): 12–16, 1998.
- Tata Steel, *Tata Steel announces completion of 100 years of its A-F Blast Furnace's existence*, 2011. <http://www.tatasteel.com/UserNewsRoom/usershowcontent.asp?id=785&ctype=PressRelease&REFERER=http://www.tatasteel.com/media/press-release.asp>.
- Tate, K., *America's Moon Rocket Saturn V*, 2009. <http://www.space.com/18422-apollo-saturn-v-moon-rocket-nasa-infographic.html>.
- Tauger, M. B., *Agriculture in World History*, Londra: Routledge, 2010.
- Taylor, A., *A luxury car club is stirring up class conflict in China*, 2013. <http://www.businessinsider.com/chinas-sports-car-club-envy-2013-4>.
- Taylor, C. F., *The Internal-Combustion Engine in Theory and Practice*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1984.
- Taylor, G. R. (yay. haz.), *The Inventions That Changed the World*, Londra: Reader's Digest Association, 1982.
- Taylor, M. J. H. (yay. haz.), *Jane's Encyclopedia of Aviation*, New York: Portland House, 1989.
- Taylor, F. S., *A History of Industrial Chemistry*, New York: Arno Press, 1972.
- Taylor, F. W., *Principles of Scientific Management*, New York: Harper & Brothers, 1911.
- Taylor, N. A. S., "Ethnic differences in thermoregulation: Genotypic versus phenotypic heat adaptation", *Journal of Thermal Biology* 31:90–104, 2006.
- Taylor, N. A. S. ve C. A. Machado-Moreira, "Regional variations in transepidermal water loss, eccrine sweat gland density, sweat secretion rates and electrolyte composition in resting and exercising humans", *Extreme Physiology & Medicine* 2:1–29, 2013.
- Taylor, R., "The polemics of eating fish in Tasmania: The historical evidence revisited", *Aboriginal History* 31:1–26, 2007.
- Taylor, T. S., *Introduction to Rocket Science and Engineering*, Boca Raton, Florida: CRC Press, 2009.
- Telleen, M., *The Draft Horse Primer*, Emmaus, Philadelphia: Rodale Press, 1977.
- Termuehlen, H., *100 Years of Power Plant Development*, New York: ASME Press, 2001.
- Tesla, N., "Electro-magnetic Motor", Specification forming part of Letters 1 Mayıs 1888 tarihli Patent No. 391,968 mektuplarının bir bölümünü oluşturan tanımlama, Washington, DC: U.S. Patent Office, 1888. <http://www.uspto.gov>.
- Testart, A., "The significance of food storage among hunter-gatherers: Residence patterns, population densities, and social inequalities", *Current Anthropology* 23:523–537, 1982.
- Thieme, H., "Lower Paleolithic hunting spears from Germany", *Nature* 385:807–810, 1997.
- Thomas, B., "Was there an energy crisis in Great Britain in the 17th century?", *Explorations in Economic History* 23:124–152, 1986.
- Thomas Edison Papers, *Edison's patents*, 2015. <http://edison.rutgers.edu/patents.htm>.

- Thompson, W. C., *Thompson Releases Report on Fiscal Impact of 9/11 on New York City*, New York: NYC Comptroller, 2002.
- Thomsen, C. J., *Ledetraad til nordisk oldkyndighed*, Kopenhag: L. Mellers, 1836.
- Thomson, K. S., "How to sit on a horse", *American Scientist* 75:69–71, 1987.
- Thomson, E., *The Chinese Coal Industry: An Economic History*, Londra: Routledge, 2003.
- Thomson, W., Binbaşı Baden Baden-Powell'a mektup, 8 Aralık 1896, Lord Kelvin'in yazışmaları, 1896. <http://zapatopi.net/kelvin/papers/letters.html#baden-powell>.
- Thoreau, H. D., *The Journal of Henry David Thoreau, 1837–1861*, Boston: Houghton-Mifflin, 1906.
- Thrupp, L. A. vd., *The Diversity and Dynamics of Shifting Cultivation: Myths, Realities, and Policy Implications*, Washington, DC: World Resources Institute, 1997.
- Thurston, R. H., *A History of the Growth of the Steam-Engine*, New York: D. Appleton Co., 1878.
- Titow, J. Z., *English Rural Society, 1200–1350*, Londra: George Allen and Unwin, 1969.
- Tomaselli, I., *Forests and Energy in Developing Countries*, Roma: FAO, 2007.
- Tomlinson, R., "The invention of e-mail just seemed like a neat idea", *SAP INFO*, 2002. <http://www.sap.info>.
- Tompkins, P., *Secrets of the Great Pyramid*, New York: Harper & Row, 1971.
- Tompkins, P., *Mysteries of Mexican Pyramids*, New York: Harper & Row, 1976.
- Torii, M., "Maximal sweating rate in humans", *Journal of Human Ergology* 24:137–152, 1995.
- Torr, G., *Ancient Ships*, Chicago: Argonaut Publishers, 1964.
- Torrey, V., *Wind-Catchers: American Windmills of Yesterday and Tomorrow*, Brattleboro, VT: Stephen Greene Press, 1976.
- Tresemmer, D., "The Scythe Book", Chambersburg, Philadelphia: Alan C. Hood, 1996.
- Trinkaus, E., "Bodies, brawn, brains and noses: Human ancestors and human predation", *The Evolution of Human Hunting* içinde, (yay. haz.) M. Nitecki ve D. V. Nitecki, 107–145, New York: Plenum, 1987.
- Trinkaus, E., "Early modern humans", *Annual Review of Anthropology* 34:207–230, 2005.
- TsSU (Tsentral'noie statisticheskoe upravlenie), *Narodnoie khoziaistvo SSSR za 60 let*, Moskova: Statistika, 1977.
- Turner, B. L., "The rise and fall of population and agriculture in the Central Maya Lowlands 300 B.C. to present", *Hunger in History* içinde, (yay. haz.) L. F. Newman, 78–211, Oxford: Blackwell, 1990.
- Tvengsberg, P. M., "Rye and swidden cultivation", *Tools and Tillage* 7:131–146, 1995.
- Tyne Built Ships, *Glückauf*, 2015. <http://www.tynebuiltships.co.uk/G-Ships/gluckauf1886.html>.
- UNDP (United Nations Development Programme / Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı), *Human Development Report (İnsani Kalkınma Raporu) 2015*, New York: UNDP, 2015.
- UNESCO, *Head-Smashed-In Buffalo Jump*, 2015a. <http://whc.unesco.org/en/list/158>.
- UNESCO, *Mount Qingcheng and Dujiangyan Irrigation System*, 2015b. <http://whc.unesco.org/en/list/1001>.
- Unger, R., "Energy sources for the Dutch Golden Age", *Research in Economic History* 9:221–253, 1984.
- United Nations Organization (Birleşmiş Milletler Örgütü), "World energy requirements in 1975 and 2000", *Proceedings of the International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy* içinde, c. 1, 3–33, New York: UNO, 1956.
- Upham, C. W. (yay. haz.) *The life of General Washington: First President of the United States*, c. 2, Londra: National Illustrated Library, 1851.

- Urbanski, T., *Chemistry and Technology of Explosives*, New York: Pergamon Press, 1967.
- U.S. Strategic Bombing Survey, *Effects of Air Attack on Urban Complex TokyoKawasaki-Yokohama*, Washington, DC: U.S. Strategic Bombing Survey, 1947.
- USBC (U.S. Bureau of the Census), *U.S. Census of Manufacturers: 1954*, Washington, DC: U.S. GPO, 1954.
- USBC, *Historical Statistics of the United States: Colonial Times to 1970*, Washington, DC: USBC, 1975.
- U.S. Centennial of Flight Commission, *History of Flight*, Washington, DC, 2003.
- U.S. Centennial of Flight Commission. <http://www.centennialofflight.gov/hof/index.htm>.
- USDA (U.S. Department of Agriculture), *Changes in Farm Production and Efficiency*, Washington, DC: USDA, 1959.
- USDA, *National Nutrient Database for Standard Reference*, 2011. <http://ndb.nal.usda.gov>.
- USDA, *Multi-Cropping Practices: Recent Trends in Double Cropping*, Washington, DC: USDA, 2014.
- USDOE (U.S. Department of Energy), *Biodiesel Basics*, 2011. <http://www.afdc.energy.gov/pdfs/47504.pdf>.
- USDOE, *Energy efficiency of LEDs*, 2013. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/led_energy_efficiency.pdf.
- USDOL (U.S. Department of Labor / ABD Çalışma Bakanlığı), *Employment by major industry sector*, 2015. http://www.bls.gov/emp/ep_table_201.htm.
- USEIA (U.S. Energy Information Agency / ABD Enerji Enformasyon Ajansı), *Consumer energy expenditures are roughly 5% of disposable income, below long-term average*, 2014. <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=18471>.
- USEIA, *Annual Coal Report*, 2015a. <http://www.eia.gov/coal/annual>.
- USEIA, *China*, 2015b. <http://www.eia.gov/beta/international/analysis.cfm?iso=CHN>.
- USEIA, *Direct Federal Financial Interventions and Subsidies in Energy in Fiscal Year 2013*, Washington, DC: USEIA, 2015c. <http://www.eia.gov/analysis/requests/subsidy>.
- USEIA, *Energy intensity*, 2015d. <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=92&pid=468&aid=2>.
- USEIA, *Coal*, 2016a. <http://www.eia.gov/coal>.
- USEIA, *U.S. imports from Iraq of crude oil and petroleum products*, 2016b. <https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=p&t=pet&s=mttmiz1&f=a>.
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency), *Photochemical smog*, 2004. http://www.epa.sa.gov.au/files/8238_info_photosmog.pdf.
- USEPA, *Light-Duty Automotive Technology, Carbon Dioxide Emissions, and Fuel Economy Trends: 1975 Through 2015*, 2015. <https://www3.epa.gov/fueleconomy/fetrends/1975-2015/420r15016.pdf>.
- USGS (U.S. Geological Survey), *Commodity statistics and information*, 2015. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity>.
- Usher, A. P., *A History of Mechanical Inventions*, Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1954.
- Utley, F., *Trade Guilds of the Later Roman Empire*, Londra: London School of Economics, 1925.
- Van Beek, G. W., "Arches and vaults in the ancient Near East", *Scientific American* 257 (2): 96–103, 1987.
- van Duijn, J. J., *The Long Wave in Economic Life*, Londra: George Allen & Unwin, 1983.
- Van Noten, F. ve J. Raymaekers, "Early iron smelting in Central Africa", *Scientific American* 258:104–111, 1988.
- Varvoglis, H., *History and Evolution of Concepts in Physics*, Berlin: Springer, 2014.
- Vasko, T., R. Ayres ve L. Fontvieille (yay. haz.), *Life Cycles and Long Waves*, Berlin: Springer-Verlag, 1990.

- Vavilov, N. I., *Origin, Variation, Immunity and Breeding of Cultivated Plants*, Waltham, Massachusetts: Chronica Botanica, 1951.
- Veraverbeke, W. S. ve J. A. Delcour, "Wheat protein composition and properties of wheat glutenin in relation to breadmaking functionality", *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 42:179–208, 2002.
- Versatile, *Versatile*, 2015. <http://www.versatile-ag.ca>.
- Vikingskibs Museet, *Wool sailcloth*, 2016. <http://www.vikingskibsmuseet.dk/en/professions/boatyard/experimental-archaeological-research/maritime-crafts/maritime-technology/woollen-sailcloth>.
- Ville, S. P., *Transport and the Development of European Economy, 1750–1918*, Londra: Macmillan, 1990.
- Villiers, G., *The British Heavy Horse*, Londra: Barrie and Jenkins, 1976.
- Vogel, H. U., "The Great Wall of China", *Scientific American* 268 (6): 116–121, 1993.
- Volkswagen, A. G., *Ivan Hirst*, 2013. http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/en/publications/2013/11/ivan_hirst.bin.html/binarystorageitem/file/VWAG_HN_4_Ivan-Hirst-eng_2013_10_18.pdf.
- von Bertalanffy, L., *General System Theory*, New York: George Braziller, 1968.
- von Braun, W. ve F. I. Ordway, *History of Rocketry and Space Travel*, New York: Thomas Y. Crowell, 1975.
- von Hippel, Frank vd., "Civilian casualties from counterforce attacks", *Scientific American* 259 (3): 36–42, 1988.
- von Tunzelmann, G. N., *Steam Power and British Industrialization to 1860*, Oxford: Clarendon Press, 1978.
- Wailes, R., *Windmills in England: A Study of Their Origin, Development and Future*, Londra: Architectural Press, 1975.
- Waldron, A., *The Great Wall of China*, Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- Walther, R., *Pechelbronn: A la source du pétrole, 1735–1970*, Strasbourg: Hirlé, 2007.
- Walton, S. A. (yay. haz.) *Wind and Water in the Middle Ages: Fluid Technologies from Antiquity to the Renaissance*, Tempe: Arizona Center for Medieval and Renaissance Studies, 2006.
- Walz, W. ve H. Niemann, *Daimler-Benz: Wo das Auto Anfing*, Konstanz: Verlag Stadler, 1997.
- Wang, Z., *A History of Chinese Firearms*, Beijing: Military Science Press, 1991.
- War Chronicle, *Estimated war dead World War II*, 2015. <http://warchronicle.com/numbers/WWII/deaths.htm>.
- Warburton, M., "Barefoot running", *Sportscience* 5 (3): 1–4, 2001.
- Warde, P., *Energy Consumption in England and Wales, 1560–2004*, Napoli: Consiglio Nazionale della Ricerche, 2007.
- Warde, P., "The first industrial revolution", *Power to the People: Energy in Europe Over the Last Five Centuries* içinde, (yay. haz.) A. Kander, P. Malanima ve P. Warde, 129–247, Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 2013.
- Washlaski, R. A., *Manufacture of Coke at Salem No. 1 Mine Coke Works*, 2008. <http://patheoldminer.rootsweb.ancestry.com/coke2.html>.
- Waterbury, J., *Hydropolitics of the Nile Valley*, Syracuse, New York: Syracuse University Press, 1979.
- Watkins, G., "Steam power—an illustrated guide", *Industrial Archaeology* 4 (2): 81–110, 1967.
- Watt, J. 1855 (1769), *Steam Engines*, &c. 29 Nisan 1769. G. E. Eyre ve W. Spottiswoode'nin yeniden bastığı patent. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0d/James_Watt_Patent_1769_No_913.pdf.
- Watters, R. F., *Shifting Cultivation in Latin America*, Roma: FAO, 1971.

- Watts, P., *The Ships of the Royal Navy as They Existed at the Time of Trafalgar*, Londra: Institution of Naval Architects, 1905.
- Wei, J., *Great Inventions that Changed the World*, Hoboken, New Jersey: Wiley, 2012.
- Weissenbacher, M., *Sources of Power: How Energy Forges Human History*, Santa Barbara, California: Praeger, 2009.
- Weisskopf, V. F., "Los Alamos anniversary: 'We meant so well'", *Bulletin of the Atomic Scientists*, Ağustos-Eylül, 24-26, 1983.
- Weller, J. A., *Roman traction systems*, 1999. <http://www.humanist.de/rome/rts>.
- Welsch, R. L., "No fuel like an old fuel", *Natural History* 89 (11): 76-81, 1980.
- Wendel, J. F. vd., "Genes, jeans, and genomes: Reconstructing the history of cotton", *Seventh International Symposium of the International-Organization-of-PlantBiosystematists* içinde, (yay. haz.) L. W. D. VanRaamsdonk ve J. C. M. DenNijs, 133-159, 1999.
- Wesley, J. P., *Ecophysics*, Springfield, Illinois: Charles C. Thomas, 1974.
- Whaples, R., "Child Labor in the United States", *EH.Net Encyclopedia*, 2005. <http://eh.net/encyclopedia/child-labor-in-the-united-states>.
- Wheat Foods Council (Buğday Gıdaları Konseyi), *Wheat facts*, 2015. <http://www.wheatfoods.org/resources/72>.
- Whipp, B. J. ve K. Wasserman, "Efficiency of muscular work", *Journal of Applied Physiology* 26:644-648, 1969.
- White, A., "A global projection of subjective well-being: A challenge to positive psychology?", *Psychtalk* 56:17-20, 2007.
- White, K. D., *Agricultural Implements of the Roman World*, Cambridge: Cambridge University Press, 1967.
- White, K. D., *Roman Farming*, Londra: Thames & Hudson, 1970.
- White, K. D., *Greek and Roman Technology*, Ithaca, New York: Cornell University Press, 1984.
- White, L. A., "Energy and the evolution of culture", *American Anthropologist* 45:335-356, 1943.
- White, L., *Medieval Religion and Technology*, Berkeley: University of California Press, 1978.
- White, P. ve T. Denham (yay. haz.), *The Emergence of Agriculture: A Global View*, Londra: Routledge, 2006.
- Whitmore, T. M. vd., *Long-term population change. In The Earth as Transformed by Human Action*, (yay. haz. B. L. Turner II vd., 25-39, Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- WHO (World Health Organization), *Protein and Amino Acid Requirements in Human Nutrition*, Cenevre: WHO, 2002.
- WHO, *Life expectancy*, 2015a. <http://apps.who.int/gho/data/node.main.688>.
- WHO, *Road traffic injuries*, 2015b. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs358/en>.
- Wier, S. K., "Insight from geometry and physics into the construction of Egyptian Old Kingdom pyramids", *Cambridge Archaeological Journal* 6:150-163, 1996.
- Wikander, Ö., *Exploitation of Water-Power or Technological Stagnation?*, Lund: CWK Gleerup, 1983.
- Wilkins, J. vd., "Evidence for early hafted hunting technology", *Science* 338:942-946, 2012.
- Williams, M., *Deforesting the Earth: From Prehistory to Global Crisis*, Chicago: Chicago University Press, 2006.
- Williams, M. R., *History of Computing Technology*, Los Alamitos, California: IEEE Computer Society, 1997.

- Williams, T., *The History of Invention: From Stone Axes to Silicon Chips*, New York: Facts on File, 1987.
- Wilson, A. M., “Windmills, cattle and railroad: The settlement of the Llano Estacado”, *Journal of the West* 38 (1): 62–67, 1999.
- Wilson, A. M. vd., “Horses damp the spring in their step”, *Nature* 414:895–899, 2001.
- Wilson, C., *The Gothic Cathedral: The Architecture of the Great Church 1130– 1530*, Londra: Thames and Hudson, 1990.
- Wilson, C., “Up-scaling, formative phases, and learning in the historical diffusion of energy technologies”, *Energy Policy* 50:81–94, 2012.
- Wilson, D. G., *Bicycling Science*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2004.
- Winkelmann, R. vd., “Combustion of available fossil fuel resources sufficient to eliminate the Antarctic Ice Sheet”, *Science Advances* 1:e1500589, 2015.
- Winter, T. N., *The Mechanical Problems in the Corpus Aristotle*, Lincoln: University of Nebraska, Classics and Religious Studies Department, 2007.
- Winterhalder, B., R. Larsen ve R. B. Thomas, “Dung as an essential resource in a highland Peruvian community”, *Human Ecology* 2:89–104, 1974.
- Wirfs-Brock, J., *Explore 15 years of power outages*, 2014. <http://insideenergy.org/2014/08/18/data-explore-15-years-of-power-outages/>.
- WNA (World Nuclear Association), *Decommissioning nuclear facilities*, 2014. [http:// www.world-nuclear.org/info/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/decommissioning-nuclear-facilities](http://www.world-nuclear.org/info/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/decommissioning-nuclear-facilities).
- WNA, *Uranium enrichment*, 2015a. <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Conversion-Enrichment-and-Fabrication/Uranium-Enrichment>.
- WNA, *World nuclear power reactors & uranium requirements*, 2015b. <http://www.world-nuclear.org/info/Facts-and-Figures/World-Nuclear-Power-Reactors-and-Uranium-Requirements>.
- Wolfe, D. A. ve A. Bramwell, “Innovation, creativity and governance: Social dynamics of economic performance in city-regions”, *Innovation: Management, Policy & Practice* 10:170–182.
- Wolff, A. R., *The Windmill as Prime Mover*, New York: John Wiley, 1900.
- Wölfel, W., *Das Wasserrad: Technik und Kulturgeschichte*, Wiesbaden: U. Pfiemer, 1987.
- Womack, J. P., D. T. Jones ve D. Roos, *The Machine that Changed the World: The Story of Lean Production*, New York: Simon and Schuster, 1990.
- Wood, W., *All Afloat*, Toronto: Glasgow, Brook & Company, 1922.
- Woodall, F. P., “Water wheels for winding”, *Industrial Archaeology* 16:333–338, 1982.
- Woolfe, J. A., *The Potato in the Human Diet*, Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- World Bank (Dünya Bankası), *Energy use*, 2015a. <http://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.PCAP.KG.OE>.
- World Bank (Dünya Bankası), *Motor vehicles (per 1,000 people)*, 2015b. <http://data.worldbank.org/indicator/IS.VEH.NVEH.P3>.
- World Bank (Dünya Bankası), *Trade*, 2015c. <http://data.worldbank.org/indicator/NE.TRD.GNFS.ZS>.
- World Bank (Dünya Bankası), *Urban population (% total)*, 2015d. <http://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTLIN.ZS>.
- World Coal Association (Dünya Kömür Derneği), *Coal mining*, 2015. <http://www.worldcoal.org/coal/coal-mining>.
- World Digital Library (Dünya Dijital Kütüphanesi), Kuzey Carolina’da Kitty Hawk’ta bulunan Orville Wright’tan babasına çektiği, dört başarılı uçuş yaptığını belirttiği telgraf, 17 Aralık 1903, 2014. [http:// www.wdl.org/en/item/11372](http://www.wdl.org/en/item/11372).

- World Economic Forum (Dünya Ekonomik Forumu), *Energy for economic growth*, 2012. http://www3.weforum.org/docs/WEF_EN_EnergyEconomicGrowth_IndustryAgenda_2012.pdf.
- Wrangham, R., *Catching Fire: How Cooking Made Us Human*, New York: Basic Books, 2009.
- Wright, O., *How We Invented the Airplane*, New York: David McKay, 1953.
- Wrigley, E. A., "The transition to an advanced organic economy: Half a millennium of English agriculture", *Economic History Review* 59:435–480, 2006.
- Wrigley, E. A., *Energy and the English Industrial Revolution*, Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- Wrigley, E. A., "Energy and the English Industrial Revolution", *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 371, 2013. doi:10.1098/rsta.2011.0568.
- Wu, K. C., *The Chinese Heritage*, New York: Crown Publishers, 1982.
- Wulff, H. E., *The Traditional Crafts of Persia*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1966.
- Xie, Y. ve Y. Jin, "Household wealth in China", *China Sociological Review* 47: 203–229, 2015.
- Xinhua, *China boasts world's largest highspeed railway network*, 2015. http://news.xinhuanet.com/english/photo/2015-01/30/c_133959250.htm.
- Xu, Z. ve J. L. Dull, *Han Agriculture: The Formation of Early Chinese Agrarian Economy*, 206 B.C.–A.D. 220, Seattle: University of Washington Press, 1980.
- Yang, J., *Tombstone: The Great Chinese Famine, 1958–1962*, New York: Farrar, Straus and Giroux, 2012.
- Yates, P., *Evaluation and Model of the Chinese Kang System*, Fort Collins, Colorado: University of Colorado, 2012.
- Yates, R. S., "War, food shortages, and relief measures in early China", *Hunger in History* içinde, (yay. haz.) L. F. Newman, 147–177, Oxford: Basil Blackwell, 1990.
- Yenne, B., *The American Aircraft Factory in World War II*, Minneapolis, Minnesota: Zenith Press, 2006.
- Yergin, D., *The Prize: The Epic Quest for Oil, Money, and Power*, New York: Simon and Schuster, 2008.
- Yesner, D. R., "Maritime hunter-gatherers: Ecology and prehistory", *Current Anthropology* 21:727–750, 1980.
- Yonekura, S., *The Japanese Iron and Steel Industry, 1850–1990: Continuity and Discontinuity*, New York: St. Martin's Press, 1994.
- Zaanse Schans, *Zaanse Schans*, 2015. <http://www.dezaanseschans.nl/en>.
- Zeder, M., "The origins of agriculture in the Near East", *Current Anthropology* 52 (Supplement): S221–S235, 2011.
- Ziemke, E. F., *The Battle for Berlin: End of the Third Reich*, New York: Ballantine Books, 1968.

İsim Dizini

Amontons, Guillaume 148
Ampère, André-Marie 264
Apuleius, Lucius 178
Arşimet 77, 80, 81, 142, 143, 165, 179, 461,
470
Auer von Welsbach, Carl 241

Babbage, Charles 346, 463
Bald, Robert 239
Bardeen, John 346, 347, 467
Bauer, Andreas F. 344, 467
Beau de Rochas, Alphonse 258
Bell, Alexander G. 345, 464
Benedict, Francis G. 149
Benz, Karl F. 465
Berliner, Emil 345, 465
Berners-Lee, Tim 350, 469
Bissell, George H. 256
Blériot, Louis C. 262, 466, 476
Bosch, Carl 317
Boulton, Matthew 247, 248
Bradley, Charles S. 67, 273
Brattain, Walter 346, 347
Braudel, Fernand 441
Braun, Ferdinand 346, 465
Braun, Wernher von 303, 467
Bruegel, Pieter 146
Brunelleschi, Filippo 205
Buehler, Ernest 347
Buz, Heinrich von 263

Carrier, Willis 369
Casement, Robert 161
Charles IV 211
Cody, William F. 185
Cooke, William 344
Corliss, George H. 249
Coulomb, Charles-Augustin de 148-150, 264
Cubitt, William 148

Daguerre, Louis J.-M. 345
Daimler, Gottlieb 258, 465
Daimler, Paul 260
Darby, Abraham 243, 462
Debussy, Claude 444
Deere, John 109
De Forest, Lee 346, 466
De la Rue, Warren 267
Diesel, Rudolf 262, 465
Dolivo-Dobrovolsky, Mikhail O. 275
Doret, Gustave 44
Drake, Edwin 256, 464

Edison, Thomas A. 269, 345
Elcano, Juan S. 201
Ellul, Jacques 434, 477
Evans, Oliver 179, 249

Faraday, Michael 265
Feynman, Richard 4
Ford, Henry 260, 295
Francis, James B. 162
Franklin, Benjamin 180
Frisch, Otto 292
Fulton, Richard 250

Galvani, Luigi 264
Gaulard, Lucien H. 271
Gibbs, John D. 271
Goddard, Robert H. 303
Grey, Elisha 345
Gutenberg, Johannes 344

Haber, Fritz 317, 466
Hall, Charles M. 332
Harrison, John 437
Henning, Hans 379
Herodot 141, 208, 209
Hérault, Paul L.-T. 332, 465
Hertz, Heinrich 346, 465

- Hill, Archibald V. 19
Hirst, Ivan 339
Hitler, Adolf 339, 373
Hollerith, Hermann 438
Hughes, Howard 285, 466
Humphrey, Davy 357, 463
Hüseyn, Saddam 376, 390
Hussey, Obed 110, 463
- Jacquard, Jean M. 438
Jefferson, Thomas 444
Jellinek, Emil 259
Jevons, Stanley 14
Jobs, Steven 350
Joule, James P. 9
- Kaplan, Viktor 162, 466
Keeling, Charles 393
Kilby, Jack S. 347, 348
Koenig, Friedrich 344, 426
Krupp, Friedrich A. 263
- Lane, John 109, 463
Langley, Samuel P. 260
Lawes, John D. 317
Leakey, Richard 21
Lee, Edmund 438
Lefebvre des Noëttes, Richard 71
Lenin, Vladimir I. 376, 450
Lenoir, Joseph E. 258, 464
Leonardo da Vinci 444
Levassor, Emile 259
Licklider, J.C.R. 350
Liebig, Justus von 317
Lilienfeld, Julius E. 346
Lotka, Alfred 2
Lukas, Anthony F. 256
- Madison, James 444
Macellan, Ferdinand 201, 462
Manly, Charles 260, 261
Mao, Zedong 283, 368, 374
Marconi, Guglielmo 346, 465, 466
Marsh, C. W. 110, 185, 464
Maxwell, James C. 345, 346
Maybach, Wilhelm 258-260
- McCormick, Cyrus 110, 463
Meitner, Lise 292
Michelangelo 211, 444
Monet, Claude 445
Montferrand, Auguste de 136
Moore, Gordon 348
Morse, Samuel 344, 463
Morton, Frederick 122
Murdoch, William 248
- Napoleon, Bonaparte 373
Neubold, Charles 109
Newcomen, Thomas 462
Niépce, Nicéphore 345
Nobel, Alfred 232, 379, 464
Noyce, Robert 347, 348
- Obert, Hermann 303
Odum, Howard 2, 320
Ohain, Hans P. von 300, 301, 467
Ørsted, Hans 264, 265
Orwell, George 3
Ostwald, Wilhelm 2
Otto, Nicolaus A. 258
- Papin, Denis 245, 462
Parsons, Charles A. 254, 271, 465, 471
Pelton, Lester A. 162, 465
Perkins, Jacob 249
Pissarro, Camille 445
Porsche, Ferdinand 338, 339
Rathenau, Emil 270
Revelle, Roger 393
Rickover, Hyman 292
Roentgen, Wilhelm, K. 351, 465
Roosevelt, Franklin D. 376
- Savery, Thomas 245, 411, 462
Scheutz, Edward 346
Schlumberger, Conrad 285, 296
Seaborg, Glen 450
Shannon, Claude 347
Shockley, William 347, 467
Smeaton, John 157, 167, 246
Sobrero, Ascanio 379
Soddy, Frederick 352

Sprengel, Hermann 267
 Spruytte, Jean 69, 71
 Stanley, William 272, 465
 Stephenson, George 144, 250
 Strauss, Lewis L. 450
 Suess, Hans 393
 Swan, Joseph W. 267, 269, 464

Taylor, Charles 261
 Taylor, Frederick W. 326, 327
 Teal, Gordon W. 347, 348
 Tesla, Nikola 273, 274, 465
 Thompson, Benjamin 180
 Thoreau, Henry D. 171
 Tomlinson, Ray 350
 Trevithick, Richard 249, 463
 Tsiolkovsky, Konstantin E. 303

Vauban, Sebastien 231

Verne, Jules 265
 Vivaldi, Antonio 426
 Volta, Alessandro 264, 344, 463

Washington, George 254, 444
 Watt, James 9-11, 246, 248, 438, 463
 Westinghouse, George
 Wheatstone, Charles 273
 Whittle, Frank 300
 Wilbrand, Joseph 379
 Wilhelm II 373
 Wood, Jethro 109
 Woowdard, Henry 267
 Wozniak, Steven 350
 Wright, Orville 262
 Wright, Wilbur 466

Zola, Émile 445

GENEL DİZİN

11 Eylül 376, 378, 387

açlık 107, 124-126, 130, 319, 373, 442, 447, 450

Afrika 17, 22, 26, 27, 32, 46-48, 55, 66, 70, 125, 127, 137, 168, 169, 174, 202, 214-216, 218, 223, 277, 283, 287, 289, 294-296, 358, 359, 363, 365, 366, 398, 427, 439

ağaç 11, 16, 17, 29, 30, 31, 37, 41, 45, 51, 76, 89, 100, 125, 158, 169-171, 174, 183, 203, 214, 216, 220-222, 233, 261, 294, 298, 378, 398

ağşap 39, 40, 55, 58, 62, 70-72, 77, 78, 88, 90, 91, 93, 102, 104, 109, 112, 113, 117, 135, 136, 139-141, 143, 144, 146-148, 153, 156-158, 161, 164, 165, 178, 182, 187, 189, 204, 208, 220, 239, 255, 256, 259, 291, 328, 332, 340, 344, 380, 381, 460, 470

Airbus 301, 342, 396, 412

Alaska 39, 40, 287, 374

Alberta 34, 110, 256, 286

alet 6, 7, 25, 26, 32, 37, 38, 40, 41, 45, 50, 51, 53-57, 65, 73, 81, 107, 114, 131, 140, 141, 169, 178, 209, 214, 219, 223, 251, 322, 325, 349, 366, 367, 369, 400, 417, 428, 430, 460, 477

Almanya 16, 25, 50, 70, 107, 108, 127, 161, 168, 173, 230, 235, 260, 267, 270, 271, 274, 276, 279, 281, 283, 286, 289, 293, 296, 298-300, 303, 310, 311, 317, 330, 333, 336, 338, 339, 342, 354-358, 362, 371, 372, 376, 380, 385-387, 406, 441, 444, 446, 470

Alüminyum 15, 16, 259, 261, 329, 330, 332, 333, 384, 422

Amerika Birleşik Devletleri 118

amonyak 85, 288, 317-320, 394, 408, 420, 453, 466

amonyum nitrat 317, 379, 387

amonyum sülfat 84, 243, 317

ampul teli 268

Apple 350

arpa 42-44, 60, 63, 86, 88-91, 96, 105, 107, 108, 123, 431, 460

asli itici güç 124, 133, 135, 137-139, 148, 160, 161, 163, 167, 183, 196, 229, 234, 236, 237, 244, 246, 252, 253, 258, 263, 265, 268, 271, 274-277, 299-301, 303, 317, 322, 361, 377, 384, 395-403, 405, 408-411, 417, 418, 421, 423, 428, 429, 436, 437, 439, 442, 443, 447, 448, 470-472

Asya 17, 21, 46-48, 55-58, 64-67, 70, 74, 76, 77, 84, 85, 89, 101, 115, 119, 120, 123, 125, 127, 137, 151, 163, 169, 174-177, 179, 180, 185, 199, 215, 228, 250, 277, 280, 289, 294, 300, 316, 320, 336, 340, 342, 344, 355, 358, 363-366, 369, 389-391, 397, 398, 402, 415, 418, 431, 439, 440, 444, 461

at nalı 73, 219, 462

atlar 33, 66, 68-70, 73, 74, 76, 93, 103-105, 107, 112, 150-152, 191, 192, 197, 215, 227-229, 238, 239, 403, 408, 415, 457

Australopithecus 21

avcılar 22, 29, 31-36, 38, 40, 41, 47

avcılık 29, 32, 33, 42

Avrupa 10, 21, 26, 29, 38, 41, 44, 47, 50, 53-57, 60, 64-68, 70, 72-76, 84-86, 88-90, 92, 95, 102-109, 115-123, 127, 128, 130, 131, 134, 135, 138, 141, 143, 146, 151, 153, 158, 160, 161, 163-165, 169, 173, 176, 177, 179, 180, 182, 183, 185-189, 191-193, 196, 197, 199-204, 210, 211, 214, 215, 217-219, 228, 231, 232, 234, 236-238, 242, 243, 250, 259, 264, 267, 269, 270, 274, 279, 280, 286, 287, 289, 296, 298, 299, 300, 310-312, 316, 317, 323, 324, 335, 337, 340-342, 344, 358-360, 362, 365-367, 369, 389, 391, 397, 400-402, 404-406, 415, 416, 431, 437-440, 444, 445, 447, 452, 456, 461, 462, 466, 469

Avustralya 33, 37, 45, 110, 168, 250, 279,
283, 372, 431

Avusturya-Macaristan İmparatorluğu 259
ayak değirmeni 142, 147-149, 470

Aztekler 100, 101

bakır 16, 83, 209, 212, 214-218, 220, 223,
266, 269, 272, 291, 330, 340, 438, 460,
461

baklagil 12, 46, 49, 52, 59, 60, 83, 85-88,
97, 102, 106, 114, 125, 174, 431

Bakü 255, 257, 325

balina avcılığı 40, 463

Barbegal 159, 471

barut 138, 224, 225, 227, 230, 231, 379,
398, 412, 462

Basarwa 33, 37

Basra Körfezi 288, 289, 375

Belçika 68, 259, 324

benzin 262, 278, 287, 299, 300, 308, 316,
352, 362, 368, 381, 384, 389, 391, 411,
428

-li motor 254, 259, 262, 336, 449

beslenme 17 21, 23, 24, 36, 37, 40, 41,
46, 49, 59, 60, 64, 74, 75, 86-88, 97,
114, 119, 121-123, 125, 150-152, 175,
177, 178, 193, 199, 209, 312, 317, 322,
361, 370, 371, 400, 418, 422, 430, 447,
451, 467

beygir gücü 9-11, 69, 71, 114, 135, 148,
149, 167, 184, 246, 254, 299, 316, 426

beyin 23, 24

biber 89, 99, 123

biçerdöver 62, 66, 69, 70, 103, 110, 111,
463, 464

biftek 322

bilgi (enformasyon) 4, 6, 8, 28, 41, 60, 96,
102, 104, 108, 115, 120, 121, 167, 203,
206, 213, 260, 261, 327, 333, 343, 371,
395, 405, 423, 433, 443, 448

bilgisayar 314, 329, 334, 346, 347, 350,
421, 426, 434, 438, 439, 449, 467-469

Birinci Dünya Savaşı 137, 229, 254, 262,
271, 272, 276, 285, 291, 300, 314, 317,
325, 334, 373, 378, 380, 386, 466

Birleşik Krallık 241, 243, 282, 282, 296,
324, 356, 385, 406, 467, 468

bisiklet 193, 194, 260, 465

bitki 1, 6, 7, 22, 27-31, 34, 36, 38, 40-45,
52, 58, 60, 64, 71, 83, 85, 86, 89, 99,
100, 119, 169, 182, 188, 234, 235, 238,
317, 319, 361, 392, 429, 431, 442, 453,
454, 467

bitkilerin evcilleştirilmesi 42

biyodizel 17, 295

biyokütle 1, 17, 18, 38, 95, 168, 169, 170,
172, 173, 176, 182, 183, 233, 234, 236,
237, 241, 242, 294, 308-310, 362-364,
393, 397, 398, 406, 407, 414, 418, 429,
447-449, 472, 476

biyoyakıt 17, 294, 295, 298, 309, 367, 407

bocurgat 11, 134, 136, 142, 143, 145, 150,
152, 159, 196, 205, 215, 239, 470

Boeing 300-302, 312, 313, 329, 333, 342,
343, 378, 381, 383, 384, 396, 411, 412,
468, 469, 471

boylam 437

Brezilya 31, 288, 295, 296, 336, 339, 240,
342, 363, 403, 415, 426, 433, 446, 451,
469

buğday 10, 17, 34, 42-44, 58-62, 64, 66,
76, 80, 82, 83, 86, 88-91, 96, 97, 99,
101, 103-105, 107, 108, 110, 112, 113,
115-117, 123, 209, 229, 312, 316, 321,
431, 457, 460

buhar

kazanı 247

motoru 9, 14, 16, 137, 246, 251-254,
270, 274, 322, 323, 326, 335, 344, 357,
400, 402, 403, 405, 408, 410, 415, 422,
423, 449, 463, 471, 476

türbini 14, 234, 237, 251, 253, 254, 270,
271, 276, 290, 291, 379, 396, 401, 403,
408, 422, 423, 465, 471

buharlı

gemi 229, 245, 249, 250, 252, 340, 341,
422, 449, 463

kürek 252

lokomotif 144, 167, 249, 250, 251, 254,
471, 472

büyüme 9, 12, 28, 95, 120, 124, 202, 237,
245, 252, 269, 276, 282, 287, 293, 296,
297, 305-309, 314, 322, 352, 354, 355,
357, 358, 362, 364, 365, 370, 374, 406,
418, 421, 427, 429, 431, 436, 442, 447,
451, 452

California 110, 112, 113, 115, 186, 256,
286, 298, 348, 428, 465, 471, 472

çekiç 6, 25

çelik 16, 56, 62, 109-111, 113, 117, 131,
137, 138, 184, 217, 218, 223, 244,
251, 257, 261, 263, 272, 276, 283, 286,
289-291, 312, 316, 325-327, 329-333,
338, 340, 384, 389, 404, 495, 433, 463,
464, 468

cep telefonu 349-352, 366

çevresel bozulma 46, 306

çimento 16, 178, 210-212, 368, 408, 463

Çin 47, 50, 54, 56, 65, 66, 72, 76, 77, 82,
84, 87, 88, 89, 92, 95, 96, 98, 121, 127,
140, 174, 176, 179, 182, 187, 189, 194,
196, 200, 214, 218, 242, 277, 281-283,
289, 294, 295, 298, 307, 311, 315, 319,
321, 336, 337, 357, 365, 367, 368, 371,
389, 397, 398, 401, 404, 405, 415, 417,
426, 427, 447, 469

Çin Seddi 401

çobanlık/göçebe çobanlık 46-48

çocuk/bebek ölümü 36, 270, 370-372, 423

değirmen taşı 152-154, 159, 164, 177-179,
265

demir 15, 16, 53, 55, 83, 93, 109, 113, 124,
131, 134-137, 141, 143, 148, 155, 158,
162, 168, 171, 173, 178, 179, 184,
212-224, 231, 238, 240-245, 250, 251,
255, 271, 281, 283, 315, 322, 324, 325,
330, 332, 344, 353, 378, 384, 389, 391,
394, 400, 403-405, 408, 412, 414, 422,
430, 432, 433, 453, 454, 456, 461-464

demiryolu 144, 166, 167, 186, 192, 197,
250, 268, 332, 335, 336, 340, 368, 291,
413, 456, 463, 464

dinamit 232, 379, 464

dizel motor 237, 253, 262, 263, 280, 291,
299, 300, 312, 316, 320, 341, 400, 412,
465, 471

DNA 44, 45

doğalgaz 17, 235, 255, 257, 279, 282, 283,
288, 289, 307, 309, 315, 318, 353, 390,
391, 406, 411, 433, 435, 436, 470, 476

domates 89, 99, 123

domuz 29, 30, 37, 42, 44, 82, 89, 92, 95,
176, 321, 322, 460

döngü 33, 45, 52, 53, 64, 73, 86, 106, 108,
220, 233, 291, 354, 411, 419, 421, 422,
423, 429

dövme demir 109, 219, 223, 241, 251

dünya

nüfusu 277, 305, 308, 314, 320, 321,
262, 362, 405, 420, 450, 453

Ticaret Merkezi 378

düşük gelirli ülkeler 294, 308, 319, 358,
397, 398, 417

eğik düzlem 134, 136, 139, 141, 142, 207

eğitim 8, 18, 151, 322, 352, 357-359, 363,
364, 366, 368, 370, 371, 397, 420

ekin 309, 316, 319-321, 361, 397, 431,
440, 453, 468

ekmek 10, 39, 45, 61, 62, 74, 83, 107, 122,
123, 125, 142, 159, 173, 177-179

ekonomi 14, 237, 242, 353, 399, 415

el arabası 461

elektriğe bağlanma 290, 326, 328

elektrik enerjisi 412, 420, 450

elektrikli motor 4, 265, 266, 270, 274, 280,
315, 320, 327, 415

elektronik 291, 292, 312, 314, 315, 329,
333, 344-347, 349, 351, 366, 367, 368,
391, 397, 420, 426, 438, 439, 441, 466,
467

emek 15, 31, 38, 45, 46, 48, 61, 62, 64, 66,
81, 84, 87, 93, 97, 101, 109, 112, 113,
117, 119, 124, 126, 127, 129, 134, 179,
189, 199, 204, 240, 315, 316, 317, 369,
373, 397, 401-403, 419, 430

enerji

çevrimi 4, 6, 8, 9, 12, 18, 133, 160, 198,
296, 299, 353, 355, 366, 407, 416, 428,
436, 441, 442, 449

tüketimi 12, 19, 238, 245, 277, 311, 354,
356, 359, 364, 366, 367, 368, 371, 384,
386, 397, 406, 414, 415, 418, 426, 427,
443, 446, 447, 452, 472, 473

verimliliği 414, 415, 437

yoğunluğu 10, 12, 13, 15-17, 27, 31, 35,
39, 59, 170, 215, 234, 235, 243, 258,
262, 332, 356-358, 361, 386, 408, 419,
429, 431, 441

- ensefalizasyon 23, 24, 32
 entegre devre 347, 348, 438, 468
 entropi 8, 9, 12, 442
 Eski Dünya 28, 43, 47, 48, 54, 58, 70, 77, 99, 138, 139, 141, 176, 182, 190, 218, 398, 400, 406, 407, 413
 et 24, 27, 32-37, 41, 43, 61, 76, 97, 103, 108, 122-124, 321, 322, 431
 etanol 17, 295, 299, 303, 417, 469
 Etiyopya 22, 367, 371, 389
 evcilleştirme 43, 67

 fil 6, 34, 35, 89, 151, 228
 Filipinler 7, 201, 446
 Finlandiya 127, 128, 136
 fırın 7, 15, 135, 158, 176-180, 219, 224, 240, 243, 317, 331, 349, 366, 369, 400, 423, 468
 fitokütle 11, 13, 17, 27-29, 31, 41, 51, 52, 135, 168, 169, 174, 122, 233, 234, 236, 237, 242, 275, 295, 305, 473
 fosfat 317, 319, 464
 fosil yakıt 7, 15, 17, 18, 53, 114, 131, 203, 233-236, 244, 275-278, 283, 284, 288, 294, 298, 305-310, 314, 315, 320, 334, 344, 354, 355, 360-362, 364, 372, 373, 384, 390-394, 397-399, 402, 405, 407, 414, 417-420, 432-436, 441, 453, 469, 473
 fotokimyasal sis 339
 fotosentez 1, 4-6, 15, 22, 29, 50, 52, 83
 Fransa 11, 16, 26, 38, 39, 57, 83, 84, 107, 108, 114, 117, 118, 141, 145, 155, 169, 192, 197, 201, 230, 231, 238, 241, 250, 255, 259, 267, 276, 277, 280, 287, 291, 293, 298, 310, 321-324, 332, 333, 337, 339, 342, 345, 356, 358, 367, 371, 372, 374, 386, 389, 397, 406, 422, 445, 446, 469, 473
 frenk inciri (opuntia) 10
 gaz 5, 7, 14, 17, 168, 230, 234-237, 240, 241, 251, 257, 258, 268, 276, 278, 282, 285, 288-291, 299-301, 303, 312, 318, 384, 391, 393, 404, 408, 411, 412, 422, 423, 466, 467, 471, 476
 gaz türbini 7, 14, 234, 237, 276, 289-291, 300, 301, 303, 312, 384, 408, 411, 422, 423, 467, 471, 476
 gazete 248, 344
 geçiş 18, 42, 44, 50, 54, 100, 103-105, 126-128, 180, 234, 236-239, 241, 242, 273, 296, 298, 323, 334, 338, 340, 341, 394, 396, 398, 399, 406-408, 426, 430, 432, 436, 452, 453
 geleneksel tarım 14, 15, 19, 49-54, 58, 60-62, 66-68, 74, 76, 83-86, 88, 89, 92, 96, 114, 115, 121, 122, 124, 126, 130, 176, 418, 431, 434
 geri dönüşüm 50, 76, 83-85, 95, 125, 431
 gernik buğdayı 42, 44, 89
 gıda 6, 10, 15, 19, 27, 29, 30, 34, 35, 37-39, 43, 49, 51, 52, 58, 59, 61-63, 82, 95-97, 99, 101, 103, 107, 108, 112, 113, 119, 121-126, 129-131, 133, 138, 154, 155, 160, 173, 176-178, 209, 212, 213, 224, 234, 252, 259, 261, 262, 292, 300, 309-311, 314, 318, 319, 321, 322, 340, 342, 359, 361, 366, 393, 397, 414, 419, 422, 423, 429, 430, 434, 440, 447, 448, 451, 457
 göç 28, 32, 39, 40, 45-48, 50, 66, 72, 97, 127, 250, 274, 322, 335, 343, 362, 363, 370, 392, 419, 430, 434, 441, 451
 gramofon 345, 465
 GSYİH 354
 Guatemala 46, 99, 100, 451
 gübreleme 52, 67, 83, 85, 87, 93, 96, 104, 107, 117, 125, 127, 129, 317, 319, 418, 434
 güneş 1, 5, 7, 8, 13, 14, 40, 50, 51, 66, 89, 91, 114, 131, 176, 203, 204, 206, 234, 236, 239, 244, 279, 296-298, 305, 314, 315, 320, 370, 391, 407, 417, 429, 441, 444, 452, 453, 455, 456
 enerjisi 1, 7, 40, 51, 89, 114, 131, 233, 239, 279, 296, 298, 305, 314, 320, 391, 407, 441, 453
 Haçlılar 164, 228
 ham
 demir ocakları (bloomery) 220

- petrol 8, 12, 15, 114, 234, 235, 237, 253-255, 257, 258, 275, 278, 282, 284-287, 295, 307, 322, 341, 352-355, 360, 374, 375, 390, 407, 412, 413, 435, 437, 440, 465-469
- hava kirliliği 235, 252, 283, 289, 291, 328, 339, 363, 449
- Hawaii 7, 393, 394
- hayvan gücü 14, 54, 58, 65, 66, 68, 77, 78, 92, 96, 110, 114, 115, 117-120, 124, 126, 135, 138, 196, 204, 228, 317, 430, 432
- herbisit 315, 319, 320
- hidroelektrik üretimi 279, 295, 305
- hidrokarbon 16-18, 234, 235, 254, 255, 257, 277, 283-285, 308, 360, 407, 421, 432, 436, 440, 451, 453
- hidrolik parçalama 286, 289, 375, 390, 435, 469
- Hindistan 60, 61, 66, 75, 78, 99, 123, 126, 137, 147, 151, 175, 176, 179, 199, 201, 202, 251, 277, 281-283, 294-296, 321, 323, 325, 335, 357, 363, 366, 371, 389, 398, 415, 426, 439, 444, 445, 446, 461, 462
- Hhz 19, 68, 69, 105, 156, 159, 166, 184, 203, 224, 226, 231, 259, 261, 262, 275, 292, 312, 326, 339, 345, 377, 405, 411, 413, 424, 426, 457, 471
- Hollanda 104, 107, 108, 117, 118, 158, 163-168, 202, 202, 237, 289, 321, 323, 324, 376, 432, 433, 436, 438, 439, 462, 470, 471
- homo erectus 21, 24
- homo sapiens 21, 24, 26
- hypocaust 181
- IBM 346, 347, 350
- Intel 348, 349, 369
- ışıklandırma 168, 268, 269, 273, 415, 416
- ısıtma 4, 169, 170, 173, 176, 179-182, 237, 240, 242, 289, 309, 361, 363, 364, 367, 415, 423, 461
- içten yanmalı motor 237, 254, 258, 401, 411, 476
- iki ayak üzerinde yürümek 22, 23, 32, 33
- İkinci Dünya Savaşı 230, 235, 256, 264, 276, 280, 281, 285, 286, 288, 291, 292, 295, 299, 300, 303, 318, 319, 330, 332, 336, 339, 341, 346, 347, 351, 355, 362, 364, 373, 375, 377, 378, 380, 381, 385-387, 390, 400, 412, 413, 419, 441, 445, 467
- imalat sanayii 398
- İngiltere 13, 85, 103, 104, 107, 108, 110, 116-118, 127, 131, 134, 135, 141, 152, 154, 157, 158, 163, 164, 168, 174, 177, 191, 220, 221, 236, 238, 241, 243, 245, 249, 250, 292, 300, 310, 311, 324, 325, 335, 396, 397, 399, 402, 432, 441, 462, 463, 466
- İnkalar 58, 81, 85, 102, 190
- inovasyon 267, 268, 270
- inşaat 65, 82, 83, 136, 137, 141, 142, 146, 151, 183, 184, 187, 189, 204, 206-211, 219, 224, 227, 239, 252, 293, 325, 328, 335, 368, 396, 400, 401, 403, 404, 414, 477
- insani gelişme endeksi 371, 446
- Japonya 61, 63, 1115, 119, 120, 174, 214, 242, 269, 280, 281, 286, 287, 289, 293, 300, 311, 312, 315, 322-325, 327, 330, 334, 336-338, 340, 342, 351, 355, 356-358, 366, 367, 371, 372, 374, 380, 385-387, 389, 397, 414, 426, 439, 440, 441, 446, 452, 466, 469, 472, 473
- Java 50, 97, 119
- jeotermal 5, 236, 298, 315, 466
- jet motoru 276, 285, 300-302, 312, 329, 353, 410, 415, 422, 438, 471
- kaldıraç 23, 26, 80, 81, 134, 136, 139-141, 186, 205, 208, 226, 249, 255, 252
- kalori 9, 10, 235, 457
- kamyon 131, 229, 264, 299, 309, 337, 338, 340, 379, 380, 387, 412, 421, 428
- Kanada 45, 109, 173, 237, 256, 267, 279, 289, 293, 296, 309, 316, 342, 346, 356, 357, 372, 375, 385, 403
- kanalizasyon 84, 212, 361, 420

karbon 22, 83, 170, 171, 214, 219, 220, 223, 234, 235, 243, 266, 267, 269, 277, 278, 329, 330, 342, 392-394, 408, 464

karbondioksit (CO₂) 5, 61

karbonsuzlaşma 280

karşılıklı yıkım 388

kaslar 6, 19, 24, 33, 48, 51, 52, 72-74, 77, 112, 133, 137, 138, 145, 147, 159, 185, 224-226, 229, 239, 315, 325, 396, 398, 400, 403, 412, 429, 430

katedral 53, 146, 205, 210, 211, 219, 254, 401, 404

katırlar 68, 112, 114, 186, 197, 228, 317, 400, 403, 434

kayış 70, 71, 73, 143, 163, 179, 245, 249, 252, 322, 326, 328, 329, 428

kemik 21, 22, 25, 32, 33, 40, 42, 45, 53, 54, 68, 73, 442, 460

kent (bkz. şehir) 11, 12, 53, 84, 85, 95, 101, 108, 120, 122, 133, 151, 158, 177, 183, 192-194, 197, 204, 225-227, 231, 235, 240, 250, 258, 264, 267, 270, 272, 275, 312, 314, 323, 335, 338, 343, 359-363, 370, 376, 381, 386, 397, 419, 428, 433, 451, 463

kentleşme 244, 245, 252, 305, 306, 316, 322, 359, 360, 362-364, 391, 417-419

Kenya 25, 365

kılıç 32, 217, 224-226, 228, 323, 377,

kinetik enerji 6, 7, 137, 138, 154, 156, 157, 159, 166, 197, 225, 226, 230, 236, 245, 295, 334, 377, 378, 380, 404, 414

kişi başı enerji 14, 310, 311, 406, 446

kıtalararası balistik füze 303, 377, 384

kıtlık 36, 102, 115, 124-126, 238, 242

kok kömürü 15, 131, 220-222, 224, 235, 242-244, 279, 281, 282, 316, 325, 400, 405, 422, 432, 453

kola 77, 226, 273

kölelik/köleler 137, 177, 178, 199, 373, 399, 400, 440, 444, 457

köprü 158, 190, 206, 211-214, 224

koşum takımı 70, 71, 73, 103, 193, 437

Kültür Devrimi 242, 374

küresel ısınma 283, 306, 360, 392, 394, 417

kurşun (projectiles) 144, 161, 212, 213, 215, 216, 230, 269, 298, 330, 377, 378, 455

kütle/güç oranı 253, 254, 259, 261, 299-301, 303, 410

Kuveyt 288, 376, 390

Kuzey Levant 44

Kuzine 463

Lady Isabella 135, 161, 471

Londra 151, 158, 173, 193, 238, 240, 248, 250, 254, 265, 266, 269, 273, 334, 341, 362, 439, 463

Maasai 47, 48

makara 134, 136, 139, 142, 143, 147, 179, 205, 220

makrobesin 10, 41, 52, 83, 317

makroparazit 440

mamutlar 27, 33-35, 38

mancınık 138, 140, 143, 196, 225-227, 230, 260, 412, 430

matbaa 344, 438, 442

Mayalar 82, 88, 100

medeniyet 2, 3, 7, 9, 13, 18, 52, 61, 99-101, 120, 138, 180, 197, 233, 299, 305, 306, 314, 330, 349, 395, 396, 398, 400, 404, 427, 429, 433, 436, 441-443, 448, 450-454, 470, 475

Megafauna 34

mekanizasyon/makineleşme 325

Meksika 7, 10, 29, 33, 44, 82, 88, 99, 100-102, 121, 125, 257, 339, 363, 446, 460

Mercedes 259, 260, 333, 339, 384, 426

metaller 50, 144, 168, 172, 214, 215, 217, 223, 237, 239, 328, 330, 333, 357, 369, 419, 431

metalürji 133, 137, 159, 173, 174, 185, 212, 214, 216, 218, 235, 242, 243, 279, 281, 324, 332, 391, 404, 405, 422, 453, 477

metan (CH₄) 235, 278, 391-393

Mezoamerika 46, 51, 58, 99-101, 123, 210

Mezopotamya 44, 54, 55, 70, 90, 122, 138, 141, 204, 209, 211, 214, 418, 460, 461

mikroçip 292, 347, 349, 350, 421, 439

mikroparazit 440

mısır 11, 22, 44, 46, 49, 51, 58, 60, 63, 76, 81, 87, 93, 97, 101, 112, 114, 119, 123, 125, 295, 321, 431, 460

Mısır 42, 46, 54, 60, 64, 77, 78, 80, 89-92, 97, 99, 103, 120, 121, 133, 135, 138, 175, 187, 188, 191, 198, 200, 206-208, 214-216, 218, 225, 296, 310, 311, 375, 401, 429, 432, 448, 451, 460, 461, 470

Model T 260, 285, 299, 338, 381, 466, 471
modern tarım 14, 15, 22, 87, 315, 320, 321, 434, 477

Moğolistan 48

Moore Kanunu 349

motor 12, 249, 253, 254, 259, 261-264, 274, 299, 301, 302, 326, 333, 337, 339, 342, 449, 464, 465, 468

mum 412, 457

Nazi 376

negentropi 9

net enerji maliyeti 18, 19, 46, 61

New York 111, 136, 151, 193, 254, 256, 269, 275, 334, 340, 343, 362, 387, 450

Nil Nehri 64

nitrojen 84, 95, 300, 317-319, 391

nüfus yoğunluğu 28, 29, 38-40, 43, 46-48, 51, 86, 92, 97-99, 101-103, 106, 108, 119-121, 124, 128, 362, 417, 418, 429, 430

nükleer

bomba 4, 292, 381-383, 388, 413, 467
santral 293

obelisk 135, 136, 207

obezite 359

ocak 7, 12, 17, 18, 55, 109, 151, 171, 174, 177, 179, 180, 182, 187, 189, 203, 204, 207, 210, 214, 215, 218-223, 240, 243, 244, 314, 325, 329-331, 349, 353, 369, 411, 427, 432, 454, 460, 462, 464

odun 11-13, 17, 18, 27, 40, 45, 114, 131, 137, 149, 168-177, 180, 181, 204, 214-216, 218, 220-223, 230, 233, 236, 238, 239, 241-244, 252, 275, 276, 278, 284, 294, 295, 298, 309, 315, 361, 369, 396, 398, 400, 404, 406, 407, 414, 418, 422, 427, 430, 432, 437, 444, 451

kömürü 13, 117, 131, 168-172, 174, 204, 214-216, 218, 220-223, 230, 233, 238, 242, 244, 275, 276, 294, 315, 361, 396, 400, 407, 414, 422, 430, 432

ok 94, 138, 225, 226, 228, 230, 430

okyanus aşırı 341, 416, 439

OPEC 276, 281, 287, 290, 299, 307, 353-355, 374-376, 421, 469

orak 53, 56, 57, 62, 88, 90, 102, 104, 109, 112, 113, 115, 174, 219, 427

ormanlar 29-31, 37, 50, 76, 106, 169, 171, 174, 220-223, 233, 294, 309, 360, 361, 393, 399, 400, 429

Ortadoğu 15, 17, 44, 47, 55, 64, 70, 76, 77, 89, 92, 102, 105, 174, 176, 177, 182, 203, 254, 257, 353, 374-376, 444, 460, 461

otoban 338, 368, 411, 433, 457, 468

otobur 29, 32-34, 38

otomobil 193, 194, 254, 258-260, 285, 287, 295, 299, 300, 308, 314, 316, 327, 332-334, 336-339, 241, 349, 352, 353, 359, 366, 367, 379, 387, 391, 397, 398, 409-412, 421-424, 426, 435, 436, 438, 449, 465, 469, 470, 476

öküz 69, 80, 96, 104, 108, 110, 119, 205, 228, 229, 403, 472

pamuk 88, 99, 150, 174, 240, 245, 261, 268

Pantheon 183, 205, 210, 211

Papua Yeni Gine 30

paradoks 14, 395, 434

Paris 84, 88, 127, 136, 151, 211, 222, 254, 266, 270, 275, 341, 362, 444, 466, 469

Parthenon 183, 205, 210

patates 44, 51, 58, 59, 64, 88, 96, 102, 107, 123, 126, 320, 431, 460

patlayıcılar 16, 138, 224, 225, 230, 377-383, 385, 387, 465

pestisit 315, 319, 320

piramitler 133, 141, 205-210, 460

pirinç 44, 46, 57-60, 62-67, 75, 76, 82, 87, 88, 92, 94, 95, 97, 99, 119, 120, 123, 124, 129, 151, 176, 217, 229, 321, 431, 461

pişirme 7, 12, 13, 26, 27, 63, 90, 168, 169, 174, 176, 177, 179, 180, 204, 224, 237, 240, 279, 289, 309, 361, 364, 368, 369, 414, 427

Pleistosen 34, 42

potasyum 31, 83, 173, 230, 317, 319
nitrat 230

primatlar 6, 21, 22, 24, 29

protein 5, 10, 17, 30-32, 34, 35, 37, 41, 49, 59-61, 76, 83, 87, 88, 122, 123, 125, 174, 318, 319, 322, 429, 442

Qing Hanedanı 82, 93, 96-98, 114, 119, 176, 323, 360, 447

radyasyon 4, 382, 388, 442

radyo 345, 346, 449, 465, 466, 468, 469

rampa 141, 142, 149, 207, 208, 413

Rio Tinto 215, 216

roket 7, 276, 299, 303, 349, 351, 378, 384, 449, 463, 467, 471

Roma 54-56, 68, 71, 85, 92, 103, 107, 114, 118, 119, 122, 146, 154, 158, 159, 173, 181, 183, 189-191, 195, 198, 200, 201, 204, 211-213, 216, 227, 236, 254, 310, 311, 401, 424, 448

İmparatorluğu 92, 103, 154, 173, 183, 204, 212, 254, 310, 311, 448

Rusya 50, 68, 127, 136, 228-230, 237, 242, 250, 255-257, 267, 279, 286, 290, 294, 303, 324, 325, 335, 342, 371, 372, 386, 388, 406, 439, 440, 446, 450, 451

İmparatorluğu 242

rüzgâr 7, 8, 17, 34, 51, 52, 58, 135, 137, 138, 152, 163-167, 178, 179, 183, 197-200, 202, 203, 225, 233, 236, 238, 239, 279, 296-298, 305, 310, 314, 315, 340, 391, 398, 401, 402, 404, 407, 417, 430, 432, 437, 439, 441, 450, 461, 469, 471

enerjisi 8, 51, 152, 166, 200, 296, 305, 407, 417, 437

gücü 138, 163, 166, 167, 179, 203, 225, 296, 401, 402, 430

türbini 8, 17, 236, 239, 279, 296, 297, 441, 450, 469, 471

saban 3, 51, 54-56, 58, 62, 65-67, 69, 74, 76, 88, 89, 91, 97, 104, 105, 109, 190, 222-224, 320, 403, 430, 470, 472

-la sürme 3, 51, 54, 55, 58, 65-67, 69, 88, 89, 91, 97, 105, 403, 430, 470, 472

saman 17, 18, 67, 73-75, 83, 84, 90, 91, 106, 112, 114, 137, 151, 168, 170, 174, 176, 180, 193, 204, 229, 230, 259, 407, 427, 438, 451

Sanayi Devrimi 245, 320, 323

sanayileşme 12, 15, 86, 133, 135, 137, 159, 160, 244, 245, 247, 251, 252, 283, 288, 295, 305, 314, 322-326, 329, 330, 362, 365, 367, 3976, 397, 418, 419, 475, 477

Santa Maria del Fiore 205

Sen Petersburg 136, 362

sifon 206, 212, 213

silah 23, 26, 32, 33, 35, 142, 186, 200, 201, 214, 218, 219, 224, 225, 229-231, 292, 306, 360, 375-385, 387, 388, 390, 400, 405, 412, 413, 437, 454, 468, 477

sindirim sistemi (gastrointestinal tract) 24, 27

siyez buğdayı 44

soba 294, 308, 309, 369

soya fasülyesi 59, 50, 88, 95, 97, 295

SSCB (Sovyetler Birliği) 282, 295, 296, 307, 366, 373, 376, 382, 385, 386, 388, 389, 440, 445, 451, 467, 468

su

değirmeni 152, 153, 158, 215, 222, 244, 248, 334, 399, 471

gücü 152, 154, 158, 160-163, 214, 323, 324, 399, 400, 432

kemeri (aqueduct) 158, 159, 206, 211-213

kirliliği 359, 363

türbini 162, 163, 168, 263, 296, 325, 328, 408, 409, 463-466, 471

sulama 51, 52, 64, 65, 67, 74, 76, 77, 80-82, 87, 90, 92-95, 100-102, 119, 122, 127, 263, 316, 317, 320, 399, 401, 418, 430, 434, 460, 461, 477

Suudi Arabistan 286, 288, 290, 307, 354, 359, 371, 374, 375, 440, 446

süvari 228, 230

şebekeler (grids) 272, 279, 292, 296

şehir (bkz. kent) 11, 12, 52, 53, 84, 85, 95, 101, 108, 120, 122, 133, 151, 158, 177, 183, 192-194, 197, 204, 225, 226, 227, 231, 235, 240, 250, 258, 264, 267, 270, 272, 275, 312, 314, 323, 335, 338, 343, 359-363, 370, 376, 381, 386, 397, 419, 428, 433, 451, 463

şeker kamışı 82, 151, 165, 174, 176, 295, 469

şempanze 6, 23, 28

şömine 7, 179, 180

tahıl 8, 12, 22, 31, 35, 41, 44-46, 49, 50, 52, 53, 56-61, 63-66, 73-76, 83, 85-93, 96, 97, 101, 102, 105, 106, 108, 110-115, 117, 119, 122-125, 127-129, 137, 148, 150, 152, 158, 160, 165, 168, 174, 176-179, 187, 191, 193, 252, 316, 318, 321, 341, 361, 399, 404, 427, 430-432, 451, 457

tahta 25, 33, 55, 56, 72, 73, 78, 141, 153, 164, 204, 428

tank 77, 161, 173, 212, 229, 230, 251, 377, 378, 380, 381, 384, 466

tanker 263, 264, 276, 278, 286, 287, 289, 300, 302, 384, 391, 398, 412, 465, 468

Tanzanya 21, 37

tarım devrimi 73, 89, 89

tarım toplumu 125

taş 16, 25, 26, 32, 34, 35, 38, 41, 56, 136, 146, 158, 161, 164, 177, 179, 181, 187, 189, 203-205, 207-212, 214-216, 218, 219, 231, 413, 424, 457, 460

tekerlek 55, 79, 104, 109, 111, 133, 139-142, 144-146, 187, 189-191, 193, 248, 251, 259, 460

Teksas 256, 257

tekstil 161, 163, 251, 323, 324

telefon 276, 344-346, 349-352, 366, 422, 464, 468, 469

telekomünikasyon 297, 329, 344, 405, 419, 420

telgraf 185, 261, 325, 344, 463

Teotihuacan 100, 206, 210, 448, 449

terleme 32, 33, 233

termal enerji 5, 7, 8, 269, 282, 290, 298, 433

termoregülasyon 33

tezek 18, 107, 168, 170, 174, 176, 204, 294, 309

tırmıklama 55, 62, 97, 104, 113

tırpan 56, 57, 66, 80, 88, 140, 472

TNT 379, 380, 382, 383

top 225, 232, 378, 379, 381, 384, 462

toplayıcılık 19, 21, 30-32, 36-38, 42, 43, 46, 49, 53, 54

Toyota 327, 329, 339, 421

traktör 114, 131, 263, 312, 316, 317, 403, 410, 466, 472

tramvay 254

transistör 346-349, 438, 467, 468

trebüş 225-227, 230

tren 229, 250, 256, 279, 280, 300, 312, 314, 325, 335, 336, 397, 411-413, 464, 472

tuğla 7, 16, 90, 168, 171, 172, 179, 180, 182, 203-205, 207, 210, 211, 240, 330, 414, 460

turba 12, 203, 234, 235, 237, 432

turbojeneratör 236, 251, 271, 290, 291, 408, 411, 471

uçak 141, 229, 260-263, 277, 300-302, 312, 314, 329, 332-334, 336, 341-343, 372, 377, 378, 380, 381, 384-389, 396, 397, 411-413, 415, 426, 428, 444, 466-469

ulaşım 133, 166, 185, 252, 334, 401, 423 devrimi 252

uranyum 7, 383, 384, 388

üre 288, 463

üzengi 186, 228, 437, 461

verimlilik 12, 14, 17-19, 29, 50, 52, 53, 80, 92, 99, 102, 112, 117, 130, 133, 153, 154, 157, 159, 160, 180, 200, 203, 220, 236, 250, 252, 254, 262, 271, 276, 277, 279, 286, 290, 305, 308, 316, 320, 326, 332, 353, 357, 360, 361, 365, 412, 415, 423, 436, 437, 441, 457

Vietnam Savaşı 386, 387, 389

vinç 134, 135, 139, 142, 143, 146, 147,
205, 210, 225, 239, 252, 255, 340,
444, 463

Volkswagen 300, 338, 339, 421

yangın 158, 174, 178, 381, 386, 388, 438

yanma 4,7, 45, 180, 263, 290, 301

yay (bow) 185, 460, 462

yel değirmeni 135, 163-168, 203, 244, 248,
252, 398, 402-404, 409, 414, 415, 438,
462, 470, 471, 475

yenilenebilir enerji 35, 112

yerçekimi 77

yetersiz beslenme 150, 422

yükleme (loads) 136, 141, 186, 214, 230,
239, 243, 287, 377, 384

yüksek enerji toplumları 15, 18, 397, 417

yürüme 10, 23, 33, 45, 143, 146, 147, 187,
413, 424

zengin ülkeler 14, 308, 311, 315, 321, 322,
329, 339, 340, 369, 372, 391, 415, 421,
422