

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>

“Dünyanın önde gelen jeologlarından Andrew H. Knoll, Yerküre tarihinin muazzam özetini sunuyor: Sürükleyici olduğu kadar ilginç, esprili olduğu kadar zekice ve kesinlikle okumaya değer bir kitap.”

—Steve Brusatte, *Dinozorların Çöküşü ve Yükselişi* kitabının yazarı

ANDREW H. KNOLL

DÜNYA'NIN KISA TARİHİ

SEKİZ BÖLÜMDE
DÖRT MİLYAR YIL
18 DİLE SATILDI

ÇEVİRMEN: AYDIN ÇAYDAR

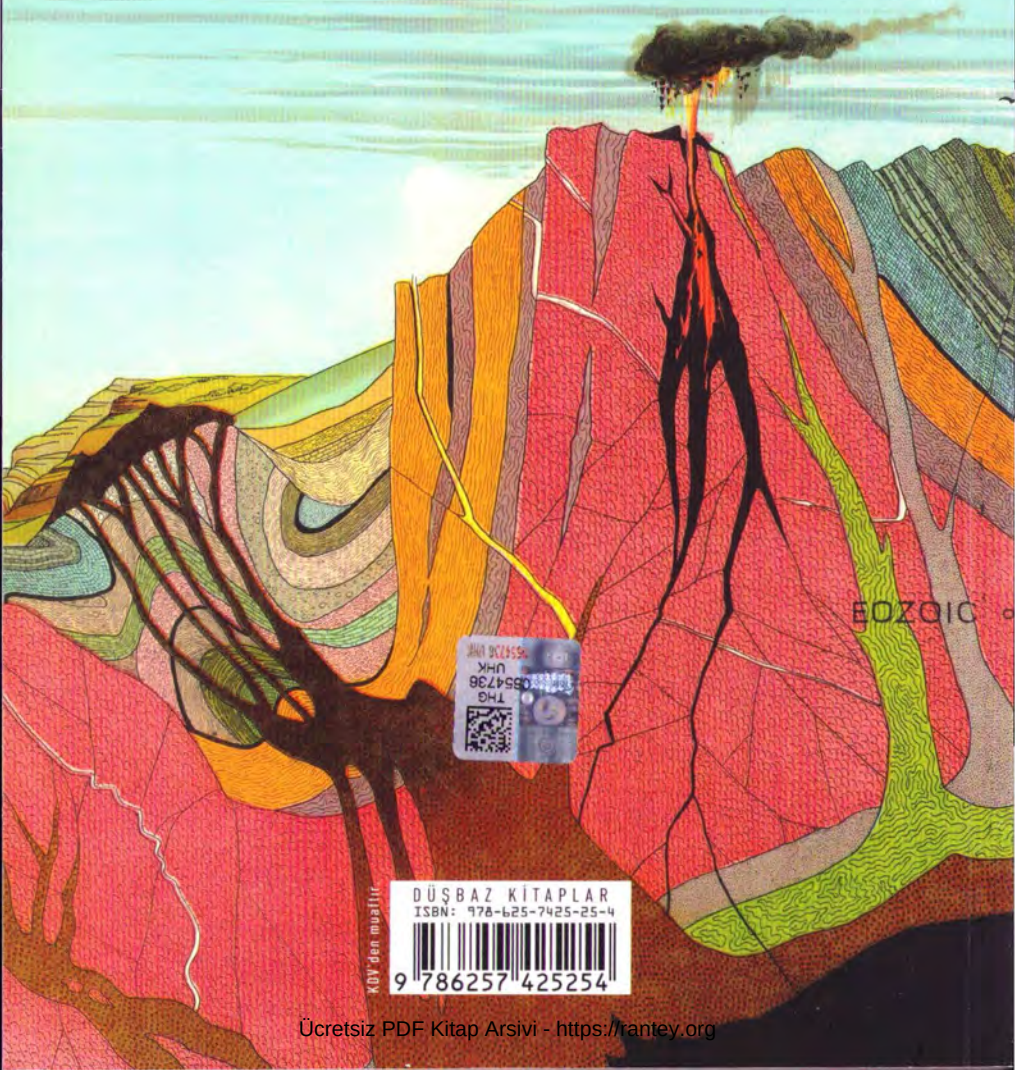


“Dünyaca tanınan jeolog Andrew H. Knoll, gezegenimizin 4,6 milyar yıllık geçmişinin soyağacını çıkardığı; özenle hazırlanmış, kolay anlaşılan bir Dünya biyografisiyle okurlarının karşısına çıkıyor. Yirmi birinci yüzyılın iklim değişikliğini ana izleğine alan kitap, geçmişte nerede olduğumuza ve şu an nereye gittiğimize dair gerçekçi bir bakış sunuyor.”

Neil Shubin,
Chicago Üniversitesi öğretim görevlisi, paleontolog ve
Your Inner Fish kitabının yazarı

“Yeryüzü’nün tarihini ustalıkla özetliyor... Muazzam bir el kitabı. ”

Kirkus Reviews



KOD'den muaf

DÜŞBAZ KİTAPLAR
ISBN: 978-625-7425-25-4
9 786257 425254



**düşünerek
ve düşleyerek
yaşayanlara**

**düs
baz**

ANDREW H. KNOLL

Harvard Üniversitesi'nde Yerküre ve Gezegenbilim Bölümü'nde Doğa Tarihi alanında profesör olan Andrew H. Knoll, bugüne kadar Uluslararası Biyoloji Ödülü (International Prize for Biology) ile Ulusal Bilimler Akademisi Charles Doolittle Walcott ve Mary Clark Thompson Madalyaları'nın, Paleontolog Topluluk Madalyası'nın (Paleontological Society Medal) ve Wollaston Londra Jeolojik Topluluğu Madalyası'nın (Wollaston Medal of the Geological Society of London) sahibi olmuştur. Knoll, yaklaşık iki yıl boyunca NASA tarafından Mars'a gönderilen uzay araçlarından rol aldığı ve Mars'ın yüzeyini ve jeolojisini tanımayı amaçlayan Mars Exploration Rover Mission'da görev almıştır. Ayrıca Bilim alanında Phi Beta Kappa Kitap Ödülü'nü aldığı *Life on a Young Planet* (Genç Gezegende Yaşam) kitabının da yazarıdır.

AYDIN ÇAYDAR

1979 yılında İzmir'de doğdu. Bornova Anadolu Lisesi Almanca bölümünü bitirdikten sonra Ege Üniversitesi'nde Gıda Mühendisliği eğitimi aldı. Yaklaşık 10 yıl boyunca özel şirketlerde çalışmasının ardından sevdiği mesleği yapabilmek için tekrar üniversiteye girdi ve Yaşar Üniversitesi Mütercim Tercümanlık bölümünü birincilikle bitirdi. Çevirmen olarak Türkçeye kazandırdığı kitaplar arasında Ayrıntı Yayınları'ndan çıkan *Hayatın Gizli Hazları*, *Harcıyorum Öyleyse Varım*, *Din Felsefesi*, *Einstein'ın En Büyük Hatası* gibi eserler yer almaktadır.

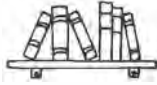
DÜNYA'NIN KISA TARİHİ

Sekiz Bölümde Dört Milyar Yıl

ANDREW H. KNOLL

Çevirmen: Aydın Çavdar





DÜŞBAZ KİTAPLAR: 25

DÜNYA'NIN KISA TARİHİ

SEKİZ BÖLÜMDE DÖRT MİLYAR YIL

ANDREW H. KNOLL

ORJİNAL ADI: A BRIEF HISTORY OF EARTH

FOUR BILLION YEARS IN EIGHT CHAPTERS

İNGİLİZCEDEN ÇEVİREN: AYDIN ÇAVDAR

YAYIN YÖNETMENİ: CANSU CANSEVEN

YAYIMA HAZIRLAYAN: BURCU ASENA ŞAHİN

SON OKUMA: DÜŞBAZ ATÖLYE

© 2021 by Andrew H. Knoll

Bu kitabın Türkçe yayım hakları HarperCollins
Publishers üzerinden AnatoliaLit Telif Hakları
Ajansı aracılığıyla alınmıştır.

Bu kitabın tüm yayım hakları
Düşbaz Kitaplar'a aittir.

KAPAK TASARIMI: LUCY ALBANESE

Bölüm Başındaki illüstrasyonlar: Todd Marshall

Arka plan görselleri: (sf. iv, xii, 8, 36, 60, 90, 112, 138, 168, and 194)

© 1xpert/adobe.stock.com

Şekil 3: Illustration © Macrovector/adobe.stock.com

Şekil 7 and 44 (kafatası): Illustrations by Alexis Seabrook

DİZGİ: ESİN TAPAN YETİŞ

Baskı ve Cilt: Ali Laçın/Barış Matbaa/Mücellit

Davutpaşa Cad. Güven San. Sit. C Blok No. 286

Topkapı/Zeytinburnu/İstanbul

Tel. (0212) 567 11 00

Sertifika No: 46277

Birinci Basım: Ocak 2023

ISBN 978-625-7425-25-4

Sertifika No: 10704

Düşbaz Kitaplar, Ayrıntı Yayınları'nın markasıdır.



INSTAGRAM @dusbazkitap



FACEBOOK @dusbazkitaplar



TWITTER @dusbazkitaplar



YOUTUBE Ayrıntı Yayın Grubu



WWW.AYRINTIYAYINLARI.COM.TR



DUSBAZ@AYRINTIYAYINLARI.COM.TR



0212 512 15 00 EXD.



HOCAPAŞA MAH. DERVİŞLER SOK.

DIRİKOÇLAR İŞ HANI, NO:1 KAT:5

SİRKECI, FATİH-İSTANBUL



“Dünyanın önde gelen jeologlarından Andrew H. Knoll, Yerküre tarihinin muazzam özetini sunuyor: Sürükleyici olduğu kadar ilginç, esprili olduğu kadar zekice ve kesinlikle okumaya değer bir kitap.”

—Steve Brusatte, *Dinozorların Çöküşü ve Yükselişi* kitabının yazarı

ANDREW H. KNOLL

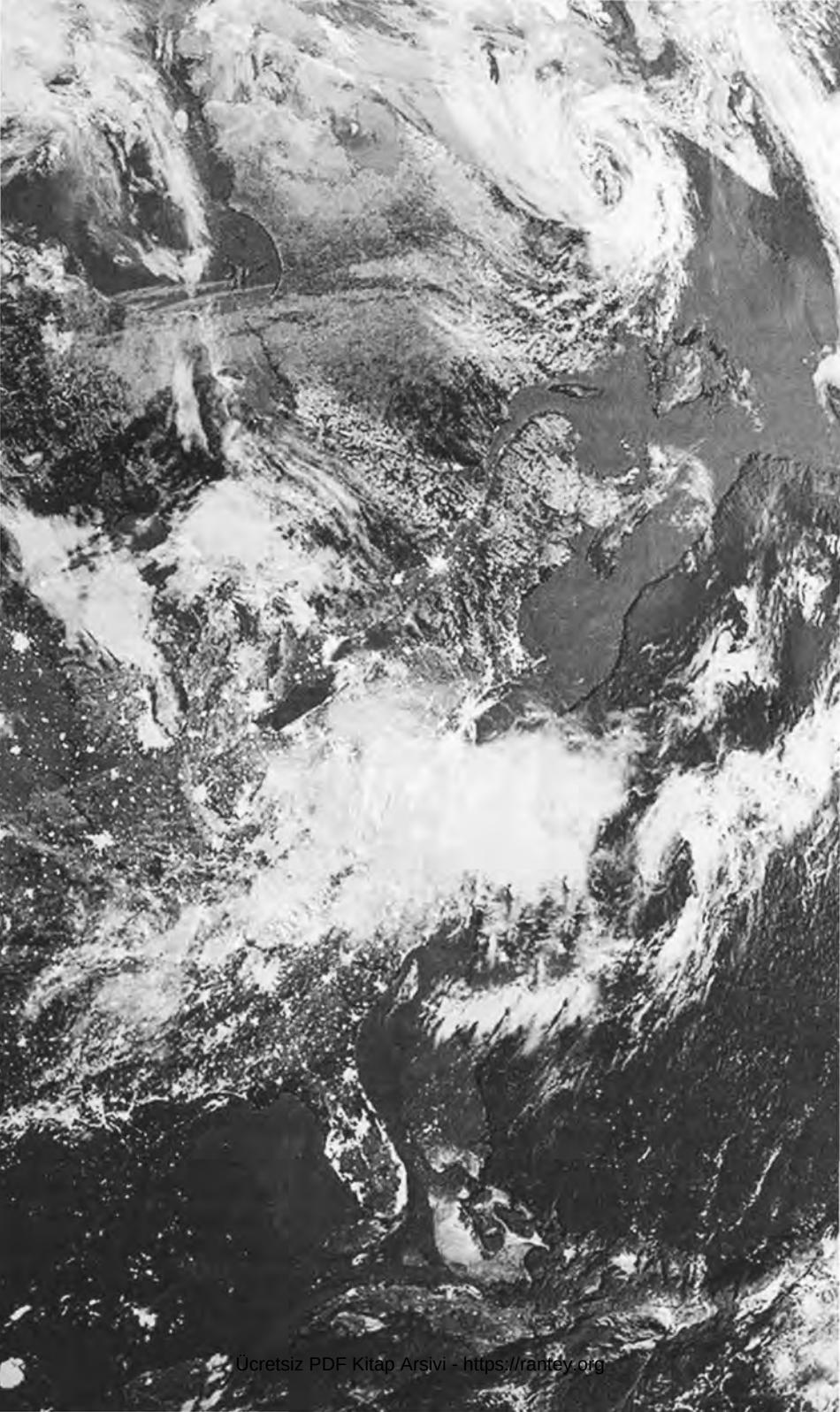
DÜNYANIN KISA TARİHİ

SEKİZ BÖLÜMDE
DÖRT MİLYAR YIL
18 DİLE SATILDI

ÇEVİRMEN: AYDIN ÇAYDAR

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - <https://rantey.org>

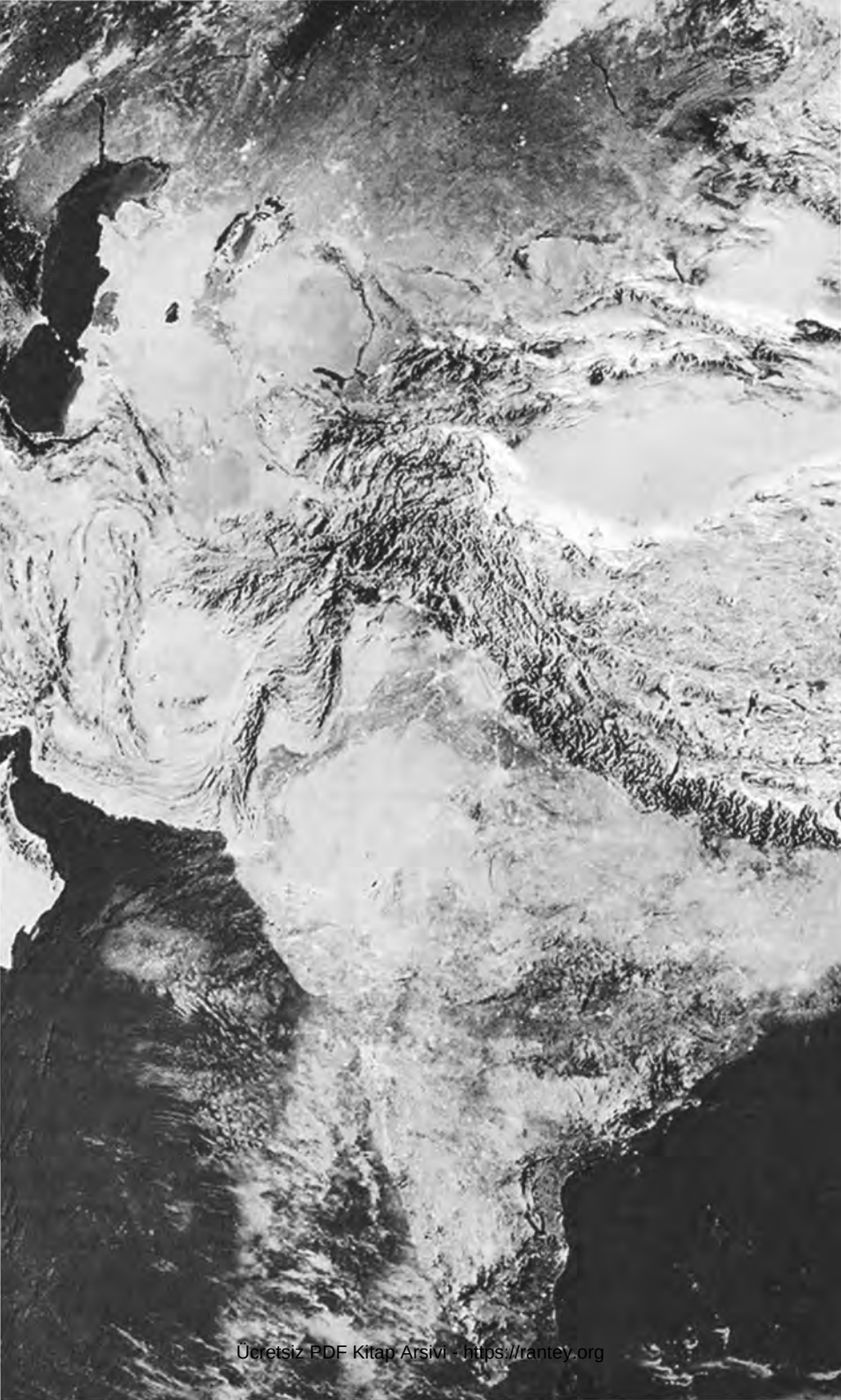




*Martha'ya ithafen.
Her Şey için.*

İçindekiler

Giriş: Bir Davet	11
1. Kimyasal Dünya	
BİR GEZEĞENİN OLUŞUMU	19
2. Fiziki Dünya	
GEZEĞEN ŞEKİLLENİŞİ	41
3. Biyolojik Dünya	
GEZEĞENE YAŞAM YAYILIYOR	61
4. Oksijen Dünyası	
SOLUNABİLİR HAVANIN KÖKENİ	85
5. Hayvan Dünyası	
HAYAT BÜYÜYOR	103
6. Yeşil Dünya	
BİTKİLER VE HAYVANLAR KARAYI İŞGAL EDİYOR	125
7. Felaketler Dünyası	
SOYLARIN TÜKENMESİYLE HAYAT YENİDEN ŞEKİLLENİYOR	149
8. İnsan Dünyası	
BİR CANLI TÜRÜ GEZEĞENİ DEĞİŞTİRİYOR	171
Dizin	215



Giriş: Bir Davet



HAYATINIZI YERÇEKİMİYLE YERKÜRE'YE BAĞLANMIŞ halde yaşıyorsunuz. Attığınız her adım, makadam kaplamayla veya döşeme tahtalarıyla gizlenmiş bile olsa sizi taş ya da toprakla temasa geçiriyor. Uçağa binip havalanınca yerçekiminin kısılcısından kurtulduğunuzu düşünebilirsiniz ama tüm bu coşku geçicidir; yerçekimi birkaç saat içinde yine kazanır ve yeniden toprağa inersiniz.

Yerküre'ye bağlılığımızı yerçekiminin bir hayli ötesine geçer. Tükettiğiniz gıdalar, topraktan veya denizden gelen besleyici maddeler ve suyun yanı sıra atmosfer ya da okyanuslardaki karbondioksitten meydana gelir. Her nefesinizle akşam yemeğinizden enerji elde etmenizi sağlayan bol oksijenli havayı ciğerlerinize çekersiniz. Bu sırada atmosferdeki karbondioksit donmanızı önler. Dahası buzdolabınızın kapısındaki çelik, “teneke” konserve kutularınızdaki alüminyum, bozuk paralarınızdaki bakır ve akıllı telefonunuzdaki nadir toprak metallerinin hepsi Yerküre'den gelir. Tüm bunları göz önünde bulundurduğumuzda yaşamamızı sağlayan ve zaman zaman

depremler veya kasırgalar sırasında bizi tehlikeye atan bu kocaman küreye karşı çoğumuzun ne kadar kayıtsız kaldığını görmek şaşırtıcıdır.

Yerküre'nin evrendeki yerini nasıl anlayabiliriz? Varoluşumuzu tanımlayan kayalar, hava ve su nasıl oluştu? Kıtalarımızı, dağlarımızı ve vadilerimizi, depremlerimizi ve volkanlarımızı nasıl açıklıyoruz? Atmosferin veya deniz suyunun yapısını kontrol eden nedir? Ayrıca etrafımızdaki yaşamın muazzam çeşitliliği nasıl oluştu? Belki de en önemlisi, bizzat eylemlerimiz, Yerküre'yi ve yaşamı ne şekilde değiştiriyor? Bu sorular kısmen sürece ilişkin cevapları arıyor ama aynı zamanda tarihsel sorgulamalar niteliğindedir, zaten bu kitabın çerçevesi de işte bunlardan oluşuyor.

Bu hikâye evimizin, Yerküre'nin ve yüzeyine yayılan organizmaların hikâyesi. Yerküre'yle ilgili her şey dinamik ve sık rastlanan fakat hatalı olan kalıcılık izlenimine rağmen sürekli değişim halinde. Örneğin Boston kentinin ılıman bir iklimi var; yazları ılık, kışları soğuk ve orta ölçekli yağışlar yıl içinde hemen hemen eşit dağılım gösteriyor. Mevsimler tahmin edilebilir şekilde geçiyor ve siz de benim gibi onlarca yıllık deneyime sahipseniz bütün bunları daha önce gördüğünüz hissine kapılıyorsunuz. Ne var ki meteorologlar sizlere Boston'daki yıllık ortalama sıcaklığın, yaşça büyük vatandaşlarının ömrü boyunca bir Fahrenheit derece (yaklaşık 0,6 derece Celsius) daha fazla arttığını söyleyecektir. Keza yüzey sıcaklığının en mühim düzenleyicilerinden olan atmosferdeki karbondioksit miktarının da 1950'lerden bu yana üçte bir oranında arttığını biliyoruz. Benzer şekilde, yapılan ölçümler bize küresel deniz seviyesinin yükseldiğini ve okyanuslarda çözünmüş olan oksijen miktarının, Beatles şöhrete ulaştığından beri yaklaşık yüzde 3 oranında azaldığını söylemektedir.

Küçük değişimler zaman içinde üst üste biniyor. Boston'dan Londra'ya yapılan uçak yolculuğu, yeni deniz tabanı Kuzey Amerika ile Avrupa'yı yavaş yavaş birbirinden ayırdığı için her yıl yaklaşık 2,5 santimetre uzuyor. Eğer kaseti geri sarabilseydik, 200 milyon yıl öncesinde Amerika'daki New England ile bildiğimiz İngiltere'nin tek bir kıtanın parçaları olduğunu,

günümüzde Doğu Afrika'da görülenlere benzer grabenlerin okyanus havzasını oluşturmaya daha yeni yeni başladığını görürdük. En uzun süreli ölçeklerle bakıldığında Yerküre'nin değişimleri gerçekten büyüktür. Örneğin Yerküre'nin ilk yıllarında dolaşmanıza müsaade edilse gezegenimizin oksijensiz havasında kısa sürede boğulurdunuz.

Yerküre'nin ve beslediği organizmaların hikâyesi, Hollywood'un gişe rekorları kıran filmlerinin hepsinden daha hashmetlidir, çoksatar gerilim romanlarıyla aşık atacak ölçüde beklenmedik gelişmelerle doludur. Dört milyar yıldan daha uzun bir zaman önce gösterişsiz genç bir yıldızın etrafında dönen toz kümelerinin bir araya gelmesiyle küçük bir gezegen oluştu. Yerküre ilk yıllarında yer kabuğundaki ani değişimlerin eşliğinde yaşıyordu; kuyruklu yıldızların ve meteorların yağmuruna tutuluyor, bu sırada çalkantılı magma okyanusları yüzeyini kaplıyor ve toksik gazlar atmosferi boğuyordu. Bununla birlikte gezegen zaman içinde soğumaya başladı. Kıtalar oluştu, derken ayrıldı, sonra tekrar birleşti; bu esnada çoğu, zaman içinde yok olup giden göz alıcı dağ sıraları ortaya çıkardı. İnsanların bugüne kadar şahit olduğu her şeyden milyon kat büyük volkanlar vardı. Küresel buzullaşma döngüleri yaşandı. Parçalarını yeni yeni bir araya getirmeye başladığımız sayısız kayıp dünya vuku buldu. Hayat bu dinamik evrede nasılsa bir dayanak meydana getirdi ve nihayetinde gezegenimizin yüzeyini dönüşüme uğratarak trilobitlerin, dinazorların ve konuşabilen, düşünebilen, araçlar yapabilen ve neticede dünyayı tekrar değiştirebilen bir türün ortaya çıkışına zemin hazırladı.

Yerküre'nin tarihini anlamak etrafımızdaki dağların, okyanusların, ağaçların ve hayvanların nasıl oluştuğunu idrak etmemize yardımcı olur. Altınlardan, elmaslardan, kömürden, petrolden ve bizzat ciğerlerimize çektiğimiz havadan bahsetmiyorum bile. Dolayısıyla gezegenimizin hikâyesi, insan faaliyetlerinin yirmi birinci yüzyılda dünyayı nasıl değiştirdiğini anlamamız için gereken bağlamı sağlar. Gezegenimiz, tarihinin büyük bölümünde insanlık için yaşanabilir durumda değildi, öyle ki jeolojinin en kalıcı dersleri arasında içinde bulunduğumuz ânın ne kadar geçici, kırılgan ve değerli olduğunun farkına varılması yer alır.

BUGÜNLERDE gazete manşetleri sıklıkla Vahiy Kitabı’ndan” koparılmış gibi görünüyor: Kaliforniya’da eşi benzeri görülmemiş orman yangınları ve alevler içindeki Amazon; Alaska’da rekor sıcaklıklar ve Grönland’da gittikçe hızlanan buzul erimesi; “yüzyılda bir görülen” seller Amerika’nın orta batısını artan bir sıklıkla basarken Karayipler’i ve ABD’nin güney kıyısını kasıp kavuran dev kasırgalar; Hindistan’ın altıncı en büyük kenti Chennai’in susuz kalması, Cape Town ve Sao Paolo’nun da o noktaya yaklaşması. Biyoloji kanadından gelen haberler de daha iyi sayılmaz: 1970 yılından bu yana Kuzey Amerika’da kuş popülasyonunda yüzde otuz azalma; böcek popülasyonunun yarıya inmesi; Büyük Set Resifi boyunca mercanlardaki muazzam ölüm oranı; fil ve gergedanların hızla azalması; ticari balıkçılığın tüm dünyada tehdit altında olması. Popülasyon azalması soy tükenmesi değildir ama canlı türlerinin biyolojik sona doğru yokuş aşağı gittiği bir yoldur.

Dünya çığırından mı çıktı? Tek kelimeyle: Evet. Sebebinin de biliyoruz: Zanlı biziz. Atmosfere sera gazlarını pompalayarak Yerküre’yi ısıtmakla kalmayıp aynı zamanda sıcak hava dalgalarının, kuraklıkların ve fırtınaların büyüklüğünü ve sıklığını artıran biz insanlardan başkası değil. Arazi kullanımını değiştirerek, kaynakları aşırı tüketerek ve gitgide artan iklim değişikliğiyle canlı türlerini tükenmenin eşiğine getiren de insanlar. Bunu akılda tutarak baktığımızda belki de en korkunç haber, insanlığın verdiği tepki: Geniş çaplı bir kayıtsızlık söz konusu, bu kayıtsızlık belki de bilhassa benim ülkemde, Amerika Birleşik Devletleri’nde yer buluyor.

Peki torunlarımızın yaşamını bambaşka bir şekle sokacak olan küresel değişiklikler karşısında çoğu insan niçin bu kadar duyarsız? Senegalli bir orman korucusu olan Baba Dioum, 1968 yılında bu soruya şu unutulmaz yanıtı verdi: “Nihayetinde yalnızca sevdiğimiz şeyi koruyacağız, yalnızca anladığımız şeyi seveceğiz ve yalnızca bize öğretileni anlayacağız.”

* Yeni Ahit’te kıyameti konu edinen tek kısımdır ve Hz. İsa’nın İkinci Gelişi’nde yaşanacak olaylara ve gelecek figürlere dair kehanette bulunur. (y.h.n.)

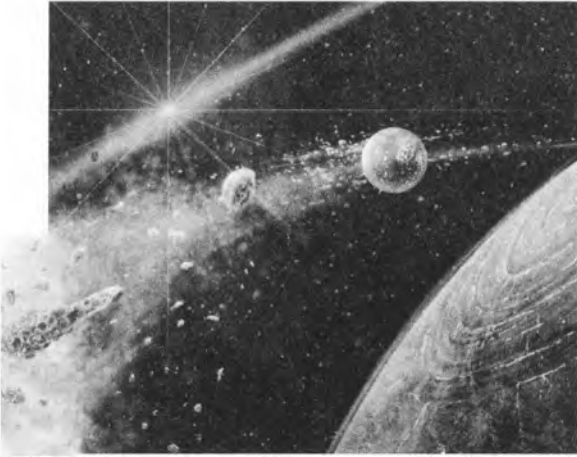
Öyleyse bu kitap anlamaya yönelik bir girişimdir. Gezegene-
nimizi şu andaki konumuna getirmiş olan köklü tarihi idrak
etmeye yönelik bir davettir. İnsanlığın eylemlerinin, dört milyar
yıldır varolan bir gezegeni ne kadar derinden etkileyebildiğini
fark etmeye yönelik bir teşviktir. Bir de bu konuda bir şeyler
yapmaya yönelik bir meydan okumadır.



①

Kimyasal Dünya

BİR GEZEĞENİN OLUŞUMU



BAŞLANGIÇTA HER ŞEY BİR parça tozdan, bir zerrecikten, bir parçacıktan ibaretti; aynı anda hem akıl almayacak ölçüde küçük hem de hayal edilemeyecek kadar yoğun bir parçacıktı bu. Evrenin uçsuz bucaksız boşluğunda bölgesel bir madde yoğunlaşması değildi. Evrenin ta kendisiydi. Oraya nasıl geldiğini ise kimse bilmiyor.

Öncesinde eğer bir şey var ise bu şeyin ne olduğu da bir o kadar gizemlidir ama bu ilkel evren çekirdeği, yaklaşık 13,8 milyar yıl önce hızla genişlemeye başladı. Bu, çevresine muazzam miktarda enerji ve madde dalgası salan “Büyük Patlama” idi. Yayılan maddeler gündelik yaşantımızdaki kayalar ve madenler değildi, hatta kayaları, havayı ve suyu oluşturan atomlar bile değildi. Evrenin şafağında, madde kuarklardan, leptonlardan ve gluonlardan yani nihayetinde atomları meydana getirecek olan atomaltı parçacıklardan oluşan tuhaf bir yapıdan ibaretti.

Evrene ve geçmişine dair bildiklerimizin büyük bölümü en kısa ömürlü kaynaktan, yani ışıktan gelir. Geceleri gökyüzüne şeklini veren o ışıklı iğnecikler tarih kitaplarına pek

benzemiyor olabilir ama ışığın iki özelliği evrenin nasıl evrim geçirdiğini anlamamıza yardımcı olmaktadır. Birincisi, gelen radyasyondaki farklı dalga boylarının yoğunluğu, kaynağının bileşimini işaret eder. Gözlerimiz yalnızca dar bir dalga boyu aralığını algılayabilir ama yıldızlar ve diğer gök cisimleri, her biri kendine has hikâyeye sahip radyo dalgaları ve mikrodalgalardan X ve gama ışınlarına kadar geniş bir aralıkta radyasyon yayar veya emer. Işığın kati bir hız sınırına sadık kalması da önemlidir: Işık uzayda saniyede yaklaşık 299.792.458 metre veya yaklaşık 186.276 mil yol almaktadır. Güneş ışığı, biz onu görmeden sekiz dakika yirmi saniye önce yayılmaya başlar. Yıldızlarla daha uzaktaki gök cisimleri bakımından kaydettiğimiz ışık daha da öncesinde meydana gelmektedir. En uzaktaki gök cisimleri için ise çok daha uzun süreler söz konusudur. Yıldızlı gökyüzümüzü göksel bir tarih kitabı haline getiren de budur.

Zamanın başlangıcından birkaç yüz bin yıl sonra oluşmuş ve gökyüzüne eşit şekilde dağılmış olan mikrodalgalar bize Büyük Patlama'dan ve hemen sonrasında olup bitenlerden bahsederken birinci nesil yıldızlardan yayılan radyasyon bize ancak şimdi ulaşmaktadır. Peki, bu ilk yıldızlar nasıl oluştu? Her şey kütleçekime, yani evrenin mimarına dayanıyor. Kütleçekim, farklı cisimler arasındaki çekimi anlatır; bu çekimin gücü cisimlerin kütleleri ve aralarındaki mesafeyle belirlenir. Atomlar, ilk dönemdeki genişleyen evrende oluşurken kütleçekim onları bir araya sürüklemeye başlamıştır. Bölgesel kümelenmeler artmış, aralarındaki kütleçekim güçlenmiş ve nihayetinde bunlar sıcak, yoğun toplar halinde çökelmiştir. Bu topraklar o kadar sıcak ve yoğunmuş ki hidrojen çekirdekleri helyum oluşturmak üzere birleşerek ısı ve ışık yaymıştır. İşte bu olay gerçekleştiğinde bir yıldız doğmuş olur. Büyük, sıcak ve kısa ömürlü olan bu primordiyal yıldızlar, bizler de dahil daha sonra ortaya çıkacak olan her şeyin kaderini tayin etmiştir.

Büyük Patlama neticesinde üretilen madde, büyük ölçüde, en basit element olan hidrojen atomları ile bir miktar döteryum (bir nötron eklenmiş hidrojen) ve helyumdan meydana geliyordu. Daha küçük miktardaki diğer hafif elementlerin yanı sıra biraz da lityum oluşmuştu ama bunların dışında pek bir şey

yoktu. Aslında bir şey daha vardı fakat onun ne olduğunu tam olarak bilmiyoruz. Gökbilimciler 1950’lerde uzayın derinliklerindeki kütleçekimi hesaplamak için yıldızların ve galaksilerin (yine kütleçekimle bir arada tutulan toz, gaz ve yıldız kümesi) hareketlerini kullanmaya başladılar; ne var ki gökyüzündeki bilinen bütün cisimlerin kütlesini topladıklarında bu toplamın gözlemlerini açıklayabilmekte yetersiz kaldığını fark ettiler. Uzayda başka bir şey, kütleçekim aracılığıyla normal maddeyle etkileşen ama ışıkla etkileşimi olmayan bir şey olmalıydı: Gökbilimciler buna karanlık madde adını verdiler. Gökbilimcilerin karanlık maddenin ne olabileceğine dair birtakım fikirleri olsa da bu konuda fikrinden emin olan kimse yok. Evrenin işleyişini açıklamak bakımından yine elzem sayılan karanlık enerji ise daha da gizemli bir unsurdur. Karanlık madde ile karanlık enerjinin, varolan her şeyin yaklaşık yüzde 95’ini teşkil ettiği tahmin edilmektedir. Bunlar bizim tespit edemediğimiz fakat evrenin şekillenmesinde büyük rol oynadığı düşünülen gizemli unsurlardır. Daha öğreneceğimiz çok şey var.

Gelin, alışılagelmiş maddelere geri dönelim. Yıldız ışığı çağı başladığında evren (büyük ölçüde) hidrojen atomlarından oluşan soğuk, dağınık bir kokteyldi. İlk yıldızlar daha fazla helyum ürettiyordu ancak bir Yerküre’yi meydana getirmekte kullanabileceğiniz herhangi bir şey yoktu. (Sonraki sayfada yer alan tabloya bakınız.) Öyleyse gezegenimizin oluşumu için gerekli demir, silisyum ve oksijen nereden geldi? Peki ya vücudumuzu oluşturan karbon, nitrojen, fosfor ve diğer elementler? Bunlar ve diğer tümelementler sonraki yıldız nesillerinden, yani günün birinde gezegenimizi oluşturacak olan atomların dökümhanelerinden doğdu. Hafif elementler, büyük yıldızlarda görülen yüksek sıcaklık ve basınçlarda karbon, oksijen, silisyum ve kalsiyum oluşturmak üzere birleşti. Demir, altın, uranyum ve diğer ağır elementler de “süpernova” adı verilen dev yıldız patlamaları sonucunda meydana geldi. Aynada gördüğünüz yüz, belki onlarca yıllık olabilir ama milyarlarca yıl önce antik yıldızlar içinde oluşan elementlerden meydana gelmiştir.

Zamanın sonsuzluğu içinde yıldızlar oluştu ve yok oldu; her bir döngü, günümüzde Yerküre’de ve yaşamın içinde bulu-

nan element stokuna katkı sağladı. Galaksiler birleşti ve kara delikler (hiçbir ışığın kaçamayacağı kadar yoğun bölgeler) ortaya çıktı; bunlar yavaş yavaş bugün gözlemlediğimiz evreni şekillendirdiler.

Hikâyemize yaklaşık 4,6 milyar yıl öncesinden devam ediyoruz. Odak noktamızda Samanyolu adı verilen sıradan bir galaksinin sarmal şeklindeki kollarından birinde yer alan hidrojen atomları ile az miktarda gaz, buz ve mineral granüllerinden oluşan mütevazı bir bulut var. İlk başta bulut büyük, dağınık ve soğuktu. (10 ile 20 derece Kelvin veya -460 ile -420 derece Fahrenheit veya -250 ile -275 C ile hakikaten soğuktu.)

YERYÜZÜNÜN VE DÜNYADAKİ YAŞAMIN KİMYASAL BİLEŞİMİ (ağırlıkça yüzde olarak)

Yeryüzü	
Demir	33
Oksijen	31
Silisyum	19
Magnezyum	13
Nikel	1.9
Kalsiyum	0.9
Alüminyum	0.9
Diğer her şey	0.3
İnsan vücudundaki hücreler	
Oksijen	65
Karbon	18
Hidrojen	10
Azot	3
Kalsiyum	1.5
Fosfor	1
Diğer her şey	1.5

Muhtemelen yakınlardaki bir süpernovanın dürtmesi neticesinde bu bulut çok daha küçük, daha yoğun ve daha sıcak

bir nebula halinde çöktü. Evrenin başka yerlerinde milyarlarca kez gerçekleştiği üzere kütleçekim nihayetinde, bulutun büyük bölümünü sıcak, yoğun ve merkezi bir kütle haline getirdi yani Güneş'imizi oluşturdu. Nebuladaki hidrojenin büyük bölümü Güneş'e gitti ama buz kitlesi ve mineral granülleri çiçeği burnunda yıldızımızın etrafında dönen bir disk haline gelerek onlardan ayrıldı. Bu disk, genel anlamda, bugün Satürn'ü çevreleyen küçük parçacıkların meydana getirdiği halkaları anımsatıyordu. (Resim 1) İlk başlarda kendisini oluşturan mineralleri ve buzları buharlaştıracak kadar sıcaktı. Ancak birkaç milyon yıl içinde soğumaya başladı; uzak kısımları daha hızlı soğurken Güneş'in sıcaklığına yakın kısımları daha yavaş soğuyordu.



Resim 1. Atacama Large Millimeter Array tarafından kaydedilen bu olağanüstü görüntü, Güneş benzeri genç bir yıldız olan HL Tauri'yi ve onun öncül-gezegen diskini göstermektedir. Görüntüde açıkça görülen halkalar ve boşluklar, yeni yeni oluşan gezegenlerin yörüngelerini toz ve gazdan arındırmalarını ispatlar. Bizim Güneş Sistemimiz de 4,54 milyar yıl önce muhtemelen büyük ölçüde böyle görünüyordu. ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/ NASA/ESA

Farklı maddelerin belirli sıcaklıklarda eridiğini veya kristalize olduğunu gündelik yaşamımızdaki deneyimlerimizden biliyoruz. Örneğin Dünya'nın yüzeyinde su, 0°C'de (32 °F) buza dönüşecektir ama kuru buz, karbondioksitten donma haline çok daha düşük sıcaklıklarda ulaşır (-78,5°C). Buna çok benzer şekilde, kayalarda bulunan minerallerin eriyik haldeki öncülleri birkaç yüz dereceden başlayıp 1000°C üzerine kadar ulaşan çeşitli sıcaklıklarda kristalize olur. Bu sebeple, söz konusu

gezegen diski soğurken farklı materyaller, farklı zamanlarda ve Güneş'in sıcaklığıyla mesafelerine bağlı olarak belirli yerlerde kristalize olarak katılmıştır. İlk olarak kalsiyum, alüminyum ve titanyum oksitleri, akabinde metalik demir, nikel ve kobalt oluştu ve ancak bundan sonra Güneş'ten uzak bir noktada don çizgisi, su buzları, karbondioksit, karbonmonoksit, metan ve amonyak yani okyanusları, havayı ve yaşamı oluşturan maddeler meydana geldi. Buz ve mineral parçacıkları daha büyük partikülleri oluşturmak üzere birleşti, bunlar da daha büyük oluşumlar halinde bir araya geldi. Birkaç milyon yıl içinde bir zamanlar diskin döndüğü yerde yalnızca bir avuç büyük, küre şeklinde yapı kaldı. "Güneş'e en yakın üçüncü kaya", Güneş'in yörüngesinde yaklaşık 150 milyon kilometre uzaklıktan dönen taşlı bir kütle olan Dünya'ydı.

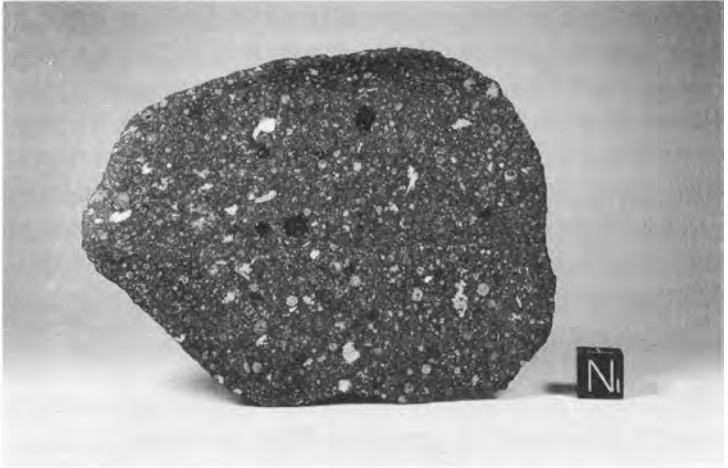
PEKİ, DÜNYA TAM OLARAK nasıl şekil aldı ve bizler Dünya'nın bebekliğine dair ne biliyoruz? Eğer ışık evrenin tarihini yazıyorsa kayalar da gezegenimizin hikâyesini anlatır. Büyük Kanyon'a baktığınızda veya Louise Gölü'nü çevreleyen zirveleri hayretle izlediğinizde aslında içinde Yerküre'nin cilt cilt taşlara kazınıp sergilendiği tabiatın kütüphanesini seyre diyorsunuzdur. Çökelti ve tortular (daha eski kayaların erozyonuyla oluşmuş olan çakıllar, kumlar veya çamurlar ya da su kütlelerinden çöken kireç taşları) taşkın yataklarına ve deniz tabanına yayılırken gezegenimizin oluştuğu dönemde ve yerde yüzeyinin sahip olduğu fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri tabaka tabaka kaydetmiştir. Dünya'nın derinliklerindeki eriyik materyallerden oluşan magmatik kayalar, tıpkı Dünya'nın derinliklerindeki yüksek sıcaklık ve basınçta tortul veya magma kökenli öncüllerden oluşmuş benzeri kayaların yaptığı gibi bize, gezegenimizin dinamik iç yapısına ilişkin daha da fazlasını anlatır. Bu kayalar bir bütün olarak düşünüldüğünde gençlik yıllarından olgunluk dönemine kadar Yerküre'nin gelişimine, bakterilerden sizlere kadar yaşamın evrimine dair muazzam bir hikâye anlatır. Söz konusu hikâyelerin en muazzamı da muhtemelen zaman içinde fiziksel ve biyolojik Dünya'nın birbirini etkileyiş biçimlerini

konu edinen olsa gerek. Bir jeolog olarak geçirdiğim kırk yıla rağmen İngiltere'nin güneyindeki Dorset kıyısı boyunca uzanan falezlerin, Dünya'nın 180 milyon yıl önceki halini gözümde canlandırmama olanak vermesini hâlâ hayretle karşılıyorum. Daha sonra göreceğimiz üzere milyarlarca yıl önceki Dünya'yı ve yaşamı anlatan kayalar, onlardan da olağanüstüdür.

Rocky Dağları'ndaki veya Alpler'deki heybetli zirvelere baktığınızda ise Dünya tarihinin başka bir özelliği dikkatinizi çekebilir. Dış görünümündeki şekilleri tortulaşma göstergesi değildir. Aksine kayaları aşındırıp hikâyelerini silip götürən erozyonla, fiziksel ve kimyasal süreçlerle yontulurlar. Dünya bir eliyle kendi tarihini yazarken diğer eliyle de siler ve zamanda daha da geriye gittikçe silinen kısımlar üstünlüğü ele geçirir. Gezegenimiz yaklaşık 4,54 milyar yıl önce oluşmuştur ama Dünya'nın bilinen en eski kayaları yalnızca yaklaşık 4 milyar yıl öncesine aittir. Daha eski kayalar mutlaka var olmuştur fakat aşınıp gitmiş veya toprak altında kalmış ve metamorfizma yoluyla tanınmayacak şekle dönüşmüştür. Kanada veya Sibirya'nın bazı ücra köşelerinde bazıları hâlâ varlığını sürdürmekte ve varlığının tanınmasını beklemekte olabilir ama genel itibarıyla Dünya tarihinin ilk 600 milyon yılı gezegenimizin Karanlık Çağı'nı teşkil etmektedir.

Peki, tarihi kanıtlardan mahrumken Yerküre'nin bebeklik dönemini nasıl yeniden kurgulayabiliriz? İşe bakın ki elimizde deyiş yerindeyse, dünya dışında depolanmış yedek kopyalar mevcuttur. Söz konusu kayalar, erken dönem Güneş Sistemi'nden sağ kalan ve zaman zaman Dünya'ya düşen taşı cisimler, yani göktaşlarıdır. Dünya'nın ve diğer gezegenlerin 4,5 milyar yıldan daha uzun bir süre önce şekil aldığına dair inancımız, bu özel kayaları meydana getiren mineraller içinde kapalı kalmış jeolojik "zaman ölçerler"den gelmektedir. (Birazdan Dünya'nın geçmişini tarihlendirmeye dair daha fazla bilgi paylaşılacaktır.) Kondritler olarak adlandırılan bazı göktaşları, "kondrül" adı verilen yuvarlak, milimetre ölçekli granüllerden oluşur. Bu göktaşların, gezegen oluşumunun en erken evrelerinde daha büyük cisimler oluşturmak üzere çarpışan o küçük parçacıkları muhafaza ettiği düşünülmektedir (Resim 2). Bu

görüş, kondrül bileşimine dair dikkatli çalışmalardan güç alır. Söz konusu bileşim, Güneş Sistemimizdeki disk soğumaya başladığında ilk yoğunlaşan mineraller olan kalsiyum, alüminyum ve titanyum mineralleri ile yakınlardaki bir süpernovadan fırlayan ve daha sonra Güneş Sistemi oluşurken sistemin içine katılan nadir granülleri içerir. Kondritik göktaşları, yalnızca erken Güneş Sistemi'ne dair doğrudan bir kaydı muhafaza etmekle kalmaz, bu göktaşlarının kimyasal bileşimleri de onların bizzat Dünya'nın kendisini oluşturan başlıca materyaller oldukları düşüncesini uyandırır.



Resim 2. 1969'da Dünya'ya düşmüş karbonlu bir kondrit olan Allende göktaşı. İçindeki yuvarlak granüller, Güneş Sistemimizin tarihinin erken dönemlerinde oluşan ve nihayetinde Dünya da dahil olmak üzere iç gezegenlerini meydana getirmek üzere daha büyük cisimler halinde bir araya gelmiş kayalık küreler, yani kondrüllerdir. Karbonlu kondritler hem su hem de organik moleküller içerir ve neticede atmosferimizde, okyanuslarımızda ve yaşamımızda yer alacak materyalleri sağlar. Eşlik eden bloğun her iki yanı da 1 santimetredir. *Matteo Chinellato (Vikipedi aracılığıyla Creative Commons)*

Güneş'imizin etrafındaki kaya ve buzulların büyük bölümü birkaç milyon yıl içinde gezegenleri oluşturacak şekilde birleşti. Geleneksel görüşe göre toz boyutundaki partiküller, daha büyük granülleri oluşturacak şekilde bir araya geldi ve ardından

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - <https://rantey.org>

bu granüller daha da büyük cisimler halinde toplandı, nihayetinde de bugün Mars'ın ve Jüpiter'in yörüngeleri arasında bulunan asteroitlerin birçoğuna benzer kilometre ölçeğindeki kaya parçalarını yani gezegenimsileri oluşturdu. Bu yaklaşıma alternatif bir hipotez de gezegenimsi cisimlerin, doğrudan çakıl taşı boyutundaki partiküllerin birleşmesiyle oluştuğunu savunmaktadır. Her halükârda, birleşmeler tamamlanmaya doğru ilerlerken Ay ile Mars boyutunda yalnızca yaklaşık yüz tane cisim kalmıştı. Bunlar da Güneş Sistemimizin gezegenlerini oluşturmak üzere çarpışacaklardı. Böylesine ani ve aşırı bir değişim, nihayetinde evimiz olan yeri derinden etkiledi. Yerküre'nin büyük oranda oluşmasından yirmi otuz milyon yıl sonra Mars boyutunda bir cisim yavru gezegenimize çarparak uzaya kaya ve gaz salınmasına sebep oldu. Dışarı fırlayan bu materyallerin büyük bölümü nihayetinde Dünya etrafında daimi bir yörüngeye hapsolan görece daha küçük bir taş küre oluşturmak üzere birleşti. Dolunay şiirlere ilham kaynağı olabilse de aslında şiddetin eseri olarak doğmuştu ve sırları, ay taşlarının dikkatle incelenmesi sonucu aydınlatılmıştır.

DÜNYA, EKVATOR ÇEVRESİNDEN ÖLÇÜLDÜĞÜNDE 12.746 kilometre çapı olan top şeklinde bir kayadır. (Esasında gezegenimiz tam olarak bir küre değildir; dönüşünden dolayı ekvatorunda biraz şişkinleşirken kutuplara doğru basılaşır.) Dünya'yı ikiye bölerseniz (ki bunu sahiden yapmanızı tavsiye etmem) gezegenimizin homojen olmadığını, daha ziyade haşlanmış yumurta gibi eş merkezli olarak katmanlara ayrıldığını göreceksinizdir. (Resim 3) Dünya'nın "sarı" çekirdeğidir; gezegenimizin kütlelerinin yaklaşık üçte birini oluşturan sıcak, yoğun bir iç cisimdir. Çekirdek bir miktar nikel ve aralarında hidrojen, oksijen, sülfür ve/veya azotun da bulunduğu düşünülen yaklaşık yüzde 10 oranındaki daha hafif elementlerin yanı sıra büyük ölçüde demirden oluşur. Bu noktada, "bulunduğu düşünülen" ifadesiyle yetinmemiz gerekir çünkü Jules Verne kusura bakmasın ama aslında hiç kimse bir numune almak için Dünya'nın merkezine yolculuk yapmamıştır. Depremler neticesinde ortaya çıkan enerji dalgaları hastanelerdeki to-

mografi cihazları gibi hareket eder ve bu dalgaların gezegen içinde nasıl iletildiğine, yansıdığına, kırıldığına veya emildiğine ilişkin detaylar, çekirdeğin boyutlarını ve yoğunluğunu ortaya koyar. Çekirdeğin yoğunluğu, onun tamamıyla değil ama büyük oranda demirden oluşması gerektiğine işaret etmektedir. Laboratuvar deneyleri ve hesaplamalar, yukarıda belirtilenlere benzer hafif elementlerden oluşan bir karışımın, gözlemlenen yoğunluğu açıklayabileceğini göstermektedir ancak karışımın mutlak yapısı hâlâ tam olarak bilinmemektedir çünkü hiçbir bileşim tek başına bu probleme eşsiz bir çözüm sunabilecek durumda değildir. Yarıçapı 1.226 kilometre olan bir top diye tasvir edebileceğimiz iç çekirdek katı haldeyken dış çekirdek (yaklaşık 2.260 kilometre çapındadır) eriyik halde kalır ve konveksiyonla yavaşça hareket eder, yani tabana yakın olan yoğun ve sıcak madde ısınır yükselmeye ve soğumaya başlar, üstte kalan daha az yoğunluktaki madde de nihayetinde tabana doğru iner. Dış çekirdeğin bu hareketi bir elektrik dinamosu yaratır, bunun sonucunda da Dünya'nın manyetik alanı ortaya çıkar. Manyetik alan konusunu gündelik hayatınızda pek düşünmüyor olabilirsiniz ama varlığına minnettar olmanız gerekir. Bu manyetik alan atmosferimizin güneş rüzgârları tarafından (Güneş'ten yayılan yüklü parçacıkların oluşturduğu bir enerji akımı) kazınmasını engellerken pusulaların da (yaklaşık olarak) kuzeyi göstermesini sağlayarak işe yarar.

Dünya'nın mantosu –gezegen yumurtasının beyazı– çekirdeği çevreler. Gezegenimizin kütlelerinin yaklaşık üçte ikisini meydana getiren bu manto genel olarak silikat minerallerle yani silisyum dioksit (SiO_2 : saf kristal halindeki kuvars) açısından zengin minerallerle onlara katılan magnezyum ve daha az bir miktar demir, kalsiyum ve alüminyumdan oluşur. Manto hakkında bildiklerimizin çoğu yine deprem dalgalarından gelir; bu bilgiler laboratuvar deneyleriyle açıklığa kavuşturulmaktadır. Bununla birlikte Dünya zaman zaman bize lütufta bulunarak mantonun parçalarını yüzeye taşır. Elmaslar derin iç yapıdan gelen, bilhassa dikkate değer ulaklardır. Yüzeyin 160 kilometre veya daha aşağısında oluşan bu sert saf karbon topakları, lavların ve diğer magmatik kayaların eriyik kaynağı olan magma aracılığıyla yüzeye taşınır. Lorelei Lee elmasların, bir kadının

en iyi dostu olduğunu iddia etmiştir fakat onlar jeologların da en iyi dostudur çünkü genellikle laboratuvarında incelenen manto materyali parçacıkları içerir.

Manto katıdır ancak uzun vadede konveksiyon yapar. Manto sirkülasyonunun üç boyutlu modelinin kesin yapısı tartışma konusu olmaya devam etmektedir; benzer şekilde mantonun tüm parçalarının yüzeye yükselen volkanik kayaları üretip üretmediği konusu da tartışmalıdır. Bununla beraber jeologlar, manto kayaçlarının kısmi erimesinin Dünya'nın en ulaşılabilir katmanı olan kabuğu meydana getirdiği konusunda hemfikirdir.

Gezegimizin kütlelerinin yüzde birden azını oluşturan kabuk (yumurta benzetmemizdeki o ince kabuk) rutin olarak gözlemleyip numune alabildiğimiz yegâne katmandır ve bizlere kayda değer bir bilgi hazinesi sunar. Kıtalar, kuvars (SiO_2) ve sodyum veya potasyum açısından zengin feldspat mineralleri içeren kabuktan meydana gelmiştir; New Hampshire'daki Beyaz Dağlar veya Yosemite Ulusal Parkı'na önemli ölçüde nüfuz etmiş Sierra Nevada Sıradağları da dramatik ölçüde bu yapıya tipik birer örnek olarak verilebilir. Okyanusların altındaki kabuk farklıdır; Hawai yanardağlarından püskürenlere benzer bazaltik kayalardan oluşur. Bu kabuklar kalsiyum veya sodyum açısından zengin feldspat minerallerini içerirler ancak kuvars içermezler. Kıtasal kabuk, okyanusların altındaki kabuğa oranla hem daha kalındır hem de yoğunluğu daha azdır, bu özelliği sayesinde tıpkı soğuk bir içecek içindeki buz küpleri gibi okyanus kabuğunun üzerinde "batmadan kalabilir". Nitekim Dünya yüzeyindeki su, topografik olarak alçak noktalarda biriktiği için bazaltik kabuk genel olarak denizin altında yer alır.

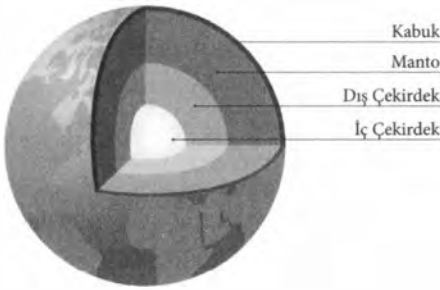
YERKÜRE'NİN KATMANLI YAPISI NASIL OLUŞTU? Dünya'nın eş merkezli katmanlarının, gezegenimiz birleşip oluşurken ardışık olarak biriken farklı materyalleri yansıttığını öne sürebiliriz fakat bu fikir birçok fiziksel ve kimyasal gözlemle çelişir. Çoğu bilim insanı bu fikir yerine şu açıklamada birleşir: Yeni yeni oluşan Dünya büyürken devam etmekte olan çarpışmalardan doğan sıcaklık ve radyoaktif izotopların bozunması gezegeni eritmiştir.

ELEMENTLER, İZOTOPLAR VE KİMYASAL BİLEŞİKLER

Elementler kimyasal bileşiklerin temel yapı taşlarıdır. Elementlerin özelliklerini sahip oldukları proton ve elektronların sayısı belirler. Örneğin karbon, altı protonu ve altı elektronu nedeniyle diğer elementlerle belirli şekillerde bağlanır. Oksijen farklıdır çünkü onun sekiz protonu ve sekiz elektronu vardır. Dünyanın dört bir yanındaki sınıflarda gururla sergilenen Periyodik Tablo, bilinen 118 elementin proton ve elektronlarının, yaptıkları kimyasal bağları ve dolayısıyla doğadaki dağılımlarını nasıl belirlediğine dair sistematik bir bakış sunar.

Tüm karbon atomlarının altı protonu ve altı elektronu vardır ancak nötron sayısı değişebilir. Çoğu karbon atomu yani karbon atomlarının yaklaşık yüzde 99'u, altı nötron ve altı proton içeren, 12 atom ağırlığına sahip (hidrojen atomu 1 olarak tanımlanır) karbon-12'dir. Bununla birlikte karbon atomlarının yaklaşık yüzde 1'i, atom ağırlığı 13 olacak şekilde fazladan bir nötrona sahiptir. Her bir trilyonda birkaç karbon atomu da atom ağırlığı 14 olacak şekilde sekiz nötrona sahiptir. Karbon-14 özel ve özellikle faydalı bir niteliği neticesinde tanıdık gelebilir: Bu atom radyoaktiftir. Radyoaktif izotoplar kararsızdır ve zamanla daha kararlı yavru atomlara ayrılır. Karbon-14 kendiliğinden bozunup azot-14 haline gelir. Laboratuvar da bu bozunmanın meydana gelme hızını ölçebiliriz: Bir numunede bulunan karbon-14'ün yarısı 5.730 yılda nitrojene bozunacaktır. (Buna yarı ömür denir.) Bu, C-14'ü arkeolojik araştırmalar için değerli bir kronometre haline getirir. Ne var ki birkaç on bin yıl sonra bir numunede doğru ölçüm için yeterli miktarda C-14 kalmaz, dolayısıyla Dünya'nın derin geçmişini tarihlendirmek için diğer izotoplara, özellikle de uranyum izotoplarına bakmamız gerekir.

Proton ve elektron sayısı bir elementin kimliğini ve dolayısıyla katılacağı kimyasal tepkimelerin türlerini belirlerken farklı izotop ağırlıkları, tepkimelerin gerçekleşme hızlarını etkiler. Bir grup elementin radyoaktif izotopları da Dünya tarihini tayin etmekte kullanılır. Göreceğimiz üzere izotopların bu özellikleri onları Dünya ve yaşam tarihi araştırmaları için vazgeçilmez kılmaktadır.



Resim 3. Yeryüzü'nün gezegenimizin iç bölümlerini gösteren bir kesiti. Üzerine bastığımız kabuk ince, yüzeysel bir kaplamadan ibarettir ve atmosfer ile okyanuslar ondan da incedir.

Özellikle demir gibi daha ağır elementler merkeze çökerken magnezyum silikat mineralleri ve demir, alüminyum, kalsiyum, sodyum, potasyum ve silikadan oluşan diğer kombinasyonlar bir dış katman oluşturmuştur. Yerküre'nin eş merkezli çekirdek ve manto yapısı ortaya çıkmıştır, yüzeysel kabuk katmanını da çok geçmeden onu izleyecektir.

Peki, bu kabuk nasıl oluştu? Bu soruyu yanıtlamak için daha önce bulunduğumuz bir beyana geri dönmemiz gerekir: Farklı mineraller belirli sıcaklıklarda erir veya kristalleşir. Dünya'nın oluşumundan sonra birkaç milyon yıl boyunca sıcak manto, yüze-ye çıkıp gezegen boyunca yayılarak gezegen bilimcilerin magma okyanusu dediği yapıyı meydana getiren eriyik materyaller üretti. Hawai'nin en aktif yanardağı olan Kilauea'dan akan taze lavı gördüyseniz bu manzaraya dair kafanızda bir şeyler oluşacaktır: Sert, siyah bir yüzey, çatlaklar içinde akkor turuncu bir parlaklık, taze akıntılar ve hepsini çevreleyen kaynar bir buhar tabakası.

Isı ince ince atmosfere akarken magma okyanusu kısa sürede soğuyarak genel itibarıyla bazaltik bileşime sahip primordiyal bir kabuk oluşturdu. Bu kabuk kalınlaşıp tabanından erimeye başladığında ise genel anlamda granit benzeyen, silika zengini kayalar yani ilk kıtasal kabuk oluşmaya başladı. Bu ilk dönem kabuk evrimine dair bir kayıt, "zirkon" adı verilen küçük mineral granüller içinde muhafaza edilmiştir. Silika içeriği zengin magmatik kayalar eriyik magmadan kristalleşirken

mineral zirkon (zirkonyum silikat, $ZrSiO_4$) oluşur. Zirkonlar, jeologlar tarafından methedilmelerine yol açan dikkat çekici bir özelliğe sahiptir: Kristalize olurken yapılarına bir miktar uranyum alır fakat kurşun almazlar çünkü kurşun iyonları, büyümekte olan kristallerin içine sığmayacak kadar iridir. Peki, bu niçin önemlidir? Çünkü bazı uranyum iyonları radyoaktiftir: Uranyum-235 ve uranyum-238, hızları laboratuvar da ölçülebilen şekilde bozunarak sırayla kurşun-207 ve kurşun-206'ya dönüşürler. Uranyum-238 4,47 milyar yıllık yarı ömre sahiptir, yani bu zaman ölçeğinde bir numunedeki uranyum-238'in yarısı kurşun-206'ya bozunacaktır. Benzer şekilde uranyum-235'in yarı ömrü de 710 milyon yıldır. Zirkonlar oluştuğu sırada yapılarına kurşun girmedikçe göre bugün içlerinde ölçülen her kurşun, uranyumun radyoaktif bozunmasıyla oluşmuş olmalıdır. Dolayısıyla zirkonların içindeki uranyum ve kurşunun dikkatle ölçümü neticesinde bir zaman ölçeri yani gezegenimizin derin tarihini tayin etmek bakımından Dünya'nın en iyi kronometresini ediniriz.

Tamam, zirkonlar jeolojik zamanı anlamamıza yardım ediyor ama eğer Dünya'da dört milyar yıldan daha yaşlı kaya yoksa zirkonlar gezegenimizin en uzak geçmişine nasıl ışık tutabilir? Bu soruya yanıt verebilmek için plaja gitmemiz gerekiyor. Ailemin en sevdiği kıyı olan Massachusetts'in Kuzey Kıyısı'ndaki plajın kale yaptığımız kumları, kalıntıları New Hampshire'ın Beyaz Dağları'nda ve New England'ın sırtı boyunca yer alan diğer yükseltilerde görülebilen eski dağlık arazilerin erozyonuyla oluşmuştur. Bu dağlar 400 milyon yıl önceki bir dağ oluşumu esnasında ortaya çıkan granitleri gözler önüne serer; yaşlarını biliyoruz çünkü bu granitler oluşum zamanlarını belli eden zirkonlar içeriyor. Zaman içinde bu zirkonlardan bazıları dağlardan erozyonla kopup nehirlerle kıyıya taşındı, nihayetinde de Massachusetts'in kumlu plajlarındaki granüllere dönüştü (şimdilik). Dolayısıyla bu plajlar modern olsa da aralarında 400 milyon yıllık zirkonları da barındıran çok daha eski kum granüllerinden meydana geldi.

Bu durum zirkonların, Dünya'nın Karanlık Çağı'nı nasıl aydınlatılabileceğini anlatıyor. Batı Avustralya'da, Jack Hills

Oluşumu olarak adlandırılan, turuncu, yıpranmış kayalardan meydana gelen alelade bir çıkıntı, yaklaşık üç milyar yıl önce nehirlerin bıraktığı kum taşlarını ve çakılları gözler önüne serer. Kayanın yaşı yeterince ilgi çekici olmakla birlikte (Dünya’da bu kadar yaşlı çok fazla tortul kaya bulunmamaktadır.) Jack Hills’in bize asıl armağanı, kum taşına çağlar önce yerleşmiş granüllere yakından baktığımızda ortaya çıkar. Bu granüller arasında zirkonlar da bulunmaktadır ve bunların yaklaşık yüzde 5’i dört milyar yıldan daha yaşlıdır. İşte bu 4,38 milyar yıllık en eski zaman ölçeridir ve bu eskiliğiyle neredeyse gezegenle yaşıttır. Son dönemde benzer keşifler Güney Afrika ve Hindistan’da da yapılmıştır.

Peki biz, bu antik minerallerden ne öğrenebiliriz? Birincisi, zirkonlar tüm magmatik kayalarda oluşmaz; çoğu silika zengini, kimyasal bileşimleri granite yakın kabuklarda ortaya çıkar. Dolayısıyla zirkonlar, Yerküre’nin kabuğunun ayrışmasının, gezegenimizin geçmişinin erken safhalarında gerçekleştiği düşüncesini doğurur. Zirkonların yapısındaki oksijenin kimyası da sıvı suyun 4,38 milyar yıl önce halihazırda mevcut olduğuna işaret eder; Dünya’nın hidrosferi neredeyse gezegen kadar yaşlıdır. Ayrıca bazı eski zirkonlar, Dünya’nın 4 milyar yıldan uzun bir süre önceki iç özelliklerinin ne olduğu konusunda çıkarımlarda bulunmakta kullanılabilecek başka minerallerin ufacık kalıntıları da içerir. Bunların belki de en ilginç ve tartışmalı olanı, 4,1 milyar yıllık bir zirkonda bulunan saf karbondan meydana gelen bir mineral olan grafitte ait küçük noktalar. Bu, yaşamın varlığına dair cılız bir gösterge olabilir mi? Bu soruya üçüncü bölümde döneceğiz. Şimdilik, gezegenimizin yavaş yavaş ortaya çıkmakta olan gençlik portresini incelemeye devam edelim.

BU NOKTAYA KADAR DÜNYA’NIN gövde bileşimini anlattık; peki yaşam için en kritik özellikleri, yani okyanuslarımızdaki su ve atmosferimizdeki gaz hakkında ne söyleyebiliriz? Gezegen bilimciler uzun yıllar boyunca Dünya’nın havasının ve suyunun büyük ölçüde kuyruklu yıldızlardan geldiğini ve büyümekte

olan gezegenimize gelişmiş bir kaplama olarak sonradan eklen-
diğini düşünmüşlerdir. Herkesin bildiği üzere “kirli kartopu”
olarak da tarif edilen kuyruklu yıldızlar erken dönem Güneş
Sistemi’nin uzak diyarlarından haber getiren elçilerdir; büyük
oranda buzdan meydana gelip yalnızca küçük bir miktar taşlı
materyal karışımı içerir. Kuyruklu yıldızların kimyasını an-
lama konusunda son dönemde yaşanan gelişmeler sayesinde
kökenlerine ilişkin hipotezleri test edebiliyoruz; bu konuyu
aydınlatmak da hidrojen izotoplarına düşüyor. Hidrojen ve
döteryumun (daha önce bahsettiğimiz üzere bir nötronun yanı
sıra bir proton ve elektron içeren bir hidrojen izotopu) sudaki ve
Dünya’daki hidrojen içeren diğer maddelerdeki nispi miktarları
hakkında oldukça iyi bir fikre sahibiz. Bu sebeple Dünya’daki
suyun kaynağı olarak öne sürülebilecek makul adayların, benzer
bir hidrojen-döteryum oranına sahip olması gerekmektedir.
Kuyruklu yıldızlar ne yazık ki bu testi geçemezler; kendilerine
özgü hidrojen kimyaları, Dünya suyunun en fazla yüzde 10’unu
oluşturabileceklerini göstermektedir.

Suyumuzun geri kalanının yanı sıra atmosferimizdeki gazlar
ve vücudumuzdaki karbon, bir bütün olarak gezegeni meydana
getirmiş olan bazı meteoritlerle, bilhassa Dünya’nın gelişiminin
ileri evrelerinde ortaya çıktığı düşünülen belli kondrit meteorit
türleriyle gelmiştir. “Karbonlu kondritler” adı verilen bir grup
kondrit özellikle dikkat çekicidir çünkü kütsel olarak yüzde
3 ile 11 oranında su içermektedir. Bu suyun çoğu, kimyasal
olarak toprağa ve diğer minerallere bağlanmıştır. Bu kondritler
suyun yanı sıra yaklaşık yüzde 2 oranında da organik madde
(karbon ve hidrojenin birbirine bağlı olduğu moleküller) içe-
rir, bu organik maddeler arasında proteinlerde bulunanlara
benzer amino asitler de yer alır. Öyleyse kondrit meteoritler,
su ve karbon kaynağı teşkil eder ve kuyruklu yıldızların aksine
hidrojen izotopu testini de geçer. Nitekim görünen o ki farklı
türdeki kondrit meteoritler evimiz dediğimiz gezegendeki kaya,
su ve havanın büyük bölümünü sağlamıştır. Isı, Yerküre’nin
ilk zamanlarında sıcak, yoğun bir atmosfer oluşturmak için iç
kısımlardan su buharını, azot gazını ve karbondioksiti almış
olmalıdır; söz konusu atmosfer bugün deneyimlediğimizden

belki de yüz kat daha yoğundur. Bununla birlikte Dünya soğudukça su buharının büyük bölümü yoğunlaşarak sıvı hale geçip okyanusları oluşturan yağmurlar olarak yağmıştır. Aynı esnada atmosferdeki karbondioksitin bir kısmı, kayalar ve su ile tepkimeye girerek kireç taşı oluşturup katılaştıran Dünya'ya tortular halinde geri dönmüştür. Belki o dönemdeki Dünya, üzeri bulutlarla kaplı, denizden fırlayan volkanlarıyla Hawai'ye daha da çok benziyordu. Fakat bazı bilim insanlarının düşündüğü üzere radyasyonun tetiklediği kimyasal tepkimelerle oluşan küçük organik moleküller ilk dönemlerdeki yoğun atmosferde turuncu renkli bir pus oluşturmuş olabileceğinden egzotik gibi bir görüntü söz konusu olabilir.

Gazdan arındırma tamamlanmamıştı: Mantoda hâlâ okyanuslarda olduğundan daha fazla su bulunmaktaydı. Suyun mantodan yüzeye hareketi de tek yönlü bir yolculuk değildi. Genç Dünya'nın sıcak mantosunun, günümüzdeki mantoya oranla daha az miktarda su tutabileceğini düşünmek için nedenler de vardır, dolayısıyla ilk dönemlerdeki okyanuslar bugünkülerden daha büyük olmuş olabilir. Bir şey apaçık ortadadır: Oksijen gazı bu erken dönem atmosferin bir parçası değildi. Dördüncü bölümde göreceğimiz üzere bizi hayatta tutan oksijen daha sonra devreye girmiştir, bütünüyle fiziksel süreçlerden ziyade biyolojik süreçlerle de ortaya çıkmıştır.

Dünya soğuyup farklılaşmaya başladığında büyük göktaşlarının etkisi de yavaş yavaş azaldı. Gerçi meteorlar Dünya'ya düşmeyi hâlâ sürdürmektedir. Küçük bir göktaşı 1992 yılında New York'un Peekskill şehrinde bir arabaya çarptı. Arizona eyaletinde yer alan Flagstaff şehrinin yakınlarındaki muhteşem Meteor Crater'a giden ziyaretçiler ise 50.000 yıl önceki bir meteor düşüşü sonucu açılmış, neredeyse 1,2 kilometre çapındaki çukuru görebiliyorlar. Bununla beraber çarpmaların sıklığı ve göktaşlarının maksimum boyutu zaman içinde azalmış durumdadır. Dünya'nın gençlik yıllarında ise erken dönem okyanuslarını buharlaştıracak ölçüde güçlü meteor çarpmaları bir süre devam etmiştir. Bu durumun kanıtı kendi gezegenimizden değil, Mars'tan, yani çok uzun zaman öncesinden kalma kraterli bir yüzeyin, güney yükseltilerinde varlığını sürdürdüğü

komşu gezegen gelmektedir. Bu kraterlerin bazıları devasadır: Hellas Planitia adı verilen dikkat çekici bir çarpma oluşumu yaklaşık 2.300 kilometre çapındadır. Bu, aşağı yukarı Boston'la New Orleans arasındaki mesafeye karşılık gelir. Böylesi bir göktaşı çarpmasından doğacak olan enerjinin yanında atom bombaları havai fişek gibi kalır.

Etkisi azalan göktaşı çarpmalarının kesin zaman çizelgesi şiddetli tartışmalara konu olmayı sürdürmektedir. İnsanlığın Ay'daki ilk keşiflerinden bu yana konuyu Geç Dönem Ağır Bombardıman üzerinden düşünmek yaygın hale gelmiştir. Söz konusu bombardıman dönemi yaklaşık 3,9 milyar yıl önce yaşanmıştır ve Güneş Sistemi'nin iç kısımlarının bilhassa güçlü meteor çarpmalarına maruz kaldığı dönem olarak tanımlanmaktadır. Bu fenomene dair ampirik kanıtlar büyük ölçüde, astronomlar tarafından ay yüzeyinin farklı kesimlerinden toplanan örneklerden gelir. Geniş alana yayılmış bu örnekler şaşırtıcı şekilde yaklaşık 3,9 milyar yıl yaşındaki çarpmalara dair kanıtlar taşımaktadır. Bu durum ilkin meteor çarpmalarında münferit bir artış olarak yorumlanıp Satürn'ün ve Jüpiter'in yörüngelerinin birbirine sürtünmesinin birçok materyali Güneş Sistemi'nin dış kısımlarından fırlatmış olabileceğini gösteren modellerle açıklanmıştır. Gelin görün ki bazı gezegen bilimciler duruma farklı bakmakta ve Ay yüzeyindeki 3,9 milyar yıllık çarpışmalara dair yaygın kanıtların, ayrı meteorlardan oluşan bir süratli gruptan değil, tek bir büyük olaydan kaynaklandığını öne sürmektedir. Bir başka grup bilim insanı ise görünürde 3,9 milyar yıl önce ulaşılan pik noktasının, zaman içinde uzun vadeli olarak azalan çarpışma yoğunluğunu yansıtan arkeolojik bir eser olduğunu iddia etmektedir. Güneş Sistemi'nin dinamiğine ilişkin daha yeni modeller, münferit bir bombardıman olayı fikrini destekler ancak bunun çok daha önce gerçekleşmiş olabileceğini öne sürer. Şu anda birçok bilim insanı 4,2 ile 4,3 milyar yıl öncesine gelindiğinde okyanusları buharlaştırma gücüne sahip meteor çarpmalarının Dünya için tehlike teşkil etmeyi bıraktığına inanmaktadır.

Dünya'nın doğumundaki bu çarpıcı drama, yani eski yıldız parçacıklarının birikimi, küresel erime ve gezegenimizin iç

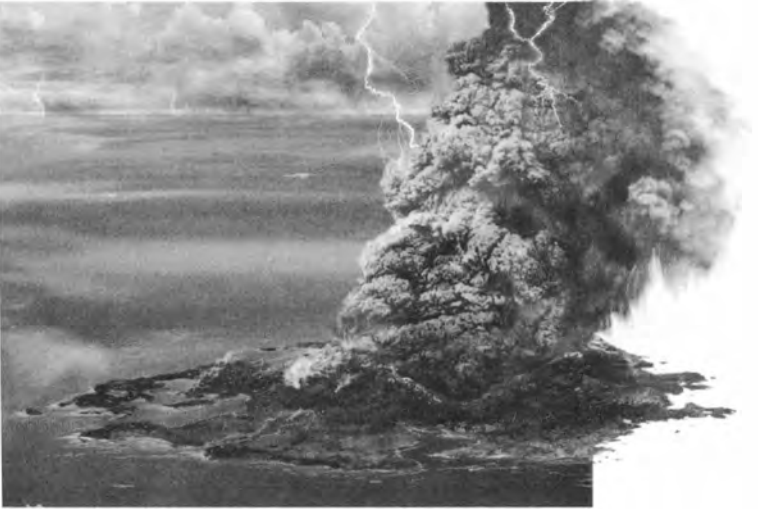
yapısını şekillendiren farklılaşma, okyanusların ve atmosferin oluşumu 100 milyon yıl veya daha az bir sürede gerçekleşmiştir. Dünya 4,4 milyar yıl öncesinde geldiğinde bir hava katmanının altında suyla yıkanan o tanıdık, kayalık bir gezegen halini almıştı. Kıtalar oluşmaya başlamıştı ancak bu kıtalar küçüktü ve muhtemelen büyük oranda sular altındaydı. Bu genç Dünya'yı küresel bir Endonezya gibi tasavvur ediyorum: Denizin üzerinde yükselen yanardağ sıraları var ama kıta benzeri kara kütlesi çok az. Dünya yoğun bir atmosferle sarılmıştı fakat bu hava oksijensizdi; zamanda yolculuk eden insanlar ilkel Dünya'da çok uzun süre dayanamazdı. Dolayısıyla tanıdık gelen bazı özelliklerine rağmen bu dünya henüz bizim Dünya'mız değildi. Büyük kıtaların, nefes alınabilir havanın ve yaşamın olduğunu bildiğimiz dünyanın ortaya çıkmasına daha zaman vardı.



②

Fiziki Dünya

GEZEĞEN ŞEKİLLENİŞİ



COLORADO'DA BOULDER'IN BATISINDAKİ flatironlar gökyüzünü ısırmaya çalışan devasa dişler gibi yükseliyor; dikey yöndeki hücumları, doğuya doğru uzanan hafif engebeli ovaların varlığıyla daha da belirginleşiyor. Gezegenimizin muhteşem topoğrafik özelliklerini hepimiz biliyoruz: Rocky Dağları, Alp-ler ve diğer dağ sıraları; çayır, bozkır ve kıyı ovaları gibi geniş düzlüklerle tezat oluşturur. Kıtalar ve genellikle akkor bir kolye gibi sıra sıra dizilen volkanik adalar uçsuz bucaksız okyanusların içinden fırlar. Depremler, dünyanın bazı bölgelerinde devamlı tehlike teşkil ederken başka yerlerde neredeyse bilinmez bile. Peki, gezegenimizin yüzey özellikleri nasıl ortaya çıktı ve bize Yerküre'nin iç işleyişi hakkında neler söylüyor?

Ünlü yazar John McPhee, Dünya'nın inceliklerine dair kendi keşiflerini özetlerken bir keresinde şöyle yazmıştır: “Eğer tüm bu yazdıklarımı bir emir doğrultusunda tek cümleye indirgemek durumunda kalsaydım şu cümleyi seçerdim: Everest Dağı'nın zirvesi, deniz kalkerinden oluşuyor.” Deniz seviyesinden sekiz kilometreden fazla bir yükseklikte fosil deniz kabuklarına ev

sahipliği yapan Everest Tepesi; başlangıçtaki yatay yatakları şimdi neredeyse dikey olan Flatironlar; Honshu'nun pirinç tarlaları üzerinde çarpıcı biçimde yükselen Fuji-san; bunlar ve diğer birçok özellik, bizleri Dünya'nın yüzeyini dinamik; sürekli değişen bir coğrafya, topoğrafya ve iklim kaleydoskopu olarak görmeye zorluyor. Bu bakış açısı bugün genel anlamda kabul görüyor ancak bu noktaya gelmemiz uzun zaman aldı.

Atalarımız bin yıl boyunca Dünya'nın fiziki özelliklerini kalıcı kabul ettiler: Yaşamlarımızı çevreleyen değişmez bariyerler, geçitler, kaynaklar ve totemler vardı. Dünya'nın statik olduğu düşüncesi on yedinci yüzyılda, Medici Ailesi'nin saray doktoru Nicolas Steno, Toskana yamaçlarında hava şartlarının aşındırmasıyla ortaya çıkan dil biçimli taşların yani *glossopetrae*'nin ölmüş köpek balıklarının dişleri olduğunu fark ettiğinde kırılmaya başladı. Steno, köpek balıkları ölüp çürürken dişlerinin deniz tabanındaki tortulara yerleştiği sonucuna vardı. Bunu kabul edersek Floransa'nın yukarısındaki tepelerde köpek balığı dişlerinin bulunması ya da denizin bir zamanlar bugünkünden daha yüksek olduğu ya da tepeleri oluşturan kayaların denizden çıktığı anlamına geliyordu.

Bu olayın üzerinden yüzyılı aşkın bir süre geçtikten sonra jeolojik süreksizlik kavramı, genellikle modern jeolojinin babası olarak kabul edilen James Hutton'ın yazıları aracılığıyla ivme kazandı. Hutton, Edinburgh'daki evinin yakınındaki tepelerde gezinirken on sekizinci yüzyılın diğer doğa bilimcileri gibi bitkiler ve çevreleri arasındaki uyumlu eşleşmeyi gözlemledi. Benzer şekilde yakınlardaki Forth Haliçi'nin sularındaki deniz yosunları ve deniz anemonları da kendi yaşam alanlarına gayet uyumlu görünüyordu. Ne var ki Hutton başka bir şeyin farkına vardı. Erozyon yavaş yavaş ama hiç durmadan tepeleri aşındırıyordu. Bu erozyonun ürettiği kum ve çamur da günbegün halici dolduruyordu.

Hutton'a göre bu bir muammaya sebep oluyordu. Eğer bu habitatlar sürekli olarak bozunma halinde idiyse barındırdıkları türler, bu kadar aşikâr biçimde geliştikleri ortama uygun olarak tasarlanmışken nasıl olup da uzun zaman boyunca varlıklarını sürdürebiliyorlardı? Hutton'ın bu soruya verdiği yanıtın zara-

feti sadeliğindeydi: Zaman içinde her dağ erozyona uğrayacak fakat yükselme ve kabarma (Hutton sıcaklık bir mekanizma olarak kabul ediyordu) yenilerini doğuracaktır. Benzer şekilde koylar da toprakla dolabilir ama Dünya'nın içindeki hareket yeni koyların oluşmasını sürdürmesini sağlayacaktır. O halde Dünya'nın çevresel açıdan değişmezliği, yükselme ve erozyon arasındaki denge yoluyla dinamik olarak korunmaktadır.

Eğer jeologların bir Mekke'si varsa burası Siccar Point'tir. Edinburgh'nın doğusunda kalan İskoçya kıyılarında uzanan kayalık burun Siccar Point'te yer alan yassı kum taşları, dikey yönlü daha eski kayaların aşınmış yüzeyine oturmaktadır. (Resim 4) Erozyona uğramış kısmın tabanındaki dikey kayalar uzun zaman önce, çok eski dönemlere ait deniz tabanı üzerinde birbiri ardına biriken yatay tortu tabakaları halinde çökelmiştir. Daha sonra jeolojik güçler bu yatay tabakaları yukarı doğru itmiş ve mevcut yönlerine doğru eğmiştir. Daha da sonrasında erozyon, dikey yatakların üzerinde düzlemsel bir yüzey oluşturmuş ve bu da nihayetinde eski bir taşkın yatağını geçen nehirlerin biriktirdiği yeni tortularla kaplanmıştır. Şimdi bu grubun tamamı Kuzey Denizi'nin üzerinde oturmakta ve yavaş yavaş aşınmaktadır. Bölgeyi 1788 yılında tekneyle ziyaret etmiş olan Hutton, İskoçya yamaçlarından çıkarsadığı dinamizm anlayışının burada da var olduğunu ve Siccar Point'te açıkça görülen tarihin, gerçekleşmek için çok uzun bir zamana ihtiyaç duyduğunu fark etti. Hutton'ın yol arkadaşı John Playfair'in yıllar sonra hatırladığı üzere "Zamanın sonsuz derinliğinin o kadar ötesine bakınca zihin sersemlemeler gibi oluyordu." Hutton'ın Siccar Point'teki kayalarının yaşını bilmesine imkân yoktu ancak günümüzde bizler dikey yatakların 440 ile 430 milyon yıl önce Silüriyen Dönemi'nde çökeltiğini, üstteki kum taşlarının geçmişi ise yaklaşık altmış milyon yıl sonrasına, yani Devoniyen Dönemi'ne dayandığını biliyoruz.



Resim 4. İskoçya'daki Siccar Point. James Hutton Dünya'nın dinamizmini ve zamanın sonsuzluğunu burada kavramıştı. *Andrew H. Knoll*

On dokuzuncu yüzyılda ve yirminci yüzyılın başlarında yaşamış olan jeologlar Dünya'nın haritasını çıkarırken Hutton'ın tekrarlanan yükselme ve erozyon döngüleri daha da netleşti. Ne var ki Alpler gibi yerleri inceleyen eğitimli gözler, dağ yamaçlarında ortaya çıkan fayların ve kıvrımların dikey hareketten daha fazlasını gerektirdiğini gördü. Kayaların yanal olarak da hareket etmesi lazımdı. Dünya'nın aktif yüzeyine ve meydana getirdiği özelliklere ilişkin modern anlayışımız, yirminci yüzyılın başlarında, Alfred Wegener adlı bir Alman meteoroloğun yazılarıyla şekillenmeye başladı. Yağmurlu günlerde evdeki Yerküre maketinin büyüüne kapılan birçok genç gibi Wegener de şunu fark etmişti: Eğer Atlantik Okyanusu'nu kapatabilsek Brezilya burnu Batı Afrika Körfezi'ne doğru gayet güzel sokulabilirdi, diğer yandan Kuzey Amerika'nın doğusu da Sahra'ya doğru rahatlıkla yerleştirilebilirdi. Belki de kıtalar yerlerinde sabit değildi, Yerküre yüzeyinde dolaşıyor hatta ara sıra çarpışıp dağ sıralarını meydana getiriyorlardı?

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - <https://rantey.org>

Okyanus havzaları, bir zamanlar bitişik kara kütlelerinin dağılımını yansıtıyor olabilir miydi?

Wegener bu gibi fikirlerini 1915 yılında yayımlanan *The Origins of Continents and Oceans* [Kıtaların ve Okyanusların Kökenleri] adlı kitabında özetlemiştir. Hipotezine gelen yanıtları “çeşitli” olarak tanımlamak kitabın yayımlanmasının ardından patlak veren tartışmaların şiddetini hafife almak olur. Geçmişe dönüp bakıldığında “sabitçiler” adını alan Kuzey Amerikalı ve Avrupalı meşhur yer bilimciler, Wegener’in fikirlerini reddediyorlardı çünkü kıtaların okyanus tabanlarından sürülebilecek bir mekanizmayı tasavvur edemiyorlardı. Güney Yarımküre jeologları daha hevesli bir yaklaşım içindeydi. Kıtaların, Wegener’in bahsettiği şekilde birbirine geometrik olarak uyduğuna katılmakla kalmıyor, Atlantik Okyanusu’nun iki yakasındaki jeolojik özelliklerin de daha önce bir arada olduklarına işaret ettiğini fark ediyorlardı. Fosiller de bu fikirlerin gelişimine yardımcı oldu. Örneğin, *Glossopteris* adı verilen yaklaşık 252 ile 290 milyon yıllık yaprakların Güney Afrika, Güney Amerika, Hindistan ve Avustralya’da var olduğu biliniyordu. Bu yapraklar daha sonra Antarktika’da da bulunacaktı. Bu bitkilerin, artık var olmayan karasal köprülerle kıtadan kıtaya göç ettiği şeklindeki geleneksel açıklama, Güney Yarımküre jeologları için en az kıtaların kayması kadar mantıksızdı. Sabitçiler, Kuzey Amerika ve Avrupa üniversitelerinde prestijli akademik pozisyonlara sahip olduklarından kayalara bakmakla kalan o zavallı güneyli jeologlara elbette baskın geliyordu.

Bilim insanları, kayan kıtalar bilmecesini çözmek için okyanuslara bakmak durumundaydı. İnsanlık tarihinin büyük bölümünde derin deniz tabanı bilinmeyen bölgeydi. Denizciler yüzey sularında gidip geliyordu fakat yüzeyin altında neyin yattığını bilen yoktu. Bu durum İkinci Dünya Savaşı sırasında, düşman denizaltılarını tespit etmek için tasarlanan sonarın derin denizlerde dağ ve çukur ağlarını ortaya çıkarmasıyla birlikte değişmeye başladı. Amerikalı bilim insanları Bruce Heezen ve Marie Tharp, 1950’lerde Atlantik deniz tabanını, İzlanda’nın kuzeyinden (burası da sırtın bir parçası) Antarktika

Yarımadası'nın ucuna kadar ikiye bölen olağanüstü bir dağ sırası olan orta Atlantik sırtını keşfettiler. Benzer detaylar Pasifik, Hint ve Güney okyanuslarına da damgasını vurur. Heezen ve Tharp'ın okyanusları boşaltılmış şekilde gösteren (Resim 5) ve oyunun kurallarını değiştiren Dünya haritasında bunlar unutulmaz şekilde dikkat çeker. Denizler altındaki Dünya'ya ilişkin ortaya çıkan bu bilgiler, gezegenimiz hakkında farklı şekillerde düşünmenin zamanının geldiğini açıkça ortaya koyuyordu.



Resim 5. 1977'de Bruce Heezen ve Marie Tharp tarafından ortaya koyulan devrim niteliğindeki Dünya Haritası. Derin deniz tabanından fay izleri taşıyan yüksek dağ sıraları çıkmaktadır. *Dünya Okyanus Tabanı Panoraması*, Bruce C. Heezen ve Marie Tharp, 1977. Telif hakkı Marie Tharp'a aittir 1977/2003. Marie Tharp Maps LLC ve Lamont-Doherty Earth Observatory'nin izniyle çoğaltılmıştır.

Savaş döneminde yaptığı gözlemleri okyanus tabanlarına dair bu yeni anlayışın temelini oluşturan Princeton Üniversitesi'nden jeolog Harry Hess, 1962 yılında okyanus sırtlarının Yerküre sisteminde önemli ve belirli bir rol oynadığını varsayımında bulunmuştur: Okyanus sırtları okyanus kabuğunun doğup kıtaları yavaş ama emin adımlarla iki tarafa ayırdığı yerlerdi. Hess'in ileri sürdüğü “deniz tabanının yayılması” meselesi bir yıl içinde İngiliz jeologlar Frederick Vine ve Drummond Matthews tarafından doğrulandı. Buradaki kilit nokta manyetizmaydı. Layıkıyla adlandırılmış demir oksit mineral man-

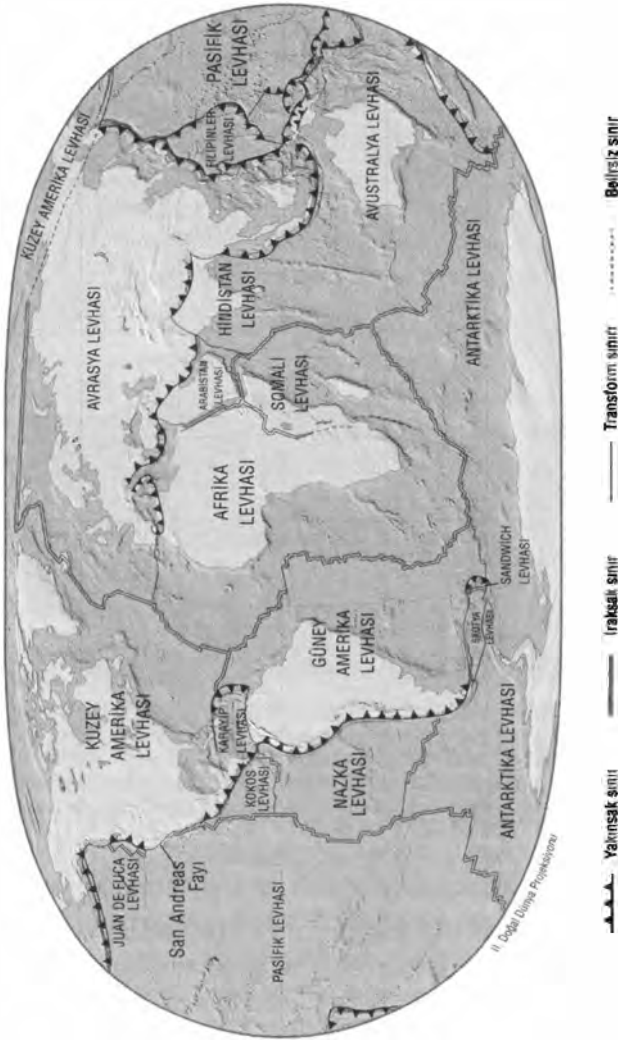
yetit gibi manyetizmaya duyarlı mineraller kristalleştiklerinde Dünya'nın manyetik alanı boyunca hizalanıp oluştukları zaman ve yerdeki alan yönelimini kaydederler. Hâlâ tartışılan nedenlerden dolayı, Dünya'nın manyetik alanı her birkaç yüz bin yılda bir 180 derece yön değiştirir. Vine ve Matthews, Atlantik Okyanusu'ndaki deniz tabanı kabuğunun manyetik izlerinin, milyonlarca yıl içinde manyetik alanın terse dönüşleriyle paralel şeritlerden bir desen oluşturduğunu gözlemledi. Bu şeritler okyanus ortasındaki sırt çevresinde simetrikti ve radyoaktif izotoplar kullanılarak kabuk kayaların oluşum tarihleri belirlendiğinde en genç kayaların sırtta en yakın yerde olduğu ortaya çıktı. Buna bağlı olarak Avrupa'ya veya Kuzey Amerika'ya doğru gidildikçe deniz tabanı şerit şerit yaşılanıyordu. Hess haklıydı: Yeni okyanus kabuğu sırtlarda oluşuyor ve Boston ile Londra'daki en sevdiğim bar arasındaki mesafeyi her yıl yaklaşık 2,5 santimetre artırıyordu. Bu süreç insan ömrü ölçeğinden baktığımızda göz ardı edilebilecek yavaşlıkta görünür, yaptığım yolu katlamadığı da kesindir ama Atlantik Okyanusu'nun son 100 milyon yılda yaklaşık 2.500 kilometre genişlediğini belirtmek gerekir. Deniz tabanı yayılması, pratikte kayan kıta meselesini çözdü ve "levha tektoniği" adı verilen yeni bir paradigma belirtmeye başladı.

Dünya büyümüyorsa (ki büyümüyor), okyanus sırtlarındaki yeni kabuk oluşumu daha eski kabuğun başka bir yerde yok edilmesini gerekli kılar. Kabukların mezarlıkları, dalma bölgeleri yani bir tektonik plakanın bir diğerinin altına girerek kabuksal kayaları doğdukları mantoya geri götüren, genel itibarıyla doğrusal fiziki yapılardır. Atlantik Okyanusu yavaşça fakat durmak bilmeksizin genişlerken Pasifik Okyanusu, Aleutian Adaları'ndan Endonezya'ya kadar doğrusal uzanan yanardağ ve deprem hatlarıyla kendini gösteren dalma bölgeleriyle çevrilidir. Aslında okyanus kabuğunu birbirinden ayıran şey kabuksal levhaların batmasıdır; yeni kabuk daha sonra pasif olarak sırtlarda oluşur. Yiten levhalar sıcak mantoya doğru çökerken erimeye başlar ve erimiş materyalin yüzeye çıkmasıyla da yanardağları meydana getirir. Aralarındaki sürtünme, levhaları bir süreliğine kilitleyebilir ama batan levhanın uygulamaya

devam ettiği güç, basınç birikimine neden olur ve nihayetinde sürtünmeye üstün gelir. Hareket kaldığı yerden hızlı ve şiddetli şekilde devam eder; bu bir depremdir. Los Angeles ve Tokyo sakinleri sık gerçekleşen küçük depremlerden teselli bulur çünkü bu depremler levhalar arasındaki sürtünmeyi giderir. Esasında uzun süre deprem olmadığında endişelenmek gerekir.

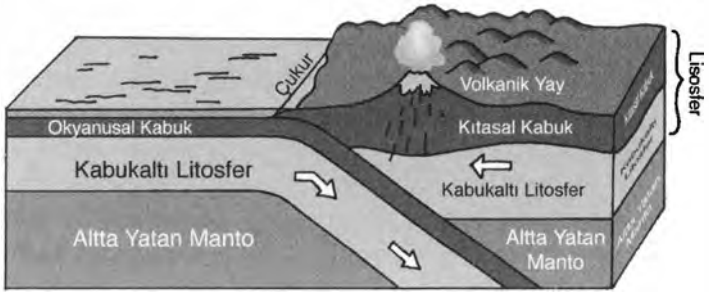
Öyleyse Dünya'nın yüzeyi inatçı tabakaların etkileşim halinde olduğu bir mozaik, kabuktan ve hemen altındaki sağlam, katı mantodan yapılmış bir "litosfer"dir. (Resim 6) Levhaların aşağı yukarı yarısı, üzerlerinde yer alan ve onlar büyürken veya batarken ayrılan ya da çarpışan kıtaları kapsar; geri kalan levhalar ise bünyesinde yalnızca okyanus kabuğunu barındırır. Okyanus kabuğunun, bir kıta sınırının altına battığı yerlerde dağ sıraları oluşabilir: And Dağları buna örnek teşkil eder. İki kıtanın çarpıştığı yerlerde de dağlar ortaya çıkabilir: Hindistan Yarımadası'nın Asya'nın alt karnına çarpmasıyla birlikte heybetli Himalaya Dağları meydana gelmiştir. Daha mütevazı boyuttaki Apalaş Dağları günümüzde dalma bölgelerinden uzakta yer almaktadır ama onlar da 300 milyon yıl öncesinde çok eski kıtalar arasında yaşanan çarpışmaya tanıklık eder. Benzer şekilde, Ural Dağları'nın Rusya'yı boydan boya kapatıp Avrupa ve Asya'yı birbirinden ayırdığı şeritler halinde uzanan alan, uzun zaman önceki kıta çarpışmasını yansıtmaktadır.

Levhalar yeni kabuk yaratmadan veya eskisini batırmadan birbirinin yanından kayıp geçebilir de. Bunun belki de en ünlü örneği, San Francisco'nun kuzeyinden Meksika'ya kadar uzanarak Kaliforniya'yı yaran San Andreas Fayı'dır. Doğıdaki Kuzey Amerika levhası ile batıdaki Pasifik levhası arasındaki sürtünme, bu bölgeyi sürekli olarak sarsan depremlere neden olur. Bilim insanları sarsıntıları durduramazlar ancak muazzam bir hesaplama kuvvetinin desteğiyle depremleri önceden tahmin etmeyi öğrenirler.



Resim 6. Dünyanın yüzeyi birbirine kenetlenen levhalardan oluşur. Levhalar birbirinden çekilip ayrılır ve okyanussal sırt sistemleri boyunca yeni okyanus kabuğu oluşur (çift çizgilerle gösterilmiştir), bu da kıtaların birbirinden uzaklaşmasına neden olur. Levhalar transform fayları (tek çizgiler) boyunca birbirlerinin yanından kayarlar ancak yakınsak kenarlarda (dişli çizgiler) bir levhanın diğerinin altına batacağı şekilde çarpışırlar. Volkanlar, depremler ve aktif olarak büyüyen dağ kuşakları, yakınsak levha sınırları boyunca yoğunlaşmıştır. Harita çizimi Nick Springer/Springer Cartographics, LLC tarafından yapılmıştır.

İngiliz jeofizikçi Dan McKenzie ve diğer bilim insanlarının çalışmaları dolayısıyla Dünya yüzeyindeki levha hareketlerinin, gezegenin daha derinlerindeki dinamiklerini yansıttığını biliyoruz. Bölüm 1’de mantonun, sıcak materyallerin altından yükselişi ve daha soğuk olanların çekirdeğe doğru çökmesiyle konveksiyon yaptığını belirtmiştik. Sırtlar, sıcak (ve dolayısıyla nispeten batmaz) mantonun yüzeye doğru yükseldiği yerlerde oluşur, bu esnada dalma bölgeleri alçalan mantoyla çakışır. Nitekim haritalardan ve seyahatlerden aşına olduğumuz dağlar ve okyanuslar, Dünya’nın derinliklerinde işleyen süreçleri yansıtır. (Resim 7)



Resim 7. Dağlar kıtaların çarpıştığı (örneğin Apalaş Dağları) veya burada gösterildiği üzere okyanussal kabuğunun bir kıtanın altına battığı yerlerde (örneğin And Dağları) oluşur. Her ikisi de alta yatan mantodaki konveksiyonla tetiklenir. Derin deniz tabanındaki doğrusal çöküntüler olan çukurlar, yakınsak levha sınırlarının yüzeydeki dış vurumunu meydana getirir. *Kaynak: ABD Jeolojik Araştırması*

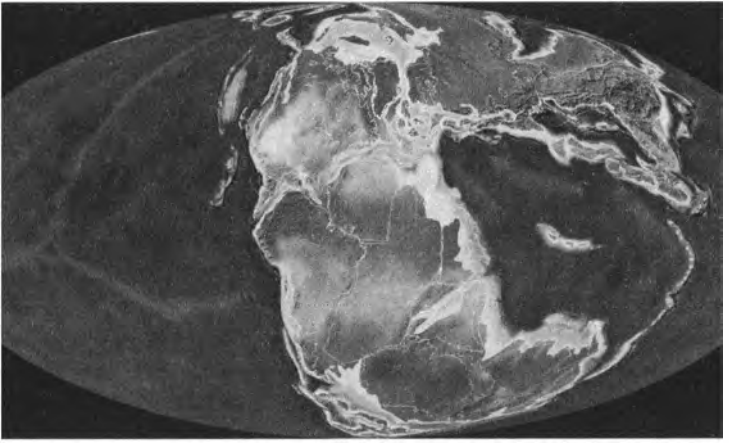
Levha tektoniği her şeyi açıklayamaz. Örneğin bugüne kadar kaydedilmiş en güçlü depremlerden birinin 1811 yılında niçin Missouri’de gerçekleştiği hâlâ net değildir. Bununla birlikte levha tektoniği, okyanus havzalarının oluştuğu ve kaybolduğu, dağların yükseldiği ve nihayetinde aşınarak yok olduğu ve depremlerin sürekli olarak huzuru kaçırdığı dinamik Dünya’mıza dair birinci dereceden, dikkat çekici açıklamalar sunar. Dünya’da her şey her zaman böyle olmuştur, değil mi? Yoksa olmamış mıdır?

DÜNYA’NIN TEKTONİK GEÇMİŞİNİ YENİDEN kurgulamaya çalışmak Sherlock Holmes’un kabiliyetlerine layık bir jeolojik problem teşkil eder. Günümüzde söz konusu olan yayılma, batına ve diğer süreçleri gözlemleyip ölçebiliriz ama Dünya’nın on milyon veya iki milyar yıl önce neye benzediğini nasıl bilebiliriz? Yaklaşık son 180 milyon yıldır bize yol gösterebilecek manyetik şeritleri olan okyanus kabuğuna sahibiz; bunlar esas itibarıyla jeologlara levha tektoniği kasetini geri sarabilme imkânı sunar. Örneğin kıtaların on milyon yıl önceki konumunu öğrenmek istersek o yaştaki veya daha genç tüm okyanus kabuklarını tespit edebilir, (sanal olarak) ortadan kaldırabilir ve ortaya çıkan boşluğu kapatabiliriz. Uzaydan bakıldığında o dünya bizimkinden çok da farklı değildi; gerçi Atlantik Okyanusu daha dardı, Alpler ve Kafkaslar gibi dağ sıraları da daha az belirgindi.

Elli milyon yıl önce Atlantik daha da küçüktü ve o dünyaya yukarıdan bakmamız halinde aşına olmadığımız bazı detayları görmeye başlayabilirdik. Hindistan Yarımadası Asya’dan ayrıydı, güneye doğru uzanıyordu ve denizle çevriliydi. Avustralya, Antarktika’dan ayrılmaya yeni yeni başlıyordu. Kutuplarda hiç buz örtüsü olmadığı için şimdikinden yüksek olan deniz seviyesi, Avrasya’nın alçak kısımları ve Amerika Birleşik Devletleri’nin doğu sahilini sular altında bırakıyordu.

Yüz milyon yıl önce ise her şey daha da farklı görünüyordu. Rocky Dağları yükselmeye başlamıştı ancak Alpler veya Himalayalar ortada yoktu. Kuzey Amerika kıtasının ortasının ve güney Avrasya’nın büyük kısmı sığ denizlerle kaplıydı. Atlantik Okyanusu ince bir kuşağa indirgenmişti, Avustralya Antarktika’ya sıkıca kenetliydi ve Hindistan Yarımadası Afrika ile Antarktika arasındaki coğrafi kuytuya gitgide daha çok yerleşiyordu.

Meseleye ilişkin kabaca bir örüntü açığa çıkmış olacaktır: Kaseti geri sardığımızda bugün geniş alana yayılmış olan kıtalar büyük, yekpare bir kara kütesi halinde birleşmeye başlar. Gerçekten de yaklaşık 180 milyon yıl öncesine vardığımızda en azından coğrafi bakımdan bizimkinden oldukça farklı bir gezegen görürüz. (Resim 8) Güney Yarımküre’deki tüm kıtalar



Resim 8. Dünya yüzeyinin yaklaşık 180 milyon yıl önceki halinin yeniden kurgulanması. Daha önce bir araya gelmiş olan kıtalar, büyük ölçüde kümelenmiş halde kalmayı sürdürüyor. Atlantik Okyanusu daha yeni açılmaya başlamış. Buna karşılık Tetis (Asya'nın güneyinde ve Gondwana kıtalarının kuzeyindeki büyük deniz), Afrika, Hindistan ve Avustralya ayrılıp kuzeye doğru hareket ederken bir süre sonra kapanacak. Nihayetinde bunlar Avrupa ve Asya'yla çarpışacak ve Alplerden Himalayalara ve oradan Yeni Gine'ye dek uzanan dağ sırasını meydana getirecekler. 2016 Colorado Platosu Geosystems, Inc.

Gondwana adı verilen (Bütün o *Glossopteris* yaprak fosilleri, bize bunu anlatmaya çalışıyordu.) tek bir parça halinde birleşir, bu da tek bir süper kıtayı yani Pangea'yı oluşturmak için bir ucuyla Kuzey Amerika ve Avrasya'ya bağlanır. Pangea, şu anda var olmayan Tetis Okyanusu tarafından iyice yarılmıştır. Gerçekte olan şey elbette şöyledir: Yaklaşık 175 milyon yıl önce Pangea süper kıtası, altında konveksiyon yapan mantodan gelen gerilimler neticesinde çatlayıp ayrılmaya başlamıştır. Yeni oluşan okyanusal kabuk, kıtasal yayılmaya yön vererek yeni okyanusları, başta belki de Atlantik'i meydana getirmiştir. Pasifik deniz tabanının altında yatan kabuk, batıya doğru hareket eden Kuzey ve Güney Amerika kıtalarının altına dalarken Rocky Dağları ve And Dağları yükselmiştir. Güney Okyanusu ortaya çıkarken Gondwana'dan ayrılan parçalar kuzeye doğru hareket ederek Tetis Okyanusu'nu kapatmış ve nihayetinde de Avrasya'yla çarpışarak Pirenelerden Himalaya'nın doğusuna uzanan dağlık omurgayı oluşturmuştur. Avusturalya'nın kuzeye

doğru Asya yönündeki yolculuğu Yeni Gine'nin etkileyici dağlarını yukarı doğru iter, bu dağların zirveleri deniz seviyesinden yaklaşık 4.500 metre yüksekliğe kadar ulaşırken hikâye bugün de devam etmektedir.

Deniz tabanı kayıtlarını kullanarak anlatılabilecek hikâye büyük ölçüde bununla sınırlı çünkü batma süreçleri, 180 milyon yıldan daha eski okyanusal kabuklarının büyük bölümünü ortadan kaldırmıştır. Bununla birlikte jeoloji, levha tektoniğinin Dünya tarihinde çok daha eskiye uzandığını işaret eder. Kıtalar, batma işlemine deniz tabanından daha iyi dayanır ve dolayısıyla çok daha uzun süreli bir tarihsel kayıt tutar. Tortul kaya birikimlerinin boyutları ve özellikleri; granitlerin ve diğer magmatik kayaların kimyasal yapısı ve dağılımı; daha yaşlı dağ kuşaklarındaki fayların ve kıvrımların yapısı, levha tektoniğinin gezegenimizin yüzeyini en azından son 2,5 milyar yıl boyunca şekillendirmiş olduğunu ortaya koymaktadır. Dünya'nın yüzeyi bir küre olduğu için bir zamanlar dağılmış olan kıtalar çarpışıp yeniden birleştikçe ayrılan süper kıtalar da nihayetinde yeniden bir araya gelecektir. Adını bu tarihçeyi ilk keşfeden kişi olan Kanadalı jeolog J. Tuzo Wilson'dan alan Wilson Döngüsü'ne göre süper kıtalar arasındaki parçalanma, dağılma ve yeniden birleşme örüntüleri zaman içinde tekrar tekrar ortaya çıkmıştır. Son 2,5 milyar yılda her biri tıpkı Pangea gibi parçalanmaya mahkûm beş süper kıtanın bir araya geldiğine dair kanıtlarımız mevcuttur. Apalaş Dağları, İskandinav Kalendonidleri ve Ural Dağları'nın hepsi eski kıtalar arasındaki daha erken çarpışmalara şahitlik etmekte, Afrika ve Güney Amerika'daki Pan-Afrika kıvrım kuşaklarıysa daha da erken süper kıta birleşmelerini ispatlamaktadır.

OFİS MASAMDAKİ EN DEĞERLİ EŞYALARDAN BİRİ
1979 yılında o dönemde üniversite öğrencisi, şimdilerde ise Dünya'nın sürekli değişen coğrafyası alanında dünyaca ünlü bir otorite olan Chris Scotese tarafından bir araya getirilmiş hareketli kitaptır. Her sayfada kıtaların belli bir zamandaki konumları gösterilirken sayfaları hızlıca çevirdiğinizde kara

parçaları eski *stop-action* filmlerdeki gibi hareket ediyormuşçasına görünür. Her birkaç saniyede bir sayfalarda belirip yok olan “çarpmışma”, “çatırdama” ve “yarılma” gibi kelimeler kıtasal çarpışmaları ve ayrılmaları vurgular. James Hutton 1788’de jeolojik kayıtların “ne bir başlangıç izi ne bir son ihtimali” gösterdiğini yazmıştı, Chris’in kitapçığının bende uyandırdığı his de tam olarak buydu. Gerçi bizler Bölüm 1’i okuduktan sonra, Dünya’nın kendi başlangıcına dair bazı izleri kaydettiğini biliyoruz. Peki, geriye doğru dönüp levha tektoniği hareketlerinin izini bu en eski tarihe kadar sürebilir miyiz?

Bu soruya “Belki,” cevabını verebiliriz. Dünya’nın erken tektonik tarihini yeniden kurgulamanın başlıca zorluğu, Bölüm 1’de karşılaşılan güçlkle aynıdır. Üç milyar yıldan yaşlı yalnızca birkaç kayamız vardır; gezegenimizin gelişiminin ilk yüzde 10’luk kısmını kanıtlayacaklardansa hiç yoktur. Dünya’nın şimdiye dek muhafaza edilmiş en eski kayalarının kimyasal yapısına ve geometrisine dair ümitlendiren ama sınırlı kalan bilgi, her türlü tahminin yapılmasına neden olmuştur; her biri bildiğimiz levha tektoniğine alternatifler öneren “hareketsiz kapak” ve “sarkma tektoniği” gibi terimler ağızdan ağıza yayılmıştır. Herkesin hemfikir olduğu tek konu Dünya tarihinin başlarında, gezegenimizin iç kısmının şimdikinden daha sıcak olduğu ve dolayısıyla erken litosferinin bugünkünden daha kalın fakat daha zayıf olması gerektiğidir.

Bazı jeologlar, Dünya’nın magma okyanusu soğurken primordiyal kabuğun çatladığını ve aşağıdaki mantodaki yarıklardan yükselen magmanın kabuğu birbirinden ayıracak şekilde her iki tarafa doğru iterek levha tektoniğinin karakteristik yanal hareketlerini başlattığını varsaymaktadır. Kabuk genişlerken akabinde kaçınılmaz olarak batmalar gerçekleşmiş ve alçalan levhaların erimesi, Dünya’nın ilk granit benzeri kabuğunun oluşumuyla sonuçlanmıştır. Bu yaklaşıma göre, levha tektoniği benzeri bir oluşum Dünya’nın bebeklik döneminde başlamıştır. Buna karşın bir başka hipotez ise ilk granitlerin, eriyik magma dumanlarının büyük bazalt yığınları oluşturacak şekilde fışkırması, taban kısımlarından eriyecek kadar yoğunlaşması ve granit kayalarını ortaya çıkarmasıyla meydana geldiğini öne sürer.

Bu noktada bir problem belirir. Geleneksel anlayışa göre granit, deniz tabanı bazaltlarının batmasını ve kısmi erimesini yansıtır ama hikâyenin bu versiyonunda ilk granitler levha hareketleri yokken oluşmuştur. Eski kayaların kimyasal detaylarına ve Dünya'nın en eski bölgelerinin yapısal özelliklerine ilişkin de benzer tartışmalar söz konusudur. Birçok gözlem, levha tektoniğinin erken başlangıcıyla uyumludur ancak diğerleri, erken Dünya'nın benzersizliğinin üstünde durur.

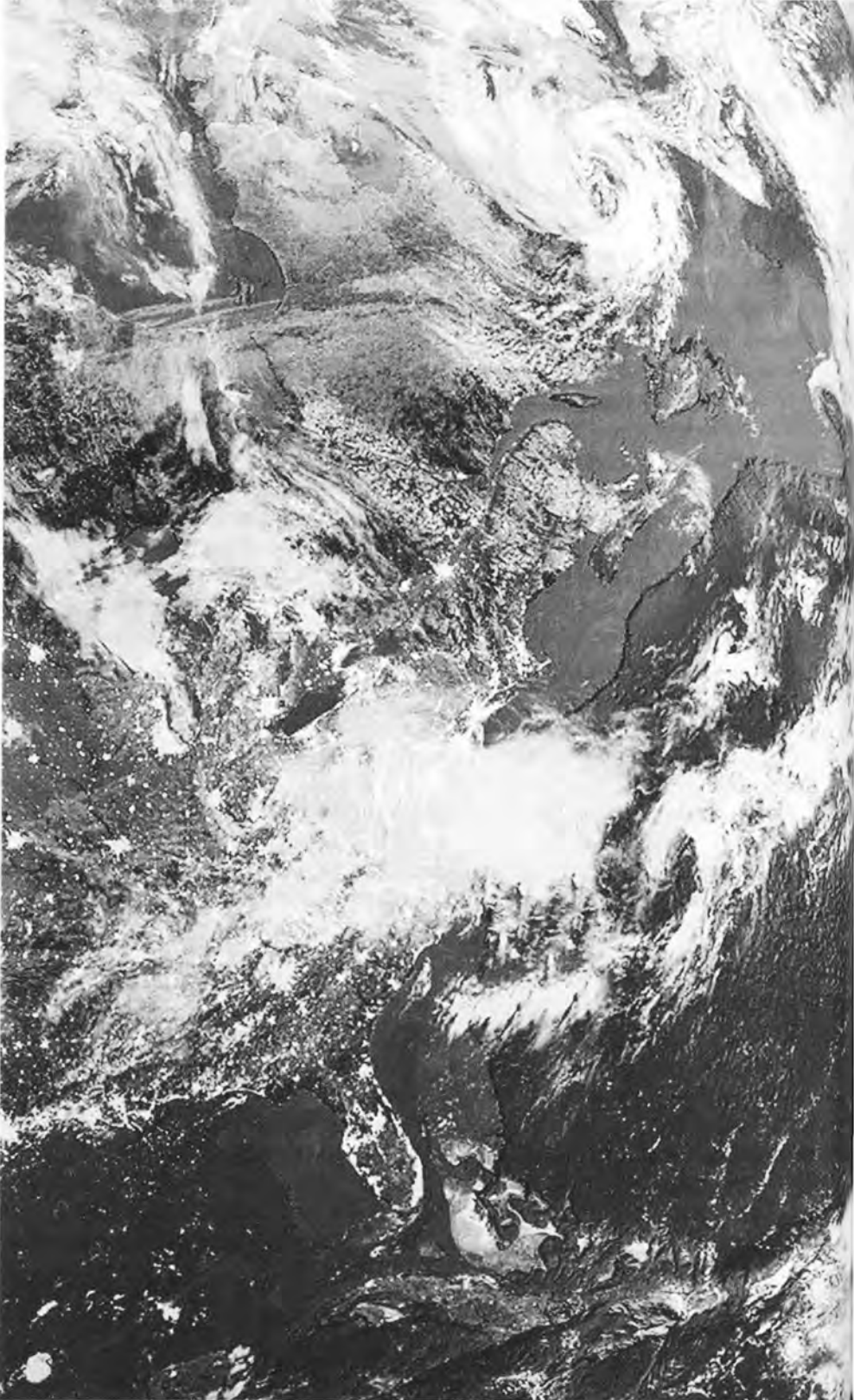
Bu noktada önemli ipuçları Bölüm I'de anlatılan o çok eski zirkonlardan gelmektedir. Bu kristallerin içine hapsolmuş eser elementler, dört milyar yılı aşkın süre önce bazı materyallerin Dünya'nın yüzeyinden iç kısımlarına doğru geçtiğini ama bu geçişin daha ileriki zamanlardakine oranla çok daha yavaş gerçekleştiğini işaret eder. Bu gözlem, en eski Dünya'daki zirkon taşıyan magmaların kalın volkanik yığınların, yani herhangi bir yanal göçün veya batmanın olmadığı bir "hareketsiz kapak"ın dibinde oluştuğunu gösterecek şekilde yorumlanmıştır. Bununla birlikte 3,8 ile 3,6 milyar yıl önceye gelindiğinde batına başlamıştı ve bu da levhalarınkine benzer hareketlerin varlığını gerektiriyordu.

Yapbozun bir başka yeni parçası 2020 yılının bahar aylarında rapor edildi. Daha önce kaya manyetizmasından bahsetmiş ve onun deniz tabanı yayılmasını, dolayısıyla da levha tektoniği mekanizmasını anlamanın anahtarı olduğunu söylemiştik. Manyetik yönelim kavramının mantığı, jeolojik tarih boyunca kıta hareketlerinin izini sürmemize de imkân verir. Örneğin, bir kıta zaman içinde ekvator yakınından 30 derece kuzey enlemine doğru yolculuk yapıyorsa rotası üzerinde patlamış olan volkanik çökeltilerdeki minerallerin manyetik yöneliminden yola çıkılarak bu kıtanın geçtiği yol yeniden oluşturulabilir. Bu durumda asıl soru şu olur: Erken Dünya'da oluşan kayaların manyetik yönelimleri, kara parçalarının yanal hareketlerini belgeliyor mu? Anlaşıldığı kadarıyla evet, belgeliyor. Alec Brenner, Roger Fu ve meslektaşları, bir dizi zahmetli analiz üzerinden, şu anda Kuzeybatı Avustralya olan eski bir bölgenin, enlemler arasında Boston'ın Avrupa'dan şu anki uzaklaşma hızına hemen hemen denk bir hızla bundan üç milyar yıldan daha uzun bir süre önce sürüklendiğini göstermişlerdir.

Bu durum, levha tektoniğinin erkenden başladığını söyleyen iddiayı güçlendirir ama erken dönemdeki Dünya'nın tam olarak modern Dünya gibi işlerlik göstermiş olmasını gerektirmez. Levha tektoniği bölgesel olarak başlamış ve bir süre için hareketsiz kapaklarla birlikte var olmuş olabilir; dolayısıyla Dünya'nın bebeklik döneminde sürekliden ziyade aralıklı olan levha tektoniğinden bahsedilebilir. Hipotezin bu versiyonuna göre konveksiyon yapan manto, yeni yeni ortaya çıkan levhaların yanal olarak hareket etmesine ve levha kenarlarında batmasına neden olmuştur. Bugün, batan levhanın mantoya inerken uyguladığı çekim levha hareketine güç vermektedir ancak Dünya'nın erken dönemlerinde levhalar o kadar zayıftı ki batma başladığında kolayca kırılır , batan levhayı ayırır ve süreci durdururdu. Erken dönemde granitler bu şekilde oluşmuş olabilirdi ama miktarları bu şekilde sınırlı olurdu. Zaman içinde, manto soğumaya devam ettikçe litosfer güçlendi ve modern levha tektoniği rejimini başlattı.

DÜNYA'NIN EN ESKİ DÖNEMİNE AİT tektonik geçmiş belirsiz kalmaya devam ediyor olabilir fakat birçok jeolog yaklaşık üç milyar yıl öncesine gelindiğinde levha tektoniğinin, makul ölçüde modern tezahürüyle gezegenimizi şekillendirmeye başladığını öne sürmektedir. Söz konusu şekillendirmenin sonuçları büyük olmuştur. Avustralyalı jeolog Simon Turner ve çalışma arkadaşları bu durumu hünerle ifade eder: “Batmanın başlaması, birçok anlamda bugün bildiğimiz Dünya'yı ve bağımlı olduğumuz çevreyi meydana getiren süreçlerin gerçekleşmesi için geri sayımı başlattı.”

Levha tektoniği, gezegen oluşumunun kaçınılmaz bir sonucu değildir. Örneğin Mars, eski ya da yeni herhangi bir levha hareketi kanıtı göstermemektedir, benzer şekilde Venüs de öyle. Diğer yandan levha tektoniği, Dünya'da erkenden oluşarak Yerküre'nin yüzeyini şekillendiren ve daha sonra göreceğimiz üzere çevrenin devamlılığını sağlayan fiziksel süreçleri işleme koymuştur. Sonuç olarak Dünya, okyanusları ve atmosferi, dağları ve volkanlarıyla bir gezegenden fazlası haline gelmiştir. Yaşamı desteklemeye gücü yeten bir gezegen olmuştur.



③

Biyolojik Dünya

GEZEGENE YAŞAM YAYILIYOR



2004 YILININ BAŞLARINDA, gezgin robot *Opportunity* Mars yüzeyindeki küçük bir çöküntü olan Eagle kraterine indi. Gezgin robot bilim ekibinin bir üyesi olma ayrıcalığı sayesinde olan bi-teni programının merkezi olan Jet Propulsion Laboratuvarı'ndan dikkatle seyrettiğimden o geceye dair hatıralarım hafızamda hâlâ canlılığını koruyor. NASA, *Opportunity*'nin güvenle iniş yaptığını duyurduğunda gülümsemeler, sarılmalar ve toka-laşmalar hızla yayılmıştı. Gezicinin ilk fotoğrafları dakikalar sonra ekranlarınıza yansıdığında neşe coşkuya dönüştü: Oppy, katmanlı tortul kayaların oluşturduğu bir çıkıntının sadece birkaç metre uzağına inmişti. Şimdi bizler de Dünya'daki jeologların yüzyıldan fazladır yaptığını yapıp bu yatakların fiziksel ve kimyasal özelliklerini Mars'ın gezegensel tarihini yeniden oluşturmak için kullanabilirdik.

Sonraki birkaç hafta içinde keşifler birbiri ardına geldi. Kayalar yaş o zamanlar belirsizdi, gerçi belirsiz kalmaya da devam ediyor. Tarihi iyi saptanabilen volkanik kayaların yokluğunda Mars tarihi için bir zaman çizelgesi oluşturabilmek kolay değil

ama makul tahminler, Eagle kraterinde keşfedilen yatakların 3,5 ile 3 milyar yıl önce oluştuğuna işaret etmektedir. Bu tarih de yaklaşık olarak Dünya üzerindeki metamorfizmayla oluşmuş en eski küçük tortul kayaların yaşına tekabül eder. Mars'taki kayalar kum taşıydı, bazıları dalga izleri taşıyordu, dalgaların deniz kıyısına vurduğu yerlerde fark etmiş olabileceğiniz türden engebeli yüzeyleri vardı. Eagle kraterinde keşfedilen tipte dalgacıklar, yalnızca hareketli suyla taşınarak oluşur. Aynı zamanda, yapılan kimyasal analizler, Eagle'daki kum taşıyı oluşturan granüllerin ve yapıştırıcıların büyük ölçüde tuzlardan oluştuğunu ortaya çıkarmıştı. Buradaki tuz mineralleri, suyun volkanik kayalarla tepkimesiyle oluşmuştu. Demek ki günümüzde ürkütücü derecede soğuk ve kuru olan Mars bir zamanlar nispeten ılık ve nemliydi.

İnişten beş hafta sonra NASA, bu keşfi duyurmak için bir basın açıklaması düzenledi. NASA genel merkezindeki açıklamanın tek bir kuralı vardı: Ekibi temsil eden bilim insanları Mars'taki su hakkında konuşacaktı, hayat hakkında konuşmayacaklardı. Buna rağmen Eagle kraterindeki kayalarda görülen su izleriyle ilgili bir saatlik ayrıntılı konuşmalardan sonra Dünya'daki hemen hemen her haber servisi, Mars'ta hayat hakkında nefes kesici yayınlar yapmak üzere koşuşturmaya başladı. Örneğin CNN'in internet sitesinin başlığı bu haberi şöyle duyuruyordu: "Kızıl Gezegen yaşanabilir bir yer olabilir." Wired kuruluşunun "Mars bir zamanlar yaşanabilir bir yerdi, peki orada yaşayan oldu mu?" demekle yetinen internet sayfası ise diğerlerinden daha şüpheciydi.

Mars'a ilişkin basın açıklaması, gençlerden Nobel ödülü sahiplerine kadar çoğumuzun konu gezegenler olduğunda en çok neyi ilgi çekici bulduğumuzu güzelce ortaya koymuştur. İlgiyi çeken kayalar, tuz, rüzgâr veya bir başına ele alındığında su bile değildir. Gezegensel keşiflerin bizi büyülemesinin sebebi gezegenlerin (ve bir ihtimal uydularının) yaşama rastlayabileceğimiz yerler olmasıdır. Dünyamız, Güneş Sistemimize ve şimdiki bilgi düzeyimize göre evren içinde yegâne biyolojik gezegen olarak öne çıkar. Yaşamın başka herhangi bir yerde tutunup tutunmadığını henüz bilmiyoruz. Bugün, sırasıyla Jüpiter ve

Satürn'ün buzlu uyduları olan Europa veya Enceladus gibi Güneş Sistemimizin suya sahip bazı ileri mevzilerinde küçük bir ihtimal mikrop var olabilir. Ne var ki gezegensel mahallemizde yaşamın yalnızca Dünya'da kendi evini dönüşüme uğrattığı aşikârdır. Peki, neden burası? Humphrey Bogart'ın sözleriyle “dünyanın tüm şehirlerindeki tüm o barlar arasında” yaşam niçin Samanyolu'nun bizlerin yer aldığı o mütevazı köşesinde ortaya çıktı ve gelişti? Bir de yaşam nasıl olup da gezegene yeniden biçim verdi?

ÖNCE BİR ADIM GERİ GİDELİM ve neyi anlamaya çalıştığımızı bir soralım. Neticede hayat nedir ki? Ünlü bir Borscht Belt* şakasında hayatın evdeki köpek öldüğünde ve çocuklar üniversiteye gittiğinde başladığı iddia edilir ancak soruyu ciddiye alacak olursak gerçekten bizleri, köpekleri, meşe ağaçlarını ve bakterileri, dağlardan ve vadilerden, volkanlardan ve minerallerden farklı kılan nedir? Kendi hayatımızı veya çocuklarımızın hayatını göz önünde bulundurarak organizmaların büyüüp geliştiklerini söyleyebiliriz. Doğru ama aynı şeyi kuvars kristalleri de yapar. Ne var ki organizmalar yalnızca büyüüp gelişmekle kalmazlar, üreyerek zaman içinde kendilerini çoğaltırlar. Gelişmeleri ve üremeleri için gerekli materyalleri ve enerjiyi bulundukları çevreden toplarlar; biyologların metabolizma adını verdiği bir dizi süreç gerçekleşir. Burada elzem olan yaşamın evrimleşmesidir. Bir kuvars kristali bir kere oluştuysa elmasa dönüşmeyecektir ama Dünya'nın ilk basit organizmaları milyarlarca yıl içinde şaşırtıcı çeşitlilikte türün oluşumuna sebebiyet vermiştir, buraya nasıl geldiğimizi sorma cüretini gösteren kişi de bunlar arasındadır.

Öyleyse yaşamın ayırt edici özellikleri büyümesi ve çoğalması, metabolizması ve evrimidir. Eğer bu yaklaşım, bildiğimiz

* Borscht Belt, Yahudi komedisi tarzlarından bir tanesidir. Esasında, New York'ta bir bölgedir ve 1920'lerden 1970'lere dek başka mekânlara alınmayan Yahudilerin gittiği tatil yerlerine ev sahipliği yapmıştır. Söz konusu yerler komedi sanatçıları da çekmiş, bu Yahudi komedyenler eğlence sektöründe büyük beğeni toplamıştır. Yahudilere atfedilen basmakalıp karakter özelliklerini benimseyen bu komedi türünü kullanan sanatçılara örnek olarak George Burns ve Mel Brooks verilebilir. (y.h.n.)

şekliyle hayata dair makul bir taslak çiziyorsa ilk organizmalar nasıl görünmüş olabilir? Dişleri veya kemikleri, yaprakları veya kökleri olmadığı kesin. Günümüzde hayatta olan en basit organizmalar bakteriler ve onların minik kuzenleri arkelerdir; bu minik organizmalar büyüme, çoğalma, metabolizma ve evrim için gerekli her şeyi tek bir hücre içine paketler. Günümüzdeki varolan tüm organizmaların son ortak atası bakteri hücrelerine benziyor olsa gerektir fakat en basit bakteriler bile karmaşık moleküler makinelerdir; evrimin başlangıç noktası değil, bir ürünüdür.

Smithsonian Enstitüsü'ndeki Ulusal Doğal Tarih Müzesi, gezegenimizin erken dönemlerini tasvir eden galerisinde uzun yıllar boyunca hafif nüktedan da olsa aydınlatıcı bir videoya yer vermiştir. Videonun başrolünde bir nesil Amerikalının televizyondaki “Fransız Şef” olarak tanıdığı Julia Child vardı. İzleyicilerine *Boeuf Bourguignon* yemeğinin inceliklerini anlatırken kullandığı tatlı sesiyle yeniden karşımıza çıkan Julia, bu kez, yaşamı ortaya çıkardığı düşünülen basit kimyasalların karışımı olan “primordiyal çorba”nın tarifini vermekteydi. Yaşamın bir “tarif”inin bulunduğu düşüncesinin basite indirgemeci bir yaklaşım olduğunu kabul etmek gerek ama organizmaların karmaşıklığını bileşenlerine, yani yaşamın moleküllerine ayırdığımızda bu yaklaşım güç kazanır.

Organizmalar zaman içinde gelişen kimyasal makinelerdir, onlara bir geçmişe sahip kimyasal yapılar da denebilir. Bu nedenle de yaşamın kökenine ilişkin laboratuvar araştırmaları, hücrelerin kimyasal bileşenlerinin cansız bir Dünya’da nasıl oluşmuş olabileceğine odaklanır. Örneğin hücrelerin yapısal ve işlevsel açıdan esas yükünü çeken proteinleri ele alalım. Vücudumuzdaki proteinler büyük ve karmaşık olabilir ancak amino asitler olarak adlandırılan nispeten basit bileşiklerin bir araya gelmesiyle oluşurlar. Proteinler genellikle yirmi farklı türden amino asit içerir ve bu amino asitler tıpkı bizlerin anlamlı sözcükler ve cümleler oluşturmak için harfleri bir araya getirmemize benzer şekilde işlevsel yapılar halinde bir araya dizilir. Dolayısıyla eğer amino asitleri sentezleyebilirsek proteinlerin yapı taşlarını elde etmiş oluruz. Stanley Miller ve

Harold Urey, bu olayın Dünya'nın ilk dönemlerinde tam olarak nasıl gerçekleşmiş olabileceğini gösterdiler. Bir cam kabı karbondioksit (CO_2), su buharı (H_2O), metan gazı veya doğal gaz (CH_4) ve amonyakla (NH_3) doldurdular; bu, Dünya'nın primordiyal atmosferinde bulunduğunu düşündükleri basit moleküllerin bir karışımıydı. Miller, yıldırımın Erken Dünya üzerindeki etkilerini canlandırmak için kaptan bir kıvılcım geçirdiğinde kabın iç duvarı kahverengiye dönmeye başladı. Kabı lekeleyen kahverengi yapışkan maddenin, organik moleküller olduğu ortaya çıktı. Söz konusu moleküllerin arasında amino asitler de vardı. Miller ve Urey, dönüm noktası teşkil eden bu tek deneyle yaşamın temel yapı taşlarının doğal süreçlerle oluşabileceğini göstermiş oldu.

DNA'ya da aynı şekilde yaklaşabiliriz. Hücrenin kullanım kılavuzu ve evrimsel belleği olan DNA zalim bir karmaşıklığa sahiptir ama aslında yalnızca dört farklı bileşenden oluşur, bu bileşenlere de nükleotid adı verilir. DNA'daki karmaşıklık ve bilgi, bu nükleotidlerin molekül boyunca doğrusal diziliminden gelir. Proteinlerdeki amino asitler gibi DNA'daki nükleotidler de DNA bilgisinin kodlandığı alfabeyi oluşturur. Nükleotidler de daha basit bileşenlere ayrılabilir: Bir şeker, bir fosfat iyonu (PO_4^{3-}) ve baz olarak adlandırılan basit bir organik molekül. Bazlar, hidrojen siyanürden (HCN) ve Dünya gençken mevcut olması muhtemel diğer basit bileşiklerden sentezlenebilir. Dahası, şekerlerin formaldehit (CH_2O) gibi yine en eski Dünya'da mevcut olduğu düşünülen basit öncül maddelerden üretilebileceğini bir yüzyıldan fazladır biliyoruz. Fosfat iyonları da volkanik kayaların kimyasal aşınmasıyla ortaya çıkmış olsa gerek. Bu bileşenleri nükleotidleri oluşturmak için bir araya getirmek on yıllar boyu bilim insanlarını zorladı fakat 2009'da İngiliz kimyager John Sutherland ve meslektaşları, erken Dünya koşulları kabul edilebilecek şartlar altında iki tür nükleotid üretti.

Son olarak da lipitlerden, yani tüm hücreleri bağlayan zarların moleküler bileşenlerinden söz edebiliriz. Tıpkı DNA ve proteinler gibi lipitler de daha basit birimlerden meydana gelir. Lipitlerin yapı taşları "yağ asitleri" adı verilen uzun, zincir biçimli moleküllerdir. Muhtemelen onlar da Dünya'nın

ilk yıllarında kimyasal olarak oluşmuşlardır. İçerisinde dağınık halde bulunan yağ asitlerini barındıran suyu sıçratır veya buharlaştırırsanız bu yağ asitlerinin kendiliğinden bir araya gelip bakterileri bağlayan zarlarla birçok ortak noktaya sahip, küresel mikro yapılar oluşturacak olmaları dikkate değerdir.

Öyleyse yaşamın ana yapı taşları olan ve hücrelerimizi meydana getiren moleküller, Dünya'nın bebeklik döneminde gezegenin her yerinde olmasa bile bölgesel olarak mevcut olduğunu söyleyebileceğimiz koşullardaki doğal süreçler neticesinde oluşabiliyordu. Bu çıkarımın teorik, hatta deneysel olmakla kalmadığının altını çizmek yerinde olacaktır. Az önce belirtilen tipte tepkimelerin milyarlarca yıl önce sahiden gerçekleştiğini biliyoruz; bu bilgiyi sağlayan kayıtlar, *in statu nascendi** Güneş Sistemimizin çok önemli yadigârları olan gök taşlarında saklıdır. Yerküre'nin oluşum aşamasında bir karbon ve su kaynağı olarak daha önce bahsettiğimiz karbonlu kondritler, etkileyici ölçüde geniş bir organik molekül çeşitliliğine sahiptir; bunlar arasında amino asitler (Yetmiş farklı tür!), şekerler, yağ asitleri ve daha fazlası yer alır. Dolayısıyla yaşamı ortaya çıkaran kimyasal maddeler evrende gayet yaygın bir şekilde bulunuyor olabilir.

Buraya kadar her şey iyiydi ama buradan sonra işler karışıyor. Amino asitlerin birleşerek "peptitler" adı verilen kısa lineer molekülleri oluşturabildiğini biliyoruz, bu oluşum süreci basit bir düzyazıdan proteinlerin Shakespeare'ine geçmek gibidir. Nükleotidler de hemen hemen aynı şeyi yapabilir. Bu tür moleküllerde işlev ve bellek birbirine yakın faaliyet gösterir gibi görünmektedir fakat canlı organizmalarda protein sentezi için moleküler talimatları DNA verir, diğer öte DNA'yı kopyalamak için de proteinlere ihtiyaç vardır. Peki, hangisinin daha önce gerçekleştiğine dair tavuk ve yumurtanın kine benzer bu ikilemden nasıl kurtulabiliriz?

Bu soruya evrimleşen ilk proto-organizmalarda ne DNA'nın ne proteinlerin var olduğunun söylenmesiyle cevap verilebilir. Ben 1970'lerde biyoloji çalışmaya başladığımda yine nükleotidlerden oluşan bir yapı olan RNA genellikle hücrelerin ebesi

* (Lat.) Doğmakta olan. (y.h.n.)

olarak anılırdı; DNA'nın mesajını proteinlere taşıyan bir dizi moleküldü ve bu taşıma işini de "ribozom" adı verilen küçük bir hücre içi yapıda gerçekleştiriyordu. Bununla birlikte o günlerden bu yana bilinen RNA moleküllerinin bilinen çeşitliliği ve ispatlı fonksiyon yelpazesi şaşırtıcı ölçüde arttı. RNA da kuzeni DNA gibi bilgi depoluyordu ancak bazı RNA'lar enzim gibi hareket edip bir zamanlar yalnızca proteinlere özgü olduğu düşünülen şekilde hücrenin moleküler işlerini gerçekleştiriyordu. Ayrıca artık küçük RNA moleküllerinin hücre içindeki gen ifadesinin düzenlenmesinde rol oynadığı da öğrenilmişti. Dahası, biyologlar ribozomun moleküler detaylarını araştırdıklarında RNA'nın, yapının işlevsel açıdan merkezinde yer aldığını buldular. Son olarak yakın zamanda gerçekleştirilen deneyler, laboratuvarıda sentezlenen RNA moleküllerinin, belirli görevleri yerine getirmek üzere seleksiyonla şekillenecek evrim geçirebildiğini gösterdi. RNA moleküllerinin bilgi depolayabildiği, enzim gibi davranabildiği ve evrimleşebildiği yönündeki keşifler bizi mühim bir düşünceye götürür: Çoğalan ve evrim geçiren en eski varlıklar belki de DNA'dan ve proteinlerden değil, RNA'dan meydana gelmişti.

RNA Dünyası hipotezi, yaşamın kökenlerini araştıran birçok kişiyi büyüdü altına almaktadır. Bu yaklaşıma göre kendiliğinden oluşan bir lipid küresinin içine kıvrılmış bir erken dönem RNA molekülü (veya RNA benzeri bir molekül) gelişebilir, çoğalabilir ve kademeli olarak daha büyük bir moleküler karmaşıklığa ve belirli bir yapıya kavuşabilirdi. Zaman içinde de DNA, RNA öncüllerinden evrimleşecek; hücre bilgisi için çok daha sağlam bir depo sağlayacak ancak diğer işlevsel rollerden feragat edecekti. Amino asitler RNA ve DNA'yla etkileşime girdiğinde de genel olarak RNA enzimlerinden çok daha hızlı hareket eden proteinler evrimleşerek hücrenin yapısal ve fonksiyonel gereksinimlerinin büyük bölümünü üstlenecekti. Son araştırmalar ilginç şekilde hem DNA hem de RNA'nın yapı taşlarının uygun prebiyotik koşullar altında oluşmuş olabileceğini göstererek canlı bütün hücrelerde bulunan DNA ve RNA arasındaki dansın, hayatın ilk dönemlerinden beri var olduğu ihtimalini artırıyor.

RNA Dünyası hipotezi ve varyasyonları açısından asıl güçlük, metabolizmayı bu karışımın içine katma noktasında ortaya çıkar. Belki ilk canlı varlıklar basitçe lipid kapsülü içine saklanmış olan ve çevreleriyle etkileşimde olmak adına herhangi bir özel mekanizmaya sahip olmaksızın büyüyen, çoğalan ve evrim geçiren RNA molekülleri idi. Bu durum kesinlikle ihtimal dahilindedir ve bu fikri destekleyen bilim insanlarının sayısı da bir hayli fazladır. İlk yaşamı oluşturmak adına metabolizma gerekli değilse de organizmaların okyanuslarla ve atmosferle etkileşime girmesini ve nihayetinde her ikisinin de bileşiminin değişmesini mümkün kıldığından birçok açıdan yaşamı ilgi çekici hale getirmektedir. Bazı bilim insanları bu düşünceyle yaşamın kökenleri konulu labirente bilgiden ziyade metabolizmanın altını çizen farklı bir kapıdan girmeyi tercih eder. Bu görüşe göre metabolizmanın başlangıcı, okyanus sırtlarının derinliklerindeki enerji açısından zengin kaplıcaların etrafında gerçekleşmiştir.

Önceliği metabolizmaya veren hipotezler, RNA Dünyası hipotezlerinin karşılaştığı problemin tam tersi yönde bir sıkıntı yaşamaktadır. Bu yaklaşım, yeni yeni oluşmakta olan yaşamın çevresiyle nasıl etkileşime girdiğine dair büyüleyici ipuçları sunar ancak bu temel üzerinden DNA, RNA ve proteinlerin bilgisini geliştirme çabaları insanda, “Dünya altıncı günde yaratıldı...” ifadesindekine benzer bir his uyandırmaktadır. Dolayısıyla yaşamın kökenlerinin ne olduğu sorunu, üzerinde çalışılmaya devam edilen bir konu olarak varlığını sürdürmektedir. Şunu biliyoruz ki ilkel Dünya’da kendi kendini kopyalayan, metabolize eden, evrimleşebilen hücreler bir şekilde ortaya çıktı ve gezegensel dönüşüme zemin hazırladı. (Bazı bilim insanlarının panspermi, yani Erken Dünya’daki yaşamın tohumunun ya fiziksel olarak ya da uzaylılar tarafından başka bir yerden ekildiği hipotezine ilgi göstermelerini anlıyorum. Belki de mikroplar, Mars’a veya başka bir gezegene çarpan meteorlar tarafından uzaya fırlatıldı ve sonunda bereketli Yerküre üzerinde duruverdi. Erken Güneş Sistemi’nde böyle bir kuluçka makinesinin var olup olmadığı net değildir ve doğal yollarla olsun ya da olmasın, Güneş Sistemi’nin dışındaki bir gezegenden tohumlama yapılması, yalnızca çok düşük olasılıkla mümkün olabilir çünkü uzayda yolculuk süreleri uzundur ve

mikrobiyal göçmenlerin gelişebilecekleri bir ortama iniş ihtimali düşüktür. Elbette, üzerlerinde düşünüp taşınmayı seçsek bile bu fikirler yaşamın kökeni sorununu çözmez, söz konusu sorunu uzaya ve zamana taşımakla yetinir.)

YAŞAMIN NASIL ORTAYA ÇIKTIĞINI henüz tam olarak anlayamasak da yaşamın Yerküre'ye ilk ne zaman kök saldığını belki tahmin edebiliriz; bu da bize yaşam başladığı sırada Dünya yüzeyinin doğasını belli bir çerçevede sınırlama imkânı verir. Bu durumda problem jeolojik bir hal alır, bitkilerden ve hayvanlardan çok daha eski olan mikrobiyal yaşamın, kayalar üzerinde izi sürülebilir bir imza bırakabileceği önermesi üzerine kurulur. Bakteriler kadar küçük ve görünürde narin organizmalar, Erken Dünya'daki yaşamı belgeleyen, dinazor kemikleri ve fosilleşmiş ağaçların daha genç çağlar için bıraktıklarına denk izler bırakabilir mi?

Yıllar önce genç bir paleontolog olarak, eski mikrobiyal yaşamın kanıtlarını aramak için kutup adası Spitsbergen'e gitmiştim. Buzulların şekillendirdiği kayalıklar, 720 ile 850 milyon yıl önce çökelmiş birkaç bin metrelik tortul kayaçları gözler önüne seriyordu. (Resim 9) Bu kayalarda kemik veya kabuk yoktur, yatak yüzeylerinde herhangi bir iz veya yol belirtisi de bulunmamaktadır. Gerçekten de bu kayalar oluştuğunda fosiller meydana getirebilecek olan hayvanların dünyaya gelmesine daha milyonlarca yıl vardı. Öte yandan eğer nasıl bakınanız gerektiğini biliyorsanız yaşamın imzasının Spitsbergen kayalarına atıldığını net olarak görürsünüz.

Çörtle başlıyoruz. Bazen çakmak taşı olarak da adlandırılan çört, ince granüllü kuvarstan meydana gelmiş, son derece sert kayalardır. Bazı okurlar Güneydoğu İngiltere'deki yüzeyi parlak siyah çakıllarla, yani orta çağda onları inşa eden mimarların elindeki en sert kayalarla kaplı çakmak taşından yapılma kiliseleri bileceklerdir. Bu farklı kayaların kökenini kavramak için Dover'daki White Cliffs'e gitmek gerekir. Bu muhteşem tebeşir kayalıkları, yaklaşık yetmiş milyon yıl önce deniz tabanında biriktikleri sırada kireçli tortular içinde çökelmiş bol miktarda siyah çört parçası bulunur. Parçalar siyahtır çünkü

büyümleri esnasında içlerinde hapsolan organik maddeler içerir. Çörtün paleontolojik güzelliği de bu özelliğinde yatar: Çört çok eski biyolojik materyalleri ebediyen saklayabilir, tortul yataklar birikirken gömülen minik organizmaların fosilleri de bu materyaller arasındadır.

Spitsbergen'de buzullarla yarılmış vadiler, bazıları White Cliffs'teki gibi siyah çört parçaları içeren kalın kireç taşı yataklarını gözler önüne serer. (Resim 10) Mikroskop altında incelendiğinde bu kayaların kâğıt inceliğinde dilimleri, küçük de olsa güzel diyebileceğimiz fosiller açısından zengin, taşlaşmış bir mikrobiyal dünyayı ortaya çıkarmaktadır. (Resim 11 ve 12) Bunların birçoğunun daha sonra göreceğimiz üzere Dünya tarihinde çok büyük bir rol oynayan fotosentetik bakteriler, yani siyanobakteriler olduğu tespit edilebilmektedir. Çörtteki diğer fosiller arasında küçük algler ve protozoalar yer alır. Sığ denizin altında biriken çamurlar ise daha fazla mikrofosil ba-



Resim 9. 750 ile 800 milyon yıllık tortullardan oluşan bir kayalık; Spitsbergen'in buzul yükseltilerinde ortaya çıkmıştır. Bu kayalar ve dünyanın çeşitli yerlerinde bulunan benzerleri, bitkilerin ve hayvanların evrimleşmesinden uzun zaman önce var olmuş, zengin mikrobiyal biyotaya dair kanıtları muhafaza eder. *Andrew H. Knoll*

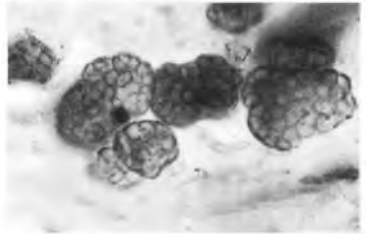
rındırır; bunlar kaya katmanları arasına eski Sevgililer Günü buketleri gibi sıkışmış durumdadır. (Resim 13) Bu ve dünyanın çeşitli yerlerinde bulunan benzeri eski kayalardaki fosiller, hayvanların büyük ölçüde mikroorganizmalardan oluşan halihazırda hayat dolu bir dünyanın içine doğup evrimleştiğini göstermektedir.



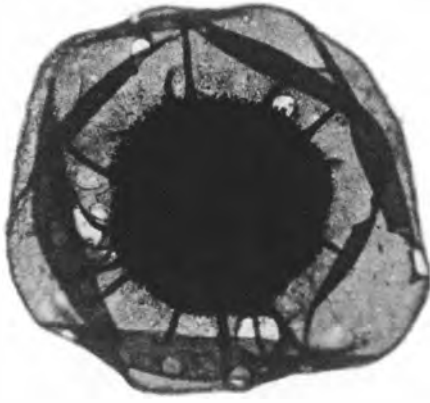
10.



11.



12.



13.

Resim 10-13. Siyah çört parçaları Spitsbergen sıralarındaki kireç taşları içinde görülür. (Resim 10) Bunlar bol miktarda ve çeşitlilikte siyanobakteri mikrofosilleri (Resim 11 ve 12) ve diğer mikroorganizmaları içerir. Aynı kayalık sırasındaki çamur taşları, tek hücreli ökaryotik mikroorganizmalara alt güzel fosilleri muhafaza eder. (Resim 13) *Andrew H. Knoll*

Spitsbergen kireç taşları oluştuğu sırada deniz kıyısında yürümüş olsaydınız gelgit bölgesini tam tepesine dek örten yoğun siyanobakteri ve diğer mikroorganizma kalıplarının mavi yeşile boyadığı kesintisiz gibi duran bir kıyı şeridi görürdünüz. Kıyının açıklarına ilerlemeniz halinde gördüğünüz mavi yeşil yüzey miktarı artardı fakat buradaki yüzeyler deniz tabanından yukarı çıkıntı yapıyor olurdu. Bunlar stromatolitler, yani mikrop toplulukları tarafından eski deniz tabanından yukarı doğru inşa edilen fosil resifleridir. Günümüzde resifler, iskelet oluşturan alglerin de yardımıyla çoğunlukla hayvanlardan meydana geliyor fakat hayvanların Dünya'yı şerefleştirmesinden çok daha uzun zaman önce oluşmuş olan resifler, mikrobiyal mimarların varlığından haber veriyor. Spitsbergen kayalıklarının duvarlarında birkaç metre kalınlığa kadar ulaşabilen ince katmanlı kubbeler, sütunlar ve koniler göze çarpıyor. (Resim 14) Bu oluşumları rahatlıkla yorumlayabiliriz çünkü günümüz dünyasının pek çok köşesinde de deniz tabanındaki mikropların hayvanlardan ve deniz yosunlarından korunduğu birçok yerde stromatolitler oluşmayı sürdürüyor. Eski Dünya'da olduğu gibi bu ortamlarda da kalıp benzeri mikrobiyal topluluklar tortuları oldukları yerde kapana kısıtırır, bağlar ve birbirine yapıştırarak zaman içinde katman katman kayalık bir yapı inşa eder.



Resim 14. Mikrobiyal topluluklar ince taneli tortulları kapana kısıtıp oldukları yere bağladığında oluşan kat kat yapılar yani stromatolitler. Mikrobiyal topluluklar çakıl taşlarından oluşan sıkı yüzeyler üzerinde koloni kurmuş ve tortular biriktikçe yukarı doğru yükselmiştir, bu büyümeleri fotoğrafta görülen ince katmanlar tarafından belgelenir. Sağdaki sütunlar boydan boya yaklaşık 5 santimetredir. *Andrew H. Knoll*

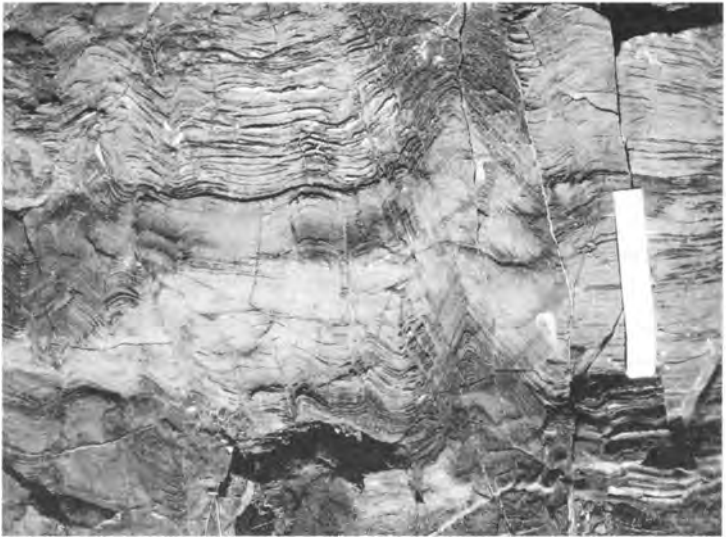
Kimya bize daha da fazla mikrobiyal kanıt sunar. Bölüm 1’de sözünü ettiğimiz izotoplar bu açıdan anahtar teşkil etmektedir. Daha önce bahsettiğimiz gibi yaşamın başlıca elementi olan karbon iki kararlı izotopa sahiptir: Karbon-12 ve Karbon-13. Karbon izotopları eski dönemin biyolojisine dair öyküler anlatır çünkü fotosentetik organizmalar, karbondioksiti organik moleküller haline getirirken daha ağır olan karbon-13 yerine daha hafif olan karbon-12 izotopunu kullanmayı tercih ederler. Organizmalar karbon-12’yi bilerek seçmezler; mesele daha hafif olan karbondioksitin hücredeki enzimlerle daha kolay tepkimeye girmesinden ibarettir. Dolayısıyla karbondioksit bol olduğunda fotosentetik organizmalar ortamdaki inorganik karbona kıyasla karbon-12 açısından biraz daha zenginleştirilmiş olan organik maddeyi üretirler. Bu fark, bin birim içinde yalnızca birkaç partikül kadar olsa da “kütle spektrometresi” adı verilen cihazlar sayesinde tam olarak ölçülebilmektedir. Bugün mesela Bahamalar’a gitsek ve kireç tortularının karbon

izotopu bileşimlerini ve içlerindeki organik maddeyi ölçsek kireç taşları ve organikler arasında bin birimde 25 partikül kadar fark olduğunu buluruz. Aynı uygulama Spitsbergen'de gerçekleştirildiğinde benzer sonuçlar vermekte ve 720 il 850 milyon yıl önce biyolojik bir karbon döngüsünün var olduğuna işaret etmektedir. Benzer şekilde pirit ve alçıda muhafaza edilen kükürt izotopları da içinde bakterilerin yer aldığı eski bir kükürt döngüsünü belgelemektedir.

Son olarak çok eski kayalar da zaman zaman, organizmalar tarafından üretilmiş olan ve kendilerini üretenin ölümünden çok sonra bile kayalarda korunmaya devam eden gerçek biyomoleküller içerir. Aslında orada DNA ve protein bulmak en iyisi olurdu ama gerçekten çok eski olan kayalarda böylesi dilekler nadiren gerçekleşir. Son on yılda eski DNA üzerine yapılan araştırmalarda kayda değer bir devrim gerçekleşmiş olsa da şimdiye dek kemiklerden veya kabuklardan güvenilir şekilde çıkarılmış en eski DNA, iki milyon yıl yaşında bile değildir. Benzer şekilde bakteriler ve mantarlar için çok iyi besin teşkil eden proteinler de en genç kayalar dışında herhangi bir yerde nadiren korunur. Korunan bir madde varsa o da zarların sert bileşenleri olan lipitlerdir. Öğrencilerime öldükleri zaman, gelecek nesillerin üzerinde kafa yoracağı son parçalarının kolesterolleri olacağını söylemeye bayılıyorum! Spitsbergen kayalıklarının şimdiye dek korunmuş biyomoleküller açısından bize çok fazla bir getirisi olmadı ama benzer yaştaki başka kayalar çeşitli mikroorganizmalara ait birtakım moleküler kayıtlar sunuyor. Öyleyse mikrobiyal yaşam, tortul kayalara çeşitli işaretler bırakabiliyor ve Spitsbergen veya başka yerlerdeki 720 ile 850 milyon yaşındaki kayalar bu işaretlerden bol miktarda barındırıyor.

Peki, yaşama dair kanıtların izini ne kadar eskiye dek sürebiliriz? Avustralya ve Sibirya'da 1.500 ile 1.600 milyon yıllık kayalar üzerinde çalıştım. Bu kayalar tıpkı yarı yaşlarındaki Spitsbergen birikintilerinde olduğu gibi mikrofosiller, stromatolitler, biyo-ışaret molekülleri ve mikrobiyal karbon ve kükürt döngüsünün izotopik kanıtlarını içeriyordu. Yaşı bir kez daha ikiye katladığımızda ise biyolojik işaretleri araştırmak açısından yeterince

iyi korunmuş, en eski tortul kayaçlara ulaşırız: Güney Afrika ve Batı Avustralya'nın uzak köşelerinde muhafaza edilmiş, 3,3 ile 3,5 milyar yıllık kaya sıraları. Dünya'nın gençlik döneminden sağ çıkan az sayıda varlık arasında yer alan bu kayalar, büyük oranda volkanik akıntılardan ve küllerden oluşmuştur ama ince tortul ara katmanları, yaşamın ne kadar eski olduğuna dair sorular sormamıza imkân verir. Çört bakımından zengin kayaçlardaki mikrofosillerden gelen bilgilerin tartışmalara sebebiyet verdiği görülmüştür çünkü bu yataklardaki basit organik mikroyapılar, çökmeden çok sonra tortulardan süzülen hidrotermal sıvılar tarafından oluşturulmuş olabilir. Benzer şekilde kayalar gömülme ve tektonik deformasyon sırasında ısınmış, bir zamanlar var olmuş olabilecek bütün biyo-işaret moleküllerini yok etmiştir. Bununla birlikte izotoplar, yeni yeni oluşmakta olan biyosfer içinde karbon ve kükürt döngüsü yapan mikropların bulunduğu bir Erken Dünya'ya işaret etmektedir. Stromatolitler de sıg deniz tabanında mikrobiyal topluluklar olduğunun göstergesidir. (Resim 15)



Resim 15. Batı Avustralya'daki 3,45 milyar yıllık tortul kayalarda yer alan stromatolitler. Karbon ve sülfür izotoplarından gelen kanıtlarla birlikte bu yapılar Dünya tarihinin erken safhalarında mikrobiyal yaşamın var olduğunu belgeler. Cetvel 15 santim uzunluğundadır. *Andrew H. Knoll*

Öyleyse bundan üç buçuk milyar yıl önce Dünya, halihazırda biyolojik bir gezegendi. Gerçi bazı gözlemler yaşamın daha da öncesinde var olmuş olabileceğine de işaret eder. Güneybatı Grönland fiyortları arasında yer alan kıyı kayaları, en nadide parçaları, yani yaklaşık 3,8 milyar yıllık magmatik ve tortul kayaçları içermektedir. Bu kayaçlar metamorfizma neticesinde yıpranmıştır ve tortullarda başta korunmakta olan organik madde, grafit oluşturmak amacıyla ısı ve basınçla değişime uğramıştır. Bununla birlikte bu materyalin karbon izotop bileşimi daha genç kayalarda saklı organik maddeye büyük oranda benzemekte ve biyolojik bir karbon döngüsüne işaret etmektedir. Ayrıca ikinci bölümde bahsedildiği üzere Avustralya'daki Jack Hills'ten gelen 4,1 milyar yıllık bir zirkon kristali içindeki küçük bir grafit zerresi de karbon-13'ten yoksundur. Bu en eski karbonun, Yerküre'nin derinliklerinde oluşup büyümekte olan zirkon kristalleriyle birleşmediğinden emin olamayız ancak çıkarılan genel fikir nettir. Zamanda geriye doğru gittikçe yaşam için kanıtımız tükenmeden önce inceleyeceğimiz kayalar tükenmiş olur. Dünya uzun geçmişinin büyük bölümünde biyolojik bir gezegen olagelmıştır.

BUNDAN 4 MİLYAR YIL veya daha uzun zaman önce yaşamın başladığı zamanda gezegenimizin durumu hakkında jeoloji bize ne söyler? Daha önce ortaya koyduğumuz üzere genç Dünya sulu bir gezegendi; volkanlar ve kıta benzeri küçük kütleler dalgaların üzerinde yükseliyordu. Prebiyotik kimyasal tepkimelerin kullanabileceği enerji yaygındı: Dünya yüzeyi ultraviyole radyasyon tarafından örseleniyor ve radyoaktif izotopların bozunması ilave bir enerjik radyasyon sağlıyordu. Volkanlar ile hidrotermal sistemlerden gelen ısı her yerdeydi ve şimşekler erken dönem atmosferini yarıyordu. Sıcak ortamlar bugün de olduğu üzere yine bölgesel olarak hidrotermal sistemlerde (Old Faithful gayzerini düşünün.) ve okyanus sırtlarında mevcuttu fakat en güncel verilere göre okyanusların ve atmosferin sıcaklığı günümüzdekinden çok da farklı değildi.

Bu durum başlı başına bir bilmecedir çünkü yıldız evrimi modellerine göre dört milyar yıl önce Güneş'in parlaklığı, mo-

dern değerinin sadece yüzde 70'i kadardı. Madem Güneş loştı, öyleyse erken dönemdeki Dünya niçin bir buz topu değildi? Cevap, yirmi birinci yüzyıl küresel ısınmasının belası olarak adlandırabileceğimiz ama diğer yandan yaşanabilir iklimin uzun vadeli garantörü olan “sera gazları”dır. Genç Dünya’nın yüzeyinde sıvı su barındırabilecek kadar ılık kalabilmesi için atmosferde bilhassa karbondioksitin şu andaki konsantrasyonundan en az yüz kat daha yoğun halde var olması gerekirdi. Anlaşıldığı kadarıyla erken dönemdeki atmosfer büyük oranda azot gazından, karbondioksitten ve su buharıyla hidrojen gazının çeşitli karışımlarından oluşuyordu. Bölüm 1’de belirtildiği üzere eski tortul kayaçlar üzerinde yapılan kimyasal gözlemler, oksijen gazının açıkça var olmadığını göstermektedir. Bu, yaşamın kökeni açısından iyi haberdır çünkü binlerce deneyden öğrendiğimiz üzere O_2 var olduğunda prebiyotik kimyasal tepkimeler gerçekleşmez.

Öyleyse yaşam, modern gözle bakıldığında zar zor tanımlanabilecek bir Dünya’da, adeta küresel boyuttaki İzlanda’da ortaya çıkmıştır: Burada su çok, toprak pek yoktu; çok fazla karbondioksit bulunuyordu ama oksijen ya çok azdı ya da hiç yoktu, hidrojen ve başka gazlar bazı bölgelerde fokurduyordu, kaplıcalar yaygındı. Yaşamın üzerine kurulduğu mesnet buydu ve orada olmanız halinde (Yanınızda oksijen götürmeyi unutmayın.) ayaklarınızın altında gerçekleşen değişimleri fark edemeyebilirdiniz. Hayat, bu mütevazı başlangıcından sonra yayılıp çeşitlenecek, gezegenimizin yüzeyini günümüze kadar tekrar tekrar şekillendirerek Dünya’yı bakterilerle, diatomlarla, sekoyalarla ve bizlerle dolduracaktı.

JEOLJİK ZAMAN ÖLÇEĞİ

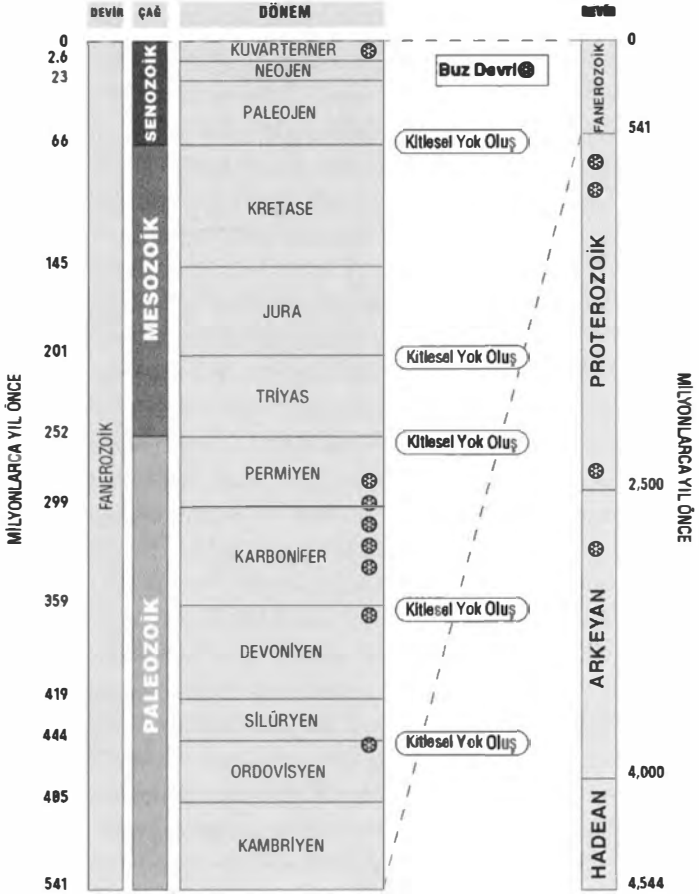
“Doğa biliminin gözleme dayalı diğer tüm branşlarının yaptığı gibi bizler de Yerküre kabuğunun karışık dev kütlelerinin doğal gruplar halinde sıralandığını ve bu grupların nizamlı olarak birbirini izlediğini gözlemliyoruz.” İngiliz jeolog Adam Sedgwick bu sözlerle Yerküre biliminin on

dokuzuncu yüzyıldaki büyük devrimini, yani gezegenimizin çok uzun geçmişinin tanınması ve jeolojik zaman ölçeğiyle kodlanmasını özetliyordu. Sedgwick 1835 yılında Kambriyen Sistemi'ni tanımladı; bu sistem, Galler'de bir tortul kayaç sırasıydı. Kambriyen Sistemi, geometrisi ve yaklaşık olarak aynı dönemde bir başka İngiliz jeolog olan Sör Roderick Impey Murchison tarafından öne sürülmüş Silüriyen Sistemi'nin paleontolojik açıdan ayrışan katmanlarının altındaki mekânsal konumu yönünden diğer kayaç gruplarından farklıydı. Yirmi otuz yıl içinde, bir dizi sistem tanımlandı ve birbirleriyle olan stratigrafik ilişkileri temelinde göreceli bir zaman ölçeğine yerleştirildi. Silüriyen kayaları Kambriyenlerden gençti çünkü Kambriyen Sistemi her zaman kayalarının üzerinde yer alıyordu; Devoniyen kayaları ise onlardan da gençti. Her bir sistemin birikim oluşturduğu zaman aralığı, dönemler olarak bilinir hale geldi ve fosiller Dünya'nın zaman göstergesi olarak kabul edildi. Sonuç olarak ortaya jeolojik zaman ölçeği veya en azından bu ölçeğin şimdilerde Fanerozoik Devir (görünür hayvan fosilleri çağı) olarak bilinen parçası çıktı.

Yirminci yüzyılın şafağında, kayaçların daha genç kısımlarında kaydedilen olayların göreceli tarihlendirilmesi işlemi gayet oturmuş durumdaydı. Bununla birlikte jeologlar, Senozoik memelilerin Mezozoik dinzorlardan daha genç olduklarından emin olsalar da bu zaman aralıklarının gerçek yaşlarını veya bu dönemlere özgü fosillerin hangileri olduğunu bilmiyorlardı. Radyoaktivitenin keşfi bu durumu sonsuza dek değıştirdi. Daha öncesinde elementlerin barındırdıkları nötron sayısıyla birbirinden ayrışan farklı versiyonları olan izotoplardan söz etmiştik. Karbonun iki kararlı izotopu vardır: karbon-12 ve karbon-13. Bununla birlikte üçüncü bir izotopa daha sahiptir: karbon-14. Karbon-14 radyoaktiftir. Çekirdeğı kararsızdır ve zamanla parçalanıp bir elektron (ve ayrıntılarla ilgilenenler için bir elektron antinötrinosu) yayarak azot oluşturur. Bu bozunmanın gerçekleşme hızını ölçebiliriz: Karbon-14'ün

yarı ömrü, yani örneğin bir parça odun içindeki karbon-14'ün yarısının azota bozunma süresi 5.730 ± 40 yıldır. Karbon-14 bu şekilde zamanı ölçmek açısından bir temel meydana getirir.

Yarı ömrü nispeten kısa olduğu için karbon-14, arkeolojik materyallerin tarihlendirilmesinde fayda sağlar ancak Dünya tarihinin uçsuz bucaksızlığı bakımından işe yaramaz. Bu konuda iş diğer radyoaktif izotoplara, özellikle de uranyumunkilere düşer. Bölüm 1'de belirtildiği üzere büyük ölçüde granitlerde ve ilgili magmatik kayalarda oluşan zirkonlar, tarihleme açısından özellikle yararlıdır ve jeologların Dünya'nın uzun tarihini ölçmelerini sağlar. Jeologlar, sahada ve laboratuvarda yapılan çok sayıda zahmetli araştırma neticesinde jeolojik tarihe nicelik vermeyi başarmışlardır. Şimdilerde Tyrannosaurus rex'in Geç Kre-tase Dönemi'nde yaşadığını bilmekle kalmıyor, 66 ile 68 milyon yıl önce eski ormanlarda dolaştığını da biliyoruz. Radyometrik tarihleme, Dünya'nın Fanerozoik öncesi geçmişinin zaman çizelgesini oluşturmanın da anahtarı olmuştur. Resim 16, jeolojik zaman ölçeğini 2020 yılında anladığımız şekliyle göstermektedir; jeolojik zamanın ölçülmesi, çözülmesi gereken birçok ayrıntısıyla birlikte devam etmekte olan bir süreç durumundadır. Resim, fosil bakımından zengin Fanerozoik Devir'in takdire şayan bir kararlılıkla tarihlendirildiğini ortaya koymakla kalmaz, bir bütün olarak bu çağın, gezegenimizin tarihinin yalnızca en yakın yüzde 13'lük kısmını oluşturduğunu gösterir. Tarifi zor Hadean Devri (4.000 ile 4.540 milyon yıl), antik Arke-yan Devri (2.500 ile 4.000 milyon yıl) ve uzun Proterozoik Devir (541 ile 2.500 milyon yıl) jeolojik zamanın büyük bölümünü oluşturur. Zaman çizelgesini kavrayabilmek için biraz zaman ayırmanız yerinde olacaktır. Sonraki bölümlerde tarihçilerin Demir Çağı, Orta Çağ veya Rönesans'tan bahsederken yaptıkları gibi bizler de jeolojik zamana atıfta bulunurken genellikle bu çizelgede bahsi geçen çağ, devir ve dönem isimlerini kullanacağız.



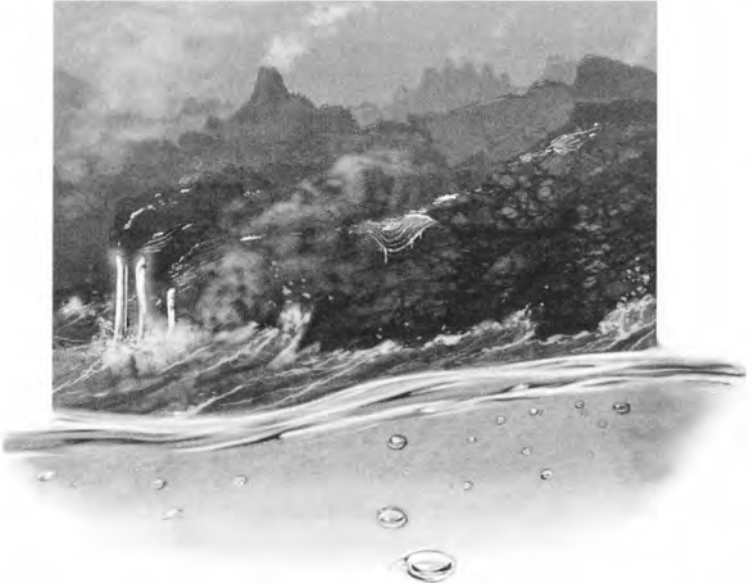
Resim 16. Jeolojik zaman ölçeği. Zaman aralıkları Uluslararası Stratigrafi Komisyonu tarafından oluşturulan Uluslararası Kronostratigrafik Çizelge'nin 2020 versiyonuna dayanmaktadır.



④

Oksijen Dünyası

SOLUNABİLİR HAVANIN KÖKENİ



OKSİJENSİZ BİR ATMOSFER MÜMKÜN OLABİLİR Mİ? Söz konusu oksijensizlik, bizim dünyamızı genç Yerküre’den temelden ayırır, peki ama bu iddianın doğru olup olmadığını nereden biliyoruz? Peki erken dönemdeki Dünya’nın bizimkinden çok farklı olduğundan nasıl emin oluruz? Hem karıncayiyenleri, filleri, dahası bizleri sırtlayabilen bir gezegen haline gelişini nasıl açıklayabiliriz? Erken dönemdeki atmosfere dair elimizdeki bilinen en eski numune yaklaşık iki milyon yıl önce Antarktik buzullarına hapsolmuş olan hava kabarcıklarıdır, dolayısıyla daha eski dönemdeki hava ve okyanuslara dair çıkarımlar kayalara bırakılmış kimyasal izlerden gelmek durumundadır. Nasıl ki Neandartal kültürü hakkında bir şeyler öğrenmek için geride bıraktıkları eserlere bakıyorsak Dünya’nın erken dönemdeki atmosferine ilişkin bir tablo çizebilmek için de bileşimleri, oluştukları dönemdeki eski hava ve suyla temaslarını yansıtan kayalara ve minerallere bakarız.

Bu bakımdan Dales Vadisi’nden başlamak iyi olacaktır. Kuzeybatı Avustralya’nın kurak ovalarına oyulmuş dar bir vadi

olan bu geçit, yaklaşık iki buçuk milyar yıl önce ekelmiş, kalın bir tortul kayaç sırasını gözler önüne sermektedir. (Resim 17) Eşit katmanlı rt ve demir mineralleri karışımından meydana gelmiş, demirin aşınmasıyla ortaya çıkan pas rengi ve Orta Avustralya'ya kadar nüfuz eden kırmızı tozla lekelenmiş söz konusu kayalar olağan dışıdır. Kayalar gerçeğe uygun düşecek şekilde demir oluşumu olarak adlandırılır ve eğer mutfakta dökme demirden bir tava kullanıyorsanız tavanın metalinin bu türden bir kayadan gelmiş olma olasılığı yüksektir.



Resim 17. Batı Avustralya'daki Dales Vadisi'nde keşfedilen 2,5 milyar yıllık demir oluşumu. *Andrew H. Knoll*

Demir oluşumunun modern deniz tabanında gerçekleşmiyor olması bize bir şeyler anlatır. Bu birikintilerin oluşması için demirin okyanusta çözelti halinde taşınması gerekir ve bu sadece O_2 'nin yokluğunda mümkündür. Küçük bir miktar oksijen bile çözünmüş demirle tepkimeye girip demir oksit minerallerinin ortaya çıkmasına sebep olacaktır. Günümüzdeki okyanuslarda demir konsantrasyonu çok düşüktür. Öyleyse demir oluşumu büyük ölçüde oksijensiz okyanuslara işaret eder. Yüzeydeki

deniz suyu da atmosferle kolaylıkla gaz alışverişine girebildiğine göre oksijensiz okyanuslar muhtemelen oksijen yönünden fakir bir havanın altında yatıyordu.

Demir oluşumları, yaklaşık 2,4 milyar yıldan daha eski tortul havzalarda geniş bir dağılım gösterir ancak o zamandan sonra belirgin şekilde azalmıştır, bu da O_2 'nin atmosfere ve okyanus yüzeyine nüfuz etmeye söz konusu azalmanın gerçekleştiği vakitlerde başladığına işaret eder. Diğer jeolojik göstergeler de bu çıkarımı desteklemektedir. Örneğin pirit veya bir başka deyişle ahmak altını, muhtemelen pek çoklarımız tarafından müzeler ve kuyumculardaki dikkat çekici altın küpler olarak bilinmektedir. Bununla beraber pirit, oksijenin hikâyesini anlatmamıza da yardımcı olur. Çok eski döneme ait çamur taşlarında ve bazı magmatik kayalarda bulunan ahmak altını, O_2 'ye son derece duyarlıdır. Islak ve oksijen açısından zengin bir ortamda bırakıldığında kükürtün alçı taşında bulunan formu olan sülfata oksitlenecektir. Bu oksidasyonun zaman ölçeği yıllar ile onlarca yıl arasında değişmektedir. Dolayısıyla pirit, kıtalarda keşfedilen kayalardan sürekli olarak aşınsa da biz bu minerali kıyılardaki kum taneleri arasında gerçekte asla göremeyiz; eski kayalardan aşınan pirit oksijenle tepkimeye girer ve kaybolur.

Bu durum önemsiz bir jeolojik olay gibi görünüyor olabilir fakat 2,4 milyar yıldan daha uzun bir süre önce kıyı şeritlerinde biriken kum taşlarını incelediğimizde karadaki bir kaynaktan aşınıp nehirler tarafından akıntı boyunca taşınmış ve nihayetinde deniz kenarında birikmiş, bütün bu süreçte ufak bir miktar oksijenle bile uzun süreli temasta bulunmamış pirit granüllerine rast geliriz. Bu tür granülleri 2,4 milyar yıldan daha genç tortul kaya sıralarında nadiren görürüz. Oksijene duyarlı diğer mineraller de aynı hikâyeyi anlatmaktadır.

Aşınmaya uğramış eski tabakalar 2,4 milyar yıl önce gezegende bir değişim olduğu iddiasını güçlendirmektedir. Elementlere maruz kalan kayalar, kimyasal aşınmaya uğrar, bu esnada kaya yüzeylerinde değişmiş minerallerden kabuklar oluşturur ve toprağa katkıda bulunur. Demir bir kez daha, daha önce belirttiğimiz sebeplerle devreye girer. Demir içeren

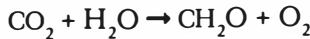
mineraller oksijensiz hava ve su altında aşındığında içerdikleri demir çözeltiye girip yağmur ve nehirler tarafından taşınır. Bu koşullar altında bir ana kayanın demir içeriğini, onun aşınmış yüzeyiyle karşılaştırdığımızda aşınmış tabakanın demir bakımından tükendiğini görürüz. Diğer yandan oksijen mevcut olduğunda aşınmayla serbest kalan demir, kısa süre içinde demir oksit minerallerini oluşturup demiri muhafaza eder. Peki, aşınmaya uğramış bu eski tabakaların O_2 ile temasa dair ilk kanıtı ne zaman gösterdiğini tahmin etmek ister misiniz? Akıllı olan 2,4 milyar yıl önce diyecektir; zaten doğru cevap da bu.

Son olarak, çok eski dönemlerdeki pirit ve alçı taşındaki sülfür izotoplarının ayrıntıları bizlere atmosferdeki kimyasal süreçlerin 2,4 milyar yıl öncesine gelinceye dek Dünya'nın sülfür döngüsünde o vakitten sonra son bulacak biçimde önemli bir rol oynadığını anlatmaktadır. Kimyasal modeller de çok şey anlatan bu izotopik imzaların yalnızca atmosferdeki oksijen seviyeleri son derece düşük olduğunda (bugünkü miktarının 1/100.000'inden az olduğunda) atılabileceğini işaret eder.

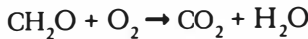
ÖYLEYSE İKİ MİLYAR YILI aşkın süreyle (gezegenimizin tarihinin ilk yarısının neredeyse tamamı boyunca) Yerküre'nin atmosferi ve okyanuslar, esasında oksijen gazından yoksundu; bu da sizin ve benim gibi organizmaların varlığını imkânsız kılıyordu. Bu durum iki önemli soruyu akla getirir. Dünya'nın 3,5 milyar yıl önce ve belki daha da öncesinde biyolojik bir gezegen olduğunu halihazırda söylemiştik. Peki, bu erken dönem, oksijensiz Dünya'da nasıl bir yaşam gelişmiş olabilir? Elzem olan bir diğer soru da şu: Dünya yüzeyinin uzun süre devam etmiş olan bu durumu 2,4 milyar yıl önce niçin değişti?

Oksijensiz yaşam sorusu nispeten daha kolay ele alınabilir çünkü oksijensiz ortamlar bugün de mevcuttur ve yaşamla doludur. Peki, bu yasaklı (Bize yasak!) habitatlarda yaşam, varlığını nasıl sürdürür? Aşına olduğumuz makroskobik dünyada bitkiler fotosentez yoluyla enerji ve karbon elde eder, karbondioksitten şeker oluşturmak için ışık enerjisini kullanır

ve bir yan ürün olarak oksijen gazı salar. Fotosentetik denklem basitleştirilmiş haliyle şöyle görünür:



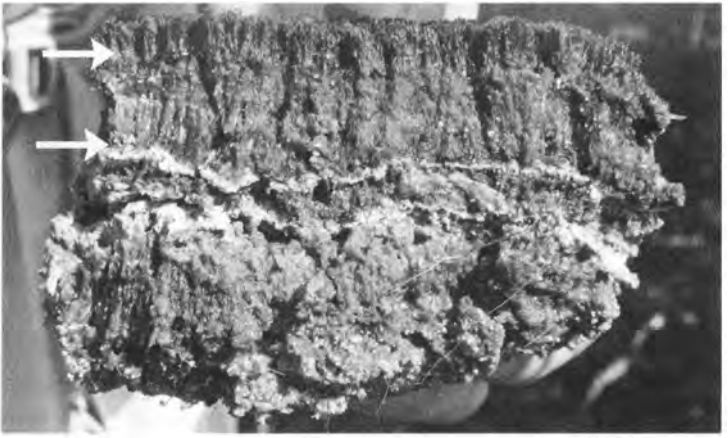
Hayvanlar ise bunun tersini yapar, organik molekülleri besin olarak alır ve bir kısmını oksijenle tepkimeye sokarak enerji elde eder. Bizler buna solunum diyoruz (Bitkiler de solunum yapar.):



Bu iki tepkime birbirini tamamlar, biri diğerinin tersidir. Sonuç olarak, karbon ve oksijen, organizmalarla çevre arasında ileri geri bir döngü içinde bulunup yaşamın zaman içinde sürdürülebilirliğini sağlarlar.

Mikroskobunuzu parlatıp işe koyulacak olursanız birçok mikroorganizmanın da aynı şeyi yaptığını görürsünüz: Algler fotosentez yaparak organik karbon ve oksijen üretir; mantarlar, protozoalar ve alglerin hepsi solunum yapar, oksijeni kullanır ve karbonu CO_2 olarak çevreye geri verir. Bazı bakteriler de bu yolları kullanarak karbonu döngüden geçirir.

Karbondioksitin şekere dönüşmesi için elektronlara gereksinim vardır; bitkiler ve algler bu elektronları sudan çıkarır, bu esnada da O_2 üretir. Bu olay yüksek bir enerji maliyeti getirir ama ortam oksijen yönünden zenginken başka bir alternatif söz konusu değildir. Diğer yandan ışığın mevcut olduğu ancak O_2 'nin olmadığı bir ortamda başka elektron kaynakları kullanılabilir hale gelir: Hidrojen gazı, çürük yumurta kokusuyla hidrojen sülfür ve çözelti halindeki demir iyonları bunlardan bazılarıdır. Bu koşullar altında hepsi bakteriyel olan farklı fotosentetik organizmalar görevi devralır. Söz konusu fotosentetik bakteriler ihtiyaç duydukları elektronları bu alternatif donörlerden almakla kalmaz, O_2 de üretmezler. Bu bakteriler, fotosentetik olarak aktif pigmentleri nedeniyle genellikle mor veya koyu yeşil renktedir; durgun bir gölette onlara rast geldiğinizde etkileyici bir manzaraya şahit olursunuz. (Resim 18)



Resim 18. Modern Dünya'da oksijensiz habitatlara sık rastlanır. Bu fotoğrafta Karayipler'deki Turks ve Caicos Adalarından mikrobiyal bir topluluk görüyoruz. Yüzeydeki (yukarıdaki okun üstündeki) koyu renkli lifli tabaka aslında siyanobakteriler dolayısıyla koyu yeşil pigmentlidir, havaya maruz kalır ve bu nedenle oksijen açısından zengindir. Bu tabakanın altında (oklar arasındaki bölgede) ışık içeri girmeyi sürdürür ama oksijen giremez, böylece mor renkli fotosentetik bakteriler açısından zengin biraz daha açık renkli tabaka ortaya çıkar. Bu bakteriler elektron kaynağı olarak hidrojen sülfidi kullanır ve oksijen gazı üretmez. Bu katmanda ve altında aerobik solunum imkânsızdır; bazı mikroorganizmalar bunun yerine sülfat ve diğer iyonları kullanarak solunum yapar, diğerleri ise organik molekülleri fermente eder. *Andrew H. Knoll*

Fotosentetik bakteriler O_2 üretmeden CO_2 'yi şekere dönüştürebiliyorsa diğer hücreler de solunumda oksijen kullanmadan karbon döngüsünü tamamlayabilir mi? Bu noktada bakterilerin metabolik açıdan çok yönlülüğü bir kez daha ön plana çıkar. Siz ve ben organik molekülleri solumak için O_2 kullanıyoruz ama bazı bakteriler sülfat iyonları (SO_4^{2-}) veya oksitlenmiş demir (Fe^{3+}) gibi başka bileşiklerini kullanarak solunum yapabilir. Bir başka deyişle nasıl ki hayvanlar organik molekülleri soluyup CO_2 'ye çevirirken bitkiler tarafından üretilen oksijeni kullanıyorsa bu bakteriler de fotosentetik bakteriler hidrojen sülfür, çözülmüş demir ve benzerlerinden elektron elde ettiğinde üretilen molekülleri kullanır. Güneş ışığı alan fakat oksijen açısından fakir olan ortamlardaki karbon döngüsü bu şekilde demir ve kükürt döngüleriyle bağlantıya girer. Dolayısıyla

Dünya'nın gençlik dönemi oksijen yönünden fakir nehirlerdeki, göllerdeki ve denizlerdeki demirin biyolojik döngüsüyle yakından bağlantılı karbon döngüsüyle ilk Demir Çağı'mız olmuş olabilir.

Bakterilerin ve önceki bölümde bakterilerin mikrobiyal kardeşleri olarak tanıttığımız arkelerin başka numaraları da vardır. Bazıları karbonu dönüştürürken kimyasal tepkimelerden gelen enerjiyi kullanarak güneş ışığına olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Bazıları da organik molekülleri daha basit bileşenlere parçalayarak mütevazı ölçüde bir enerji elde eder, bu süreç fermantasyon olarak bilinir. Aslında bizler de fermantasyon yapabilir, egzersiz esnasında kaslarımızdaki oksijen tükendiğinde gereken enerjiyi üretmek için fermantasyon mekanizmasını kullanabiliriz. Bu süreçte ortaya çıkan asit, yorucu bir egzersiz sırasında hissedebileceğiniz yanma hissini meydana getirir. Geçici bir enerji kaynağı temin etmek için organik molekülleri fermente edebiliyor olsak da bedenimiz bu şekilde yaşayamaz. Aslında bakteriler ve arkeler dışında çok az sayıda hücre fermantasyon becerisine sahiptir; bu konuda şampiyon, tahılları biraya ve üzümleri şaraba çeviren kimyasal büyümenin kaynağı olan mayalardır.

Öyleyse günümüzde var olan mikroplar, bize yaşamın oksijensiz bir gezegende bir milyar yıl boyunca nasıl sürdürülmüş olabileceğini gösterir. Erken dönemdeki Dünya'da çeşitli bakteriler ve arkeler karalarda ve denizlerde bulunuyor; karbon, demir, sülfür ve diğer elementleri döngüden geçiriyordu. Algler, prozoalar, mantarlar, bitkiler ve hayvanlar gibi daha karmaşık organizmalar metabolizma için oksijene ihtiyaç duyduğundan O₂, Dünya yüzeyinin kalıcı bir parçası olana dek evrimin kıyısında beklemek durumundaydı.

ÖYLEYSE GEZEĞENİMİZ 2,4 MİLYAR YIL önce niçin bu kadar büyük bir değişime uğradı? Jeologlar bu durumun O₂'nin birikimene başlamasıyla birlikte gerçekleştiğinde hemfikir olsa da şu an için bunun nasıl olduğu konusunda bir fikir birliğine varabilmiş değil. Bana göre yapbozun kilit parçalarını oluşturan

şeyleri özetlememe müsaade edin amabâşkalarının farklı bir tablo çizebileceğini de elbette kabul ediyorum.

En azından iki noktada fikir birliği vardır. Birincisi soluduğumuz havadaki oksijen, varlığını yaşama borçludur. Gezegemizin atmosferine oksijen verme potansiyeline sahip yegâne süreç oksijenli fotosentezdir. Bu fotosentezde elektronlar sudan gelir, yan ürün olarak da O_2 üretilir. Dünya'daki Büyük Oksidasyon Olayı (GOE) Devrim niteliğindeydi ve oksijenli fotosentez yapabilen yegâne bakteri olan siyanobakteriler bu devrimin kahramanıydı. Bunu aklımızda tuttuğumuzda basit olması muhtemel bir çözüm ortaya çıkar: Siyanobakterilerin evrimsel kökeni doğrudan Büyük Oksidasyon Olayı'na yol açmış olmalıdır. Bu hakikaten de basit bir çözümdür ancak biri jeolojik, diğeri ekolojik olan iki gözlemden meydana gelmesi hikâyenin daha karmaşık olduğunu işaret eder.

Anlaşıldığı kadarıyla 2,4 milyar yıldan daha eski tortul kayalar, birçok kişinin genel itibarıyla oksijensiz bir gezegende geçici oksijen üretiminin kanıtı olarak gördüğü kimyasal izler barındırmaktadır. Aynı kimyasal izlerden 2,4 milyar yıl önce kalıcı çevresel değişimler gerçekleştiğini belgeleyen bazıları, daha erken fakat sınırlı, bölgesel ve kısa ömürlü oksijen birikimlerine işaret eder. Böylesi yorumları eleştirenler de mevcuttur ama bu “eser miktarda oksijen”e dair kanıtlar çok sayıdadır ve gittikçe de artmaktadır. Bu kanıtların biri bile doğru yorumlandıysa oksijenli fotosentez Büyük Oksidasyon Olayı'ndan yüz milyonlarca yıl önce ortaya çıkmış olmalıdır. Moleküler biyolojiden elde edilen çıkarımlar da oksijen üreten siyanobakterilerin, güneş ışığı alan ekosistemlerde hüküm sürmelerinden çok önce ortaya çıktıklarını göstermektedir.

Ekoloji de jeolojik verileri açıklamaya yardımcı olur. Halihazırda belirtmiş olduğumuz üzere modern dönemde çözülmüş demirin, hidrojen sülfidin veya diğeri alternatif elektron kaynaklarının mevcut olduğu güneş alan ortamlarda siyanobakteriler için işler iyi gitmez. Bu durum, erken dönemdeki okyanuslarda siyanobakterilerin diğeri fotosentetik bakteri türlerine göre rekabet açısından genel itibarıyla dezavantajlı olduğunu göstermektedir. Peki, siyanobakteriler uzun bir za-

man boyunca diğer fotosentetik mikropları kayırmış olan bir dünyada üstünlüğü nasıl kazanmış olabilir? Bir cevap bulmak için biyolojinin ötesinde düşünmemiz ve Dünya'nın kendisini göz önünde bulundurmamız gerekiyor.

Bu konu fikir birliğinin görüldüğü ikinci noktayı gündeme getirir: Siyanobakteriyel fotosentezin varlığı, gezegensel değişimi teşvik etmek için yeterli değildir. Atmosfer ve okyanuslardaki O_2 ancak ve ancak siyanobakteriler tarafından üretilen oksijen oranı, fiziksel ve biyolojik süreçlerle uzaklaştırılan oksijen oranını aştığında birikecektir.

Siyanobakterilerin, oksijen atmosfer ve okyanus yüzeyinde kalıcı birikimine başlamadan çok önce nasıl ortaya çıkmış olabileceğini açıklamak için elimizde iki yol var. Belki erken dönem okyanuslardaki azaltılmış gazlar ve iyonlar, siyanobakteriler dışındaki fotosentetik bakterileri desteklemiştir. Yine bir ihtimal genel fotosentez oranları, erken dönemdeki siyanolar tarafından üretilen bütün oksijen gazının, volkanik gazlar ve aşınmış mineraller tarafından uzaklaştırılmasına neden olacak ölçüde düşük olabilir. Ben bu düşüncelerin ikisinin de doğru olduğuna inanıyorum.

Günümüzde fotosentez oranları genelde yalnızca güneş ışığı, karbondioksit veya su miktarıyla kısıtlanmaz, daha ziyade besin maddelerinin, özellikle DNA'da ve zarlarda bulunan fosforun, hücrelerin enerji birimi olan ATP'nin ve hem DNA hem de proteinler için gerekli olan azotun kullanılabilir durumda olup olmamasıyla sınırlanır. Bazı bakteriler ve arkeler, tıpkı şimşegin sınırlı miktarda da olsa yaptığı gibi azot gazını biyolojik olarak kullanılabilir moleküllere dönüştürebilir; dolayısıyla biz de erken dönemdeki biyosferi anlayabilmek için fosfora odaklanacağız. Fosfor, tabiat olaylarına maruz kalan kayalar-dan aşınır ve nehir akıntılarıyla okyanusa ulaşır. Fotosentetik organizmalar bu fosforu alır ve biyomoleküllerle birleştirir; diğer organizmalar fosforu yedikleri gıdalardan elde eder ve besin zinciri aracılığıyla bir organizmadan diğerine aktarır. Nihayetinde de bu fosforun büyük bölümü, yüzeyden gelen yavaş bir organik parçacık yağmuruyla birlikte deniz tabanına batır. Tortullardaki bakteriler bu fosforun büyük bölümünü

serbest bırakır ve derin deniz akıntıları da yeni fotosentezlere yakıt sağlamak için bunları geri yüzeye taşır.

Erken dönemdeki okyanuslarda kıtalardan gelen fosfor miktarı düşüktü çünkü sınırlı sayıda kaya denizin üstünde yükselmekteydi. Aynı zamanda fosforun, derin suların yükselmesiyle yüzeye dönüşü de verimsiz geri dönüşüm yüzünden kısıtlı olsa gerekti. Hem benim çalıştığım laboratuvar hem de diğerleri erken dönemdeki okyanuslarda fotosentetik mikroorganizmaların kullanabileceği fosfor miktarını tahmin edebilmek için temel kimya ilkelerini kullandı ve ortaya çıkan yanıt “Çok yoktu,” şeklinde oldu. Aslına bakarsanız erişilebilir besin maddesi miktarı erken dönemdeki yaşam üzerinde muhtemelen büyük bir baskı oluşturuyor, siyanobakterilerin veya diğer bakterilerin yapacağı fotosentezi küresel bir dönüşüme etki etmesi mümkün olmayan seviyelerle sınırlı tutuyordu.

Gezegelimiz olgunlaştıkça büyük, istikrarlı kıtalar deniz seviyesinin üstünde belirip okyanusa giden erozyonal fosfor akıntısını artırdı. Nihayetinde fosfor miktarı alternatif elektron donörlerinden daha erişilebilir hale geldikçe siyanobakteriler ekolojik anlamda önem kazanmaya başladı. Bu önemi kazanırken de dünyayı değiştirdiler. Ürettikleri oksijen gün ışığı alan sulardaki diğer elektron kaynaklarını uzaklaştırıp biyosferi kalıcı olarak oksijenli fotosenteze ve oksijenli havaya yöneltti. Tortullar siyanobakteriler tarafından üretilen organik maddeleri gömüp solunuma karşı korudukça Dünya’nın O_2 birikim motoru işlerlik kazanmış oldu. Artık geriye dönüş yoktu.

Bu yaklaşıma göre Büyük Oksidasyon Olayı, Dünya’nın fiziksel gelişiminin bir ürünü olmaktan ibaret değildi, evrimsel yenilenmeyi yansıtmakla da kalmıyordu. Gezegenimizin yüzeyini dönüşüme uğratan unsur, yaşam ile Dünya arasındaki etkileşimdi.

BÜYÜK OKSİDASYON OLAYI ESNASINDA ve sonrasında ne kadar oksijen birikti? Peki, bunun sonuçları neler oldu? Erken dönemdeki oksijen seviyelerinin ölçümü zor olmayı sürdürüyor ancak yapılan çeşitli gözlemler yanıtın bir kez daha “Çok

yoktu,” olduğunu gösteriyor. Tortul kayalar üzerinde yapılan kimyasal analizler, Büyük Oksidasyon Olayı’nın ardından gelen yaklaşık iki milyar yıl boyunca dünya okyanuslarının modern Karadeniz gibi görüldüğüne, oksijenin suyun yüzeyinde bulunup altında olmadığına işaret etmektedir. Bazı veriler Büyük Oksidasyon Olayı sırasında oksijenin önemli ölçüde arttığına işaret etse de yaklaşık 1,8 milyar yıl öncesine gelindiğinde atmosferdeki ve okyanus yüzeyindeki O_2 ’nin yeniden günümüzdeki değerlerin yaklaşık yüzde birine düştüğü görülmektedir. Bu oran bir amibe yetip artacak olsa da bir böceği yaşatmaya yetmez. (Demir oluşumu yaklaşık 1,9 milyar yıl önce kısa süreliğine de olsa küresel olarak geri döndü, bu durum mantodan okyanuslara doğru giden güçlü hidrotermal sıvı akışının sonucu olabilir. Minnesota’nın Mesabi Sıradağları’ndan çıkarılan demir bu olayın neticesidir.)

Bununla birlikte oksijen, mütevazı yoğunluklarda bile yaşam için yeni imkânlar sunuyordu. Siyanobakterilerden beslenen ekosistemler daha üretken ve daha enerjik hale gelmişti. (O_2 kullanımıyla gerçekleşen solunum, oksijensiz solunumdan veya fermantasyondan çok daha fazla enerji sağlar.) Eğer bu cesur yeni oksijen dünyasına yüz maskesi ve oksijen tankıyla korunur halde, elinizde mikroskopla götürülebilecek olsaydınız daha öncesinde orada olmayan bir şeyi fark ederdiniz: Yaşamın tarihinde yolun yarısına gelmişken yeni bir hücre tipi ortaya çıkıyordu.

Ökaryotlar, DNA’sı bir çekirdek içinde bölümlere ayrılmış organizmalardır. Tıpkı ponderosa çamları, deniz yosunları, mantarlar ve amiplerden diyatomlara kadar uzanan tek hücreli organizmalar, toplamda belki on milyon tür gibi siz de bir ökaryotsunuz. Çekirdek ökaryotları tanımlarken diğer hücre özellikleri de tarihlerinde ve ekolojilerinde kilit rol oynar. Ökaryotların bakterilerin aksine hücrelerinin büyümesine ve birçok farklı şekil almasına imkân veren dinamik, dahili bir moleküler yapı ve zar sistemine sahip olması bilhassa önem taşır. Bu durum ökaryotlara, bakterilerin genel olarak yapamadığı tarzda, özellikle küçük besin parçalarını ve diğer hücreleri yutma yoluyla yaşama imkânı da sunar. Öyleyse ökaryotik hücreler avlanmalarıyla ekosistemlere yeni bir karmaşıklık

getirmiştir. Bir sonraki bölümde tartışacağımız üzere hücreler arasındaki yeni iletişim biçimleri de çok hücreli karmaşık organizmaların önünü açmıştır.

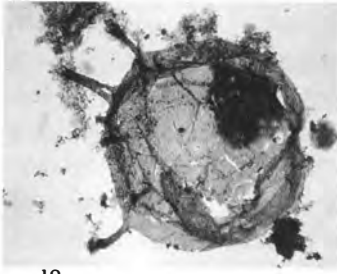
Ökaryotik hücrelerde solunum ve fotosentez, “organel” adı verilen küçük yapılar içinde gerçekleşir; mitokondriler solunumun, kloroplastlar ise fotosentezin yapıldığı yerdir. Bu organeler bakteriyel hücrelere biraz benzer. Örneğin kloroplastlar, siyanobakterilerinkilere çok benzeyen iç zarlara sahiptir. Bir yüzyıldan daha uzun süre önce Rus botanikçi Konstantin Mereschkowski bu benzerliğin tesadüf olmadığını önc sürmüştür. Resif mercanlarının dokuları içinde algleri barındırdığına dair önceki keşiften haberdar olan Mereschkowski, kloroplastların bir zamanlar özgür yaşayan, sonrasında protozoalar tarafından yutulan ve nihayetinde de metabolik köleliğe indirgenen siyanobakteriler olarak ortaya çıktığını iddia eder. Mereschkowski’nin bu iddiası, alay konusu olmadığı noktada unutulmuştur. Bu kadere bilim alanında sık rastlanır. Gelin görün ki bu olayda Mereschkowski haklıydı. Moleküler biyoloji çağının başlamasıyla Mereschkowski’nin hipotezini yeni araçlarla tekrardan değerlendirmek mümkün oldu. Kloroplast küçük bir miktar DNA içerir ve genlerinin moleküler dizilim analizi de kloroplastların, Hayat Ağacı’nda siyanobakteri sınıfı içinde yer aldığını açıkça gösterir. Sonraki araştırmalar mitokondrilerin de bakteriyel kökenlere sahip olduğunu göstermiştir. Giderek güçlenen izlenime göre ökaryotik hücrenin kendisi de bir arke hücresi ile aerobik solunum yapabilen bir bakteri arasında uzun zaman önce gerçekleşmiş bir ortaklıktan doğmuştur. Gerçekten de bilim insanları yakın zamanda ökaryotlarda hücre içini düzenleyen moleküllerin benzerlerini içeren arkeler keşfetmişlerdir. Bizler evrimsel açıdan kimeralarımız* ve bitkilerin burada fotosentezi nüfuz alanımıza getirmek için siyanobakterilerin gücünü kullanan ilave bir ortağı da vardır.

* Yunan mitolojisinde farklı canlıların uzuvlarından meydana gelen ve ateş püskürten dişi bir yaratık olarak bilinen kimera umulan fakat hayali veyahut eldesi imkânsız şeylerden söz ederken de genetik biliminde birden fazla genotipe sahip hücrelerden oluşan tek bir organizmadan bahsederken de kullanılır. Hayvanlarda iki veya daha fazla zigottan gelmek demektir. (y.h.n.)

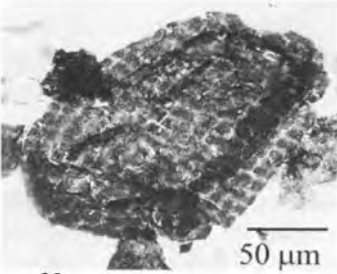
Gelin, bu biyolojik hikâyeyi çevresel perspektife oturtalım. Çoğu ökaryot, oksijen kullanarak solunum yapar ve bunu yapmayanlar da yapan atalardan gelmiştir. Dahası, oksijenin olmadığı yerlerde yaşayan ökaryotların neredeyse hepsi yalnızca O₂'nin mevcut olduğu yerlerde oluşan biyomoleküllere gereksinim duymayı sürdürür, ihtiyaç duydukları şeyi de oksijen yönünden zengin habitatlardan gelen gıdaları tüketerek elde eder. Dolayısıyla ökaryotlar önemli bir açıdan Büyük Oksidasyon Olayı'nın çocuklarıdır.

Bu görüşe paralel olarak 1,6 ile 1,8 milyar yıl önce biriken tortul kayaçlarda ökaryotik hücre fosillerini görmeye başlıyoruz. Avustralya, Çin, Montana ve Sibiry'a'daki bu çağdan kalma kayaların hepsi bünyelerinde mütevazı bir mikrofosil çeşitliliğini barındırır; bu mikrofosillerin günümüze kadar korunmuş hücre duvarları, şu anda yalnızca ökaryotik organizmalarda bulunan yapısal ve morfolojik bir karmaşıklık sergiler. Örneğin bu ökaryotik hücrelerin bazılarının, belki de bugün mantarların yaptığı gibi çözünmüş organik molekülleri emmelerini sağlayan uzun kol benzeri uzantıları vardı. (Resim 19) Bazıları da çevre büyümeyi kolaylaştırmadığında uykuda beklemelerini mümkün kılan, kalın levha benzeri duvarlara sahipti. (Resim 20) Bir kısmı, çıplak gözle görülebilen hücre tabakaları oluşturarak basit, bir çokhücrelilik derecesine dahi ulaşmıştı. (Resim 21) Yeni bir biyolojik devrim gerçekleşmekteydi ancak ortaya çıkan ökaryotların, yaşam başladığından beri Dünya'ya hükmeden bakteri ve arkelerin yerine geçmediğini aklımızda tutmalıyız. Ökaryotlar, mikrobiyal metabolizmaya bağlı olarak yaşamayı sürdüren mikrobiyal ekosistemlere ilave olmuştur. Bugün bile biyosferde her bir ton hayvan için 30 ton bakteri ve arke bulunur.

Günümüze kadar korunmuş fosil tarihini ilerleyen milyar yıllar boyunca incelediğimizde gitgide daha fazla ökaryotik çeşitlilikle karşılaşırız; bir protozoa ve bir siyanobakteri arasında erken dönemde gerçekleşen ortaklıktan türediği açık algler, vazo şeklindeki sert duvarlarla veya pullu zırhlarla avcılardan korunan hücreler ve çeşitliliği gitgide artan basit çokhücreli yapılar bunlar arasında yer alır. (Resim 22 ve 23)



19.

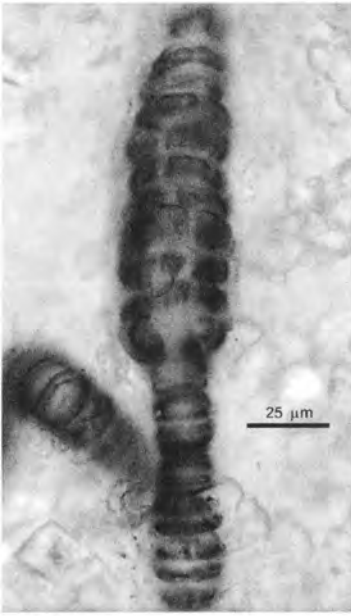


20.

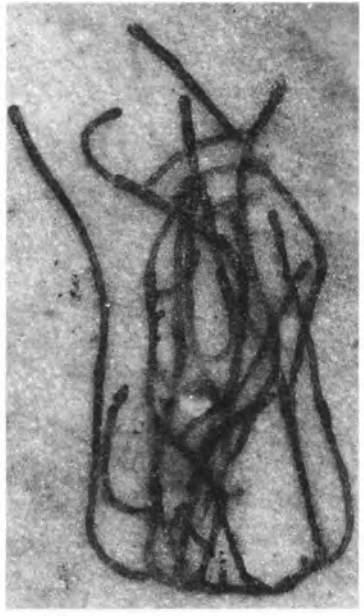


21.

Resim 19-21. Erken dönem ökaryotik organizmaların fosilleri. (Resim 19) Beslenmek için organik molekülleri emmekte kullanılmış olması muhtemel kol benzeri uzantıları olan tek hücreli bir organizma. Kuzey Avustralya'daki 1.500 ile 1.400 milyon yıllık kayalarda bulunmuştur. (Resim 20) Sahibini elverişsiz bir ortamdan ve diğer organizmalardan koruyacak kalın, levha benzeri bir hücre duvarı. Yine Avustralya'daki 1.500 ile 1.400 milyon yıllık kayalarda bulunmuştur. (Resim 21) Basit, çok hücreli yapıya sahip bilinen en eski organizmalardan biri. Çin'de yer alan yaklaşık 1,6 milyar yıllık kayalarda bulunmuştur. 20'deki çizgi 19. ve 20. resimlerde 50 mikron, 21. resimde ise 5 milimetredir. Şekil 19 ve 20 Andrew H. Knoll'a aittir; Şekil 21 ise Nanjing Jeoloji ve Paleontoloji Enstitüsü'nden Mao-yan Zhu'nun izniyle kullanılmıştır.



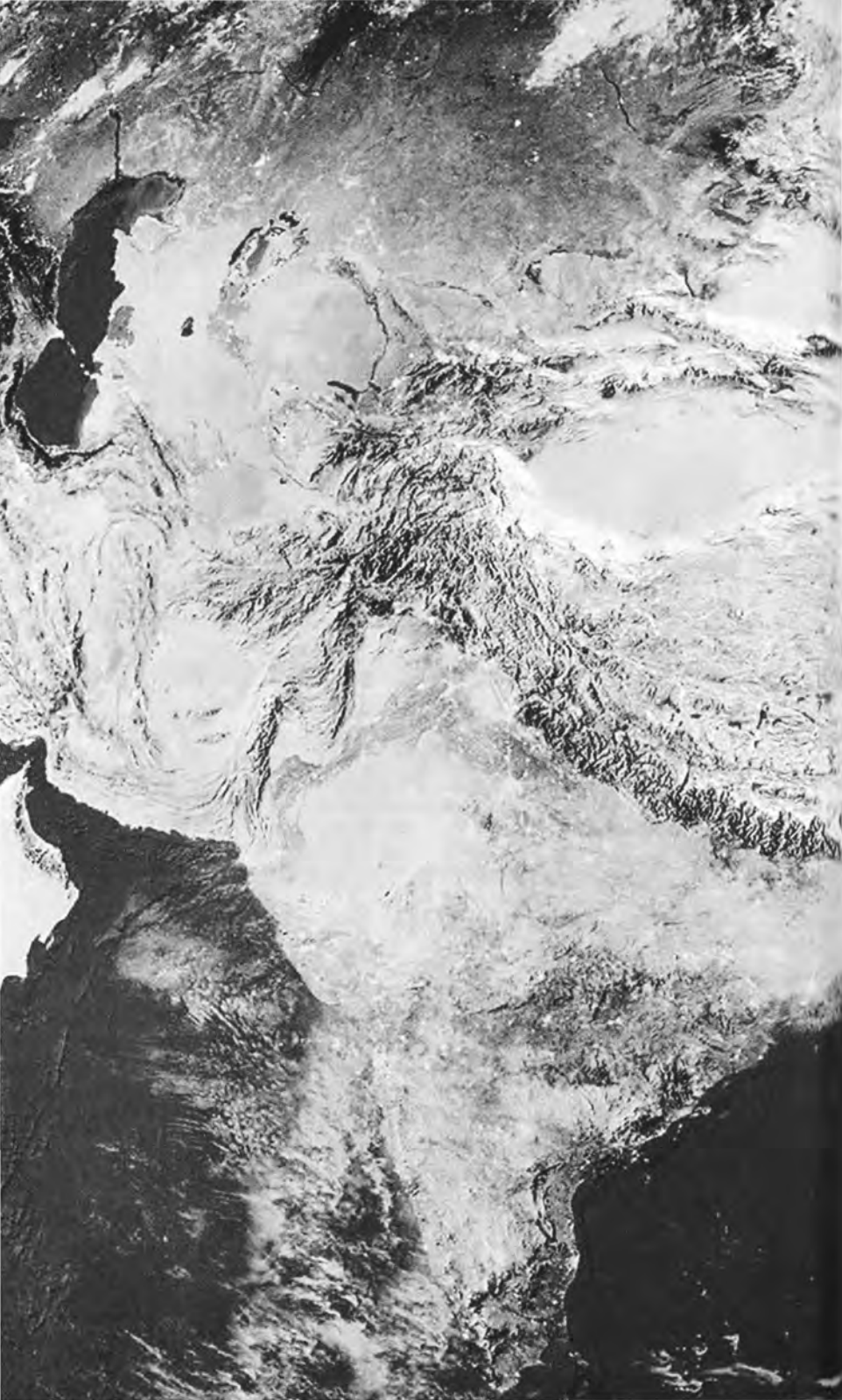
22.



23.

Resim 22 ve 23. Fosiller, hayvanların dünyaya gelişinden önce çeşitli ökaryotların geliştiğini gösteriyor. Burada sırasıyla Kanada'nın arktik bölgesinde ve Çin'de yer alan milyar yıllık kayalar içinde muhafaza edilmiş, bilinen en eski kırmızı (Resim 22) ve yeşil (Resim 23) algleri görüyoruz. 22. resimdeki çizgi o resim için 25, 23. resim için ise 225 mikrondur. Resim 22 Cambridge Üniversitesi'nden Nicholas Butterfield'ın, Resim 23 ise Virginia Tech'ten Shuhai Xiao'nun izniyle kullanılmıştır.

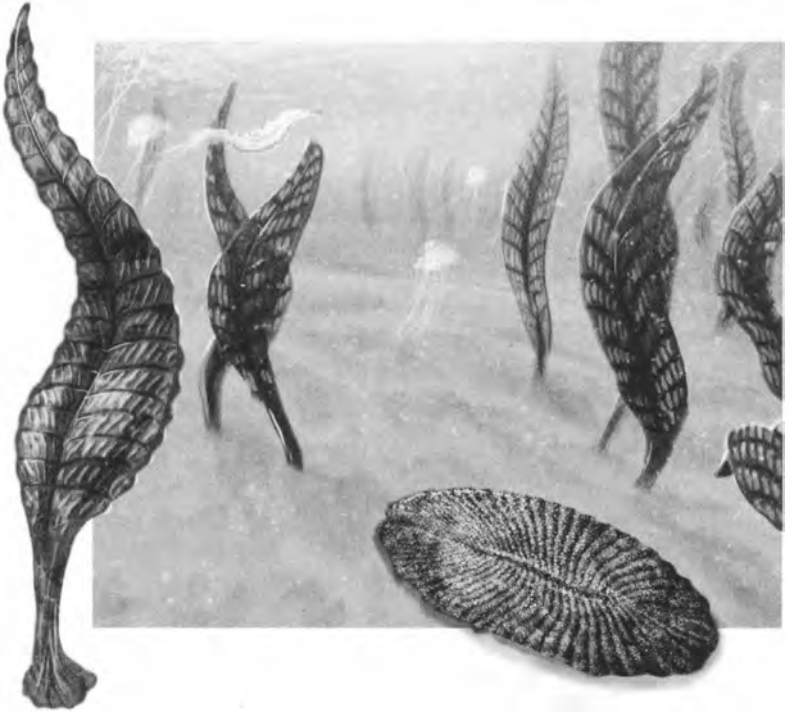
Düşük oksijenli ve (büyük oranda) mikrobiyal yaşamın hüküm sürdüğü bu dünya milyonlarca yıl süreyle var olmuştu ancak Geç Proterozoik Devir okyanuslarındaki çok hücreli basit yaratıklar arasında yeni bir devrimin eli kulağındaydı. Geniş çaplı bir küresel buzul çağının hemen ardından biriken en tepedeki Proterozoik kayalarda yer alan fosil kayıtlarında büyük ve karmaşık organizmalar görülür. Yaşamın ortaya çıkışının üzerinden üç milyar yılı aşkın bir zaman geçmişti; hayvanların devri yakındı.



⑤

Hayvan Dünyası

HAYAT BÜYÜYOR



MISTAKEN POINT EKOLOJİK REZERVİNİ, güneşli bir günün öğleden sonrasında görebilen paleontolog ne mutlu bir paleontologtur. Kanada, Newfoundland'ın güneydoğusundaki kayalık sahilde uzanan ve aynı zamanda UNESCO Dünya Miras Listesi'nde yer alan Mistaken Point, genellikle bir sis perdesiyle örtülüdür veya şiddetli yağmura tutulmaktadır. Gelin görün ki havanın açık olduğu ender günlerden birinde, alçaktan gelen güneş ışınlarının, çok eski çağlardan kalma yatakların yüzey hatlarını keskin bir canlılığa sevk ettiği akşamüstüne doğru orada olmayı başarabilerseniz bu manzarayı bir daha asla unutamazsınız.

Mistaken Point'teki kayalıklar, yaklaşık 565 milyon yıl önce derin deniz tabanı üzerinde birbiri üstüne biriken çamurlu tortulardan ve volkanik küllerden oluşmaktadır. Mistaken Point'in onu bir bütün olarak özel hale getiren üç önemli niteliği vardır. Birincisi, basamak görünümlü deniz kayaları, hızlıca toprağa gömülerek günümüze kadar muhafaza edilebilmiş olan ve esasında eski deniz tabanında yürümemize imkân veren eski tortul yataklarının geniş yüzeylerini gözler önüne serer. İkinci olağan dışı özellik ise volkanik küllerin çokluğudur,

bu da yatakların teker teker tarihlendirilmesini kolaylaştırır. Üçüncü ve en olağan dışı özellik ise yatak yüzeylerinde bulunan unsurlardır. Bu işte iyi olduğunuz vakit orada yüzlerce tuhaf ve muhteşem fosil görürsünüz, bunlar görüntü itibarıyla yaşadıkları yerde volkanik külün içine gömülerek muhafaza edilmiş, yabancı yaşam formlarıdır. Bu halleri paleontolojik bir Pompei izlenimi yaratır. (Resim 24) Bazıları eğreltiotuna, bazıları da yelpazeye benzemektedir. Birkaç tanesi uzun ve incedir, sü-lünlerin kuyruk tüylerine benzedikleri söylenebilir. Birçoğu deniz tabanı üzerinde dik durur; tortula soğanı andıran kök benzeri bir yapıyla tutunmuştur ancak akıntıyla biraz sallanır. Bazıları ise tortulun yüzeyine yayılmış durumdadır. Bununla birlikte enleri ve boyları ne olursa olsun, hepsi yalnızca birkaç milimetre kalınlığındadır ve çoğu dürülmüş gibidir, az biraz çocukken kampa giderken yanıma aldığım şişme yatağın sıra sıra dizilmiş borularını andırır. Şaşırtıcı gelebilir fakat çoğu bilim insanı bu fosilleri bilinen en eski hayvan fosilleri, gezegenimizin yüzeyinin tamamında çeşitlenecek olan gruba atılan ilk paleontolojik bakış olarak kabul etmektedir.



Resim 24. Newfoundland, Mistaken Point'te bulunan 565 milyon yıllık tortul kayalardaki ilk hayvanlara ait fosiller. Ölçek çubuğu 1 santimetrelik birimleri göstermektedir. Queen's Üniversitesi'nden Guy Narbonne'un izniyle kullanılmıştır.

Mistaken Point fosillerinin biyolojisini ve dolayısıyla evrimsel ilişkilerini anlamak için muhafaza edilmiş fosillere dikkat kesilerek (aynı dikkati muhafaza edilmemiş olanlara da vererek) ilk ilkelerden başlamanız gerekiyor. Gelin, önce bu tuhaf organizmaların karbon ve enerjiyi nasıl elde ettiğini inceleyelim. Yaşamlarını nasıl sürdürdüler? Bazıları dışarıdan bakınca yosuna benziyor, öyleyse belki de fotosentetiklerdi. Hayır, Mistaken Point organizmaları deniz yüzeyinin birkaç yüz metre altında, güneş ışığının nüfuz ettiği derinliklerin çok aşağısında yaşadı. Günümüzde denizlerin derinliklerinde yaşayan bazı hayvanlar, karbon üretmek için kimyasal enerjiyi kullanabilen simbiyotik bakterilerin gücünden yararlanıyor. Gelin görün ki bu da söz konusu olamaz çünkü bu tür bakterilerle yakın ilişki içinde yaşayan hayvanlar oksijenli ve oksijensiz suların bulunduğu yerde gelişmektedir. Mistaken Point kayalarından elde edilen kimyasal kanıtlar, bu organizmaların istikrarlı, oksijen açısından nispeten zengin ortamlarda yaşadıklarını göstermektedir.

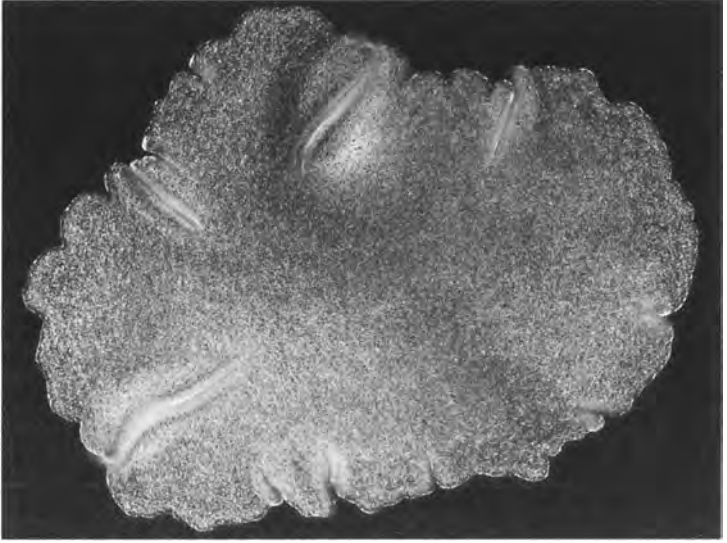
Geriye bir tek heterotrofi, yani başta diğer türler tarafından sentezlenen organik molekülleri yiyerek karbon ve enerji kazanılması kalıyor. Köpek balıkları, yengeçler ve mürekkep balıkları gibi bizler de heterotrofuz. Bununla birlikte bu liste, dikkati Mistaken Point fosillerinde bulunmayan özelliklere çekiyor. Bu fosillerin ağızları ve hareket etmelerini ya da avlarını yakalamalarını sağlayacak uzuvları yok. Görüldüğü kadarıyla iyi gelişmiş bir sindirim sistemine de sahip değiller ve aralarında deniz tabanında veya üstünde aktif olarak hareket eden olmuşa bile bunu çok azı başarmıştır. O halde nasıl beslenebiliyorlardı?

Bu noktada karşılaştırma yapabilmek için canlı hayvanlara dönmemiz gerekiyor; gerçi ormanlarda, hayvanat bahçelerinde veya doğa belgesellerinde her gün karşılaştığımız türlere bakmak doğru olmaz. Sizi pek fazla bilinmeyen Placozoa soyunun resmi olarak tanımlanmış yegâne türü *Trichoplax adhaerens*'le tanıştırmama izin verin. (Resim 25) Dünyanın en küçük (birkaç milimetre uzunluğunda) ve basit hayvanları arasında yer alan *Trichoplax* türünün üyeleri, büyük ölçüde, "epitel" adı verilen

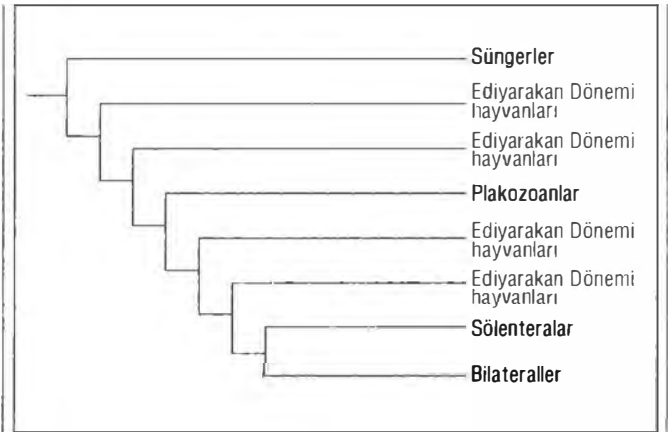
üst ve alt hücre tabakalarından oluşur; bu epiteller, bir miktar sıvının yanı sıra birkaç lifli hücreyi içeren bir iç yapıyı sarmalar. *Trichoplax*'ların ağızları, uzuvları, akciğerleri, solungaçları, böbrekleri veya sindirim sistemleri yoktur. Bir *Trichoplax*'ın yüzeyini kaplayan hücreler, protozoaların yaptığı gibi gıda parçacıklarını yutabildiği gibi çevredeki su ya da tortulardan da organik moleküller emer. İhtiyaç duydukları oksijeni difüzyonla alırlar ve bu nedenle de ince olmaya mahkûmdurlar.

Trichoplax'ın bu kısa tanımı, boyutu dışında, daha önce Mistaken Point fosilleri için yaptığımız tanıma fazlasıyla benzetmektedir. Aslında ben 2010 yılında o zaman yüksek lisans öğrencileri olan Erik Sperling ve Jakob Vinther tarafından ortaya atılan görüşe katılıyorum. Bu öğrenciler, Mistaken Point ve başka yerlerdeki fosiller tarafından belgelenen erken dönemdeki hayvanların adaptif yayılımından sağ çıkan yegâne türün plakozoanlar olabileceğini öne sürmüşlerdi. Resim 26 hayvanların basit bir filogenezi, yani soyağacını gösterir. Şu an için günümüze kadar gelen gruplara odaklanan ağaç, bu hayvanların son ortak atasının, biri süngerleri ve diğeri de geriye kalan hemen hemen her şeyi içeren iki soy meydana getirdiğini işaret ediyor. Mistaken Point fosillerinden bazıları süngerlerle akrabalık belirtileri gösterse de bunlar bölgesel ekosistemde ekolojik olarak öne çıkan türler değildi. Soyağacının “geriye kalan her şey” kısmına tırmandığımızda plakozoanların ayrıldığı ikinci bir dala ulaşırız, akabinde sölenteler (deniz anemonları, mercanlar, denizanası) ve bilaterallerin (böcekler, salyangozlar, bizler ve başıyla kuyruğu, üstüyle altı, soluyla sağı olan diğer her şey) yollarını ayırdığı bir başkasına denk geliriz. Bu soyağacının mantığına göre ağacın köküne daha yakın olan dal noktalarının ağacın tepesinde, yukarılarda yer alanlardan daha erken tarihli olması gerekir. Newfoundland fosillerimizin plakozoanlarla kıyası dikkate alındığında bu durum, Mistaken Point'in Devoniyen Dönemi'nden ziyade Salvador Dali'ye ait gibi görünen tuhaf fosillerinin anatomik olarak basit hayvanların erkenden çeşitlenmesinin neticesi olduğuna işaret eder. Bu çeşitlenme süngerlerinkinden sonra gelirken modern dönem okyanuslarda çokça görülen daha

karmaşık ve çeşitli sölentelerle bilaterallerin yayılmasından önce gerçekleşmiştir.



Resim 25 ve 26. *Trichoplax adhaerens* ve hem Ediyakaran Dönemi hayvanlarıyla hem de şimdi yaşayan hayvanlarla var olduğu öne sürülen evrimsel ilişkisi. Resim 25 Harvard Üniversitesi'nden Mansi Srivastava'nın izniyle kullanılmıştır.



Mistaken Point'teki kalıntılara Ediyakaran Dönemi'nde yaşadıkları için bazen Ediyakaran fosilleri ya da yalnızca Ediyakaranlar da denmektedir . Ediyakaran Dönemi, ardından gelen Fanerozoik Devir'in dönemlerinin kabul edilmesinden yüzyılı aşkın bir süre sonra, 2004 yılı gibi yakın bir tarihte uluslararası jeolojik zaman ölçeğinin bir parçası haline gelmiştir ve sınırları çok önemli iki olayla belirlenmiştir. Ediyakaran Dönemi'nden yaklaşık 80 milyon yıl önce başlayan bir süreç boyunca Dünya, kutuptan ekvatora kadar buzullarla iki kat sarmalanmış haldeydi ve bir "Kartopu Dünyası" oluşturuyordu. Dünya'nın en büyük buz devirleri muhtemelen biyolojiyi derinden etkilemişti. Gerçekten de buzul öncesi okyanuslarda fosil olarak kaydedilen birçok alg ve protozoa, buzlar geri çekildikten sonra biriken kayalarda görülmemektedir. Bununla birlikte Ediyakaran Dönemi hayvanlarının (ve yaşayan tüm hayvanların) ataları da dahil olmak üzere birçok soy hayatta kalmış olsa gerektir. Peki, Dünya bu derin dondurucu evresine nasıl girdi ve bir o kadar önemlisi, geri nasıl çıktı?

Jeologlar ve iklim modelleyicileri, Geç Proterozoik buzul çağlarının ortaya çıkış nedenlerini tartışmaya devam etse de hepsi kayalar tarafından kaydedilmiş olan ekstrem iklim olaylarında karbon döngüsünün her zaman olduğu gibi belirleyici bir rol oynadığında hemfikir. Bu Kartopu döneminin başlangıcına ilişkin olarak kulağa cazip gelen bir hipotez, düşük enlemlili kara kütleleri boyunca muazzam bir volkanik kaya saçılmasına işaret ediyor. Volkanik kayalar, aşınırken büyük miktarda CO₂ tüketir, ekvator yakınlarında saptanmış olan yüksek sıcaklıklar da aşınma ve erozyonun hızla gerçekleşmesini sağlayacak olsa gerektir. Buradan hareketle tektonik olaylar sera gazı karbondioksit oranını düşük seviyelere indirerek gezegeni soğutmuş ve buzullaşmayı başlatmış olabilir. Rus klimatolog Mikhail Budyko 1969'da buzulların, kutuplardan ekvatora doğru yayıldıkça Güneş'ten gelen radyasyonun daha fazlasını uzaya yansıtacağı, bunun neticesinde gezegeni soğutacağı ve dolayısıyla buz tabakalarının daha da çok yayılmasını kolaylaştıracağı (bunun da uzaya geri yansıtılan güneş ışığı miktarını artıracığı) varsayımında bulundu. Zaman içinde de bu kaçak

buzullaşma tüm Dünya'yı sarmış olsa gerekti. Budyko, matematiksel açıdan akla yatkın olsa da Dünya bir Kartopu haline geldiğinde bu halden asla kaçamayacağından bunun asla gerçekleşmediğini öne sürdü. Gelin görün ki jeoloji, Ediyakaran Dönemi'nden hemen önce tüm Dünya'nın beyaza döndüğüne işaret etmektedir. Kalın buz tabakaları kutuplardan ekvatora kadar kıtalar boyunca yayılmış, denizdeki buzlar okyanusları örtmüştür; Antarktika tabiatının Karayipler boyunca yayıldığını hayal edin. Bizler Dünya'nın bu buzlu pençelerden kurtulduğunun canlı kanıtıyız.

Kayalardan gelen kanıtlar, milyonlarca yıl sonra buzulların hızla ortadan kalktığını göstermektedir; buz kütleleri kutuplara ve dağ zirvelerine doğru geri çekilmiş, sonrasında da kaybolmuştur. Peki, bu büyük buz kütlelerinin ansızın daralmasına neden olan neydi? Burada bir kez daha bakışlarımızı karbon döngüsüne çeviriyoruz. Buzullar gezegen boyunca yayılırken karbondioksiti atmosferden uzaklaştıran süreçler (başlıca kara kütlelerinin aşınması ve fotosentez) iyiden iyiye yavaşladı ama havaya CO₂ katan süreçler (büyük ölçüde volkanizma) hızla devam etti. Atmosferdeki karbondioksit zamanla birikti ve sonunda sera ısınmasının, yıkıcı erimeyi tetiklediği kritik seviyeye ulaştı. Buzul çağı bitti, Ediyakaran Dönemi başladı.

MISTAKEN POINT, EDİYAKARAN DÖNEMİ hayvanlarının ortaya çıktığı bilinen en eski yerlerden biri olarak en üstün mevkide yer alsa da Avustralya (İsmi o dönemden alan Ediyakaran Tepelerine ev sahipliği yapmaktadır.), Rusya, Çin, Kuzeybatı Kanada, Kaliforniya ve Afrika gibi uzak yerlerdeki daha birçok bölge de genel itibarıyla Newfoundland'dekilere benzeyen hayvanların, Geç Ediyakaran Dönemi okyanuslarında dünya çapında serpildiğini göstermektedir. Örneğin 550 ile 560 milyon yıl önce deniz tabanını kucaklayan yassı oval şekliyle *Dickinsonia* fosili de bunlardan biridir. (Resim 27) Mistaken Point fosilleriyle arada bariz farklar olsa da genel görüş geçerliliğini sürdürüyor: Bunlar muhtemelen sıvıyla dolu birden fazla borudan oluşan, parçacıkları yakalayıp emerek

beslenen, oksijeni de difüzyon yoluyla elde eden basit organizmalardı. Rusya'nın Beyaz Deniz bölgesinden gelen bazı nadi-de numunelerin, *Dickinsonia*'nın hayvanlar arasındaki yerini doğrulayan moleküler fosiller barındırıyor olması da ilginçtir.

Sonra bir de daha genç Ediyakaran kum taşlarında yaygın olarak görülen eğreltiotu benzeri *Arborea* fosili vardır. (Resim 28) *Arborea* hayvanı sığ deniz tabanına bağlanmış kök benzeri dairesel bir yapıya ve kendisini çevreleyen suya doğru uzanan, tüyü andıran, iki kulağı olan silindirik bir sapa sahipti. Gözle görülür bir ağız, solungaçları, sindirim sistemi veya uzuvları olmayan *Arborea*'nın da *Dickinsonia* ve Mistaken Point hayvanları gibi beslenmiş ve oksijen almış olması muhtemeldir. Bununla birlikte bir özelliği *Arborea*'yı onlardan ayırır. Frankie Dunn ve meslektaşları tarafından yapılmış olan titiz araştırma, kulak benzeri uzantılarındaki hacimli birimlerin her birinin saptan köke doğru inen ince bir boruya bağlandığını göstermiştir. Bu özellik ve fosilin genel itibarıyla modüler olan yapısı, *Arborea*'nın tek bir bireyden ziyade bir koloni olduğu olasılığını ortaya çıkarıyor. Bu durum şaşırtıcı değildir çünkü iyi gelişmiş organlara sahip bilateral hayvanların evriminden önce koloni oluşumu, doğanın karmaşık hayvan yapılarını ortaya çıkarma bakımından öncelikli yöntemi olmuş olabilir. Örneğin Portekiz Savaşçısı adı verilen canlıyı ele alalım. Bu, iğneleri dikkatsiz yüzücülerde çirkin izler bırakan, günümüzde denizde yaşayan bir sölenenteradır. Portekiz Savaşçısı, denizanasına benzer ama aslında her biri belirli bir fonksiyonu yerine getirecek şekilde gelişim göstermiş, sayısız bireyden oluşan bir kolonidir. Dikkat çekici yüzme kesesi tek bir bireydir. Yüzme kesesinden aşağı doğru sarkan boru benzeri yapılar ise beslenmeye, üremeye veya savunmaya adanmış ayrı bireylerdir. *Arborea* bu yönde erken dönem bir evrim deneyinin ispatı olabilir.

Gelin görün ki geç dönem Ediyakaran fosillerinin hepsi bu kalıba uymamaktadır. *Kimberella*, ilk olarak Avustralya'da keşfedilmiş küçük bir fosildir ancak en çok Beyaz Deniz kayalarında güzelce muhafaza edilmiş, sayıları bini aşan numuneleriyle bilinir. (Resim 30) Birkaç santimetre uzunluğunda olan *Kimberella*'nın soyağacının büyük bilateral uzvunun bir

parçası olduğunu gösteren belirgin bir önüyle arkası, üstüyle altı, soluyla sağı vardı. *Kimberella* fosilleri üzerinde iç organlar ve hafif desenli bir muhafazanın yer aldığı, kaslı bir ayağa sahip olduğunu kanıtlar. Eski dönemlerden kalma ayak izleri *Kimberella*'nın deniz tabanı üzerinde hareket ettiğini açıkça ortaya koyar, diğer yandan ağız bölgelerinin bıraktığı çizik izleri bizlere bu hayvanların ağızlarında günümüzde yaşayan salyangozların dişli dillerine benzeyen ve alglerle diğer organizmaları deniz tabanından kazıyarak beslenmelerini mümkün kılan tarak benzeri sert bir organ olduğunu gösterir. Bu çağa ait diğer kum taşlarındaki izlerse başka basit bilaterallerin varlığını belgeler, bunlar yalnızca deniz tabanı üzerindeki ve içindeki hareketleri vasıtasıyla bilinmektedir. (Resim 31)

Ediyakaran Dönemi sonuna yaklaşırken yenilikler devam ediyordu. İlk kez Namibya'daki 541 ile 547 milyon yıllık kireç taşlarında keşfedilen ancak sadece bu bölgede değil, küresel olarak var olduğu bilinen kalsiyum karbonat boruları da hayvanlarda mineralize iskeletlerin ortaya çıkışına işaret eder. (Resim 29) Böylesi bir zırhın oluşturulması enerji gerektirir fakat yırtıcılar yayıldıkça bu zırh yapım işleminin maliyeti hayatta kalmak gibi paha biçilmez bir kazançla ödüllendirilir olmuştur. Dönemin sonuna gelindiğinde tuhaf Ediyakaran hayvanları bir dereceye kadar çeşitliliğe kavuşmuştu, ne var ki bizim dünyamızın tanıdık hayvanları henüz ortaya çıkmış değildi.



27.



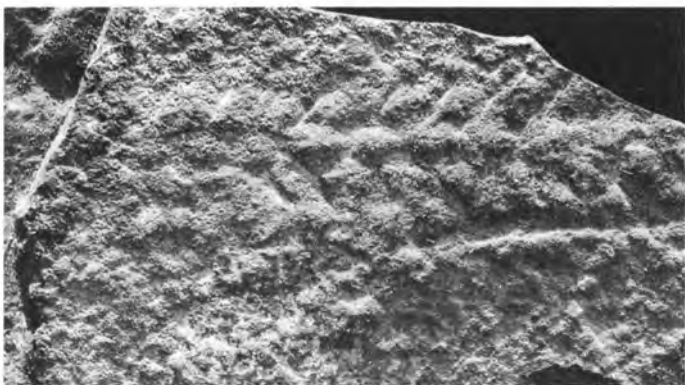
28.



29.



30.



31.

Resim 27-31. Ediyakaran kayalarındaki fosiller ve izler: *Dickinsonia* (Resim 27), *Arborea* (Resim 28), en eski mineralize hayvan iskeleti (Resim 29); *Kimberella* (Resim 30) ve uzuvları olan erken dönem bir bilateral hayvanın bıraktığı izler (Resim 31). Resim 27, Cambridge Üniversitesi'nden Alex Liu'nun; Resim 28, Oxford Üniversitesi'nden Frankie Dunn'ın; Resim 29 ve 31, Virginia Tech'ten Shuhai Xiao'nun; Resim 30, Rusya Bilimler Akademisi Jeoloji Enstitüsü'nden Mikhail Fedonkin'in izniyle kullanılmıştır.

Hayvanlar, Ediyakaran Dönemi okyanuslarında adaptif yayılım gösterirken etraflarındaki dünya da değişiyor, günümüz biyosferinin temelini oluşturuyordu. Proterozoik Devir'in büyük bölümünde atmosferdeki ve okyanus yüzeylerindeki O₂ seviyelerinin düşük olduğunu, günümüzdeki düzeyinin yaklaşık yüzde biri kadarının ancak bulunduğunu daha önce belirtmiştik. Okyanusun bazı köşelerinde görece düşük oksijenli ortamlar günümüzde de varlığını sürdürmektedir; bu ortamlar hayvanlara ev sahipliği yapar fakat bu hayvanlar çoğunlukla fosil kayıtlarına geçme ihtimali düşük, minik türlerdendir (birkaç yüz mikron boyunda ve yirmi otuz mikron genişliğinde canlılardır). Büyük, çeşitliliğe sahip ve enerjik hayvanlar (Anlatımımızın merkezine oturmak üzere olan etoburlar buna dahildir.) yalnızca oksijen seviyelerinin daha yüksek olduğu yerlerde ortaya çıkar. Öyleyse makroskobik hayvan fosilleri, Ediyakaran Dönemi esnasında gezegenimizin denizlerinde hakikaten de büyük bir çevresel değişim yaşandığına işaret eder ve onlarca laboratuvarın yaptığı binlerce kimyasal analiz de Dünya'nın, bugün içinde yaşadığımız oksijence zengin gezegen olmak üzere geçirdiği uzun süreli dönüşümüne bu dönemde başladığına ilişkin bağımsız kanıtlar sunar.

Hayvanlar büyüdükçe ve oksijen bollaştıkça Dünya'nın fotosentetik biyotasında da değişiklikler söz konusuydu. Hem fosiller hem de günümüze kadar korunmuş lipidler, büyük ölçüde bakteriyel fotosentezle geçen üç milyar yılı aşkın sürenin ardından alglerin okyanuslarda ekolojik olarak öne çıktığını göstermektedir. Hayvanlarda, alglerde ve havada görülen bu eşzamanlı dönüşümü neyle açıklayabiliriz? Ediyakaran Dönemi'nde gerçekleşen büyük ölçekli dağ inşası neticesinde okyanuslarda daha fazla besin maddesinin ortaya çıktığına inanmak için geçerli sebeplerimiz var. Günümüz denizlerinde

siyanobakteriler, besinlerin kıt olduğu yerlerde planktonun önemli üyeleri olmaya devam ediyor fakat besin seviyelerinin daha yüksek olduğu yerlerde ökaryotik algler hüküm sürme eğiliminde. Bugün uzayda gördüğümüz örüntü, Ediyakaran zamanında ne olduğuna dair bir fikir veriyor: Daha fazla besin ve neticesinde çeşitlenen algler dolayısıyla artan fotosentez. Daha fazla fotosentez, neticesinde daha fazla besinle oksijen ve nihayet yaşamın başlamasından üç milyar yılı aşkın süre sonra büyük, enerjik hayvanları besleyebilen bir dünya.

EDİYAKARAN DÖNEMİ’NİN BAŞLANGIÇ NOKTASINI buzlar belirlemişse sonunu getiren de evrim olmuştur. Bunun kanıtlarını görmek için Newfoundland’ın yaklaşık 4.500 kilometre batısına gidip Kanada’da yer alan, dünyanın en güzel manzaraya sahip hazinesi Louise Gölü’nün hemen batısında bulunan British Columbia bölgesinde küçük bir kasaba olan Field’a seyahat etmemiz gerekir. Vadi tabanından yüksekteki bir yamaçta paleontologlar koyu renkli şeyl tabakalarını küçük bir taş ocağından dikkatle kaldırmaktadır. Verdikleri emek sık sık, anatomik detayları tabaka yüzeylerinde kayda değer ölçüde muhafaza edilmiş parlak görünümlü sıkıştırılmış hayvan fosilleriyle (ve birkaç tane de alg) ödüllendirilir. Burgess Şeyli olarak bilinen bu kayalar, 505 ile 510 milyon yıl önce çamur halinde çökmüş, fırtınalarla savrulmuş veya depremlerle sarsılmış, nispeten daha derin deniz tabanında birikmek üzere dik bir yamaçtan hızla aşağı inmişti. Çamur sayısız organizmaya mezar oldu, aç mikropların onları çürütmesine izin vermeyecek şekilde üzerlerini örttü. Sonuç olarak bizler, sadece geleneksel fosil kalıntılarını oluşturan mineralize iskeletleri değil, mineralize olmayan kabukları, uzuvları, solungaçları, sindirim kanallarını ve hatta sinir düğümlerini görüyoruz; bunlar eski bir anatomi metnindeki resimler gibi önümüze diziliyor.

Peki, bunlar nasıl organizmalardı? (Resim 32-34) Kambriyen Dönemi (485 ile 541 milyon yıl önce), tanıdık görünen hayvanlara ait çok sayıda fosil görebildiğimiz ilk zaman aralığı olmasıyla ünlüdür. Kambriyen Dönemi hayvanlarının minerali-

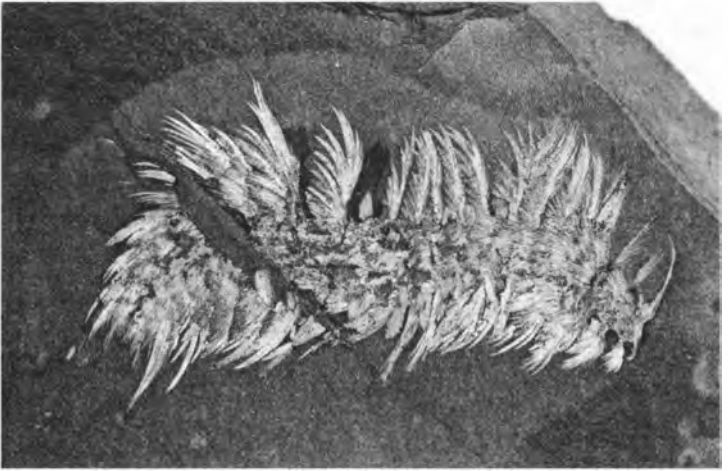
ze kabuklar ve diğer iskeletler tarafından belgelenen geleneksel kütüğüne “trilobit” adı verilen, soyu tükenmiş eklembacaklılar hâkimdir; bölümlere ayrılmış, çok uzuvlu bu canlılar, Kambriyen kayalarında keşfedilen tüm fosil türlerinin yaklaşık yüzde 75’ini oluşturur. Burgess’te trilobit fosilleri de bol miktarda bulunur (Resim 32) fakat bir bütün olarak eklembacaklılar, Burgess’teki tür çeşitliliğinin yalnızca üçte birini oluşturur ve bu eski eklembacaklıların çoğu trilobit değil; dış iskeletlerinde mineral biriktirmeyen, dolayısıyla da çoğu koşulda muhafaza edilemeyen olağanüstü ölçüde tuhaf cinslerdir. Fosiller arasında süngerler yaygındır ve biyoloji alanında eğitilmiş gözler burada bilateral filunı türünün çok sayıda temsilcisini görebilir; bunlar arasında yumuşakçalar (salyangoz, istiridye, kalamar), halkalı deniz solucanları ve yırtıcı deniz solucanları, hatta bizim grubun yakın kuzenleri olan omurgalı hayvanlar da yer alır. Çin, Grönland ve Avustralya’daki başka oluşumlar biyolojik geçmişimize açılan bu olağanüstü pencereyi genişletir ve en az 520 milyon yıl öncesine kadar derinleştirir.



Resim 32-34. Burgess Şeyl’indeki Kambriyen Dönemi fosilleri. Enfes biçimde korunmuş uzun ve antenleriyle trilobitler (Resim 32); eklembacaklıların soyu tükenmiş bir akrabası olan *Opabinia* (Resim 33) ve belirgin tüylere sahip, halkalı deniz solucanı (Resim 34). Telif Hakkı Smithsonian Enstitüsü, Ulusal Doğa Tarihi Müzesi’ne aittir. Fotoğrafların sahibi Jean-Bernard Caron’dır.



33.



34.

Ediyakaran ve Kambriyen fosil toplulukları birbirinden dikkat çekici ölçüde farklıdır fakat gözlemlenen biyolojik farklılıklar, evrimden ziyade fosillerin muhafazası ve çevreden kaynaklı dezavantajı yansıtıyor olabilir mi? Görünen o ki bu ihtimali reddedebilirmişiz. Birincisi, Çin'deki yaklaşık 550

milyon yıllık şeylerde, Burgess tarzı muhafaza koşullarında bulunan fosiller çeşitli makroskobik Ediyakaran organizmaların varlığını belgelemektedir. Bu fosiller arasında çok sayıda deniz yosunu ve hayvan olması muhtemel birkaç şey vardır; ne var ki eklembacaklıların, yumuşakçaların ve diğer karmaşık bilaterallerin izine rastlanmaz. İz fosilleri de benzer bir hikâye anlatmaktadır. Hareket eden hayvanlar hem anatomilerini hem de davranışlarını yansıtan ayırt edici pist, patika ve ayak izleri bırakır. Daha ileri tarihli Ediyakaran kayalarında sınırlı bir çeşitlilikte de olsa basit izlere rastlanabilir ama bunlar da Kambriyen kum taşları ve şeyleri üzerinde bırakılmış olan karmaşık izlere ve oyuklara benzemez. Ayrıca Geç Ediyakaran kayalarında her ne kadar mineralize iskeletler bulunuyor olsa da bunların basit morfolojileri ve sınırlı çeşitlilikleri, Kambriyen iskeletlerinin zenginliğinin yanında sönük kalır.

Öyleyse Mistaken Point ve Burgess biyotaları arasındaki biyolojik farkların hayvan çeşitliliği açısından mühim bir zaman aralığını yansıttığı aşikârdır. Söz konusu zaman aralığına genellikle Kambriyen Patlaması denir. Kambriyen fosilleri hiç şüphesiz yeni bir biyosferin ortaya çıkışını belgelemektedir ve bu yeni biyosfer önceki üç milyar yıllık evrimin hem doruğudur hem de o evrimden büyük bir kopuştur.

Kambriyen fosillerine dikkatlice baktığımızda günümüzde yaşamakta olan hayvanlarla aralarındaki farklılıklar kadar benzerlikleri de fark etmeye başlarız. Müteveffa Stephen Jay Gould, çok satan kitabı *Wonderful Life*'ta [Muhteşem Yaşam] farklılara odaklanmış; Burgess hayvanlarını, soyu tükenmiş vücut yapılarını belgeleyen "tuhaf mucizeler" olarak görmüştür. Gould'un vermeyi en sevdiği örnek, yaklaşık 4 ile 7 santimetre uzunluğundaki *Opabinia*'ydı; bu küçük yaratığın beş gözü ve bir pençeyle biten uzun, esnek bir hortumu vardı. (Resim 33) Tuhaf bir yaratık? Kesinlikle. Peki, alışılmadık mı? Muhtemelen hayır. Merak uyandıran ayrıntılarına rağmen *Opabinia*, tıpkı eklembacaklılar gibi bölümlere ayrılmış bir bedene ve sert bir organik dış iskelete sahipti. Kambriyen kayalarındaki diğer fosiller de alışılmadıkla tanıdık olanın birleşimlerini gösterir ve bunlar, hepsini bir araya getirdiğimizde eklembacaklı ola-

rak bildiğimiz vücut yapısının nasıl oluştuğunu ortaya koyar. Dolayısıyla Kambriyen fosillerinin merceğinden bakıldığında şimdi var olan eklembacaklılar, daha geniş bir Kambriyen soyunun (büyük başarıyla) hayatta kalan temsilcileri olarak düşünülebilir. Eklembacaklılar için geçerli olan bu durum, diğer filumlar için de geçerlidir. Kambriyen fosilleri, hayvanların biçim almakta olan vücut yapılarına dair anlık görüntüler sunar.

Öyleyse Kambriyen Dönemi, bir geçiş dönemi olarak diğerlerinden ayrışır. Ediyakaran Dönemi'nin ileriye doğru büyük atılımı Kambriyen Dönemi'nde devam etmiş ve hatta hızlanmış ancak bize bütünüyle modern bir biyosfer bırakmamıştır. Fosiller, *in statu nascendi* çeşitli hayvanın vücut yapısını belgeler fakat bunu az sayıda tür için yapar ve bütünüyle modern haldeki yapı miktarı da çok değildir. Hayvan gruplarından bazıları, mineraller tarafından sertleştirilmiş iskeletler geliştirip vücutlarını hızla çeşitlenen etoburlara karşı zırhla donatmıştır ancak Kambriyen kireç taşları çoğunlukla fiziksel süreçler veya mikroplar tarafından kolaylaştırılmış kalsiyum karbonat çökmesi neticesinde oluşmayı sürdürmektedir. (Günümüzde iskeletler okyanuslardaki kireç taşı birikiminin büyük bölümünden sorumludur.) Sığ deniz tabanını nokta nokta kaplayan resifler, esas olarak mikroplar tarafından inşa edilmiştir ancak fosiller, hayvanların bu yapıların içinde ve çevresinde geliştiğini açıkça gösterir. Deniz yosunları kısmen yaygındır fakat hayvan benzerleri gibi alg fosilleri de sınırlı çeşitliliğe sahiptir. Havadaki ve okyanuslardaki oksijen geçmişte olduğundan daha zengindir ama yine de günümüzdeki seviyesinin yarısından fazla değildir; okyanusların derinlikleri oksijensiz kalmayı sürdürmektedir. Birçok farklı kanaldan gelen kanıtlar bize, Kambriyen ikliminin günümüzdekinden daha sıcak olduğunu söylemekte, uzun süren Kartopu Dünya döneminin buzhaneyi andıran ikliminden sonra gerçek bir sera ortamının varlığından söz etmektedir. Bir Kambriyen okyanusunda yüzmeniz halinde avını yakalamak veya yakalanmaktan kaçmak için su sütunundan fırlayan hayvanların çokluğu sizi şaşkına çevirirdi. Bununla birlikte hem türler hem de türlerin bireyleri arasında

alışılmadık canlılarla sıradan olanların oluşturduğu muazzam karışım da sizi hayrete sürükleyebilirdi. Bu durum bana antik Mısır tapınaklarındaki bas rölyefleri hatırlatıyor; onları modern gözlerle yorumlamaya çalışmak cezbedici görünebilir ama muhtemelen pek akıllıca olmaz.

BUNDAN YILLAR ÖNCE, Kambriyen Dönemi'nin ardından gelen Ordovisyen Dönem'deki (444 ile 485 milyon yıl önce) yaşamı ve çevreyi belgeleyen kireç taşlarının kalın, stratigrafik bir kesitinde yürüyüş yapmak gibi aydınlatıcı bir deneyim yaşadım. Dağ sırasının tabanına yakın bölgedeki kayalar, altta yatan Kambriyen Dönemi'ndekilere büyük ölçüde benziyordu: Nispeten az fosil vardı, trilobitler dışında çoğu grubun çeşitliliği kısıtlıydı. Gelin görün ki yukarı doğru tırmanmaya başlayıp Ordovisyen kalıntıları arasında yükseltilere çıktıkça kayalar yavaş yavaş değişmeye başladı. Hâlâ çok sayıda trilobit vardı fakat şimdi diğer iskelet fosilleri de çoktu.

Yeni yeni oluşmakta olan bu dünyanın nasıl bir yer olabileceğini tasavvur edebilmek için Indiana, Richmond civarındaki kır yollarına çıkmanızı tavsiye ederim. Cincinnati'nin kuzeybatısında küçük bir kasaba olan Richmond, en çok Earlham Koleji'nin evi olmasıyla bilinir. Yol kenarlarındaki biçilmiş kesimler Geç Ordovisyen Dönem'e (yaklaşık 445 ile 450 milyon yıl öncesine) ait fosillerle dolu kireç taşlarını ve şeyleri gözler önüne serer. Bu fosillerin alışılmadık bir yanı da kalmamıştır; bunların istiridyelerin, salyangozların, kafadan bacaklıların (kalamarların ve ahtapotların ait olduğu grup), mercanların, bryozoanların (yosun hayvancıklar), brakiyopodların ve deniz zambaklarının iskeletimsi kalıntıları olduğu gayet anlaşılırdır. O bölgede bu iskeletler deniz tabanından yukarı doğru yapılanıp Florida Keys veya Bahamalarda şnorkelle yüzerken görebileceğiniz türden resiflere en azından genel itibarıyla benzeyen yama resifleri oluşturmuştur. Bu çağın kayaları, filum seviyesi vücut yapısı açısından yeni bir şey ortaya koymaz ancak türlerin çeşitliliği önemli ölçüde artmış durumdadır. Bazı tahminlere

göre neredeyse on kat artış söz konusudur. Ayrıca iskeletler, ilk kez bu dönemde sığ deniz tabanında oluşan kireç taşlarının ana bileşenleri olarak ortaya çıkmaktadır.

Deniz hayvanları çeşitliliğinin bu üçüncü evresine ilişkin çok sayıda ve çeşitlilikte açıklamalar mevcuttur. Bazı jeologlar, okyanusların soğumasını sağlayan kimyasal kanıtların hayvanlar için varolan ekolojik fırsatları artırmış olabileceğine işaret eder. Bazıları da oksijen seviyelerinin artarak hayvan çeşitliliği açısından yeni bir fiziksel teşvik sağladığını öne sürer. Başka bir kesim de ekolojik etkenleri öne sürer ve yırtıcı baskısının artmasıyla birlikte yoğun iskelete sahip hayvanların ve alglerin çeşitlendiğini iddia eder.

Bu açıklamaların hepsi doğru olabilir ancak teker teker baktığımızda muhtemelen her birinin eksik noktaları vardır. Biyosferde işlerlik gösteren fiziksel ve biyolojik süreçlerin birbirinden bağımsız hareket etmediğini tekrarlamak gerekir. Küresel soğumaya ilişkin kanıtlar sağlamdır. Söz konusu soğuma, dağların yükselişiyle tetiklenmiş olabilir çünkü dağların aşınması CO₂'nin atmosferden uzaklaştırılmasını hızlandıracaktır. Soğuk suların ev sahipliği yapabileceği çözünmüş oksijen miktarı da sıcak sulara oranla daha fazla olduğundan Ordovisyen soğuma, atmosfer değişmeden kalmış olsa bile sığ okyanuslardaki hayvanların O₂'ye ulaşabilirliğinin artmasıyla sonuçlanacaktır. Ayrıca etçil hayvanlar genellikle diğer hayvan türlerinden daha fazla oksijene ihtiyaç duymaktadır çünkü yırtıcılık çok fazla enerji gerektirir.

Doğru yorum ne olursa olsun Geç Ordovisyen Dönem okyanusları hayvanlarla dolup taşıyordu. Soyu tükenmiş mercanlar, devasa bryozoanlar (bugün görülenlerin hiçbirine benzemeyen) ve yoğun şekilde mineralize olmuş süngerler, resifleri oluşturdu. Bu resifler de çeşitli yırtıcı hayvanlar ve çöpçüller için yiyecek ve barınak sağladı. Bu canlılar arasında kalamarların koni biçimindeki akrabaları (Bazıları neredeyse 3,5 metre uzunluğundaydı.) ve yüzgeçleriyle kuyruklarından tanınabilen ancak çenesi olmayan balıklar da vardı. Küresel soğuma, şu anda Güney Yarımküre'de yer alan kıtalardaki buzul kayalar

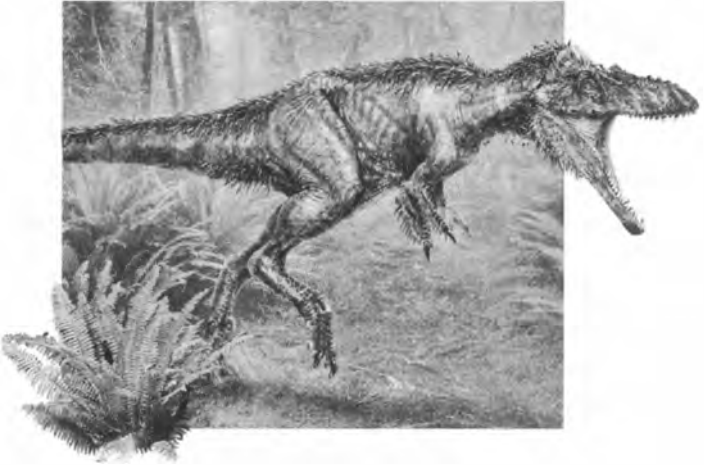
tarafından belgelenen kısa ama önemli bir buz devriyle sonuçlandı. Bu arada bir şey daha oldu. Buzullar ortadan kalktığında bilinen bütün hayvan türlerinin yaklaşık yüzde 70'i ortadan kaybolmuştu.



⑥

Yeşil Dünya

BİTKİLER VE HAYVANLAR KARAYI İŞGAL EDİYOR



MOSKOVA’NIN 4.900 KİLOMETRE DOĞUSUNDA bir sibirya şehri olan Yakutsk’a doğru yol alan eski bir Aeroflot jet uçağına bindiğimde yıl 1991’di. Sekiz saatlik uçuşun büyük bölümünde pencereden dışarı baktım; aşağıda hiç bitmeyecekmiş gibi duran ormanlar dışında çok az şey görebiliyordum. Bu orman manzarasını bölen yegâne unsur, Arktik Okyanusu’na doğru kıvrılan, gümüş renkli birer ipliğı andıran nehirlerdi. Benzeri bir uçak yolculuğunu trilobitlerin evrimsel gençliklerinin tadını çıkardıkları Kambriyen Dönemi esnasında yapmış olsaydım, büyük ölçüde, yer yer mikrobiyal balçıkça renklenmiş sarp kayalarla kaplı bir arazi üzerinden geçerdim. Öyleyse günümüzdeki Sibirya manzarasının yeşili başka bir biyolojik devrimi, karaların karmaşık çok hücreli organizmalar tarafından işgal edilmesini yansıtmaktadır.

Mikroplar muhtemelen Dünya tarihinin erken dönemlerinde karalar üzerinde kök salmış ancak dünyayı değiştiren karmaşık karasal ekosistemlere hem gıda hem de fiziksel altyapı sağlayan bitkiler olmuştur. Bugün yaklaşık 400.000 karasal bitki

türü Dünya'daki fotosentezin yarısını gerçekleştirmekte ve gezegenimizin toplam biyokütlesinin tahminen yüzde 80'ini oluşturmaktadır. Aslına bakarsanız Dünya'nın görkemli yeşil örtüsü, gezegenimize öyle yayılmıştır ki uzaydan bakıldığında dahi algılanabilmektedir. NASA'nın Galileo uzay aracı 1990 yılında Jüpiter'e doğru yol alırken mekanik gözlerini uzaklardaki Dünya'ya doğru çevirmiş ve gezegenimizin yansıttığı ışıktaki yakın kızılötesi bölgesindeki farklı bir tepe noktasını ortaya çıkarmıştır. Bu tepe noktasına Vegetation Red Edge adı verilir. Bu kendine has nokta, karasal bitki örtüsünün, gelen görünür radyasyonu büyük ölçüde emmesi fakat kızılötesi dalga boylarını uzaya geri yansıtması neticesinde ortaya çıkar. Erken dönem Dünya'yı ziyaret edenler böyle bir özellikle karşılaşmayacaktır.

Hayvanlar eski dönemde okyanuslarda doğmuş olmalarına rağmen günümüzde karada daha fazla çeşitliliğe sahiptir. Tek başına böcek türleri bile denizdeki bütün hayvan cinslerine sayıca epey üstün gelir. Çoğunlukla kayıt altına alınmamış, muazzam çeşitlilikte mantar toprağa nüfuz eder, sayısız protist ve bakteri uzun süre suda yaptıkları gibi karbon, azot, kükürt ve diğer elementleri karada da döngüye sokar.

Araziler, ormanlar, çekirgeler ve tavşanlardan oluşan aşına olduğumuz dünyanın, kıtaların ve adaların Yerküre tarihinin yalnızca son yüzde onluk döneminde geçirdikleri kayda değer dönüşümü yansıttığı açıktır. Peki, gezegenimizin yeşile dönüşümü nasıl gerçekleşti ve bu dönüşümün Dünya için sonuçları ne oldu?

EĞİTİMLİ BİR HEKİM OLAN WILLIAM MACKIE, 1912 yılında bölgedeki jeolojik özellikleri incelerken İskoçya'nın Rhynie köyünden geçti. Aberdeen kentinin yaklaşık elli kilometre kuzeybatısındaki Rhynie, engebeli tarlaların arasında yer alır. Bölgede jeoloğun dikkatini çekecek, yeryüzüne çıkmış çok fazla kaya bulunmadığından Mackie, tarlaları çevreleyen duvarlarda olağandışı bazı taşlar fark edince yakından bakmak için durdu. Kayalar çörtten (SiO_2) meydana geliyordu ve üstün-

körü bir inceleme bile bunların, bazıları büyüme pozisyonunda muhafaza edilmiş fosil gövdesi benzeri şeyler içerdiğini gösteriyordu. Mackie, Burgess Şeyli'nin paleobotanideki muadilini yani Rhynie Çörtü'nü keşfetmişti. Günümüzde ABD'deki Yellowstone Ulusal Parkı'nda veya Yeni Zelanda'daki North Island bölgesinde bulunanlara benzer kaplıcalar içinde ve etrafında 407 milyon yıl önce birikmiş olan Rhynie Çörtü, evrimsel ergenlik dönemindeki karasal ekosistemlerden dikkate değer ölçüde net bir görüntü sunar.

Bitkiler, Rhynie sahnesindeki şovun yıldızı kabul edilse de daha sonra göreceğimiz üzere sahneyi sayısız tipte organizmayla paylaşmaktadır. Hücre biyolojisinin ve moleküler biyolojinin birçok özelliği, karasal bitkilerin tatlı sularda yaşamış olan yeşil alglerden evrimleştiğini açıkça ortaya koyar. Gelin görün ki nehirlerden ve göletlerden başlayıp kuru toprağa doğru uzanan bu evrimsel yolculuk büyük güçlükler içermektedir. Örneğin kurumaktan kaçınmak lazımdı, mekanik desteğe gerek duyuluyordu ve kaynak edinimine ihtiyaç vardı. Fotosentetik organizmalar, etraflarında su olduğunda kuruma tehlikesi yaşamazlar ancak karadayken hücrelerdeki su sürekli olarak buharlaşır; bitkilerin tatlı suda yaşayan kuzenlerini kuru toprağa koyacak olursanız çabucak büzüşüp öleceklerdir. Dolayısıyla karadaki fotosentetik yaşam, canlı dokulardan buharlaşmayı geciktirecek bir araca gereksinim duyuyordu. Su alglerinin bir göl veya nehir tabanında dikey kalması için özel dokulara ihtiyacı yoktur çünkü bizzat su, vücutlarını destekler. Bununla birlikte hava, karada dik duran dokuları destekleyemediğinden bitkiler dik duruşlarını korumak için başka yöntemlere ihtiyaç duyar. Ayrıca göl ve nehirlerde besinler, çevredeki sudan emilirken karada topraktan alınmaları ve hücrenin büyüme bölgelerine taşınmaları gerekir. Paleontologların şansına, bitkilerin karadaki yaşam için geliştirdiği adaptasyonlar büyük ölçüde anatomiktir; bu adaptasyonları günümüzde varlığını sürdüren bitkilerde görebilirsiniz, fosillerde de iyi korunmuşlardır.

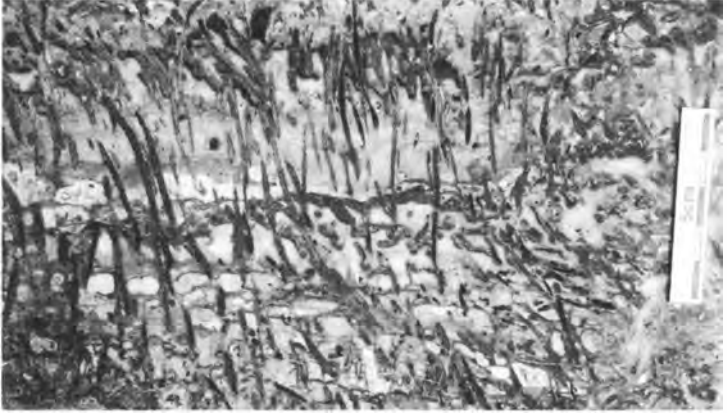
Rhynie coğrafyasının büyük bölümünü kaplayan ve erken dönemlere ait ikonik bir bitki olan *Rhynia* büyük ölçüde çıplak fotosentetik eksenlerden oluşuyordu. Toprakta büyüyen kalem

genişliğindeki bu yapılar, çilek bitkisinin kök filizlerine benziyor ve zaman zaman gökyüzüne doğru 20 santimetre kadar uzayan dikey dallar veriyordu. (Resim 35) Eksenler, mumla yağ asitlerinden oluşan ve “kütikül” adı verilen ince bir dış kaplamayı koruyordu. Günümüzde var olan bitkilerden bilindiği üzere kütikül, hücrelerdeki su buharının atmosfere kaçmasını etkin şekilde önler; ne var ki aynı başarıyı, karbondioksitin fotosentez amacıyla bitkiye nüfuz etmesine mâni olma konusunda da gösterir. Neticede günümüzde var olan bitkiler gibi *Rhynia* da CO₂ kazanımını su kaybına karşı dengeleme sorununa bulduğu incelikli çözümü gözler önüne serer: Yüzeyinde “stomata” adı verilen çok sayıda küçük delik bulunmaktadır. Bu delikler, bitki su kaybına bağlı stres yaşadığında açık kısımları kapatmak üzere genişleyen ve emniyete kavuştuğunda karbondioksitin bitkiye girmesine müsaade etmek için daralan hücrelerle desteklenir. Dolayısıyla Rhynie fosillerinde herkesin görebileceği şekilde muhafaza edilen stomatalı kütikül yapısı, karasal bitkiler için olmazsa olmaz konumundadır.

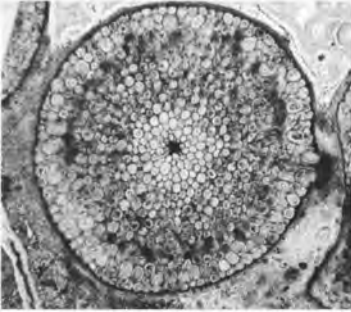
Karadaki fotosentez er ya da geç su kaybına sebep olduğu için bitkilerin çevrelerinden suyu emecek ve bitki boyunca taşıyacak bir mekanizmaya ihtiyacı vardır. Karasal ekosistemlerde su esas olarak azot ve fosfor gibi besinlerle birlikte toprakta bulunur. Canlı bitkiler ince, parmak benzeri çıkıntılarını alt tabakaya yayıp hem suyu hem de besinleri alan kökler geliştirir. Aslında çoğu bitkide besin maddesi alımının büyük bölümü, bitkinin kökleriyle yakın ilişki içinde yaşayan mantarlar tarafından gerçekleştirilir. Rhynie bitkileri iyi gelişmiş köklere sahip olmadıklarından toprağa tutunmak ve su emmek için “rizoid” adı verilen ince filamentlere bel bağlıyordu. Bununla birlikte fosillerden elde edilen bulgulara göre 400 milyon yılı aşkın süre önce karasal bitkiler halihazırda mantarlarla yakın ilişki içinde yaşıyor ve besin maddesi alışverişinde bulunuyorlardı. Bu ortaklık olmasaydı, Dünya’nın yeşil devrimi asla gerçekleşmeyebilirdi.

Son olarak bitkilerin suyu ve besin maddelerini yerden alıp yukarıya doğru taşımaları ve fotosentezle üretilen gıdayı bitki gövdesinin tamamına yaymaları gerekir. Bu büyük başarılar, “damar sistemi” adı verilen özel dokular tarafından hayata

geçirilir. Suyu ileten hücreler, bitki eksenini için gereken mekanik gücü sağlayan kalın duvarlara da sahiptir. *Rhynia*'nın anatomik kesitleri, bitki ekseninin merkezinden yukarı doğru çıkan damar dokudan yapılmış, ince bir silindiri gözler önüne serer. (Resim 36)



35.



36.



37.

Resim 35-37. İskoçya'daki Rhynie Çörtü, 407 milyon yaşında. Rhynie kayaları, bizlere en eski karasal ekosistemlerden birine göz atabilme imkânı sunar: Bu ekosistemler içlerinde hepsi karada veya sığ su birikintilerinde yaşayan basit bitkiler (Resim 35, anatomik olarak korunmuş kesit: Resim 36), hayvanlar, mantarlar (Resim 37, oklar, Rhynie bitkilerinin dokuları üzerinde yaşayan mantarları göstermektedir), algler, protozoalar ve bakterileri barındırır. Resim 35, Aberdeen Üniversitesi'nden Alex Brasier'ın; Resim 36, Hans Steur'un; Resim 37, Münster Üniversitesi'ndeki Paleobotany Group'un izniyle kullanılmıştır.

Dik duran *Rhynia* eksenleri genel olarak, üreme için gerekli sporları barındıran uzun bir bölmeyle sonlanır. Sporlar, suyun içinde bir yerden başka bir yere yüzebilir, bu da sporların yayılmasını nispeten basit bir mesele haline getirir. Gelin görün ki *Rhynia* sporları karada rüzgâr tarafından çevreye savruluyor, bu da onları kurumaya maruz bırakıyordu. Modern eğreltiotu sporları veya polen taneleri gibi *Rhynia*'nın sporları da zararlı UV radyasyonuna karşı “güneş gözlüğü” sağlarken su kaybını da önleyen “sporopollenin” adı verilen karmaşık bir polimerle kaplanmıştı. Dolayısıyla genel anatomi itibarıyla *Rhynia* ve diğer Rhynie bitkileri, günümüzde var olan bitkilere benziyor fakat yapraklara, büyük köklere, gövdeye veya tohumlara sahip olmadıklarından o noktadan sonra işler daha da ilginçleşiyordu. Sonuç olarak Burgess kayalarının hayvan fosillerini muhafaza etmesi gibi Rhynie Çörtü de bitkiye dönüşme eylemi esnasında yakalanan fotosentetik öncülleri fosiller halinde saklamıştır.

Rhynie’de bir düzineden fazla hayvan türü de keşfedilmiştir. Aynı anda hem Dünya’da en çok bulunan hayvanlardan hem de en seyrek rastlanan fosillerden biri olan ufak yuvarlak solucanlara rast gelindiği olağanüstü bir olay haricinde keşfedilenlerin hepsi eklembacaklıdır. Karadaki ilk bitkiler gibi kolonici hayvanlar da karada kurumaktan kaçınmak ve vücut ağırlıklarını taşımak zorundaydılar. Eklembacaklıların organik dış iskeletleri üzerinde yer alan mumsu bir kaplama, suyu muhafaza etmiş, en başta denizde evrimleşmiş olan kashı, eklemli bacaklarıysa karada sağlam bir hareket yeteneği ve yapısal destek sağlamıştır. Bu dönemdeki canlılar için oksijen meselesi de bir başka zorluktu çünkü solungaçlar suda iyi iş görse de havada pek bir şeye yaramıyordu. Günümüzde birçok akrep ve örümcek, kitap akciğerlerini kullanarak nefes almaktadır; bunlar, hava ile yüzey temasını en üst düzeye çıkararak atmosferdeki oksijenin, vücutta O₂’yi taşıyan kan benzeri sıvılara nüfuz etmesine imkân veren karmaşık şekilde katlanmış dokulardır. Kitap akciğerleri, suda yaşayan atalarındaki solungaçlardan gelmiş gibi görünmektedir.

Rhynie kayaları, bilinen en eski böcekleri de bünyesinde barındırır. Bu böceklerin varlığı, çeşitlilik bakımından hayvanlar âleminde en üst sıraya yükselecek olan bir türün yayıl-

ması açısından başlangıç ziline çaldığı anlamına gelir. Rhynie kayaları çeşitli mantarları da muhafaza eder; bunlar arasında hem ölü bitkileri yiyenler hem de canlı olanları besleyenler yer alır. (Resim 37) Kayalarda bulunan fosiller arasında şu canlılar da yer almaktadır: En çok, on dokuzuncu yüzyılda İrlanda'da patateslere dadanan hastalığın sebebi olmasıyla bilinen mantar benzeri mikroorganizmalar olan oomisetler; hücreleri etrafında vazo görünümlü organik kabuklar oluşturan amipler; yeşil algler ve siyanobakteriler. Kısacası Rhynie fosilleri 400 milyon yıl öncesine gelindiğinde karasal ekosistemlerin, modern ekolojik yapı ve çeşitliliklerinin temellerini oluşturduğunu göstermektedir. Daha eski fosil parçaları, karasal bitkilerin erken dönem öncüllerinin Rhynie'den yaklaşık 50 milyon yıl önce karada yerleşim gösterdiğini ortaya koymaktadır. Zamanda ileriye doğru gittiğimizde ise İskoçya'daki dönüm noktamızın ardından gelen 50 milyon yıl içinde bitkilerin kayda değer bir evrimsel patlama yaşayıp yaprak, kök, gövde ve tohum geliştirdiğini, belli başlı soy gruplarında son aşama dışında neredeyse her şeyin tamamlandığını görüyoruz.

Bizim atalarımız olan omurgalılar ise partiye nispeten geç katılmışlardı. Dört uzuvları olduğu için tetrapodlar olarak adlandırılan kara omurgalılarının, ilk kez okyanuslardaki Kambriyen patlamasının bir parçası olarak çeşitlenen balıklardan geldiği açıktır. Gerçekten de karşılaştırmalı biyoloji ve moleküler dizilim analizleri neticesinde elde edilen veriler, tetrapod omurgalıların, lob yüzgeçli balıklar olarak adlandırılan belirli bir grubun yakın akrabası olduğunu göstermektedir. Ton balığından alabalığa kadar birçok kılçıklı balık, vücutlarına bağlı bir dizi küçük kılçıktan çıkan uzun ve ince kılçıkların desteklediği yüzgeçlere sahiptir. Buna karşılık lob yüzgeçli balıklar, vücuda tek bir kılçıkla bağlanan bir çift etli yüzgece sahiptir. Bu balıklardaki diğer kılçıklar ise tetrapodların uzuv kemiklerinininkine benzer bir yapı meydana getirir. Sölekantlar, kara omurgalılarının en yakın akrabası olmasa da lob yüzgeçli balıkların en çok bilinenidir. Bu farklı balıklar uzun süre fosilleriyle tanındı. Söz konusu fosiller yalnızca 66 milyon yıldan daha eski kayalarda görülüyor, sölekantların soyunun bu

tarihten sonra tükendiği düşünülüyordu. Gelin görün ki 1938 yılında Güney Afrika kıyısı açıklarında çalışan bir balıkçının ağında canlı bir sölekant görülünce soyunun tükendiğine dair kaniya biraz erken varıldığı anlaşıldı. İkinci bir tür daha sonra Endonezya'daki Sulawesi yakınlarındaki sulara keşfedildi. Sölekantlar, omurgalıların akrabaları olduklarını gösteren loblu yapıya sahiptir fakat bu canlıların balık olduğu ve hayatlarını suda geçirdiği de bir o kadar aşikârdır.

Tetrapodun daha yakın akrabaları ise akciğerli balıklardır. Tatlı suda yaşayan yarım düzine farklı türden oluşan bu balıklar, loblu yüzgeçlere sahip olmakla kalmaz, aynı zamanda evrimsel açıdan yüzme keseleriyle (balıklarda genel olarak suda batmamayı sağlamanın yanı sıra kalbe oksijen vermek için de kullanılan soğan biçimindeki organlar) ilişkilendirilen ilkel akciğerleri kullanarak solunum da yapabilir. Akciğerli balıklar, açıkça balık gibi görünmeyi sürdürse de karada yaşamaya yönelik bariz adaptasyonlar geliştirmiştir; bu balıkların yalnızca tek bir türü soluma işlemini sadece solungaç kullanarak gerçekleştirir. Bununla beraber balıklarla tetrapodlar arasındaki morfolojik uçurum büyüklüğünü korumaktadır. Tıpkı bitkiler gibi omurgalılar da karaya yerleşmek için evrimsel dönüşüme gereksinim duymuştur. Havadan oksijen almak için akciğerlere ihtiyaç duymalarının haricinde karasal ortamlarda yemek yiyebilmeleri, nefes alabilmeleri ve hareket edebilmeleri için kafataslarının, göğüs kafeslerinin ve uzuvlarının yapısal olarak yeniden düzenlenmesi de gerekliydi.

Balıklar yiyecekleri büyük ölçüde ağızlarına çekerek yakalar ve oksijeni de suyu yutup solungaçlarına iterek elde eder. Bu yüzden de balıkların kafatasları karmaşık ama esnek yapılardır. Omurgalılar karada besini ısırarak alır ve oksijeni de solunum yoluyla elde eder. Bunun sonucunda kafatasının anatomisi, ısırmayı ve nefes almayı kolaylaştıracak şekilde daha güçlü, daha sert bir yapı oluşturmak üzere değişime uğramıştır. Bu değişiklikler uzun vadede davranışsal sonuçlara sebep olacak şekilde damağı da ses çıkarmaya uygun hale getirmiştir. Nefes almak için gerçekleştirilen adaptasyon, göğüs kafesinin evriminde de görülebilir; omurgadan çıkan bu uzun kemikler,

akciğerleri genişletip daraltmak için gerekli kasları destekler. Dahası balıklarda omuz kemerini oluşturan kemikler kafatasının devamı niteliğindedir ve büyük ölçüde suda hareketi kolaylaştıran biçimli gövdeyi şekillendirmeye hizmet eder. İtici güç büyük oranda, beden ve kuyruk boyunca uzanan kaslarla sağlanır. Kara omurgalılarında ise hem yapısal destek hem de hareket, kasları sabitleyen belirgin pelvik bölgelere ve omuz kemerlerine (Artık kafatasından gerçek bir boyunla ayrılmış durumdaydı.) bağlı kaslı uzuvlar gerektiriyordu.

Nc mükemmeldir ki 360 ile 380 milyon yıl önce birikmiş bir dizi fosil, bu dönüşüme ilişkin güçlü bir kanıtı muhafaza etmektedir. Evrim teorisine şüpheyile bakanlar, fosillerin evrimin ara ürünlerini muhafaza etmediğini zaman zaman iddia eder ama bu insanlar henüz *Tiktaalik*'le tanışmamıştır. (Resim 38) Arktik Kanada'daki yaklaşık 375 milyon yıllık kayalarda keşfedilen *Tiktaalik*, lob yüzgeçli bir balığın genel bedensel organizasyonuna sahipti, yüzgeçlerle solunum yapıyordu ve pullarla kaplıydı ancak lob yüzgeçli bir balığın aksine timsahları andıran yassı bir kafatası vardı. Yüzgeçleri loblu yüzgeç modeli üzerine inşa edilmişti fakat dirsek ve bilekleri akla getiren kemik modifikasyonlarına sahipti. Omuz kemeri, kafatasından bir boyunla ayrılıyordu ve uzuv benzeri hareketleri ve vücut duruşunu sağlamak için gerekli kasları taşımış gibi görünüyordu. Kafatası özellikleri de şu an varolan akciğerli balıklar gibi *Tiktaalik*'in de akciğer yoluyla solunum yapabildiğine işaret etmektedir.

Tiktaalik bir balık mıydı yoksa bir tetrapod muydu? Bunu anlamak güç ve zaten mesele de bu. Bu dikkat çekici fosil ve benzerleri, farklı zaman ölçeklerinde evrimleşen farklı özellikleriyle sudan karaya geçişi belgelemektedir. Örneğin *Tiktaalik* suda yaşayan bir hayvan olmayı sürdürse de muhtemelen sığ sularda, hatta belki uzuv benzeri yüzgeçlerini kullanarak karada hareket edebiliyor ve ayakta durabiliyordu. Ayrıca havayı soluyabiliyor ve avını çenesinde hapsedebiliyordu. Tortul yatakların yüzeylerinde muhafaza edilen fosil izlerinin sağladığı bağımsız kanıtlara göre omurgalılar, Geç Devoniyen Dönemi'ne geldiğinde kurak topraklara yerleşmeye başlamıştı.

DENİZ YAŞAMINDA KAMBRIYEN DÖNEMİ çeşitlenmesi başladığında mantodan yüzeye doğru giden akış Geç Prote-rozoik Devir'e ait bir süper kıtayı parçalamış ve parçalarını dağıtmış olduğundan Dünya'nın kara kütleleri küresel bir yayılmayla meşguldü. Gelin görün ki Dünya'nın küresel yüze-yinde ayrılan her şey geri birleşmeye mahkûmdu, dolayısıyla Rhynie zamanına gelindiğinde kıtalar Pangea adı verilen tek bir süper kıtayı oluşturmak üzere bir kez daha birleşmeye başlamıştı. Milyonlarca yıllık bir süreç boyunca kara kütleleri çarpıştı, bugün faylı ve kıvrımlı kayaları, maden ocaklarıyla yol yarmalarında görünür durumda olan ve kendileri de hafif yükseltiler halinde var olmayı sürdüren dağları meydana getirdi. Pangea'nın birleşmesi yaklaşık 300 milyon yıl önce tamamlanmıştı ancak kıtaların, mantonun devamlı konveksiyon yapması neticesinde tükenmek bilmeyen bu dansı, 175 milyon yıl önceye gelindiğinde Pangea'yı tekrardan parçalayacaktı. (Bkz. Bölüm 2)



Resim 38. Tiktaalik, balık ve omurgalı kara hayvanları arasındaki geçiş özelliklerini sergileyen 375 milyon yaşında bir fosil. (Sol tarafta yeniden oluşturulmuştur.) Chicago Üniversitesi'nden Neil Shubin'in izniyle kullanılmıştır.

Peki, yaşımanın karaları fethetmiş olması gezegeni nasıl etkiledi? Toprak bu kolonizasyonun bir ürünüdür. Toprağı pek düşünmeyiz ama düşündüğümüzde de genelde onları gezegenimizin fiziksel değişime uğratılmış yüzeyi olarak akla getiririz. Bununla birlikte Dünya'nın insanlar için belki de en büyük kaynağını meydana getiren toprak da yine fiziksel ve biyolojik süreçler arasındaki etkileşimleri yansıtır; dolayısıyla kimyasal bozunma kadar köklerle mantarlara, gömülü bitki kalıntılarıyla toprak solucanlarına da mecburdur. Aslına bakarsanız toprak oluşumunun esas fiziksel kısmı (kimyasal bozunma) da yer altına nüfuz edip ilerledikçe organik asit salan kökler tarafından desteklenir. Öyleyse karasal ekosistemler gelişirken verimli topraklar da beraberlerinde gelişmiştir.

Bitkiler tarafından sentezlenen kütikül, lignin, sporopollenin ve diğer biyomoleküller bakteriyel çürümeye karşı direnç gösterir, bu durum toprak altında kalmalarını ve tortularda muhafaza edilmelerini kolaylaştırır. Karbon döngüsündeki bu yeniliğin iki farklı sonucu olsa gerektir. Fotosentetik olarak üretilen organik maddenin daha fazla toprak altında kalması, atmosferdeki CO₂'den tortulardaki organik moleküllere dönük karbon transferini artırarak Dünya iklimini soğutmuş olmalıdır. Ayrıca toprağın altına gömülen organik karbon, oksijen kullanılarak solunmamış organik karbon olduğu için toprak altında kalan organik maddenin artışı, atmosferdeki O₂ seviyelerini yükseltmiş olsa gerektir. Dört farklı noktadan gelen kimyasal kanıtlar da bu tahminlere uygun düşerek erken dönem karasal bitki evriminin zaman ölçeğinde atmosferdeki oksijenin nihayet modern seviyelere ulaşp okyanus derinliklerine de O₂ yaydığına işaret etmektedir. Buna ilaveten kıtasal buz kütleleri de Devoniyen Dönemi'nin sonlarına doğru başlayıp Karbonifer Dönemi boyunca hızlanarak güney kıtalarına tekrardan yayılmıştır. Hepsi Geç Paleozoik Çağ'da tek bir kara kütesinin parçaları olmuş olan bu buz kütlelerinin tortul izleri Güney Afrika, Güney Amerika, Hindistan, Avustralya ve Antarktika'da korunmaktadır.

Buzlar kutupları taçlandırırken bataklıklar ekvatoryal düzlüklere yayıldı; o dönemde bu bölgeler arasında Kuzey Amerika,

Avrupa ve Çin'in bazı kesimleri de vardı. Sanayi Devrimi'ni ayakta tutmuş olan (ve küresel ısınmayı besleyen) kömürün büyük bölümü bu eski sulak alanlara gömülü bitki atıklarından oluşmuştur. Biyolojik olarak bakıldığında bu dönem, devlerin dönemiydi: Dinozorlar henüz ortaya çıkmamıştı ama kanat açıklığı 70 santimetreyi bulan yusufluklar ve 2 metre boyunda kırkayaklar vardı. Günümüzde yalnızca, genelde küçük boyutlardaki on beş farklı türle temsil edilen kırkkilit otu grubu, o dönemde bünyesinde boyları 10 metreyi aşan ağaçları da barındırıyordu. Günümüzde genel itibarıyla yine dar bir toprak florasıyla sınırlı kalan kurtayağı bitkisi, tropikal Karbonifer Dönemi'nin sulak arazilerinde 30 metrelik yüksekliklere kadar ulaşabiliyordu. Batı Virginia, Kentucky ve Illinois'dan çıkan kömür büyük ölçüde, bu soyu tükenmiş dev bitkilerin sıkışıp ezilmiş kalıntılarıdır. Eğreltiotları ve tohum bitkileri de bu dönemde çeşitlenmiştir; bu çeşitlilik büyük ölçüde soyu tükenmiş taksonlardan meydana gelse de başka bitkilerin yanı sıra modern kozalaklı ağaçların atalarını da barındırıyordu. Gelin görün ki sulak topraklar varlığını sürdürmeyecekti. Geç Paleozoik Çağ kıta çarpışmaları sırasında yükselen dağlar, atmosferdeki ve okyanuslardaki sirkülasyon örüntülerini değiştirip sulak alanları kuruttu ve besledikleri çeşitli türlerin sonunu getirdi. Hem bitkiler hem de tetrapodlar arasında yeni ekosistemler şekilleniyordu. Bu yeni ekosistemler, soyu tükenmiş organizmalar arasında en ikonik olanı, yani dinozorları da barındıracaktı.

YILLAR ÖNCE genç bilim insanları için düzenlenen bir konferansa katılmıştım, o zamanlar genç kategorisine giriyordum. Orada tanıştığım meslektaşların arasında o zamanlar henüz çiçeği burnunda bir gezegen bilimci olan, şimdiyse ay ve uzak gezegenler konusunda ünlü bir uzman haline gelen Maria Zuber de vardı. İlk günün kapanışında Maria, küçük oğluyla arayı kapatmak için evini aramış ve ona günün büyük bölümünü paleontologlarla konuşarak geçirdiğini söylemişti. Oğlu heyecanla kimlerle tanıştığını sordu. "İki kişi," diye yanıtladı Maria.

“Andy Knoll, Simon Conway Morris.” Çocuk bu kişileri hiç duymamıştı. Annesi ona ünden yoksun bu bilim insanlarının Dünya’daki hayatın ilk dönemleri üzerinde çalıştıklarını söyleyince çocuk gözle görülür bir acımayla karşılık verdi. “Kafana takma anne,” dedi teselli edercesine. “Dinozorcularla belki bir dahaki sefere tanışırsın.”

Dinozorlar. *Brachiosaurus*, *Triceratops*, *Tyrannosaurus rex*. İsimlerini biliyorsunuzdur ya da en azından sekiz yaşındayken biliyordunuz. Dünya’nın ve yaşamın bütünü açısından bakıldığında gezegenimizin tarihinin yüzde dördünden azını meydana getiren hegemonyaları kısa süreliydi. Dünya üzerindeki etkileri de siyanobakterilerinkinin yanında sönük kalıyor. Bununla birlikte Jura ve Kretase dönemlerinde dinozorların ekolojik açıdan mutlak bir hakimiyeti söz konusuydu ve geliştirdikleri vücut biçimlerinin yaşam tarihinde yer bulan canlılar arasında eşi benzeri yoktu.

Öyleyse dinozorlar neyin nesiydi? Ekolojik başarılarının altında hangi özellikler yatmaktadır? Peki, bazıları nasıl olup da bu kadar etkileyici boyutlara ulaşmıştır? Gelin, dinozorları yaşadıkları dünya bağlamında değerlendirerek başlayalım.

En eski kara omurgalıları yırtıcı ve belki de çöpçüldü ancak 50 milyon yıl içinde tetrapod çeşitliliği hem etoburları hem de otoburları kapsar hale geldi. Bunlar da günümüzdesürüngenleri, kuşları, kaplumbağaları ve memelileri içeren amniyotlar ve amfibiler şeklinde ayrılmıştı. Bir sonraki bölümde anlatılacağı üzere Paleozoik Çağ bir felaketle sona erdi fakat karasal ekosistemler Mezozoik Çağ’da (66 ile 252 milyon yıl önce) hayata dönerken hem omurgalılar hem de bitki örtüsü daha modern bir görünüm kazandı. Artık baskın olan ağaç ve çalı türleri, diri örtüsünde çeşitli eğreltiotları bulunan kozalaklı ağaçlar, ginkgolar ve diğer tohumlu bitkilerdi. Günümüzde çoğu karasal ekosisteme hâkim olan çiçekli bitkiler, ancak devrin sonraki zamanlarında yayılma göstermiştir; çiçekli bitkilerin en eski fosilleri 140 milyon yıldan biraz daha geçmişe aittir.

Erken Mezozoik tetrapod çeşitlenmesi, bugün görmeyi sürdürdüğümüz grupları da ortaya çıkarmıştır. Bilinen en eski gerçek memelilerin, kaplumbağaların, kertenkelelerin

ve kurbağaların tümü, buna ilaveten pterozorlar (ilk kanatlı omurgalılar), dinozoromorf (en eski gerçek dinozorlar ve yakın akrabaları) ve şimdi soyu tükenmiş olan başka gruplar Triyas Dönemi'ne ait (201 ile 252 milyon yıl önce) kayalarda görülür. Triyas Dönemi tabiatının pek çok yerinde en büyük çeşitliliğe sahip ve bol rastlanan omurgalılar, büyük ve çevik sürüngenlerdi. Bunların bazıları iki ayak üzerinde hareket ediyor, bazılarıysa dört ayak üzerinde koşuyordu; bazılarının dişli uzun hortumları, bazılarının basık burunları vardı; bazıları etoburdu, bir kısmı da bitki yiyordu. Peki ya dinozorlar neredeydi? Aslında onlardan pek yoktu. Triyas topluluklarında var olsalar da bilhassa kalabalık veya çeşitli değillerdi. Triyas Dönemi tabiatının aristokrat sınıfı, günümüzde timsahlar tarafından temsil edilen bir soya aitti. Dinozorlar nihayetinde hâkimiyeti, üstün bir adaptasyon neticesinde mi ele geçirdi peki? Durum öyle görünmüyor. Triyas dünyası bir felaketin ardından ortaya çıkmıştı ve o şekilde de sona erdi. Dinozorlar ekolojik öneme en azından kısmen de olsa Geç Triyas Dönemi'nin çevresel sıkıntıları atlatmayı başardıkları için kavuşabilmişlerdi. Bu sıkıntıyı atlatabilmelerinin nedeni iyi genleri kadar güzel talihleri de olabiliirdi.

Daha modern bir biyolojik dünya, kıtalar üzerinde şekillenirken dahi Dünya'nın fiziki yapısı değişmeye devam ediyordu. Pangea'nın dağılmasına ilişkin ilk kanıtlar arasında süper kıtanın parçalanışının ilk aşamalarında saçılan volkanik kayalardan oluşan ve günümüzde New York yakınlarındaki Hudson Nehri boyunca uzanan alçak falezlerde gözler önüne serilen Palisades yer almaktadır. Bu fiziki değişim esnasında Atlantik Okyanusu ekvator'dan kutuplara doğru fermuar gibi açılmıştı. Hem Kuzey Amerika hem de Güney Amerika batıya doğru hareket ederken de Pasifik levhasının okyanus kabuğu, bu kıtaların altlarına dalarak Rocky ve And Dağları'nı ortaya çıkardı. Güney kıtaları da ayrıldı: Afrika ve Hindistan kuzeye doğru harekete geçerken Avrasya'nın alt kısmıyla çarpışıp Alplerden Himalayalara kadar uzanan büyük dağları meydana getirdi. Anlayacağınız, bugün bildiğimiz küresel coğrafya şekilleniyordu. Ilık ve büyük oranda buzsuz bir zaman aralığıydı

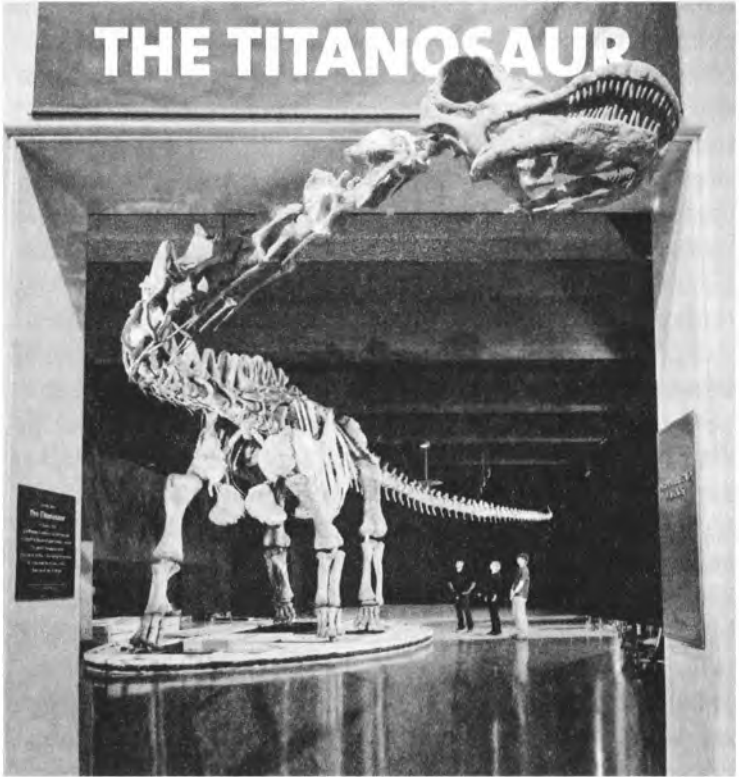
ancak levha tektoniği kara kütlelerini yeniden dağıtıp dağları meydana getirirken bir kez daha yeni bir buz devrinin tohumları atılıyordu fakat bu olaya daha vardı.

ŞİMDİ DİNOZORLARLA İLGİLİ TEMEL SORULARA geri dönebiliriz. Bir dinozorun tanımlanması aslında oldukça alelade şekilde gerçekleşmiştir. Paleontologlar 1800'lerin başlarından itibaren bugün var olan herhangi bir tetrapoddan farklı bir dizi devasa fosil keşfettiler ve bunlara akılda kalıcı bir isim verdiler: dinozorlar (Yunancadaki “korkunç kertenkele” kelimesinden gelmektedir.) Günümüzde bu hayvan grubu soyağacındaki yerlerine göre tanımlanır: Dinozor ailesi, bu ilk bulunan dev yaratıkların son ortak atasını ve onun soyundan gelenleri içerir. Neyse ki bu tanım, birisi dinozorlardan bahsettiğinde zihnimizde canlanan görüntüyle oldukça uyumludur ancak göreceğimiz üzere şaşırtıcı bir sonuç da doğurur.

Dinozorları düşündüğümüzde çoğumuzun aklına devasa yaratıklar gelir, otoburları bile epey korkutucu görünür. Bu durum genel anlamda doğru olsa da bilinen en küçük dinozorlar aşağı yukarı yalnızca 7 kilogram ağırlığındaydı, yani minyatür schnauzer köpekleri kadardı. Omurgalı türlerinin bedensel büyüklükleri konusunda son dönemde yapılan bir derleme, üyeleri ister memeli, ister kuş, ister amfibi veya balık olsun çoğu grubun boyut dağılımında egemenliğin küçük bedenlerde olduğunu, daha büyük türlerin dağılımsal kuyruğun alçak ve uzun ucunda yer aldığını göstermiştir: Yani çok sayıda kemirgen vardır ama pek fazla fil bulunmaz. Bununla birlikte dinozorlar farklıdır; esasında onların sayısı büyük bedenlerde yoğunlaşır.

Dolayısıyla sekiz yaşındaki herhangi bir çocuğun da söyleyebileceği üzere çoğu dinozor gerçekten büyüktü. Peki ama neden? Dinozorlar tarih boyunca Yerküre’de gezinmiş diğer tetrapodlardan niçin farklıydı? Bu sorunun cevabı konusunda fikir birliğine ulaşılammış olsa da Alınan paleontolog Martin Sander ve çalışma arkadaşları, bana da oldukça mantıklı gelen bir hipotezde bulunmuştur.

İlk dev dinozorlar ve esasında tüm zamanların en büyük dinozorları, saropodlardı. En büyük temsilcileri titanozorlar olan bu uzun boyunlu otoburların boyları 37 metreye, ağırlıkları da 70 ile 90 tona ulaşabiliyordu. (New York'taki Amerikan Doğa Tarihi Müzesi'nde sergilenen muhteşem örnek, akıllıca bir yaklaşımla kafası koridordan dışarı çıkacak şekilde yerleştirilmiştir, bu durum yarattığın muazzam boyutlarını vurgulamaktadır. [Resim 39]) Sander ve çalışma arkadaşları bu uzun boynlara özellikle dikkat çeker.



Resim 39. *Patagotitan mayorum*, New York'taki Amerikan Doğa Tarihi Müzesi'nde sergilenen devasa bir titanozor iskeleti. İskelet burundan kuyruğa kadar 37 metre uzunluğundadır. © Amerikan Doğa Tarihi Müzesi/D. Finnin

Dikkat çekici boyunları saropodların, diğer bitki yiyicilerin ulaşamadığı besinlere ulaşmasını ve büyük alanlarda minimum hareketle yiyecek aramasını sağlıyordu. Boyutları arttıkça besin kaynaklarını toplama konusundaki verimlilikleri de artıyordu. Saropodların uzun boyunları kafalarının küçüklüğü dolayısıyla mümkündü ve hadrozor veya tiranozor kafalarını taşıyamazdı. Küçük kafalar ise saropodlar, söz dinleyen çocukların aksine yiyeceklerini çiğnmeden yuttuğu için mümkün oluyordu. Dalları öylece ve hızlıca ağızlarıyla kıstırıp üstündekileri sıyrıyor, yaprakları ve tohumları hemen hemen bütün olarak yutuyordu.

Timsahların aksine dinozorların kuşlarınkine benzer bir solunum sistemi vardı. Bu sistem, dev bir gövdede oksijenin verimli şekilde taşınmasını kolaylaştırıyor ve daha da önemlisi, boynun ağırlığını hafifleten sayısız hava boşluğuna sahip omurların oluşumuna imkân veriyordu. Ayrıca saropodların metabolizma hızları da yüksekti, bu da hızla büyümelerini mümkün kılıyordu; yetişkinleri yavrularından 100.000 kat daha büyük olabilen bir canlı türü için gerekli bir özellikti. Günümüzde hayvanlar genellikle, çok fazla kalori yakarak yüksek vücut ısını koruyan sıcakkanlı hayvanlar veya vücut sıcaklığını çevreye göre düzenleyen soğukkanlı hayvanlar olarak sınıflandırılır. Sıcakkanlı memeliler ve kuşlar, yüksek iç sıcaklıklarını korumak için yiyecek olarak aldıkları enerjinin çoğunu kullanırlar. Dinozorlar, günümüzde kuşlar ve diğer memelilerle bağdaştırdığımız anlamda sıcakkanlı olmasa da hem aldıkları besinin daha büyük bölümünü büyümeye ayırabilmiş hem de metabolizmanın hızla çalışmasını teşvik eden farklı bir yolla yüksek vücut sıcaklıklarını koruyabilmiş gibi duruyor. Tahmin edebileceğiniz gibi burada kilit nokta, vücut büyüklüğüydü. Bir hayvan büyüdükçe hacminin bir kuvveti (uzunluğun küpü) olarak ürettiği ısı da artar, vücut ısısı ise yüzey alanının bir kuvveti (doğrusal boyutların karesi) olarak dağılır. Dolayısıyla dinozorların ulaştığı büyük boyutlarda yüksek iç sıcaklıklar pasif olarak korunabiliyordu. Yakın zaman önce bu görüşe, Saropod kemikleri üzerinde yapılan kimyasal analizlerden destek gelmiştir. Söz konusu analizler

saropodlarda şu anda yaşayan memelilerin çoğunda olduğu gibi 36 ile 38°C'lik bir vücut sıcaklığını işaret etmektedir.

Vücut büyüklüğü saropodlar için yırtıcılara karşı güçlü bir savunma sağlıyordu. (Fillerin leoparlardan korktuğu nadirdir.) Buna yanıt olarak yırtıcılar daha da büyümüş, bu durum bir bütün olarak dinazorlar arasında evrimsel anlamda bir silahlanma yarışını tetiklemiştir. Neticede karadaki ekolojik ve fizyolojik açıdan avantajlı noktalar korkunç kertenkelelerin eline geçmiştir. Erken dönemlerdeki memeliler de dinazorlarla aynı topluluklarda yaşamış ancak benzeri büyük boyutlara ulaşamamıştır. Bu memelilerin çoğu hayatta kalabilmek için dinazorların yolundan çekilmiş ve günümüzde pek çok memeli türünün yaptığı gibi gece olduğunda veya ağaçlarda ya da oyuklarda yaşamıştır. Güçlüye karşı zayıfın yanında olmayı sevenlerin içini rahatlatmak için de erken dönemdeki bu memelilerin en azından bir kısmının dinazor yumurtalarını yediğini belirtmek gerekir.

DİNOZORLARI NESLİ TÜKENMİŞ HAYVANLAR olarak düşünmeyi tercih ederiz ancak daha önce yaptığımız dinazor tanımını doğru kabul edersek bu düşüncemiz yanlıştır. Arka bahçenizde bile canlı dinazorlar vardır: Örneğin ispinozlar, bülbüller ve serçeler. Kuşların, dinazorların soyundan geldiği düşüncesi bir buçuk yüzyıl öncesine, Darwin'in en ateşli savunucusu olan T. H. Huxley'e dayanır. Huxley 1868 yılında şöyle yazmıştır: "Sürüngenlerden kuşlara giden yol dinozorlardan geçiyor... kanatlar ilkel ön uzuvlardan doğmuştur." Huxley, kuş iskeletleriyle Geç Triyas ve Erken Jura Dönemi kayalarında bulunan küçük bir dinazor olan *Kölofiz*'in iskeleti arasındaki anatomik benzerliklere özellikle dikkat çekmiştir.

Ara ürün karakteri taşıyan fosiller bir kez daha iddiayı destekledi. Bavyera'daki bir kireç taşı ocağından 1855'te ve 1861'de dikkate değer iki fosil çıkarıldı. *Arkeopteriks* adı verilen fosiller, çağdaşları olan küçük dinazorlarinkini andıran genel bir iskelet yapısı ortaya koyuyordu ancak ön uzuvları kanatlara benzer şekilde uzanmıştı. (Resim 40) Kafatası kuş gagalarına benze-



Resim 40. Dinozorlarla kuşlar arasında bağ kuran çarpıcı bir fosil örneği olan *Archaeopteryx lithographica*. Bu, Berlin'deki Museum für Naturkunde'de sergilenen orijinal numunedir. © H. Raab (Kullanıcı: Vesta)/ kaynak: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Archaeopteryx_lithographica_\(Berlin_specimen\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Archaeopteryx_lithographica_(Berlin_specimen).jpg)

yecek şekilde değişmişti fakat çeneler hâlâ dişlerle kaplıydı. Daha da şaşırtıcı olanı *Arkeopteriks*'in tüylerle örtülü oluşuydu. (Berlin'deki ikonik *Arkeopteriks*örneği Humboldt Müzesi'nde görülebilir; örnek ön planda olacak şekilde sergilenmekte ve Louvre Müzesi'ndeki Mona Lisa gibi kurşungeçirmez camla korunmaktadır.) *Tiktaalik*'in, balık-tetrapod geçişi meselesinde yaptığı gibi *Arkeopteriks* de evrim açasından nereden geldiğini ve nereye gittiğini ortaya koymaktadır. Son on yirmi yılda dinozor ve kuş ilişkisi, Çin'deki Kretase Dönemi yataklarında yapılan bir dizi yeni keşifle güçlenmiştir. Keşiflerde elde edilen fosiller, pek çok şeyin yanı sıra dinozorlar arasında akrabalık bakımından kuşlara en yakın olanların zaten tüylü olduğunu da göstermektedir. Pigment moleküllerinin korunmuş olması, bu öncü kuşlardaki renk modellerini yeniden oluşturmamıza dahi olanak tanıyarak “Siyah beyaz olan ve okunan şey neyin nesidir?”” şeklindeki eski bilmeceye yeni, bilimsel bir yanıt da sağlar. Erken dönemdeki proto-kuşlar avlarını yakalamak için muhtemelen uzun ön ayaklarını kullanmış olsa da nihayetinde süzölme ve daha sonra da aktif olarak uğma yeteneklerini geliştirdi. Uğmak için gerekli olan iskelet ve kas değişimleri Çin'deki çeşitli fosillerde görülebilmektedir. Uğma yeteneği yeni bir âlemin, yani gökyüzünün fethine imkân veriyordu. İlk uğabilenler pterozorlar oldu ve yakın zamanda, diğer küçük dinozorların da kuşlardan bağımsız olarak kanat geliştirdiği ortaya konmuş olsa da bu işi en iyi kuşlar başardı: Gökyüzüne hâkim oldular (Çok daha sonraları yarasalar da onlara katılacaktı.) ve daha da önemlisi, 66 milyon yıl önce yaşanan yeni çevresel felaketten de sağ kurtuldular. Dolayısıyla papağanınızla konuşurken, kartalların zarafetine hayran olurken, tavuğunuzu kızartırken veya kargaları bahçenizden kovarken kuşlara hak ettikleri sayęıyı gösterin; onlar kudretli dinozor soyunun sağ kurtulanlarıdır.

* Orijinali “What's black and white and red all over?” olan ve “red” (kırmızı) ile “read” (okunmuş) kelimelerinin benzer telaffuzunu kullanan ve kelimesi kelimesine tercümesi “Siyah beyaz olan ve boydan boya okunan nedir?” olan bu bilmecenin esas cevabı “gazete”dir. Bilmece zaman içinde farklı yanıtlar da bulmuştur fakat burada renkler ve onların okunmuş oluşuna gönderme yapılmaktadır. (y.h.n.)



7

Felaketler Dünyası

SOYLARIN TÜKENMESİYLE
HAYAT YENİDEN ŞEKİLLENİYOR

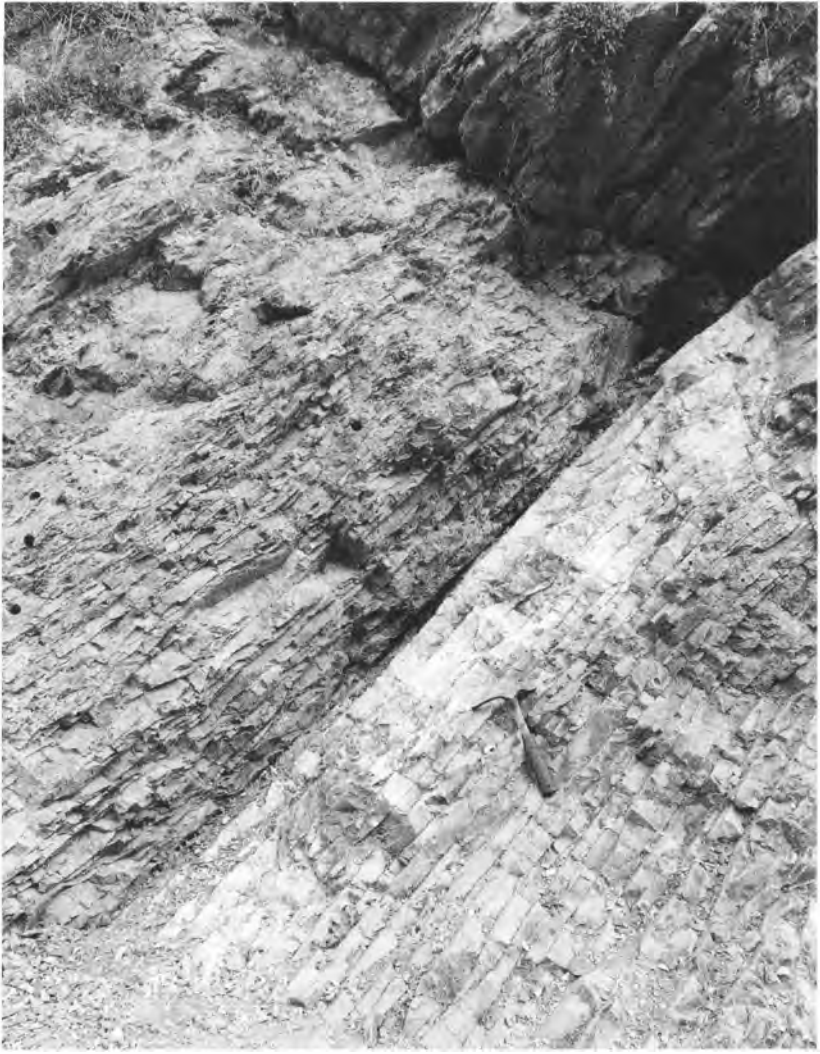


İTALYA'DA BİR ORTAÇAĞ KASABASI GUBBIO'NUN yakınlarında yer alan derin bir geçit Apenin Dağları'nı derinlemesine yarar. Kanyon duvarları boyunca uzanan kayalar, alelade gözlere tekdüze görünebilir; uzun zaman önce derin bir deniz tabanında birikmiş olan ince granüllü kireç taşı tabakaları birbiri ardına sıralanmaktadır. Bu kireç taşları fosillerle doludur fakat (Hatta büyük ölçüde protozoaların, "foraminiferler" adı verilen küçük kalsiyum karbonat iskeletlerinden ve "kokolito-foritler" adı verilen mikroskobik alglerden oluşurlar.), minik boyutları nedeniyle bu kalıntılar kayaların yüzeyinde belirgin olarak görülemez. Gerçi doğru yere dikkatle bakarsanız ilgi çekici bir özellik görürsünüz. Yüzlerce metre kireç taşının üzerinde ve benzer çok sayıda yatağın altında biraz olsun karbonat minerali içermeyen bir santimetrelilik bir kil tabakası bulunur. (Resim 41) Bu kireç taşlarını laboratuvara götürüp her bir yatağı mikroskop altında tek tek incelediğinizde başka bir bilmeceye rast gelirsiniz: Kil tabakasının altında bulunan mikrofosil türleri arasında kilin üzerinde de varlığını sürdürenlerin sayısı çok azdır.

Gubbio'daki kil tabakası, Kretase ve Paleojen dönemleri (ayrıca Mezozoik ve Senozoik çağlar) arasındaki sınırı işaretlemekte ve 66 milyon yıl önce hem kara hem de denizdeki belirgin biçimde farklı biyotaları ayıran zamansal bir çit vazifesi görmektedir. Mezozoik Çağ'ı yeniden kurgulayabilmemizi sağlayan mikrofosil türleri, deniz kayalarında görünüş itibarıyla bir anda ortadan kaybolur. Kalamarların akrabası olan ve Mezozoik okyanuslarda en büyük çeşitliliğe sahip ve bol rastlanan etoburlar arasında yer alan ammonitler de başka pek çok tür gibi toplu olarak yok olur. Karadaysa uzun süredir hâkim olan dinazorlar son nefeslerini vermiştir. Anlaşılan o ki bütün bunlar, tam da Gubbio kil tabakasının temsil ettiği o anlık zaman diliminde gerçekleşmiştir.

Jeolog Walter Alvarez'in, 1970'lerin sonlarına doğru Gubbio'nun kalın kireç taşı yataklarının manyetik özelliklerini incelemek üzere bölgeye gittiğinde dikkati, tek başına duran o kil tabakası tarafından cezbedildi. Bu tabaka ne kadarlık bir zaman dilimini temsil ediyor olabilirdi? Walt bu soruyu Nobel ödüllü bir fizikçi olan babası Luis Alvarez'e yöneltti. Alvarez'in pederine göre sorunun çözümü basitti: Minik mikrometeorlar sürekli olarak atmosferden yağıyor ve bunu bilinen hızlarda yapıyordu. Göklerden gelen bu haberciler, Dünya yüzeyindeki materyallerde nadir bulunan iridyum gibi elementler içerdiğinden Walt kil tabakasındaki iridyum miktarını ölçecek olursa tabakanın ne kadar zamanda biriktiğini hesaplayabilirdi. O da kimyager Frank Asaro ve Helen Michel'le birlikte tam da bunu yaptı: Yüksek iridyum miktarından yola çıkarak kil tabakasının oluşumunun milyonlarca yıl sürmüş olması gerektiğini hesapladı. Gelin görün ki Walt bu cevabın yanlış olması gerektiğini biliyordu. Görüleceği üzere bu yanıt hayret uyandıran, nefesleri kesen ve öğreten şekilde hatalıydı.

Eğer kildeki iridyum artışı, uzun bir zaman ölçeğine yayılan düşük birikim hızlarını göstermiyorsa buna alternatif olarak üretilebilecek düşünce, bu yüksek miktarda iridyumun kısa sürede ve muhtemelen büyük bir meteorun etkisiyle birikmiş olduğuydu. Alvarez ve çalışma arkadaşları bu iş için gerekli meteor boyutunun yaklaşık on bir kilometre çapında olması



Resim 41. İtalya'nın Gubbio kasabasındaki Kretase-Paleojen sınırı. Walter Alvarez meteor düşüşü sonucunda kitlesel yok oluş savını burada geliştirmiştir. Sağ alttaki beyaz kireç taşları Kretase Dönemi'nin sonlarına doğru çökelmiştir ve küçük foraminiferlerle kokolitoforid alglerin çeşitli iskeletlerini içerir. Sol üstteki kırmızımsı kalkerler Paleojen Dönemi'nin başında oluşmuştur ve bünyelerinde az sayıda foram ve kokolitofor türü barındırır. Bunları, beyaz bölgenin üstünde yer alan ve küçük tanelerden oluşan ince bir çamur taşı tabakası ayırır; meraklı jeologlar tarafından bu tabakanın bol bol numunesi alınmıştır. *Andrew H. Knoll*

gerektiğini hesapladılar. Böylesi bir çarpışmanın gezegen-
sel etkisi felaket boyutunda olur, dinazorların ve Paleojen
Dönemi'nde bir kez olsun şafağın söktüğünü görememiş olan
tüm diğer bitkilerin, hayvanların ve mikroskobik türlerin
soyunu tüketecek bir mekanizma yaratırdı.

Alvarez'in ekibinin 1980 yılında yayımladığı makale büyük
bir sansasyon yarattı; destekleyenler olduğu kadar şüpheyle
yaklaşanlar da vardı. Bu tartışma, biriken veriler durumu
kesin olarak Alvarez'in lehine çevirinceye kadar bir on yıl
sürdü. (Bu arada Walt 1980'lerin sonlarında Harvard'ı ziyaret
ettiğinde bizim evimizde kaldı. Onu, o zamanlar dört yaşında
olan kızım Kirsten'a, "Bay Alvarez dinazorlarla ilgileniyor,"
diyerek tanıttım. Kirsten hemen mest oldu, ben de bir risk
alıp işi bir adım daha ileriye taşıdım. "Günümüzde yaşamayı
sürdüren dinazorlar var mı?" diye sordum. "Hayır, şaşkın,"
diye karşılık verdi Kirsten, ses tonundan cehaletime yandığı
anlaşılıyordu. "Bir meteor onları öldürdü," dedi. Walt bir anda
koltuktan fırladı, kolları gol olduğunu gösteren bir hakem gibi
havaya kalkmıştı. Eğer çocuklar bu hikâyeyi kabul ettiyse bilim
insanları da edecekti elbette.)

Bilimdeki diğer meselelerde olduğu gibi Alvarez'in hipotezi
de oylamayla kabul edilmedi. Hipotez, kaya kayıtlarında ko-
runmuş olması gereken başka özelliklere dair varsayımlarda
bulunuyordu, dünyanın dört bir yanındaki jeologlar da bunları
araştırmaya koyuldu. İridyum anomalisi tüm dünyada sınır
zamanda oluşmuş kayalarda boy gösteriyordu, daha yaşlı ve
daha genç yataklardaysa yoktu. Kısa süre sonra aynı dönemde
birikmiş kayalarda "şoklanmış kuvars" adı verilen farklı bir
mineral. Şoklanmış kuvars yalnızca kısa süreli yüksek sıcaklık
ve basıncın söz konusu olduğu koşullarda meydana gelir; bu
koşullar da büyük bir meteorun etkisiyle oluşabilir. Zaman
içinde somut delil de bulundu: Tam da gereken vakitte oluşmuş
ve şimdilerde Yucatan Yarımadası'ndaki daha genç tortulların
altına gömülmüş olan yaklaşık 200 kilometre çapında bir me-
teor krateri. Aşağı yukarı 170 milyon yıl süren dinazor devrimi
bir felaketle son bulmuştu.

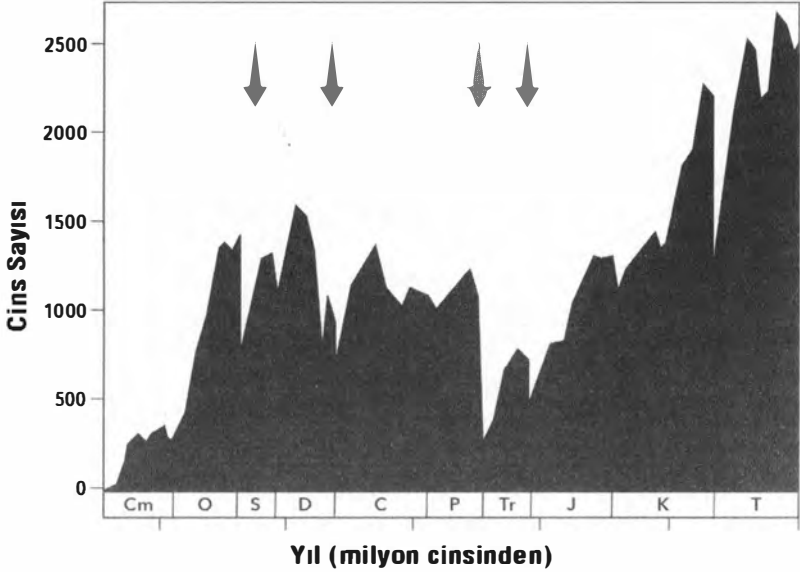
BİR PALEONTOLOĞA HANGİ FOSİLLERİN evrimle ilgili bilgilerimize katkı sağladığını soracak olursanız kendisi kitlesel yok oluşlara ve bunların yaşam üzerindeki derin sonuçlarına odaklanmadan önce muhtemelen dinozorlar, trilobitler ve dev kurtayağı bitkisi gibi uzun zaman önce ortadan kaybolan ve biyolojik ihtimallere dair algımızı genişleten organizmalara dikkat çekecektir. Durum her zaman böyle değildi. Yirminci yüzyıl ortalarının Neodarwinci evrim sentezi olarak adlandırılan yaklaşımına paleontoloji alanında en büyük katkırı sağlayan George Gaylord Simpson, 1944 yılında *Tempo and Mode in Evolution* [Evrimin Temposu ve Biçimi] adında oldukça etkili bir kitap yazdı. Simpson bu kitapta fosillerin ortaya koyduğu evrimsel modellerin, uzun zaman aralıklarında işlerlik gösteren popülasyon genetiğini yansıttığını öne sürdü. Argümanları açık ve inandırıcıydı; nihayetinde Neodarwinci sentezin amacı, popülasyon genetiğini doğal seleksiyonun ve dolayısıyla da zaman içinde gerçekleşen evrimsel değişimin altında yatan mekanizma olarak gösterebilmektir. Bununla birlikte Simpson, büyük bir kararlılıkla popülasyon genetiğine odaklanarak evrim açısından anahtar görevi gören bir jeolojik dersi kaçırmış oluyordu. Dünya, üzerinde dinamik popülasyonların evrimleştiği pasif bir platform değildir; gezegenimiz, hem geçici ve bölgesel hem de uzun vadeli ve küresel olmak üzere değişen ölçeklerde sürekli olarak dönüşüm gösteren çevresel koşullarıyla birlikte beslediği popülasyonlar kadar dinamiktir. Çevresel bozulma, biyotayı kısa, keskin bir şoka maruz bıraktığında da türler ve hatta ekolojik yapı çökebilir. Popülasyon genetiği türlerin kökenini sağlamlaştırır ancak türlerin kalıcılığı genellikle Dünya'nın çevresel dinamizmine göre belirlenir. Önceki bölümlerin ipuçlarını verdiği ve Kretase sonu olaylarının açıkça ortaya koyduğu üzere bugün etrafımızda gördüğümüz biyolojik çeşitlilik, popülasyon genetiği kadar kitlesel yok oluşu ve çevresel değişimi de yansıtmaktadır. Memelilerin, Senozoik Dünya'da yayılabilmiş olmalarının tek sebebi popülasyon genetiği değildir; bazılarının, Kretase sonunda yaşanan ve dinozorların sağ çıkamadığı felaketten sağ çıkmış olması da burada bir etkindir.

Alvarez hipotezi, paleontolojik düşüncayı kitlesel yok oluş konusuna odaklamada çok etkili oldu, bu konuda ilave bir itici güç de hemen hemen aynı dönemde şekil alan başka bir projeden geldi. Ben 1970'lerde yüksek lisans öğrencisiyken benim gibi öğrenci olan arkadaşım Jack Sepkoski zaman içindeki fosil çeşitliliğini tasnif etmeye başladı. Jack bunu deneyen ilk kişi değildi ama azmi ve detaylara gösterdiği dikkat sayesinde fosil kayıtlarında bulunan deniz hayvanlarının her bir takımının, ailesinin ve nihayetinde cinsinin ilk ve son kez görüldükleri tarihlere ilişkin kayda değer bir veri tabanı oluşturmayı başardı. (Jack haklı bir öngöründe bulunup türleri tasnif etmekten kaçınmıştı. O detay düzeyindeki kayıtların, tortulların bolluğu ve numune toplayanların alışkanlıkları neticesinde ön yargıya gebe olduğu düşüncesindeydi.) Jack'in topladığı veriler, biyolojik çeşitlenme sürecinin hiçbir zaman düz bir şekilde ilerlemediğini gösterdi. Hayvan çeşitliliği Kambriyen ve Ordovisyen dönemlerinde arttı ama Ordovisyen Dönem'in sonlarına doğru düştü. Yeniden toparlandı derken Geç Devoniyen Dönemi'nde bir kez daha düştü, sonrasında bu döngü Kretase Dönemi'nin sonu da dahil olmak üzere üç kez daha tekrarlandı. Yeryüzü'nün biyotası, son 500 milyon yılda toplamda beş kitlesel yok oluş süreci geçirdi, bunun yanı sıra yarım düzine kadar da daha küçük çaplı yok oluşlar yaşandı. (Resim 42)

Alvarez'in hipotezi, başlarda Sepkoski'nin dalgalanan çeşitlilik portesine genel bir açıklama getirebilirmiş gibi görünüyordu. Belki büyük meteorlar büyük yok oluşlara sebep olmuş, daha küçük çarpmalar da daha küçük çaplı yok oluşlar getirmişti. Evet, bu basit bir yaklaşımdır ancak yanlış olduğu ortaya çıkmıştır. Sadece Kretase sonunda yaşanan yok oluş güvenilir bir şekilde meteor çarpmasıyla ilişkilendirilebilir.

Bilinen en büyük kitlesel yok oluş Kretase Dönemi'nin sonunda değil, bundan 252 milyon yıl önce, Permiyen Dönem'in sonunda meydana gelmiş ve deniz hayvanı türlerinin yüzde 90'ından fazlasının yok olmasıyla sonuçlanmıştır. (Bu iki büyük yok oluş olayının Fanerozoik Devir'in çağları arasındaki sınırlarda gerçekleşmesi tesadüfmüş gibi görünebilir ama elbette öyle değildir. On dokuzuncu yüzyıl paleontologları, jeolojik

zaman ölçeğini fosilleri baz alarak oluşturmuşlar, Permien ve Kretase dönemlerinin sonunda yer alan belirgin paleontolojik değişimler de bu dönemlerin Dünya tarihini alt bölümlere ayırmak açısından doğal noktalar olarak sivrilmesine neden olmuştur.)



Resim 42. Zaman içinde deniz hayvanlarının cins düzeyindeki çeşitliliğine ilişkin bir derleme; Jack Sepkoski'nin büyük çabalarıyla oluşturulmuştur. Oklar, son 500 milyon yılda çeşitliliğin hızla düştüğü beş farklı zamanı yani kitlesel yok oluşun yaşandığı "Büyük Beşli"yi işaret etmektedir.
Kaynak: Sepkoski's Online Genu Database

Permien Dönem'in sonundaki biyolojik felaket, Çin'in Meishan kentinde bir dağın yamacında keşfedilen kayalara açıkça kazınmıştır. (Resim 43) Bu jeolojik alanı bulmak oldukça kolaydır çünkü bölgesel idare, yöredeki bu jeolojik alanı korumak, sergilemek ve işletmek için gösterişli bir jeo-park inşa etmiş durumdadır. İnsanların bu süslemeleri bir yana dursun, Meishan'daki kayalar tüyler ürpertici bir hikâye anlatmaktadır. Dağ tabanına yakın konumdaki kireç taşları Geç Permien Dönem deniz hayvanlarının fosilleriyle doludur: dalı bacaklılar,

yosun hayvancıkları, derisi dikenliler, büyük iskeletli tek hücreliler ve daha fazlası. Geç Permiyen Dönem kıyıları boyunca yüzebilseydiniz sığ deniz tabanına dağılmış çeşitli hayvanları, deniz yosunlarını ve protozoaları gözlemlerdiniz. Gelin görün ki kesitin yarısında bu fosiller öylece ortadan kaybolmaktadır. Hem de hepsi birden. Fosiller bıçak kalınlığında bir noktada kesilir, daha genç kayalarda da tekrardan ortaya çıkmaz. Dağ yamacını tırmanmayı sürdürdüğümüzde onların yerine çoğu istiridye ve salyangoz olmak üzere yalnızca birkaç küçük fosil görürüz.

Tüm bunları Meishan'da ilk kez gördüğümde varoluşsal anlamda şaşırtıcı şekilde bir kaybolmuşluk hissettim: Çok sayıda yaşam hızla ve sonsuza dek ölüvermişti. Peki ama tam olarak ne olmuştu? Yanıt anlamında ilk adım Meishan'ın kireç taşları arasına serpilmiş, ince volkanik kül tabakalarından geliyor: Yok oluş çizgisinin hemen üstünde ve altında yer alan kül tabakaları sırayla 251.941 ± 0.037 ve 251.880 ± 0.031 milyon yıl yaşlarında olduklarını açığa vurmaktadır. Bu kesin tarihler yarım kıta uzakta, Sibirya Tuzaklarında gerçekleşen baş döndürücü bir jeolojik olayla çakıştıklarından önem arz ediyor.

Jeoloji jargonunda "tuzak" kelimesi bazalt veya diğer koyu renkli volkanik kayaların birikimini ifade etmektedir; bunlar genellikle, basamakları andırır şekilde üst üste binmiş yataklar halinde keşfedilir. (İsveç dilinde *trappa* olarak ifade edilir.) Ural Dağları'nın doğusunda yer alan Sibirya Tuzakları, yoğun bir bazaltik kayaç taşkınına belgeler. Söz konusu bazaltik taşkın, Hawai Adası'ndaki taşmayı akla getirir. Sibirya Tuzakları tip itibarıyla günümüzde gözlemlenebilen volkan püskürmelerine benzese de boyutları baş döndürücüdür. Tuzakların, varlığını sürdüren alanı su seviyesi üstünde yaklaşık yedi milyon kilometrekaredir ve bu da aşağı yukarı Avustralya Kıtası'nın boyutuna karşılık gelmektedir. Genel olarak 2.500 metre kalınlığındaki tuzakların hacminin dört milyon kilometreküp olduğu tahmin edilmektedir; bu haliyle biz insanların veya yakın akrabalarımızın bugüne kadar şahit olduğu en büyük volkanizmadan bir milyon kat daha büyüktür. Titizlikle gerçekleştirilen radyometrik tarihlleme işlemi, bu devasa yığının



Resim 43. Çin'in Meishan kentinde keşfedilen Permilen-Triyas sınırı. Sağ alt kısımdaki devasa tabakalı kayalar, fosil açısından zengin Geç Permilen kireç taşlarıdır. Kayalar birdenbire, bunların üzerinde, çok az fosil içeren ince taneli kireç taşlarına dönüşmektedir. Tortul kaya tipindeki değişimle işaretlenen zaman noktasında deniz hayvanı türlerinin yaklaşık yüzde doksanının soyu tükenmiştir. *Andrew H. Knoll*

büyük bölümünün, Meishan'da kaydedilen yok oluşlarla aynı zamanda püskürdüğünü göstermektedir.

Batı Asya'daki volkanik faaliyetleri, Çin'de güzelce örnek-lendirilen ama esasında küresel olarak gözlemlenen biyolojik felaketle nasıl ilişkilendirebiliriz? Sibiry Tuzakları, geniş çaplı olmakla birlikte bütün Dünya'yı kaplamaktan uzaktı. Dola-yısıyla küresel çaptaki yok oluşlar yalnızca lavların altında kalındığı sonucunu vermez. Muazzam boyutlardaki volkanik faaliyetlerin küresel ortamları nasıl etkilediğini sormamız ge-rekir. Volkanlar, lavları bölgesel olarak saçarken atmosfere büyük miktarlarda gaz enjekte eder. Enjekte edilen gazların başında da iklim üzerindeki etkilerini daha önce gördüğümüz jeolojik bir aktör olan karbondioksit gelir. Permien Dönem sonu volkanik faaliyetleri atmosferdeki ve okyanuslardaki CO₂ içeriğini kısa sürede katbekat artırmıştır.

Yirmi yılı aşkın bir süre önce arkadaşım Richard Bambach'la birlikte Permien Dönem sonundaki kitlesel yok oluşla ilgil-enmeye başladık. Diğer paleontologlar daha önce yok oluş delillerini incelemiş, kurbanların ve hayatta kalanların coğrafi, çevresel veya taksonomik özelliklerinde anlamlı örüntülerin peşine düşmüşlerdi. Onların aksine Dick ve ben, fizyolojiye yani organizmalarla çevreleri arasındaki biyolojik ara yüze yöneldik. Kendimize bilhassa, yaşamın çok yüksek miktarda karbonhidratın atmosfere enjektesinden nasıl etkileneceğini sorduk. O sırada Sibiry'daki volkanik faaliyetler hakkında çok bir şey bilmiyorduk ve dürüst olmak gerekirse yok oluş konusundaki motivasyon modelimiz" de yanlıştı. Yine de elde ettiğimiz sonuçlar aydınlatıcı oldu. Kütüphanede geçirdiğimiz aylar, bizlere fizyologların on yıllar süren laboratuvar deney-lerinden edindikleri bilgileri öğretmişti. Yüksek yoğunluklar-daki karbondioksit, birçok organizma için bulundukları çevre koşullarını ve fizyolojilerini eşit ölçüde etkileyen bir felaket demekti. Bununla birlikte bütün canlı türleri üzerindeki etkisi aynı değildi; Bir kesim nispeten daha toleranslıyken bir başkası bilhassa özellikle hassas olabiliyordu. Biz de fosillerden mantık

* Bilim insanlarının kararlarına sebebiyet veren hedeflerin, stratejilerin ve etkenlerin kaydı. (y.h.n.)

çerçevesinde elde edilebilecek anatomik ve fiziksel özelliklerin bir listesini oluşturduk ve bu listeyi Geç Permiyen Dönem deniz faunasını iki gruba ayırmak için kullandık: Gruplardan birinin ani CO₂ artışına karşı daha toleranslı olması beklenirken diğer grubun hassas olacağı tahmin ediliyordu. Permiyen Dönem sonunda yok olanlara ve hayatta kalanlara dair elimizdeki kayıtlar, tahminlerimizle dikkate değer bir uyum göstererek karbondioksit ve diğer volkanik gazların, fiziksel açıyla biyolojik felaket arasındaki bağlantıyı oluşturduğunu saptamış oldu.

Sibiryaya Tuzaklı volkanik faaliyetleri atmosfere muazzam miktarda karbondioksit enjekte etmiş ve CO₂'nin sera gazı özelliklerinden dolayı küresel ısınmaya neden olmuştur. (Sibiryaya Tuzakları birikmiş turbanın bulunduğu geniş alanlara yayıldığı için ısınan organik maddeden metan gazı da [CH₄] oluşmuş ve sera gazı etkisini artırmış olabilir.) Isınma, deniz suyuna karışabilecek olan O₂ miktarını azalttığı için denizler, özellikle de doğrudan teması olmayan yüzey altı suları oksijen yönünden fakir hale gelmiştir. Salınan CO₂'nin deniz suyuna karışması da suyun pH'ını düşürmüştür. (Şu anda buna "okyanus asitlenmesi" diyoruz.) Yirmi birinci yüzyıldaki küresel değişimin biyolojik sonuçlarını anlama konusunda en çok çaba gösterenlerden biri olan Alman fizyolog Hans Otto Pörtner, küresel ısınma, okyanus asitlenmesi ve oksijen tükenmesini "ölümcül üçlü" olarak adlandırmaktadır. Bu faktörlerden her biri biyotaya tek başına zarar verme yetisine sahip olmakla kalmaz, Dünya sisteminde diğerleriyle birlikte ortaya çıkar ve sinerjik etki gösterir, yani her bir faktör diğerlerinin etkisini daha da kötüleştirir. O dönemde artan CO₂'nin doğrudan fizyolojik etkilerinden biri olan hiperkapni de rol oynamıştır. Örneğin, yüksek karbondioksit seviyelerinde O₂'yi vücuda taşıyan proteinler oksijen yerine CO₂'yle bağlanıp oksijen metabolizmasına mâni olabilir.

CO₂'nin yarattığı zincirleme çevresel ve fizyolojik etkileri, en belirgin şekilde büyük karbonat iskeletler oluşturan ancak bu iskeletlerin mineral birikiminin kaynağı olan sıvılarda değişiklik yapmak adına sınırlı fizyolojik kapasiteye sahip hayvanlarda, örneğin mercanlarda görmemiz gerekir. Buna

karşın yüksek metabolizma hızına sahip hayvanlar (Yüksek metabolizma hızı, onları gün bazında daha yüksek dahili CO₂'ye maruz bırakır.) daha yüksek toleransa sahip olmalıdır. Aynı şey gaz alışverişi için solungaçlara veya akciğerlere ve gelişmiş bir dolaşım sistemine sahip olan hayvanlar için de geçerlidir. Bu durumu göz önünde bulundurarak yumuşakçaların, balıkların ve eklembacaklıların nispeten toleranslı olacağını tahmin edebiliriz. Permien Dönem'in sonunda volkanik faaliyetler şiddetlenirken biyoloji hakikaten de okyanuslardaki varlıkların kaderini tayin ediyordu. Neticede Paleozoik Dönem'e ait tüm mercanlar yok oldu. (Günümüz okyanuslarındaki mercanlar, bu yok oluştan sağ çıkan deniz anemonlarının iskeletlerinin Geç Triyas Dönemi'ndeki evrimini yansıtmaktadır.) Permien deniz tabanındaki en yaygın görülen, en çeşitli hayvanlar arasında yer alan ve fizyolojik anlamda miskin varlıklar olan dallı bacaklılar neredeyse tüm çeşitliliklerini kaybetti. Öte yandan istiridyeler ve salyangozlar hayatta kalmayı nispeten daha iyi başardı. Balıklar arasında, fizyolojilerine dayanarak yapılan tahminlere paralel olarak nispeten soyu daha az tükendi. Aslına bakarsanız günümüzde yemek tabağımızdaki karidesler, yengeçler ve istakozlar tarafından temsil edilen on ayaklı kabuklular da Permien'den Triyas Dönemi'ne geçildiğinde çeşitlendi.

Karada ise çoğu hayvan ve bitki küresel değişimin etkilerini hissetmiş olsa da belki buradaki canlı popülasyonu okyanus asitlenmesine veya oksijen tükenmesine maruz kalmadığından ve belki de karasal türler sıcaklık değişimine daha toleranslı olduğu için bu değişimin uzun vadeli etkileri, denizi büyük ölçüde değiştirenlerle kıyasla daha yumuşak olmuş gibi görünmektedir. Bir bütün olarak değerlendirildiğinde 200 milyon yılı aşkın süredir Dünya'daki okyanusların ayırt edici özelliği olmuş ekoloji modelleri ve çeşitlilik ortadan kaybolmuştu ve bunun sebebi dünya dışı bir etki değil, Sibiry toprakları boyunca mantodan şiddetle fışkıran sıcak magmaydı. Triyas Dönemi'nde çeşitlilik geri geldi ama artık farklı bir ekolojiye katkı sağlayan farklı gruplar vardı. Kitlesel yok oluş Paleozoik Dönem'i sona erdirdi ve tıpkı Kretase sonu felaketinin Mezo-

zoik Dönem defterini kapatıp Senozoik dünyamıza güç verdiği gibi alelacele Mezozoik Çağ'ı başlattı.

SİBİRYA TUZAKLARI, MAHŞERİ BOYUTLARINA rağmen jeolojik açıdan eşsiz değildir. Mantodan gelen ve belli bir bölgeye odaklanan ısının tetiklediği büyük hacimli lavlar, son 300 milyon yılda karasal alanda veya deniz tabanında on bir kez püskürmüş ve en az bir başka kitlesel yok oluşla daha küçük çaplı birçok olayı açıklamak adına bir mekanizma sunmuştur. Deniz yaşamı, Permien sonu yok oluşunun ardından Triyas Dönemi'nde (201 ile 252 milyon yıl önce) yeniden çeşitlenerek birkaç milyon yıllık bir zaman diliminde yeni ve farklı ekosistemlere yol açmıştır. Gelin görün ki Triyas Dönemi başladığı gibi sona erdi: İskoçya'nın batı kıyısı açıklarındaki Fingal Mağarası ve New York'taki Palisades'ten Fas'ın Atlas Dağları'ndaki siyah uçurumlara ve günümüzde Amazon ormanları tarafından gömülmüş olan geniş çaplı döküntülere kadar uzanan bir kemer üzerinde muazzam miktarlarda lav püskürmesi gerçekleşti. Biyolojik çeşitlilik böylece bir kez daha dibe vurdu. Triyas Dönemi sonundaki yok oluşun seçiciliği ve okyanuslardaki hayatta kalabilme durumu, Permien Dönem'de olanları yansıtmaktadır; resifler her iki süreçte de bilhassa ağır darbelere maruz kalmıştır. Tüm cinslerin tahminen yüzde 40'ı ve türlerin yaklaşık yüzde 70'i okyanuslardan kaybolmuştur; bu oranlar, Permien Dönem sonu yok oluşundakilerin epey altında kalsa da çarpıcıdır. Karada ise omurgalıların Triyas Dönemi'ndeki çeşitliliği, volkanik faaliyetler ve bu faaliyetlerin biraz daha öncesinde yaşanan iklim bozulmaları tarafından azaltılmış, önceki bölümde belirtildiği üzere Geç Triyas Dönemi topraklarının baskın unsurları olan çeşitli timsahların soyu tükenmiş, diğer yandan dinozorlar ve memeli atalar hayatta kalarak Geç Mezozoik ekosistemlerin büyük ve küçük canlılarının varlığına sebebiyet vermiştir.

Geç Mezozoik Dönem'e ait jeolojik deliller, okyanus derinliklerinin büyük kesitlerinin binlerce yıl boyunca oksijen açlığı çektiği, ilave birkaç zamanı belgelemektedir. Bu olaylardan en az iki tanesi hem muazzam büyüklükte volkanik faaliyetlerle

hem de artan hızda bir yok oluşla ilintilidir; biri yaklaşık 183 milyon yıl önce, ikincisi de 94 milyon yıl önce gerçekleşmiştir. Bu “küçük çaplı” yok oluşlarda tahminlere göre tüm deniz canlısı cinslerinin yüzde 15 ile 20’si ortadan kaybolmuştur. Hatta Kretase Dönemi’nin sonunda büyük bir volkanik faaliyet de gerçekleşmiştir. Bazı bilim insanları, Hindistan’ın Deccan Tuzakları volkanizmasının, Kretase Dönemi sonu kitlesel yok oluşun gidişatını etkilediğine inanmaktadır. Volkanizma bunu ya çevreyi bozup darbe için zemin hazırlayarak ya da havaya büyük miktarda gaz püskürtüp darbenin etkisini şiddetlendirerek yapmıştır. Lavlar üzerinde yapılan bazı radyometrik tarihlendirmeler ilk görüşü desteklerken bazı sonuçlar da ikinci görüşe dayanak sağlamaktadır. Neyse ki devasa volkanik faaliyetler tortullar üzerinde kimyasal izler bırakabilmektedir, söz konusu izler Deccan volkanik faaliyetlerinin, yok oluştan önce başladığını gösterir. Gelin görün ki jeolojik bağlam ne olursa olsun nedensellik konusunda son sözü fosiller söyler. Kretase Dönemi sonundaki yok oluşa ve hayatta kalabilen canlılara dair gözlemlenen örüntüler, devasa volkanik faaliyetlerle güvenilir şekilde ilişkilendirebileceğimiz diğer yok oluşlarla pek fazla benzerlik taşımamaktadır, bu da Mezozoik dünyanın kapısının kapanışında meteor etkisinin önemini vurgular.

İKİSİ DE PALEOZOİK DÖNEM’DE gerçekleşen son iki kitlesel yok oluş ise hem sebep hem de sonuç açısından farklılık göstermektedir. Bölüm 5’te Kambriyen ve Ordovisyen Dönemlerindeki çeşitlenmenin, okyanuslarda çeşitli ekosistemler oluşturduğunu öğrenmiştik. Gelin görün ki bu çeşitlilik 445 milyon yıl önce, Ordovisyen Dönem’in sonlarına doğru ortadan kalktı. Bu yok oluş, Güney Yarımküre merkezli, nispeten kısa (İki milyon yıl sürmüştür.) ancak belirgin bir buzul çağına denk geliyordu. Tüm deniz hayvanı cinslerinin neredeyse yarısına yakını yok oldu ama ekolojik yapıdaki parçalanma sınırlı seviyede kaldı; dünya tekrar toparlanırkendeniz tabanı toplulukları yok oluş öncesine oranla çok farklı görünmüyordu. Su sütunundaki yaşam ise daha fazla etkilenmişti; tribolitler

ve erken dönem omurgalılardaki çeşitlilikte keskin düşüşler söz konusuydu.

Ordovisyen Dönem sonundaki kitlesel yok oluşun geniş çaplı bir buzullaşmayla aynı zamana denk gelmesi biraz kafa karıştırıcıdır çünkü Dünya, geçtiğimiz 2,6 milyon yıl boyunca (Bölüm 8) bir buz devrine kilitlenip kalmış fakat o dönemde en azından deniz canlıları dünyasında yalnızca küçük bir yok oluş belgelenmiştir. Öyleyse Ordovisyen Dönem sonundaki dünyada işlerin farklı olmasının ne gibi bir gerekçesi vardı? O dünyayı öncekinden ayıran meselelerden biri deniz seviyesiyle alakalıdır. Buzulları oluşturan sular çoğunlukla okyanuslardan gelmektedir, dolayısıyla buz kütlesi artarken deniz seviyesi düşer. En son buz devrinde yaklaşık 130 metre seviyesinde gerçekleşmiş olan bu düşüş, Ordovisyen Dönem'in sonunda çok da farklı değildi. Deniz seviyesi, buzulların arttığı son dönemde olduğu gibi başlangıçta düşükse neticede ortaya çıkan yaşanabilir deniz tabanı kaybı nispeten az olur. Diğer yandan deniz seviyesi yüksek olduğunda büyük buzullar artıyorsa ve Dünya'nın alçak zeminli arazilerinin büyük bölümü sığ denizlerle kaplanmışsa bunun sonucunda deniz seviyesinde ortaya çıkacak olan düşüş, kıtaları kaplayan sığ denizleri kurutacak ve dünyanın sığ deniz tabanlarının büyük bölümünü sakinleriyle birlikte ortadan kaldıracaktır. Ordovisyen Dönem'de gerçekleşen de buydu.

Bir diğer konu da coğrafya ile ilişkilidir. İklim değişirken canlı popülasyonları, göç yollarının bulunması halinde daha yaşanabilir ortamlara taşınabilir. Örneğin Kuzey Amerika'nın doğusundaki bitki türleri, 2,6 milyon yıl önce buz kütleleri genişlerken Meksika Körfezi'ne yaklaşıp canlarını sağlama alabildi. Buna karşılık, Kuzey Avrupa'daki bitkiler, Alplerin oluşturduğu duvarı aşamadı, bu da önemli ölçüde bir yok oluşa sebebiyet verdi. Sığ okyanuslarda da göç yollarının kısıtlı olduğu yerlerde yok oluş en üst seviyedeydi. Örneğin derin denizlerin, göçü daha ılıman iklimlerle sınırlandırdığı Florida'da durum böyleydi. (Kendinize günümüz Dünya'sı ısınırken kutup ayılarının nereye göç edebileceğini sorun.) Yükselen ekvator dağları ve derin denizler de aynı şekilde Ordovisyen sonu göçünü engellemiş olabilir.

Göçü kısıtlayan durumlar da büyük ölçekli habitat kayıpları da tür kaybı örüntülerini Permiyen Dönem'in sonundaki felakete benzer şekilde görmemize neden olmamalı, dolayısıyla bir ihtimal, büyük çaplı tür kayıplarına rağmen ekolojik yapıların, Ordovisyen Dönem sonu kitlesel yok oluş esnasında varlığını nasıl sürdürebildiğini anlamamıza yardım etmelidir.

Seposki'nin "Büyük Beşli"sinin en az anlaşılan olayı, çeşitliliğin uzun bir zaman aralığında (359 ile 393 milyon yıl önce) düştüğü Geç Devoniyen Dönem'de meydana geldi. İlk olarak dallı bacaklılar ve deniz tabanında yuvalanmış olan diğer organizmalar yok oldu, ardından resif yapımına katkısı olan mercanlar ve son olarak da su sütunundan fışkıran erken dönem kafadanbacaklılar kayboldu. İlginçtir ki Devoniyen Dönem'deki çeşitlilik azalışı yok oluş kadar, düşük yeni oluşum hızını da yansıtır görünmektedir. Bu durum Dick Bambach'la beni, bu olayı, meşru bir kitlesel yok oluştan ziyade "kitlesel azalış" olarak adlandırmaya yöneltti. Çeşitlilik kaybının, yeni oluşum oranlarıyla ilişkili olduğu farklı çalışmalarla doğrulanmıştır ancak niçin böyle olduğu sorusu, araştırma konusu olmaya devam etmektedir.

DÜNYA'NIN BU OLAĞAN DIŞI ve tekrarlanan kitlesel yok oluş olaylarına ilişkin genellemeler yapabilir miyiz? Ortak nedensellikten bahsedemeyiz çünkü farklı yok oluşların göktaşlarıyla, buz devirleriyle ve büyük volkanik faaliyetlerle ilişkili olduğu görülmektedir. Ekolojik etki de genelleştirilemez: Yok olma olayları birbirine zıt ekolojik etkilere işaret etmektedir, ekosistemdeki bozulmalar da tür kaybının şiddetini birebir yansıtmaz. Bulabildiğimiz ortak nokta şudur: Her bir yok oluş olayında çevresel bozulma hızlı olmuştur; çevresel değişimin hızının, büyüklüğü kadar önemli olduğu görülmektedir. Çevresel değişim yavaş olduğunda canlı popülasyonları farklılaşan koşullara adaptasyon gösterebilir fakat çevresel değişim hızla gerçekleştiğinde adaptasyon zor olabilir, dolayısıyla göç etmek veya yok olmak, eldeki yegâne seçenekler olarak kalır. Kitlesel yok oluşlar, Dünya'daki veya

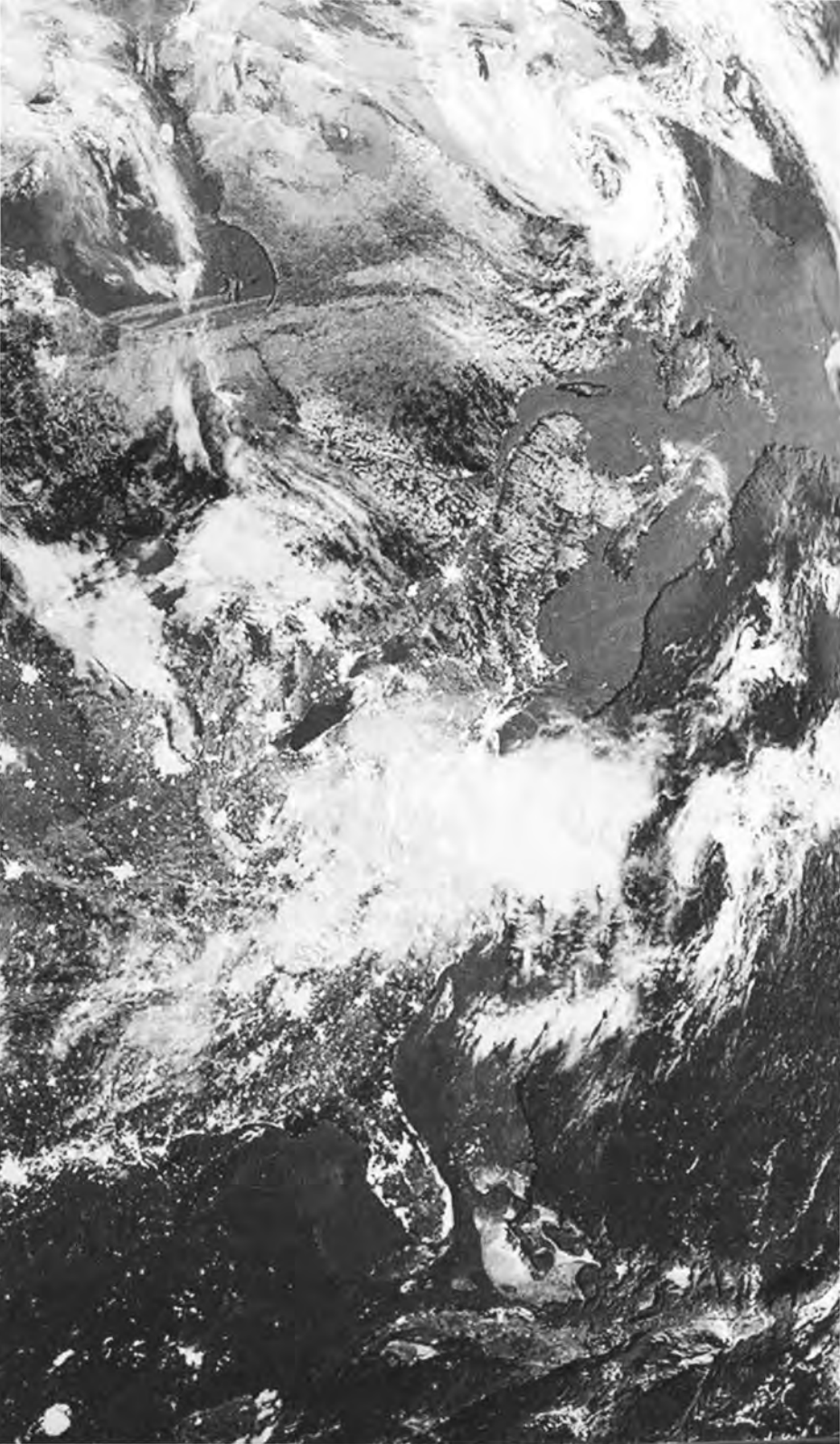
kozmetik evrenimizin başka herhangi bir yerindeki mekanizmalarla tetiklenen, geçici fakat büyük çaplı çevresel bozulmayı yansıtmaktadır. Kitlesele yok oluşların zaman ölçeğı kısa olsa da çeşitliliğın yeniden oluşturulması uzun zaman alır, yüz binlerce hatta milyonlarca yıl gerekir: Büyük çaplı kitlesele yok oluşlardan sonraki toparlanmanın uzun zaman aldığını bize fosiller söylemektedir.

Kitlesele yok oluşlar evrim tarihinin şekillenmesi açısından tartışmasız büyük rol oynamıştır. Modern dünyanın memelilerle dolu olmasının sebeplerinden biri, dinozorların soyunun tükenmiş olmasıdır. Açık okyanustaki balıklar, ancak Kretase sonundaki kitlesele yok oluşun ammonitleri ortadan kaldırmasından sonra yayılmıştır. Günümüzdeki resiflerde modern mercanlar, yumuşakçalar ve yengeçler yer alır; bunun ana sebebi eski resif sistemlerinde sıralanmış mercanlar, dallı bacaklılar ve trilobitleri sayıca geride bırakmış olmaları değil, bu canlı gruplarının kitlesele yok oluşla büyük oranda ortadan kalkmış olmasıdır. Bir yağmur ormanında dolaştığınızda ya da bir mercan kayalığı üzerinde şnorkelle yüzdüğünüzde Dünya’da tekrar tekrar yaşanan kitlesele yok oluşlardan sağ kalan canlılara baktığınızı aklınıza getirebilirsiniz.

Peki, bu tekrar yaşanabilir mi? Büyük göktaşları ve devasa volkanik faaliyetler nadiren görülse de bir daha bunlarla karşılaşmayacağımızı düşünmek için herhangi bir sebep bulunmamaktadır. MÖ. 43’te Alaska’daki bir volkanın patlaması sert kışların yaşanmasına ve Avrupa’da geniş çapta görülen bir mahsul kıtlığına neden olmuş, Roma İmparatorluğunun çöküşüne katkıda bulunmuştur. Gayet yakın bir tarih olan 1815 yılında ise Endonezya’daki Tambora Dağı’nın zirvesi havaya uçarak bölge halkından binlerce insanı canından etmiş ve New England gibi uzak bir bölgeye kadar “yaz mevsimi olmayan bir sene” yaşanmasına neden olmuştur. Tabii bir de Pompei’den var. (Napoli şehrinin, yaklaşık 4.000 yıl önce meydana gelen bir patlamanın enkazının üzerinde oturmaktadır.) Büyük meteor çarpmaları ise kesinlikle daha ender yaşanmaktadır ancak 1908’de Sibirya’nın (neyse ki) seyrek nüfuslu bir bölümünde yaklaşık 80 milyon ağacı yerle bir eden devasa bir patlama olan

Tunguska Olayı, bir kuyruklu yıldızın veya göktaşının havada parçalanmasına bağlanmaktadır.

Neyse ki küresel anlamda yıkıma yol açacak büyüklükteki volkanlar ve göktaşları milyon yıllık zaman ölçeklerinde nadiren görülür, o yüzden yerinizde olsam onları çok fazla dert etmezdim. Bence çok daha endişe verici olan unsur, sokakta yürürken gördüklerinizdir: Bu da sizin ve çocuklarınızın yaşam süreci içinde Dünya'yı ve yaşamı derinden değiştirebilecek etkiye sahip olan insan popülasyonudur.



⑧

İnsan Dünyası

BİR CANLI TÜRÜ GEZEĞENİ DEĞİŞTİRİYOR



KRETASE DÖNEMİ SONUNDAKİ FELAKETİN son kolları yaklaşık 66 milyon yıl önce soğumaktayken gezegenimiz yeni bir evreye girdi. Hayatta kalan bitkiler ve hayvanlar neredeyse hemen çeşitlenmeye başladı, birkaç yüz bin yıl içinde de karada yenilenmiş ve dirençli ekosistemler oluşturdu. Halihazırda ılık olan Dünya sonraki on beş milyon yıl içinde atmosferde nispeten bol olan karbondioksitin, sera gazı etkileri sebebiyle daha da sıcak hale geldi. Alaska'da palmiye ağaçları filizlenirken Kanada'nın Kuzey Kutbu hattında timsahlar yüzmeye başladı. Dinozorların sahneden çekilmesiyle beraber memeliler yeni biçimler alacak şekilde çeşitlenip karasal toplulukların baskın bileşenleri haline geldi. Bilhassa ilgi çekici olan, tropik ağaçlarda yaşayan ve muhtemelen böceklerle beslenen minik, cadı maki benzeri yaratıklardı: Bunlar, atalarımız olan ilk primatlardı.

Senozoik Çağ boyunca yaşam ve çevre koşulları birbiriyle uyum içinde değişim gösterdi. Kıtalar, daha öncesinde, süper kıta Pangea'nın parçalanmasıyla başlamış olan küresel yayılmaya devam etti. Atlantik Okyanusu önemli ölçüde genişledi ve Rocky

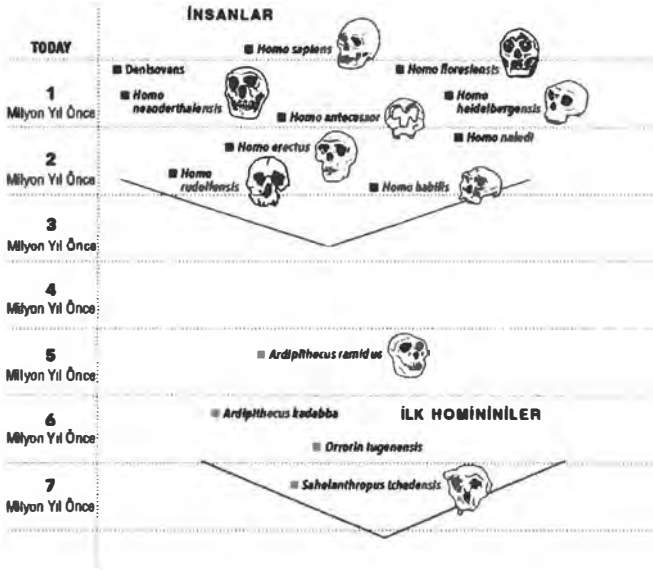
Dağları, Alpler ve Himalayalar görkemli şekilde göklere yükseldi. Yükselen dağlar aşınma oranlarını artırarak atmosferden karbondioksit çekilmesine neden oldu, bu esnada kaymakta olan levhalar da okyanuslardaki deniz suyu sirkülasyonuna yeniden yön verdi. Neticede Dünya soğumaya başladı. Palmiyeler, timsahlar ve sıcak seven diğer türler yüksek enlemlerden geri geldi ve çayırlar, kıtaların iç kesimlerde ormanların yerini almaya koyuldu. Buzullar da 35 milyon yıl öncesine gelindiğinde Antarktika boyunca yayılma hareketlerini başlattı.

Bu dinamik fiziksel ortamda primatlar geniş araziler boyunca yayılıp lemurlar, cadı makiler, maymunlar ve primat soyağacında bizim dalımızda yer alan büyük maymunlar gibi çok çeşitli canlılara sebebiyet verdi. Hikâyeyi 6 ile 7 milyon yıl öncesinden, küresel soğumanın, Dünya'nın bir başka buz devrine yaklaşmasını hızlandırmaya başladığı zamandan alalım. Afrika'da, kıtanın iç kısımları kurudukça açık ağaçlık alanlar ve çayır düzlükler gitgide artan bir hızla ormanların yerini almaya başlamış, habitattaki bu değişiklik neticesinde en yakın akrabalarından farklılık gösteren ve günümüzde şempanzeler ve bonobolar tarafından temsil edilen yeni bir büyük maymun soyu meydana gelmişti. Homininiler olarak adlandırılan bu yeni maymunlar genel anlamda şempanzeye benziyordu: Ufak tefek vücutları, küçük bir beyinleri, çıkıntılı burunları ve ağaç tepeleri arasında hareketi kolaylaştırmak için uzanıp kıvrılan parmaklara sahip uzun kolları vardı. Gelin görün ki homininiler son derece önemli bir açıdan diğer büyük maymunlardan ayrılıyordu: Dik yürüyebiliyorlardı.

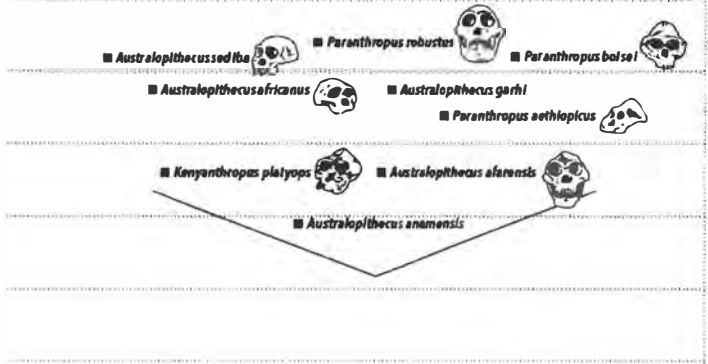
Büyük maymunlar arasında yalnızca insanlar dik yürüyebilir, duruş ve hareket şeklimiz bir dizi anatomik adaptasyon neticesinde mümkün hale gelmiştir. Bu adaptasyonlar arasında dik gövdeyi dengeleyen kavisli bir alt omurga, yürümek için gerekli kasların işini kolaylaştırmak üzere yeniden yapılandırılmış bir pelvis, başı doğrudan gövdenin üzerine yerleştiren dikey bir boyun ve belirgin bir topuğu olan kavisli bir ayak yer alır. Sizin sahip olduğunuz bu özelliklere, ilk homininiler de belli ölçüde sahipti. Bu ataları, 6 ile 7 milyon yaşındaki kayalarda bulunan iskelet parçalarından tanıyoruz ancak onlara dair en sağlam

bilgimiz Etiyopya'da 4,4 milyon yıllık bir kaya içinde bulunan ve iyi korunmuş olan genç bir kadın iskeleti üzerinden geliyor. *Ardipithecus ramidus* veya kısaca Ardi olarak adlandırılan bu kadın, insanların ve şempanzelerin ortak atasında mevcut olması muhtemel birçok özellik göstermektedir: Usta bir tırmanıcıdır, ağaçlarda evinde gibi hissetmektedir. Bununla birlikte Ardi, meyve ve başka yiyecekler bulmak için açık ağaçlık alanlarda yiyecek de aramıştır. Bundan yüz yılı aşkın bir süre önce ilk kez Charles Darwin'in öne sürdüğü gibi iki ayak üzerinde hareket edebilmek başka işleri gerçekleştirebilmek üzere ellerin serbest kalmasını sağlamıştır; bu işler arasında zamanla araç gereç yapımı ve kullanımı da olacaktır. O halde iki ayaklılık, Ardi ve akrabalarını bize doğru gelen o yola sokmuştur. (Resim 44)

Ardi'nin zamanından bir süre sonra yeni bir hominin grubu ortaya çıktı. *Australopithecus* olarak adlandırılan bu maymunlar, en eski homininlere benziyor ancak sahip oldukları kilit farklılıklar onları insanlara giden evrimsel yolda daha ileriye taşıyordu. Çeşitliliklerinin ne kadar olduğunu tam olarak bilmiyoruz fakat bugüne kadar, hepsi de Afrika'da yer alan bir düzine kadar tür saptandı. *Australopithecus* kemikleri genel anlamda alışıldık olsa da bir kez daha bu iskeletlerden biri gruba sıra dışı bir ışık tutar. Lucy muhtemelen bütün insan öncesi homininlerin en ünlüsüdür. Etiyopya'da 3,2 milyon yıllık kayalar içinde keşfedilen ve adını, keşfedildiği dönemde popüler bir Beatles şarkısı olan "Lucy in the Sky with Diamonds"tan alan Lucy, şempanzelerle ve Ardi'yle yaklaşık olarak aynı boyuttaydı ama beyni belirgin biçimde daha büyüktü. Ağaçlar arasında zarafetle dolanmayı sürdürüyordu ama geniş kalçaları, kemerli ayakları ve ayaklarındaki kısa başparmakları, Lucy'nin daha önceki homininlere göre daha kolayca dik yürüyebildiğini göstermekteydi. Lucy'nin dişleri de farklıydı, uzun süreli çiğneme işlemine uygun düşen büyük azı dişleri vardı. Paleoantropologlar, Lucy ve akrabalarının şempanzelerden ve daha önceki homininlerden daha az meyve yediklerini, bunun yerine açık ormanlık alanlardan toplanan sert yumru köklere, tohumlara, yapraklara ve bitki gövdelerine bel bağladıklarını öne sürmektedirler.



AUSTRALOPİTHECİNLER



Resim 44. Son 7 milyon yıldaki hominini çeşitliliği: İnsanlar, bir zamanlar büyük çeşitliliğe sahip bu grubun hayatta kalan son halkasıdır.

İlave iki kanıt, australopithecine biyolojisini aydınlatmaya yardımcı olmaktadır. Mary Leakey 1976 yılında Tanzanya'daki 3,7 milyon yıllık kayalarda çok önemli bir dizi ayak izi keşfetti. Islak volkanik kül üzerinde yürüyen bir erkek, bir kadın ve bir çocuk 27 metre kadar uzanan bir yürüyüş yolu oluşturmuş, bu patika sonrasında daha fazla kül altında kalmıştı. Biyologlar, çamurda bıraktığınız izlerden yürüyüşünüz hakkında çok şey söyleyebilirler ve Tanzanya ayak izleri, australopithecinelerin günlerinin çoğunu ağaçlardan ziyade yerde geçiren başarılı yürüyüşçüler olduğunu göstermektedir.

İkinci kanıt da bir o kadar önemlidir: Kenya'daki 3,3 milyon yıllık kayalar bilinen en eski el aletlerini muhafaza etmekte ve australopithecinelerin (Hangi türleri olduğunu bilmiyoruz.) büyük, sert taşlardan keskin parçalar yontarak aletler yaptığını göstermektedir. İngiliz antropolog Kenneth Oakley 1957 yılında *Man the Toolmaker* [Araç Gereç Yapan İnsan] adını taşıyan ve alanında hayli etkili bir kitap yazdı. Diğer canlı türleri etraflarındaki objeleri basit araç gereçler olarak kullanabilmeleriyle bilinirken insanlar birçok farklı amaç için araç gereç tasarlayıp bunları inşa etme yetileri açısından eşsizdir. Kenya'da bulunan el aletleri, basit olsalar da otomobilleri, bilgisayarları ve frizbileri doğuracak olan evrimsel yolun, bizim türümüzün ortaya çıkışından çok daha uzun süre önce oluştuğunu göstermektedir.

HOMO SAPIENS yani bizler, Homo cinsinin mevcut yegâne türüyüz hatta yaşayan tek hominini konumundayız. (Resim 44) Diğer yandan, fosillere temelinde, *Homo* cinsine ait 13 tür daha tanımlanmıştır, bunlardan 11 tanesi resmi olarak adlandırılmıştır ama şu anda hepsinin soyu tükenmiş durumdadır. En yakın akrabalarımız 2 milyon yılı biraz aşkın bir süre önce tıpkı hominini ataları gibi Afrika'da çeşitlenmeye başladı. En iyi anlaşılan *Homo* cinsi atamız 1,9 milyon yıl ile 250.000 yıl öncesine tarihlenen kayalarda bulunmuş olan *Homo erectus*'tur. *Homo erectus* birçok birey sayesinde gayet iyi korunarak günümüze gelmiş olmasının yanı sıra iki sebeple göze çarpar: Birincisi, anatomisinin australopithecineler ve modern insanın

anatomi arasında ara ürün konumunda oluşudur; iskeleti insaninkine daha çok benzer ve beyni de Lucy'ninkinden daha büyük ama bizimkinden küçüktür. İkincisi, daha önceki tüm homininlerin aksine *H. erectus*'un yalnızca Afrika'da değil, Avrasya'da da var olmuş olmasıdır. O döneme gelindiğinde atalarımız artık tamamen yere inmişti ve avcılık-toplayıcılıkla besleniyordu. Hayvan kemiklerindeki kesik izleri, avlarını doğradıklarını ve Dünya tam teşekküllü bir buz devrine girerken kendilerine yeni ve önemli bir besin kaynağı sağladıklarını gösterir. Bu atalar, günümüzde avcı-toplayıcıların da yaptığı gibi grup içindeki sosyal bağı kuvvetlendirmek amacıyla büyük ihtimalle avlarını paylaşıyordu.

Homo sapiens olarak değerlendirilen en eski fosiller ise Fas'ta, 300 milyon yıllık kayalarda ortaya çıkmıştır. Bu fosiller, yeni ve daha sofistike bir araç gereç yapım kültürünün ve ateşin yaygın (ve kontrollü) kullanımının kanıtlarından yalnızca biraz daha erken bir tarihe aittir. Dolayısıyla türümüzün yeni teknolojilerle birlikte geldiğini söyleyebiliriz. Belki şaşırtıcı olacak ama atalarımız, bu buz devri Dünya'sını en az üç başka *Homo* türüyle doğrudan paylaşıyordu. Bunların en iyi bilinenleri, genellikle kaba saba tipler olarak karikatürize edilseler de aslında çeşitli araç gereçlere ve bizimkinden daha büyük beyinlere sahip gelişmiş avcı-toplayıcılar olan Neandertallerdir. Yel pazenin diğer ucunda ise Endonezya'da fosilleriyle birlikte daha yeni keşfedilen ve "hobbit" olarak adlandırdığımız küçücük bir akrabamız olan *Homo floresiensis* yer alır. Bunların haricinde bir de yalnızca Sibirya'daki 30.000 ile 50.000 yıllık mağaralarda ortaya çıkarılan parçalar vasıtasıyla bilinen ve bir parmak kemiğinde korunan DNA'larına bakılarak farklı oldukları anlaşılan Denisovanlar vardır. Artık elimizde hem Neandertallerin hem de Denisovanların fosillerinden elde edilen genomlar var ve bu genomlar sayesinde modern insanların, Neandertallerin ve Denisovanların yakın akraba olduğunu anlamakla kalmıyor, aynı zamanda geçmişin derinliklerinde, bu türlerin bireylerinin zaman zaman birbirleriyle çiftleşip melezler meydana getirdiklerini de görüyoruz. Çoğu insanın DNA'sında küçük bir miktar Neandertal geni karışımı bulunur; Melanezyalılar,

Avustralya yerlileri ve diğer bazı Asya popülasyonları, Denisovanlardan türemiş genlere de sahiptir. Tarih, genlerimizde canlanmaktadır.

İlk insanlar yalnızca Afrika'da yaşıyordu ancak 100.000 yıldan biraz daha uzun bir süre önce bir insan popülasyonu daha geniş bir dünyaya adım atıp Neandertallerle birlikte şu anda İsrail olan yerde ikamet etti. Sonrasında yani 50.000 ile 70.000 yıl önce, türümüz Asya ve Avrupa'ya hızla yayıldı. Peki, koloni kuran bu gözü pek kimseler neye benziyordu?

Almanya, Tübingen'de bulunan Antik Kültür Müzesi'nin derinliklerindeki pençeresiz bir odada, mamut dışından oyulmuş küçük hayvanlar mücevher gibi parlamaktadır. (Resim 45) Güneybatı Almanya'da bir mağarada bulunan hayvan figürleri, temsil ettikleri yaratıkları (mamutlar, atlar, büyük kediler ve daha fazlası) kayda değer bir canlılıkla gözler önüne serer. Bu figürler 40.000 yıllık yaşlarıyla bilinen, en eski temsili sanat örnekleri arasında yer almaktadır. Yakınılardaki bir mağaradan da yine mamut dışından yapılmış bir kadın figürü elde edilmiştir. En eski hayvan figürleriyle hemen hemen aynı yaşta olan bu eser, bilinen en eski insan tasviridir. Eski Dünya'nın her yanında bu ilk oymacıların çağdaşları da mağara duvarlarını hayvanların ve belki de ruhların enfes resimleriyle kaplamaya başlamıştı. Bilinen en eski mağara resimleri yaklaşık 44.000 yıl önce Endonezya'da yapılmıştır; duvarlarda tasvir edilen yarı insan yarı hayvan avcılar, sanatın yanı sıra maneviyata da işaret etmektedir. (Resim 46) Bu dönemin araç gereçleri de benzer şekilde yeni bir teknolojik devrimi yansıtmaktadır, taştan yapılmış aletlerin seri üretimine ince işlenmiş tığlar, iğneler, hatta kemikten yapılmış flütler eşlik etmiştir. Eski kemiklerden dil kullanımına dair bir çıkarımda bulunulamaz ancak bu kilit insan özelliğinin de söz konusu zaman aralığında ilerlediğini varsayabiliriz. Bu değişimlerin niçin bu dönemde gerçekleştiğini bilmiyoruz ama paleoantropolog Daniel Lieberman'ın dediği gibi "İnsanlar bir şekilde farklı düşünüyor ve davranıyorlardı". İnsanlar nihayet modern sıfatını elde etmişti.



45.



46.

Resim 45 ve 46. İnsanlığın ileriye doğru büyük atılımı: (Resim 45) Yaklaşık 40.000 yıl önce mamut dişinden oyulmuş harika hayvan figürleri. (Resim 46) Endonezya'da yaklaşık 44.000 yıl öncesine ait bilinen en eski mağara resimleri. Resim 45'in telif hakkı Museum der Universität Tübingen MUT'tan J. Lipták'a aittir; Resim 46, Ratno Sardi tarafından fotoğraflanmış ve Griffith Üniversitesi'nden Adam Brumm'ın izniyle kullanılmıştır.

Platon'un hikâyesinde olduğu gibi (Adrienne Mayor'ın sürükleyici eseri *Gods and Robots*'ta [Tanrılar ve Robotlar] yeniden anlatılmıştır.) tanrılar hayvanları yarattığında, onlara yetenek atama işini Prometheus ve Epimetheus adlı iki titana devretmişlerdir. Özellikle Epimetheus, görevi zevkle üstlenmiş; çitaları hızlı, yengeçleri zırhlı ve filleri büyük hale getirmiştir. İnsanlar ne yazık ki sona kalmıştır ve Epimetheus onlara gelene kadar elindeki bütün iyi özellikleri diğer canlılara dağıtmış durumdadır. İnsanları koca dünyada yaşam için gerekli özelliklerle donatmanın aciliyetini anlayan Prometheus bu noktada devreye girmiş, insanlara lisan, ateş ve teknoloji vermiştir; bütün bunlar tanrılardan çalıntıdır. Bu güzel hikâye antropologların görüşünden çok da uzak değildir; dili kullanma, ateşi kontrol etme ve araç gereç yapabilme yetisiyle donanan insanlar kendilerini hayvanlar âleminin geri kalanından ayırmaya başlamışlardır.

Atalarımız dönüşüme uğrayan Afrika topraklarına adapte olmaya çalışırken değişen çevre koşulları, insan evrimini

muhabbâk şekillendirmiştir. Diğer yandan Dünya tarihinin uzun vadeli hikâyesine baktığımızda organizmaların çevrelerini sadece yansıtmakla kalmadıkları görülür. Organizmalar çevrenin biçimlenmesine de yardımcı olur ve bu anlamda, insanlar da farklı değildir. Aslında farklıyız ama etkimizin küçüklüğünden değil, çok büyük olmasından ötürü. *Homo sapiens*, başlangıcımızdan itibaren etrafımızdaki dünyayı şekillendirmiştir ve şimdi bunu daha önce eşi benzeri görülmemiş biçimlerde yapmaktadır; şu an olanlar, Dünya'nın ve yaşamın uzun, senfonik dansının son figürüdür.

Yirmi bin yıl önce Kuzey Amerika'nın kuzey yarısını devasa bir buzul tabakası kaplamıştı. Cape Cod'dan Montana'ya uzanan buzdan bir sınırın güneyinde tundra, bozkır ve ladin ormanı dikkate değer bir memeli çeşitliliğini barındırıyordu. Bu memeliler arasında mamutlar ve mastodonlar, tüylü gergedanlar, mağara ayıları, ilk gri kurtlar, mağara aslanları, kılıç dişli kediler, atlar, develer, dev tembel hayvanlar ve VW Beetle büyüklüğündeki soyu tükenmiş armadillolar yani gliptodonlar yer alıyordu. Bunların hepsi, 10.000 yıl öncesine gelindiğinde ortadan kalkmıştı. Peki, ne olmuştu?

Buzlar yaklaşık 15.000 yıl önce erimeye başladı ve son bir soğuk dalgasından sonra Dünya aşağı yukarı 10.000 ile 13.000 yıl önce hızla ısınıp bugün yaşadığımız buzullar arası dünyayı meydana getirdi. Ben bu aralığa "buzul sonrası" yerine "buzullar arası" diyorum çünkü son bir milyon yıldır Dünya, Güneş etrafındaki yörüngesindeki metronomik varyasyonların belirlediği 100.000 yıllık bir zaman ölçeğinde buzul soğuğu ve buzullar arası sıcaklık arasında gidip geliyor. Günümüzdeki sıcaklığın, gelecekte yaşanacak yeni bir buzul artışına kadar buzullar arası bir zaman aralığından başka bir şey olduğuna inanmak için sebebimiz yok. En azından, endüstriyel insan ortaya çıkana kadar böyle düşünmek için bir neden bulunmuyordu.

Ilıman iklimler 10.000 ile 13.000 yıl önce Kuzey Amerika'ya yayıldıkça bitki popülasyonları kuzeye doğru göç etti ve bugün görülenlere benzemeyen topluluk kümelerine yol açtı. Bazı bilim insanları, değişen çevresel koşulların ve alışılmadık bitki örtüsünün memeli popülasyonlarının dibe vurmasına neden ol-

duğunu öne sürmüştür. Çevresel stres, gerçekten de memeliler arasındaki yok oluşlara zemin hazırlamış olabilir ancak önceki milyon yıllarda, benzer iklim değişimleri büyük çaplı herhangi bir tür kaybı yaşanmadan tekrar tekrar gerçekleşmişti. Ortada başka bir sebep var gibi görünüyor.

O sebep *Homo sapiens*'ten başkası değildir. İnsanlık Afrika ve Avrasya'da uzun bir geçmişe sahipken son buz devrinin hafiflediği evrelere kadar Yeni Dünya'ya gelmiş değildi. Arkeologlar yakın zamanda, insanların 16.300 ile 16.500 yıl önce Idaho'daki Salmon Nehri kıyılarında yaşadığına dair kanıtlar bildirdiler; bu olay, Kuzeydoğu Asya'dan gelen ilk göç dalgasını belgelemektedir. Bu göç hareketi muhtemelen Pasifik kıyısı boyunca gerçekleşmiştir. İlk olarak New Mexico, Clovis yakınlarında keşfedildikleri için Clovis adını verdiğimiz insan topluluğu da büyük memeliler ortadan kaybolmadan hemen önce hızla yayıldı, ayrıca yeni ve sofistike taş aletler yapmayı başardı. Çok sayıda av ve kesim alanının varlığı, Clovis kültürünü avcılıkla ilişkilendirir ve neticede bu da büyük memeli türlerinin Kuzey Amerika'dan yok olmasında insanların büyük rol oynamış olabileceğine işaret eder. Büyük olasılıkla hem avlanma hem de çevresel değişim söz konusuydu ancak insanlar olmasaydı kıtanın faunası bugün farklı görünüyordu olabilir. Avustralya'da da insanların 40.000 ile 50.000 yıl önce bölgeye gelişi, oradaki hayvanların yok oluşuyla aynı döneme denk düşmektedir. Kıyaslama açısından Sibirya'nın kuzeyindeki Chukchi Denizi'nde izole bir arazi parçası olan ve insanların yerleşmediği Wrangell Adası'ndaki mamutların, yaklaşık 4.000 yıl öncesine kadar hayatta kalabildiğini söylemek gerekir. Mısır firavunları nerede olduklarını bilselerdi, onları gösteriler için yakalayıp kullanabilirlerdi.

Öyleyse insanlar biyolojik dünyayı erkenden etkilemeye başladı ve yarattığımız etki zaman içinde ivme kazandı. İkinci ve nihayetinde belirleyici olmuş bir başka etki de yaklaşık 11.000 yıl önce İsrail ve Ürdün'den Suriye, Türkiye ve Irak yönünde kuzeye doğru kıvrılan bir hilal hattında ortaya çıktı. Burada insanlar önce tarımı geliştirdiler; incir, arpa, nohut ve mercimek yetiştirmeyi ve hasat etmeyi öğrendiler. Bin yıl

içinde koyunlar, keçiler, domuzlar ve sığırlar evcilleştirilmişti. Aslında tarım, Çin (9.000 yıl önce), Orta Amerika (10.000 yıl önce), And Dağları (7.000 yıl önce) ve Sahra Altı Afrika'nın (6.500 yıl önce) kesimleri dahil olmak üzere dünyanın çeşitli yerlerinde bağımsız olarak gelişti. Son dönemde bu kültürel dönüşüme ağıt yakmak moda haline geldi çünkü çiftçilik neticesinde avcılık ve toplayıcılığa göre hem daha fazla çalışmayı gerektiren hem de daha az besleyici ve daha az güvenilir bir diyet içeren bir yaşama geçilmiş oldu. Durum böyle olabilir ancak iPhone kullanan, filmlerin tadını çıkaran veya kanserden sağ kurtulanlarımız, tarım devriminin hızlandırdığı toplumsal yapılanmanın bazı avantajları olduğunu düşünebilir. Neticede tarımla birlikte daha fazla yiyecek üretmek için artık daha az insana ihtiyaç duyuluyordu, böylece diğer insanlar sanatla, icatlarla ve ticaretle uğraşabilmek üzere daha fazla boş vakit bulabilir hale geldiler.

Elbette, ekili alanlar ve otlaklar genişledikçe insanın doğa üzerindeki etkisi de buna orantılı olarak arttı. Kasabalar filizlendi ve bazıları şehirlere dönüştü. Nüfus arttı, ticaret yayıldı. Bununla birlikte insanların çevresel ayak izi ilk başta yavaş bir büyüme gösterdi. İsa zamanında veya bin yıl sonrasında yaşasaydınız, yaşamınızın hatta insanlığın gezegenimiz üzerindeki etkisi büyük ölçüde benzer olurdu. Sayımız bu aralıkta fazla değişmedi, dünya nüfusu 200 milyon civarında gezindi. Gelin görün ki insanlar olarak ayaklarımızın altındaki enerji kaynaklarından yararlanmayı öğrendikçe nüfus büyüklüğü, teknolojik yenilik ve çevresel etki gidişatı yüksek vitesa geçti: İki yüzyıldan daha kısa bir süre içinde beygir gücünden ve buhardan benzine ve jet yakıtına geçtik. İnsan nüfusu 1800 yılı civarında bir milyar noktasını geçip 1930'da iki milyara ve 1975'te dört milyara ulaştı. Önümüzdeki on yılda nüfusu bir kez daha iki katına çıkarma sürecini tamamlama yolundayız. Nüfusumuz büyüdükçe her bireyin çevresel etkisi de dikkate değer ölçüde arttı. Fosil yakıtlar on dokuzuncu yüzyıldan beri çıkarılıyor ancak kullanımları İkinci Dünya Savaşı'ndan bu yana neredeyse on kat artış gösterdi.

SANAYİ DEVRİMİ BAZI AÇILARDAN insanlığın altın çağını başlattı. Kamu sağlığı ve refahının getirileri, eşitlikten yoksun bir şekilde de olsa tüm dünyada geniş çapta yayıldıkça sayımız hızla arttı. Gelin görün ki yedi milyardan fazla insanı beslememize ve giydirmemize imkân veren yenilikler, şimdilerde Dünya'yı giderek daha sıkı bir mengeneye sıkıştırıyor. Baskı iki yönden geliyor: Organizmalar üzerindeki doğrudan etkiler ve Dünya'nın fiziksel ortamı üzerinde artan etki. Doğrudan etkilere verilebilecek başlıca örneklerden biri, günümüzde tarımın, Dünya'nın yaşanabilir alanının yarısını kaplayıp bir zamanlar bu topraklarda gelişmiş olan bitkileri, hayvanları ve mikroorganizmaları yerinden etmiş olmasıdır. Biz insanlar çevre kirliliği neticesinde doğal ekosistemleri de zora sokuyor; havayı, suyu, toprağı ve denizleri etkiliyoruz. Elbette kirlilik, ister Delhi'deki solunamayan hava ister Michigan Flint'teki içilemez su olarak yaptığı geri dönüşle olsun, insanlığa bir bedel ödetiyor. Bununla birlikte doğadaki canlı topluluklarının çeşitliliğini, üretkenliğini ve ekolojik direncini de baltalıyor; bu etkilerden ancak çok az sayıda ekosistem muaf kalıyor.

Bu noktayı örneklendirmek adına Meksika Körfezi'nde ve kıyılara yakın diğer deniz yollarında bulunan ve uğursuz bir şekilde "ölü bölgeler" olarak anılan yerlere bakabiliriz. Kuzey Amerika'nın orta bölgelerindeki çiftçiler, buğday ve mısır tarlalarına bol miktarda gübre atarlar. Bu gübreler mahsul verimini artırır ancak besleyici maddelerin büyük bölümü büyümekte olan bitkiler tarafından asla alınmaz, bunun yerine yağmur ve yer altı suları ile birlikte nehirlere akıp nihayetinde de Meksika Körfezi'ne dökülür. Körfez sularına ulaşan gübre burada nihayet işlerlik kazanıp mevsimsel alg oluşumunu destekler. Algler deniz tabanına doğru inerken solunum yapan bakteriler tarafından tüketilir, bu olay civardaki sularda bulunan oksijeni yok eder. Büyüme ve metabolizma için gerekli oksijenin bulunmadığı durumlarda da deniz tabanındaki veya yakınlarındaki hayvanlar büyük kitleler halinde ölür. Körfez'deki ölü bölge 1988 yılında ilk kez keşfedildiğinde yaklaşık 39 kilometrekarelik bir alanı kaplıyordu; 2017 yılında ise kapladığı alan 27.730 kilometrekareye çıktı, yani aşığı

yukarı New Jersey'nin boyutuna ulaştı. Tüm dünyada kıyılarında başka yüzlerce  l  bölge tespit edilmiştir, hepsi de deniz yaşamı açısından toksiktir.

Ayrıca bitki ve hayvanları besin maddesi veya ticaret için seçip kullanarak ve canlı türlerini doğal ortamlarından uzaklara taşıyıp bazılarının yabancı toplulukları istila edeceği bölgelere götürerek de biyolojik çeşitliliği doğrudan erkiliyoruz. Gezegenimizin en farklı ve görkemli hayvanlarından biri olan gergedan, aşırı sömürünün simgesi gibi durmaktadır. Boynuzlarının afrodizyak  zellikleri (Gerçek olduğu kanıtlanmamıştır.) nedeniyle Asya'nın bazı bölgelerinde takdir gören gergedanlar, Afrika ve Asya'da uzun süredir avlanmaktadır. Bunun neticesinde bütün gergedan nüfusu tehlikeye girmektedir ve bir zamanlar Orta Afrika'da bulunan kuzeyli beyaz gergedanın vahşi doğada yaşayan kesiminin soyu neredeyse tükenmiştir. Küresel çapta, avlanma neticesinde birçok kuş ve memeli popülasyonu sayıca epey azalmış durumdadır ve tepeli akbabalardan fillere kadar birçok türün torunlarımıza ulaşabilmek için aktif koruma altında tutulmaları gerekecektir.

Buna karşılık, deniz çoğumuza engin ve safmış, insanların tahribatına bir şekilde bağışkmış gibi görünür. Gelin görün ki son yıllarda bunun bir masal olduğu gün yüzüne çıkmıştır. Aşırı kullanımın nasıl bir şey olduğunu anlamak için ticari balıkçılığa bakmamız yeterli olacaktır. Yaklaşık üç milyar insan protein için deniz ürünlerine bel bağlamaktadır ancak son yirmi otuz yılda küresel çapta çalışan her altı balıkçılık işletmesinden biri batmıştır. Tüm ticari balık rezervinin yaklaşık yüzde otuzu sürdürülebilir limitlerin üzerinde kullanılmış ve geri kalanın büyük bölümü de ekolojik sınıra kadar avlanmıştır. Grand Banks'teki morina rezervlerinin çöküşü, işlerin ne kadar kötü gidebileceğini gözler önüne serer. Morina popülasyonu 1958'de 800.000 tondan fazla avlanmışken 1992'de ticari balıkçılık açısından soyu tükenmiş canlılar olarak ilan edilmiş, bu durum av bölgesine komşu olan Newfoundland'in kültürel dokusunun değişmesine neden olmuştur. Ticari balıkçılık yasaklanmış ama aradan neredeyse otuz yıl geçmesine rağmen morinalar hâlâ toparlanamamıştır.

Okyanusların büyüklüğü de benzer şekilde kirlenmelerinin önünde engel değildir. Her dakika yaklaşık bir çöp kamyonu değerinde plastiğin okyanuslara girdiği tahmin edilmekte, bu durumun denizlerin birçok bölgesindeki hayvan popülasyonlarına bedeli ağır olmaktadır.

HABİTAT BOZULMALARI, kirlilik, aşırı sömürü ve istilacı türler bir yüzyıldan fazladır doğal ekosistemlere zarar vermektedir. Avustralya'nın yerli memeli türlerinin yüzde 10'undan fazlasının Avrupa kolonizasyonundan bu yana ortadan kaybolduğunu, Kuzey Amerika kuş popülasyonunun 1970'ten bu yana yaklaşık yüzde 30 oranında azaldığını veya Avrupa çayırlarındaki böcek popülasyonunun son on yılda yaklaşık yüzde 80 düşüş gösterdiğini okuduğumuzda bu çarpıcı istatistiklerin, mevcut zararı büyük ölçüde yansıttığını görürüz. Bununla beraber torunlarımızın, insanlığın Dünya üzerindeki en büyük etkisi olarak göreceği mesele daha yeni yeni şekilleniyor. Yirmi birinci yüzyıl devam ederken habitat tahribi ve benzeri zararlar, ortadan kaybolmak bir kenara kendisi de önemli ölçüde değişim gösteren bir gezegen üzerinde gerçekleşecek. İleriye dönük en büyük hikâye, küresel ısınma, yani insanın karbon döngüsüne katılarak Dünya'nın değişiminde önemli bir faktör olarak rol alması olacak.

Yaklaşan felaketi anlayabilmek için bir kez daha karbondioksit ve iklim arasındaki temel ilişkiye ve daha geniş anlamda da Dünya ve karbon döngüsüne dayalı yaşam arasındaki etkileşimlere bakmamız gerekiyor. Kısaca gözden geçirecek olursak: Bitkiler ve diğer fotosentetik organizmalar havadan ve sudan CO_2 'yi uzaklaştırıp büyüme ve çoğalma için gerekli biyomolekülleri oluşturmak üzere de karbon kullanır. Hayvanlar, mantarlar ve sayısız mikroorganizma bu moleküllerle solunum yaparak enerji elde eder ve karbonu, CO_2 halinde çevreye geri verir. Fotosentez ve solunum bütünüyle olmasa da büyük oranda birbirini dengeler, bütünüyle olmamasının sebebi de solunumdan ve ilişkili süreçlerden kaçıp tortul halinde biriken organik maddelerdir. Bu gömülü organik maddelerin

bir kısmı petrol, kömür ve doğal gaz oluşturmak üzere olgunlaşır. Onlar da yüzeydeki karbon döngüsüne katılacak ancak bunu ağır ağır yani milyonlarca yıl içinde levha tektoniği, bu tortuları dağlara çevirip kimyasal aşınmaya ve erozyona açık hale getirdikçe yapacaktır. En azından Sanayi Devrimi'ne kadar işler böyle yürümüştür.

Karbon döngüsünün fiziksel tarafında ise volkanlar atmosfere CO_2 verirken kimyasal bozunma CO_2 'yi uzaklaştırır, karbon da nihayetinde kireç taşı olarak birikir. Bu süreçler bir araya geldiğinde atmosferdeki karbondioksit oranını belirler. CO_2 güçlü bir sera gazı olduğu için zaman içinde iklimi de şekillendirir. Yedinci bölümde 252 milyon yıl önce yani Permien Dönem'in sonunda devasa volkanların, atmosfere çok büyük miktarlarda CO_2 göndererek küresel ısınmayı, okyanus asitlenmesini (deniz suyunun pH değerinde fizyolojik açıdan önemli bir düşüş) ve deniz sularında oksijen tükenişini tetiklediğini öğrenmiştik. Karada ve denizlerde, biyolojik çeşitlilik yıkıma uğramıştı. Volkanik faaliyetlerin ardından gelen sıcak dönemde, kimyasal bozunma hızı arttı, atmosferdeki CO_2 oranının volkan felaketi öncesi seviyelerine dönmesi binlerce yıl aldı.

Volkanlar, doğanın karbon döngüsünü bozmak için kullandığı araçlar olabilir ancak insanlar da yeni ve bir o kadar güçlü mekanizmalar oluşturdular: Fosil yakıtları kullandılar ve tarım için ormanları yok ettiler. Yüz milyonlarca yılda oluşan kömür, petrol ve doğal gaz şimdi karbonlarını inanılmaz hızlarda atmosfere geri veriyor. Yirmi birinci yüzyılda insanlar, atmosfere dünyadaki tüm volkanların toplamından yüz kat daha fazla karbondioksit gönderiyor. Bununla birlikte teknolojik insanlar olan bizler, CO_2 'nin atmosfere ve okyanuslara katılma hızını çarpıcı biçimde artırmış olsak da CO_2 'nin uzaklaştırılma hızını artırmak için (henüz) hiçbir şey yapmadık, bu nedenle etrafımızdaki havada bulunan CO_2 oranı giderek yükseliyor.

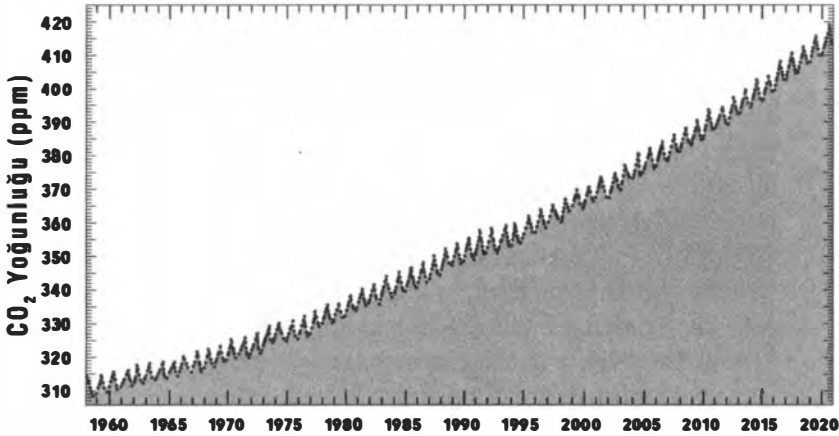
Daha sıcak olan Dünya nihayetinde kimyasal bozunma hızını artırıp Permien Dönem sonu yok oluşunun ardından yaptığı gibi atmosferdeki karbondioksiti yeniden dengeleyecektir ama geçmiştekine benzer şekilde bu olay binlerce yıl alacaktır.

Bizim, çocuklarımızın ve torunlarımızın hayatı açısından bakıldığında CO₂ yalnızca artış yönünde ilerleyen tek yönlü bir yolculuk olarak görünmektedir.

Atmosferdeki CO₂'nin yükseldiğini biliyoruz çünkü bunu ölçebiliyoruz. (Resim 47) Charles David Keeling 1958'de Mauna Loa Dağı'nın tepesindeki bir istasyondan saat başı okumalar alarak atmosferin bileşimini gözlemlemeye başladı. (Bugün de devam eden bir programdır.) Keeling bu işe başladığında Hawai'deki hava, milyonda 316 partikül karbondioksit içeriyordu. CO₂ miktarı 2020 mayıs ayı itibarıyla Dünya üzerinde en son milyonlarca yıl önce görülmüş bir değer olan 417 ppm'e yükseldi. Büyük toplumsal değişimler yaşanmaması halinde yüzyıl ortasında 500 ppm'e ulaşacağız. Bu da Antarktik buzullar ortaya çıkmadan önceki sıcak dünyadaki havaya benziyor ve insanlık tarihinin veya hominini atalarımızın deneyimlediği tüm seviyelerden daha fazlası anlamına geliyor.

Gözlemlenen CO₂ artışının esas olarak fosil yakıtların yakılmasından kaynaklandığını biliyoruz çünkü fosil yakıtlar havaya kimyasal bir imza bırakıyor. Son altmış yılda, bazı bilim insanları atmosferdeki karbondioksit miktarını ölçerken bazıları da CO₂'nin karbon izotopu bileşimini ölçmüştür. Karbonun iki kararlı izotopu olan karbon-12 ve karbon-13'ün oranı, Dünya'nın en büyük karbon rezervleri arasında farklılık gösterir ve bizler bu farklılıkları atmosfere katılan CO₂'nin kaynağını belirlemek için kullanabiliriz. Volkanik gazdaki karbondioksit ve deniz sularında çözünmüş halde bulunan CO₂ bu anlamda işimize yaramaz çünkü izotop bileşimleri, atmosferdeki CO₂'nin değişen izotop bileşimini açıklayamaz. Buna karşılık fotosentez yoluyla oluşan organik madde, verileri açıklamak için tam da gerekene sahiptir. Sadece kararlı izotoplara dayanarak bakıldığında atmosfere katılan CO₂'nin kaynağının ormanların ortadan kaldırılması veya fosil yakıtlar olduğu söylenebilir ancak meseleye karbonun üçüncü izotopu karbon-14'ün analizlerini eklediğimizde cevap netleşir. Karbon-14 radyoaktif olup binlerce yıllık bir zaman ölçeğinde azota bozunduğundan canlı organizmalarda az miktarda bulunur fakat milyonlarca yıl önce oluşmuş fosil yakıtlarda saptanmaz.

Ölçümler, atmosferdeki CO₂'de bulunan oransal karbon-14 miktarının zamanla azaldığını göstermektedir. Bu azalma, atmosferdeki CO₂ artışının ana kaynağının, gelişen toplumun enerji ve ısı sağlamak için insanlar tarafından yakılan kömür, petrol ve doğal gaz olduğunu ortaya çıkarır.



Resim 47. Hawai'deki Mauna Loa'nın tepesindeki bir istasyondan 1958'den beri saat başı ölçülen atmosferdeki karbondioksit miktarı. Yıllık bazda görülen küçük salınımlar, Kuzey Yarımküre'de ekvatorun altına kıyasla daha fazla arazi bulunduğunu, dolayısıyla kuzeyde yaz aylarında çok daha fazla fotosentez yapıldığını ve bunun karbondioksit seviyelerini düşürdüğünü gösterir. Kuzey kışında fotosentez yavaşlar ancak solunum, hızını koruyarak karbondioksiti atmosfere geri kazandırır. *Scripps Oşinografi Enstitüsü*

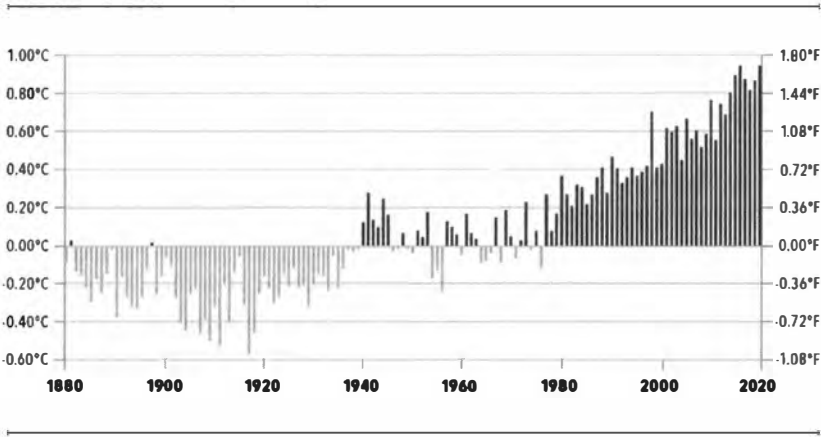
Atmosferdeki sera gazını artırdığımızda Dünya yüzeyinin ısınmasını beklemeliyizdir, zaten gerçekleşen de tam anlamıyla budur. Bizler bu olayı da ölçebiliyoruz. (Resim 48) Günümüzde Dünya'yı uydular aracılığıyla gözlemliyoruz ancak yüzyıl önceki sıcaklıkları eski meteorolojik ve oşinografik kayıtlardan elde etmek durumunda olduğumuzdan kesinlikten yoksun bazı veriler ortaya çıkıyor. Bununla birlikte bilim dünyası, son yüzyılda gezegenimiz yüzeyinin ortalama sıcaklığı 1°C'den biraz daha az artış gösterirken kutupların daha düşük enlemlerdeki bölgelere göre daha hızlı ısındığı konusunda

hemfikiridir. Uluslararası Paris Anlaşması (2016) dünyaya, küresel ısınmayı, endüstri öncesi değerlerin maksimum 2°C üzerinde olacak şekilde sınırlandırma sözünü verdirir. Gelin görün ki şimdiden bu noktanın yarısına yaklaştığımız durumdayız ve başarılı olmamız halinde muazzam bir fayda sağlayacak olsak bile var oluş tarzımızı önemli ölçüde değiştirmedığımız sürece bu hedefe ulaşamayacağız.

Isınan bir Dünya'nın neticeleri nelerdir? Kısmen nerede bulunduğunuza bağlı olarak durumun kazananları ve kaybedenleri olacaktır. Son dönemde yapılan bir tahmine göre 2050 yılına gelindiğinde Toronto, şu andaki Washington gibi bir iklime sahip olacak. Kanadalıların bir kısmı daha az karlı bir hayatı ipe çekiyor olabilirler ama Washington'da yaşayan insanları da bir düşünmek gerekir çünkü 2050'de yazın sıcağı ve nemi, günümüzde bile bunaltıcı olan seviyelerin çok üstüne çıkacak. Brooking Enstitüsü'nün yaptığı bir araştırmaya göre Birleşik Devletler'in Kanada sınırındaki eyaletleri yirmi birinci yüzyıldaki iklim değişikliğinden ekonomik anlamda az da olsa faydalanacak. Buna karşın, güney eyaletleri ekonomik anlamda bedel ödeyecek, bazı bölgelerde bu bedel mevcut gelirin yüzde 15'ten fazlasına tekabül edecek. Bazıları, iklim değişikliğini inkâr etmekte başı çeken bölgelerin en büyük ekonomik bedeli omuzlayacak olmasında adaletin şairane bir tecellisini görüyor olabilir ama nihayetinde Dünya ısındığında hepimiz bir bedel ödeyeceğiz. Sıcaklık değiştikçe yağışlar da değişecek. Ulaşılabilir su kaynakları konusu şimdiden jeopolitik bir mesele durumunda ve yirmi birinci yüzyıl ilerledikçe daha da önemli hale gelecek. Birleşik Devletler'in güneybatısında, Orta Doğu'nun insanlara ev sahipliği yapan bölgelerinde, Güneybatı Afrika'da, İber Yarımadası'nda ve daha birçok farklı bölgede yağışların düşeceği tahmin ediliyor. Alçak enlemlerdeki dağ buzulların mevsimsel erimelerine bel bağlayan yaklaşık iki milyar insan da kendilerini besleyen buzulların küçülmesi ve nihayetinde yok olması neticesinde su kaynaklarının gittikçe azaldığını görecek.

Halihazırda sıklaşan olağan dışı hava koşulları yirmi birinci yüzyıl ve sonrası için bir başka güçlük oluşturmaktadır. Kalifor-

niya ve Avustralya'da görülen tahrip edici yangınlar, geçmişte yalnızca nadiren meydana gelen sıcaklık ve kuraklık koşullarını yansıtıyor. Küresel değişim hızlandıkça olağan dışı hava koşullarının daha sık yaşanır hale gelmesinden elbette korkuluyor. Bu durumun gıda güvenliği ve siyasi istikrar açısından ortaya çıkabilecek sonuçları ürkütücü boyutta olacaktır.



Resim 48. Son 140 yıldaki küresel sıcaklıklar. Grafik, mayıs sıcaklıklarındaki yirminci yüzyıl ortalamasından sapınayı gösteriyor. Küresel sıcaklıklar 1940 yılından önce sürekli olarak yirminci yüzyıl ortalamasının altındaydı; 1978'den beri ise sürekli olarak ortalamanın üzerinde ve yıldan yıla daha da yükseliyor. *Kaynak: NOAA Climate.gov*

Peki, doğal dünya için neler söyleyebiliriz? Küresel değişimle birlikte habitat tahribatı, aşırı sömürü, kirlilik ve canlı türü istilaları gitgide artarken bitkiler, hayvanlar ve mikroorganizmalar buna nasıl yanıt verecek? Değişen çevresel koşullarla karşılaşan popülasyonlar, bu duruma adaptasyon göstererek, göç edip değiştiği esnada tercih ettikleri habitatın peşine düşerek veya nesillerinin tükenmesine maruz kalarak tepki verebilir. Biyologlar hızlı adaptasyonların gerçekleşebildiğine dair bazı ilgi çekici örnekleri belgelemiştir ancak yirmi birinci yüzyılın yüksek hızlı küresel değişimi birçok canlı türünü zorlayacaktır. Yirmi birinci yüzyıl dünyasında göç yolları tarlalarla, şehirlerle

ve otobanlarla tehlikeye atılabildiğinden aynı şekilde göçler de zorlu olacaktır. Durum böyleyken nesil tükenmesi ihtimalini nasıl en aza indiregileyebiliriz?

Ulusal parklar, barınaklar ve koruma altındaki diğer alanlar, habitat tahribatı ve benzeri tehditler altında kalan canlı türlerinin muhafazası açısından kritik rol oynamaktadır. Elimizdeki barınaklara ihtiyacımız var, sayılarının artması da bize büyük fayda getirecektir. Bununla beraber, koruma altındaki bölgelerin iklimi sürekli olarak değişirse bu canlı türlerini ne ölçüde koruyabileceğiz? Bu bakımdan göçü teşvik etmek için oluşturulan koruma altındaki koridorlar fayda sağlayacaktır ama araziler ister korunsun ister korunmasın iklim değişikliği birçok canlı türünün dağılımını değiştirecektir. Geçmişte birbirleriyle karşılaşmamış olan canlı türleri aynı yerde bulunacak, rekabet ve ekosistemin değişimle başa çıkma yetisi anlamında büyük oranda bilinmeyen sonuçlar ortaya çıkacaktır.

Hızlanan iklim değişikliği karşısında denizler bir kez daha duygularını gizler; uçsuz bucaksız yapısı onu insanın etkisinden korumaktadır. Gelin görün ki bu algı yine büsbütün hatalıdır. Birincisi, eriyen buzullar okyanuslara geri aktığı için deniz seviyesi yükselmekte ve ısınan deniz suları yayılmaktadır. Yirminci yüzyılda, küresel anlamda ortalama deniz seviyesi 15 ile 20 santimetre yükselmiştir ve bu yükselme hızı son yıllarda artış göstermektedir. Denizlere ilişkin 2100 yılına yönelik tahminler birçok belirsizliği beraberinde getirir ancak çoğu 50 ile 100 santimetrelilik ilave bir yükselişe işaret etmektedir. Bu sayı çok yüksek gibi görünmeyebilir ama eğer Venedik'te, Bangladeş'te, Pasifik'te bir mercan adasında veya Florida'da yaşıyorsanız deniz seviyesindeki farklılık hayatınızı önemli ölçüde değiştirecektir. Deniz seviyesi yükseldikçe deniz sularının fiziksel özellikleri de değişim gösterecektir. Atmosferdeki CO₂ arttıkça kara yüzeyleri gibi okyanusların da daha sıcak hale gelecek olması şaşırtıcı değildir. Sular ısındıkça taşıyabildikleri oksijen miktarı azalır, dolayısıyla okyanuslar, özellikle derinlerde oksijen kaybına uğrayacaktır. Ayrıca okyanusların, insan eylemlerinin yaydığı karbondioksitin büyük bölümünü emdiği ölçüde deniz sularının pH'ı da düşecektir (okyanus asitlenmesi). Evet, Permien Dönem'in

sonunda harekete geçen katil üçlü, yirmi birinci yüzyılda bütün güçleriyle geri dönecek. Bu süreç halihazırda başladı bile.

Avustralya'daki Büyük Set Resifi değişmekte olan bir dünyayla birlikte ortaya çıkan iç içe geçmiş güçlülere gezegenin diğer yerleri kadar iyi bir örnek teşkil eder. Mercanlardan oluşan göz alıcı bir kolyeyi andıran bu resif 2.300 kilometreyi aşkın bir mesafe boyunca uzanır ve milyonlarca yıldır Avustralya'nın kuzeydoğu kıyısına zarif bir görünüm kazandırmaktadır. Resif yakınındaki toprakları fırtınalardan korurken muazzam bir biyolojik çeşitliliğe de ev sahipliği yapar. Yapılan güncel bir çalışmaya göre resif, bu uzun geçmişine rağmen 1987 ve 2012 yılları arasında canlı mercan tabakasının yaklaşık yüzde 50'sini kaybetmiştir, sebebi de büyük oranda siklonlar ve tarımdan gelen suların akarsulara karışmasıyla artan besleyici maddelerin tetiklediği obur denizyıldızlarının mercanları tüketmesidir. Şimdi, deniz suyu sıcaklığı arttıkça ve pH düştükçe resif daha da sıkışmaktadır. Laboratuvarı ve sahada yapılmış onlarca deney, deniz suyunun pH'ı düştükçe mercanların karbonat iskeletlerini salgılama kapasitelerinin de düştüğünü gösterir. Dolayısıyla okyanuslardaki asitlenmenin hızlanmasıyla birlikte mercanlar bundan böyle, resifleri oluşturan ve biyolojik çeşitliliklerini muhafaza eden kireç taşı çerçevesini inşa edemeyebilir. Ayrıca okyanus sıcaklıkları arttıkça bir başka problem daha öne çıkar. Resif mercanları temelinde çiftçidir; besinlerinin çoğunu dokuları içinde yaşayan alglerden elde eder. Ortam sıcaklığı kritik bir noktanın üstüne çıktığında mercanlar, şaşırtıcı sayılabilecek bir eylemde bulunup alglerini dışarı atar; neticede mercanlar beyaza döndüğünden bu sürece ağartma denmektedir. Olağanüstü sıcaklıkların nispeten daha ender görüldüğü geçmişte, ağaran mercanlar daha fazla alg edinecek genellikle kendilerini toparlayabiliyordu. Gelin görün ki şimdilerde yükselen sıcaklıklar ağarma süreçlerini sıklaştırdı, bu da resif mercanları için ölüm anlamına geliyor. Büyük Set Resifi'nin kuzeyinde 2016 ve 2017 yıllarında arka arkaya yaşanan ağartma süreçleri bölgedeki mercan kolonilerinin yaklaşık yüzde ellisini öldürmüştü ve 2020'de tekrarlanmasıyla mercan kaybını resifin uzandığı uçsuz bucaksız mesafelere yaymıştır.

Bununla beraber, gözü pek biyologlar Pasifik Okyanusu'nun bazı kesimlerinde sıcaklığa toleranslı mercanlar keşfetmişlerdir. Hem bunlar hem de mercan kolonileşmesini destekleyici programlar dünyadaki resif ekosistemlerini korumayı başarabilir. Gelin görün ki gezegenimizin en olağanüstü ekosistemlerinden bazıları için zaman daralıyor.

JEOLOGLAR YAŞADIĞIMIZ DÖNEMİ, gittikçe artan bir sıklıkla Antroposen Çağ** olarak anmakta, bu şekilde insanın, etrafımızdaki dünya üzerindeki muazzam etkisini ve bu çağla öncekilerin farkını vurgulamaktadır. Gelecekteki jeologların ve paleontologların, geriye dönüp baktıklarında şu anki dünyamızı, çevresel değişimlerin jeolojik anlamda nadir görülen hızlarda yaşanması ve biyolojik çeşitlilikteki düşüşün, Paleozoik ve Mezozoik çağları bitiren kitlesel yok oluşlardakine değilse bile (Ümidim bu yönde...) daha küçük çaplı olanlarda yaşanan benzemesiyle dikkat çeken olağan dışı bir dünya olarak yorumlayacaklarını düşünüyorum. Bununla birlikte antropojenik küresel değişimle ilişkili tüm fenomenler arasında belki de en çarpıcı olanı insanın bu duruma gösterdiği tepki, daha doğrusu bu tepkinin günümüze dek çok cılız kalmış olmasıdır. Bu konuda uyarılmamış gibi davranıyoruz. Oysaki 1957 yılı gibi erken bir vakitte okyanus bilimci Roger Revelle, atmosferdeki artan CO₂ seviyelerinin, iklimi ve bunun sonucunda dünyadaki ekosistemleri nasıl değiştireceğini açıkça belirtmişti. O zamandan bu yana geçen her on yıllık dilimde, bilim insanlarının mesajı daha net ve korkutucu hale geldi. On yıllar içinde ortaya çıkan değişikliklerin insanları telaşa sürüklemesi biraz zor görünüyor ama bu zaman ölçeği yanıltıcıdır. Eğer yirmi yaşındaysanız ömrünüz dahilinde büyük değişiklikler yaşanacak, altmış yaşındaysanız torunlarınızın yüzleşeceği dünya çok farklı

* Kullanılan kelimenin farklı oluşundan ötürü, metin boyunca söz edilen diğer çağların aksine çağ değil zaman olarak anılması uygundur fakat genelde bu şekilde bilindiğinden çağ olarak verilmesi uygun görülmüştür. Antik Yunancadaki *anthropos* (insan) ve *kainos* (yeni) kelimelerinden gelir ve dolayısıyla "İnsan Çağı" olarak da adlandırılır. (y.h.n.)

olacak demektir. Yangınlar, kasırgalar, su kıtlığı, çöken balık işletmeleri, mülteci sorunları... Bu gibi sorunlar günümüzde ne kadar zorlu görünüyorsa olsun, yirmi birinci yüzyılın ilerleyen dönemlerinde çok daha kötü gelecektir.

Mevcut durumdan maddi çıkar sağladıkları için küresel değişimle ilgili yanlış bilgiler yayanlar da var elbette. Kanser ve sigara hakkındaki tartışmalar, yarın daha iyi bir dünyada yaşamaktansa bugün daha çok dolar kazanmayı tercih edenler hakkında bize çok şey öğretti. Hiçbir şey yapmamayı savunan ekonomik argümanlar hem bu savlarda bulunanların çıkarlarına hizmet ediyor hem de hiçbir şey yapmamanın maliyetini hesaba katmadıklarından insanları yanılgıya sürüklüyor. Son tahminler, yaşama ve çalışma şeklimizi değiştirmek için bugün harcanan her bir doların, yüzyılın sonuna gelindiğinde beş dolarlık bir getiri sağlayacağını gösteriyor.

Gelecekteki iklim ve doğuracağı sonuçlara dair yapılan tahminlerle ilgili belirsizlikler elbette ki var. Büyük fizikçi Niels Bohr'un, "Tahmin yapmak zordur, özellikle de gelecek hakkında," dediği söylenir; bu sözü söyleyen gerçekten Bohr mudur bilinmez ama bu saptamanın doğru olduğu inkâr edilemez. Geçmişte, yirmi birinci yüzyıldaki iklim değişikliğine ilişkin olarak yapılmış bilimsel tahminler zaman zaman hedefi şaşırmıştır ama görüldüğü kadarıyla bu hatalar büyük oranda, değişim hızını hafife almış olmalarından kaynaklanır. Bilim insanları doğaları gereği ılımlıdır; hem bizler de küresel ısınmayı hızlandıran ve sonuçlarını daha da kötüleştiren faktörler hakkında bugüne kadar dikkate alınmamış bazı geri bildirimlerden haberdar olmayı sürdürüyoruz. Bu durumda yapabileceğimiz en iyi tahminler belki de şunlardır: (1) Bu yüzyıldaki insan eylemlerinin "hiçbir değişim"e sebep olmayacak olması muhtemelen en düşük ihtimaldir ve (2) değişim, mevcut örüntülerin tahmininden çok daha hızlı ve şiddetli olabilir.

Gelecekle ilgili karamsar tahminler ümitsizlik ve bıkkınlık doğurabilir ancak bu tahminler esasında Charles Dickens'ın *Bir Noel Şarkısı*'ndaki "Gelecek Noel'in Hayaleti gibi birer ikaz

* Charles Dickens, *Bir Noel Şarkısı*, İş Bankası Kültür Yayınları, İstanbul, 2021. (y.h.n.)

niteliği taşır. Hayalet, romanın kahramanı Ebenezer Scrooge'a eğer davranışlarını değiştirmezse başına gelecekleri gösterir. Scrooge değişir ve bu herkesin yararına olur. Elbette, bir yandan dört milyar yıllık bir evrimle şekillenen doğal dünyaya lütuf gösterip bir yandan da toplumsal geleceğimizi korumak göz korkutucudur; ayrıca bir şey yapmadan geçirdiğimiz her bir sene bu ödevi daha büyük ve acil kılar. Gelin görün ki küresel bir kararlılık sergilememiz halinde çocuklarınıza güvenli ve insafli bir dünya bırakabiliriz. Gelişmiş Batı dünyasında gıda, barınma ve ulaşım konularında bilge seçimler yaparak ekolojik ayak izimizi azaltabilir ve dünyanın diğer bölgelerinde daha iyi yaşam koşullarına ulaşmak isteyen insanlara sürdürülebilir alternatifler sağlayabiliriz. Vatandaşlar olarak biyolojik çeşitliliği korumayı ve gezegen dostu teknolojiler geliştirmeyi amaçlayan girişimleri destekleyebiliriz: Örneğin (sürdürülebilir enerji kaynaklarından tam olarak faydalanabilmemiz için gerekli olan) yeni tip bataryalar ve havadaki karbondioksiti temizleyen mekanizmalar hemen akla gelmektedir. George Washington, Amerikan halkına yaptığı veda konuşmasında, "Bizzat taşımamız gereken yükü bencillik edip gelecek nesillere aktarmamalıyız," diyerek meşhur uyarısında bulunmuştur. Washington o sırada vergilerden ve ulusal borçtan bahsediyordu ama bu sözleri küresel iklim değişikliği ve sonuçlarına da eşit ölçüde uygun düşer. Bir nesil önce Birleşik Devletler ve müttefikleri, bomba yapabilmek için olağanüstü yetenekleri ve kaynakları bir araya getirmişti, bizler de belki torunlarımız için daha iyi bir dünya yaratmak adına aynı kararlılığı gösterebiliriz.

Dört milyon yılın fiziksel ve biyolojik mirasıyla yaşıyorsunuz. Bir zamanlar trilobitlerin antik deniz tabanında su sıçratarak dolaştığı, dinazorların Gingko kaplı yamaçlarında hantal hantal gezindiği, mamutların buz gibi bir ovaya hükmettiği yerlerde yürüyorsunuz. Burası bir zamanlar onların dünyasıydı, şimdiyse sizin. Sizlerle dinazorlar arasındaki fark, elbette, sizin geçmişi kavrayabiliyor ve geleceği tasavvur edebiliyor olmanız. Miras aldığınız dünya yalnızca size ait olmakla kalmıyor, aynı zamanda sizi kendinden sorumlu da kılıyor. Bir sonraki aşamada olacaklar size bağlı.

Teşekkürler

BU KİTAP, GEZEĞENİMİZİ VE BARINDIRDIĞI yaşamı anlamaya çalışarak geçirilmiş bir ömrün meyvelerinin özünü çıkarmaktadır. İlk olarak Oberlin College'ta, ardından da yaklaşık kırk sene boyunca Harvard'da geçen öğretmenliğim/akademisyenliği ve beş kıtada yaptığım araştırmalar neticesinde Yerküre'nin geçmişi, bugünü ve muhtemel geleceği hakkınca çok şey öğrendim. Tüm bu çabalarım esnasında başkalarının bilgeliğinden, iş birliğinden ve desteğinden yararlandım.

Bilim insanları genellikle iki entelektüel ırmağın kesiştiği noktada dururlar. Bunların ilki kendi öğretmenlerimizden bize akmış olan bütün o bilgilerdir. Akıl hocalarım arasında Dünya'daki ilk yaşam konusundaki paleontolojik araştırmaların öncüsü Elso Barghoorn, Dünya'nın çevresel geçmişi üzerine yapılan araştırmaların zeminini hazırlamış olan büyük jeokimyacı Dick Holland, evrim konusundaki ilgimi körükleyen Stephen Jay Gould, beni tortul kayalara dikkatle bakmaya teşvik eden Ray Siever ve siyanobakteriler konusunu bana öğreten Steve

Golubic yer alıyor. Diğer ırmak ise bizi öğrencilerle ve laboratuvarlarımızda çalışmış olan doktora sonrası araştırmacılara bağlar. Bu ırmak, hiç şüphesiz karşılıklı gerçekleşen kesintisiz bir fikir ve analiz akışına sahne olur. Knoll laboratuvarı mezunları paleontoloji, jeobiyooloji ve Dünya tarihi çalışmalarını yeni yönlerle taşıyan bilim insanlarından oluşan mükemmel bir gruptur ve ben hem hepsine müteşekkirim hem de hepsiyle gurur duyuyorum.

Bilimsel makalelerimi birlikte kaleme aldığım kişilerin sayısı yıllar içinde beş yüzün üzerine çıktı, dolayısıyla hepsine sonsuz minnet duyuyor olsam da burada her birinden bahsetmem mümkün değil. Bununla beraber bana biyokimya hakkında bildiğim her şeyi öğreten John Hayes'e, beni arktik araştırmalarla tanıştıran Keene Swett ve Brian Harland'a, Avustralya taşrasındaki sayısız saha araştırmasında birlikte çalıştığım arkadaşım Malcolm Walter'a, Sibiry'a'daki jeolojik keşif yolculuğuma eşlik eden Misha Semikhatov ve Volodya Sergeev'e, paleontolojik sezilerimi laboratuvar deneylerine çeviren Mario Giordano'ya, Namibiya ve Sibiry'a'dan (en azından sanal olarak) Mars'a uzanan son otuz yıllık saha çalışmalarımnda partnerim olan John Grotzinger'e ve evrim meselesini farklı şekillerde düşünmem için bana epeydir meydan okuyan Dick Bambach'a teşekkür etmek durumundayım.

Ernest Hemingway'in romanlarını şekillendirmesine yardımcı olan Maxwell Perkins'i vardı, neyse ki benim de dostum Peter Hubbard var. *Bir Solukta Dünya Tarihi*, Peter'ın fikriydi ve onun desteği, tavsiyeleri ve yapıcı eleştirileri bu kitabın her bir sayfasını daha üst noktalara taşıdı. Ayrıca Molly Gendell'a ve hatta HarperCollins'teki herkese teşekkür ediyorum, her biri çok profesyonel insanlar. Naziklik edip bu kitapta kullanılan bazı fotoğrafları paylaştıkları için Atacama Büyük Milimetre Dizisi'ne, Matteo Chinellato'ya (Vikipedi, Creative Commons üzerinden), Marie Tharp Maps LLC'ye ve Lamont-Doherty Dünya Gözlemevi'ne, DeepTime Maps'ten Ron Blakey'e, Smithsonian Enstitüsü'nün Ulusal Doğal Tarih Müzesi'ne, Amerikan Doğa Tarihi Müzesi'ne, Tübingen'de yer alan Eberhardt Karls Üniversitesi'ndeki Eski Kùltürler Müzesi'ne,

Scripps Oşinografi Enstitüsü'ne ve Ulusal Oşinografi ve Atmosfer İdaresi'ne, ayrıca arkadaşlarım ve meslektaşlarım Zhu Maoyan, Nick Butterfield, Shuhai Xiao, Guy Narbonne, Mansi Srivastava, Frankie Dunn, Alex Liu, Misha Fedonkin, Jean-Bernanrd Caron, Alex Brasier, Hans Kerp, Hans Steur, Neil Shubin, Mike Novacek ve Adam Brumm'a teşekkür ederim.

Son olarak ve en önemlisi, evdeki ekibime teşekkür ediyorum: Marsha, Kirsten ve Rob. Onların sevgisi ve desteği olmasa bu kitap (ve daha pek çok şey) var olamazdı.

İlave Okumalar

1 | KİMYASAL DÜNYA

Kolay Okunabilir Kaynaklar

Eric Chaisson (2006). *Epic of Evolution: Seven Ages of the Cosmos*. Columbia University Press, New York, s. 478.

Robert M. Hazen (2012). *The Story of Earth: The First 4.5 Billion Years, from Stardust to Living Planet*. Viking, New York, s. 306.

Harry Y. McSween (1997). *Fanfare for Earth: The Origin of Our Planet and Life*. St. Martin's Press, New York, s. 252.

Neil de Grasse Tyson (2017). *Astrophysics for People in a Hurry*. W. W. Norton and Company, New York, s. 222.

Daha Teknik Kaynaklar

Edwin Bergin vd. (2015). "Tracing the Ingredients for a Habitable Earth from Interstellar Space Through Planet Formation."

Proceedings of the National Academy of Sciences, ABD 112: 8965–8970.

T. Mark Harrison (2009). “The Hadean Crust: Evidence from >4 Ga Zircons.” *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 37: 479–505.

Roger H. Hewins (1997). “Chondrules.” *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 25: 61–83.

Anders Johansen ve Michiel Lambrechts (2017). “Forming Planets via Pebble Accretion.” *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 45: 359–87.

Harold Levison vd. (2015). “Growing the Terrestrial Planets from the Gradual Accumulation of Submeter-sized Objects.” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, ABD 112: 14180–85.

Bernard Marty (2012). “The Origins and Concentrations of Water, Carbon, Nitrogen and Noble Gases on Earth.” *Earth and Planetary Science Letters* 313–14: 56–66.

Anne Peslier (2020). “The Origins of Water.” *Science* 369: 1058.

Laurette Piani vd. (2020). “Earth’s Water May Have Been Inherited from Material Similar to Enstatite Chondrite Meteorites.” *Science* 369: 1110–13.

Elizabeth Vangioni ve Michel Casse (2018). “Cosmic Origin of the Chemical Elements Rarity in Nuclear Astrophysics.” *Frontiers in Life Science* 10: 84–97.

Jonathan P. Williams ve Lucas A. Cieza (2011). “Protoplanetary Disks and Their Evolution” *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 49: 67–117.

Kevin Zahnle (2006). “Earth’s Earliest Atmosphere.” *Elements* 2: 217–22.

Kolay Okunabilir Kaynaklar

Charles H. Langmuir ve Wally Broecker (2012). *How to Build a Habitable Planet: The Story of Earth from the Big Bang to Humankind*. Princeton University Press, Princeton, NJ, s. 736.

Alan McKirdy vd. (2017). *Land of Mountain and Flood: The Geology and Landforms of Scotland*. None Edition, Birlinn Ltd., Edinburgh, Scotland, s. 322. (İskoçya için çıkarılmış bilgilendirici bir seyahat rehberidir. Mountain Press ABD'deki meraklı gezginler için bir dizi Roadside Geology kitabı yayımlamaktadır.)

Naomi Oreskes, ed. (2003). *Plate Tectonics: An Insider's History of the Modern Theory of the Earth*. Westview Press, Boulder, CO, s. 448. (2018'de CRC Press tarafından e-kitap olarak yeniden basılmıştır.)

United States Geological Survey, internet sayfası: "Understanding Plate Motions." <https://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/understanding.html>.

Daha Teknik Kaynaklar

Annie Bauer vd. (2020). "Hafnium Isotopes in Zircons Document the Gradual Onset of Mobile-lid Tectonics." *Geochemical Perspectives Letters* 14: 1–6.

Jean Bedard (2018). "Stagnant Lids and Mantle Overturns: Implications for Archaean Tectonics, Magmagenesis, Crustal Growth, Mantle Evolution, and the Start of Plate Tectonics." *Geoscience Frontiers* 9: 19–49.

Ilya Bindeman vd. (2018). "Rapid Emergence of Subaerial Landmasses and Onset of a Modern Hydrologic Cycle 2.5 Billion Years Ago." *Nature* 557: 545–48.

Alec Brenner vd. (2020). "Paleomagnetic Evidence for Modern-like Plate Motion Velocities at 3.2 Ga." *Science Advances* 6, No. 17, eaaz8670, doi:10.1126/sciadv.aaz8670.

Peter Cawood vd. (2018). "Geological Archive of the Onset of Plate Tectonics." *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Londra. 376A: 20170405, doi: 10.1098/rsta.20170405.

Chris Hawkesworth vd. (2020). "The Evolution of the Continental Crust and the Onset of Plate Tectonics." *Frontiers in Earth Science* 8: 326, doi: 10.3389/feart.2020.00326.

Anthony Kemp (2018). "Early Earth Geodynamics: Cross Examining the Geological Testimony." *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Londra. 371A: 20180169, doi: 10.1098/rsta.2018.0169.

Jun Korenaga (2013). "Initiation and Evolution of Plate Tectonics on Earth: Theories and Observations." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 41: 117–51.

Craig O'Neill vd. (2018). "The Inception of Plate Tectonics: A Record of Failure." *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Londra. 371A: 20170414, doi: 10.1098/rsta.20170414.

3 | BİYOLOJİK DÜNYA

Kolay Okunabilir Kaynaklar

David Deamer (2019). *Assembling Life: How Can Life Begin on Earth and Other Habitable Planets?* Oxford University Press, Oxford, UK, s. 184.

Paul G. Falkowski (2015). *Life's Engines: How Microbes Made Earth Habitable*. Princeton University Press, Princeton, NJ, s. 205.

Andrew H. Knoll (2003). *Life on a Young Planet: The First Three Billion Years of Life on Earth*. Princeton University Press, Princeton, NJ, s. 277.

Nick Lane (2015). *The Vital Question: Energy, Evolution and the Origins of Complex Life*. W. W. Norton and Company, New York, s. 360.

Martin Rudwick (2014). *Earth's Deep History: How It Was Discovered and Why It Matters*. University of Chicago Press, Chicago, s. 360.

Daha Teknik Kaynaklar

Abigail Allwood vd. (2006). "Stromatolite Reef from the Early Archaean Era of Australia." *Nature* 441: 714–18.

Giada Arney vd. (2016). "The Pale Orange Dot: The Spectrum and Habitability of Hazy Archean Earth." *Astrobiology* 16: 873–99.

Tanja Bosak vd. (2013). "The Meaning of Stromatolites." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 41: 21–44.

Martin Homann (2018). "Earliest Life on Earth: Evidence from the Barberton Greenstone Belt, South Africa." *Earth-Science Reviews* 196, doi: 10.1016/j.earscirev.2019.102888.

Emmanuel Javaux (2019). "Challenges in Evidencing the Earliest Traces of Life." *Nature* 572: 451–60.

Gerald Joyce ve Jack Szostak (2018). "Protocells and RNA Self-replication." *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, doi: 10.1101/cshperspect.a034801.

William Martin (2020). "Older Than Genes: The Acetyl CoA Pathway and Origins." *Frontiers in Microbiology* 11: 817, doi: 10.3389/fmicb.2020.00817.

Matthew Powner ve John Sutherland (2011). "Prebiotic Chemistry: A New Modus Operandi." *Philosophical Transactions of the Royal Society, Londra*. 366B: 2870–77.

Alonso Ricardo ve Jack Szostak (2009). "Origins of Life on Earth." *Scientific American* 301, no. 3, Özel Basım: 54–61.

Eric Smith ve Harold Morowitz (2016). *The Origin and Nature of Life on Earth: The Emergence of the Fourth Geosphere*. Cambridge University Press, Cambridge, Birleşik Krallık, 691 s.

Norman Sleep (2018). "Geological and Geochemical Constraints on the Origin and Evolution of Life." *Astrobiology* 18: 1199–1219.

Kolay Okunabilir Kaynaklar

John Archibald (2014). *One Plus One Equals One*. Oxford University Press, Oxford, Birleşik Krallık, s. 205.

Donald E. Canfield (2014). *Oxygen: A Four Billion Year History*. Princeton University Press, Princeton, NJ, s. 196.

Nick Lane (revize edilmiş basım, 2016). *Oxygen: The Molecule That Made the World*. Oxford University Press, Oxford, Birleşik Krallık, s. 384.

Daha Teknik Kaynaklar

Ariel Anbar vd. (2007). "A Whiff of Oxygen Before the Great Oxidation Event?" *Science* 317: 1903–6.

Andre Bekker vd. (2010). "Iron Formation: The Sedimentary Product of a Complex Interplay Among Mantle, Tectonic, Oceanic, and Biospheric Processes." *Economic Geology* 105: 467–508.

David Catling (2014). "The Great Oxidation Event Transition." *Treatise on Geochemistry* (ikinci basım) 6: 177–95.

T. Martin Embley ve William Martin (2006). "Eukaryotic Evolution, Changes and Challenges." *Nature* 440: 623–30.

Laura Eme vd. (2017). "Archaea and the Origin of Eukaryotes." *Nature Reviews in Microbiology* 15: 711–23.

Jihua Hao vd. (2020). "Cycling Phosphorus on the Archean Earth: Part II. Phosphorus Limitation on Primary Production in Archean Oceans." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 280: 360–77.

Heinrich Holland (2006). "The Oxygenation of the Atmosphere and Oceans." *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Londra. 361B: 903–15.

Olivia Judson (2017). "The Energy Expansions of Evolution." *Nature Ecology and Evolution* 1: 138.

Andrew H. Knoll vd. (2006). "Eukaryotic Organisms in Proterozoic Oceans." *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Londra. 361B: 1023–38.

Timothy Lyons vd. (2014). "The Rise of Oxygen in Earth's Early Ocean and Atmosphere." *Nature* 506: 307–15.

Simon Poulton ve Donald Canfield (2011). "Ferruginous Conditions: A Dominant Feature of the Ocean Through Earth's History." *Elements* 7: 107–12.

Jason Raymond ve Daniel Segre (2006). "The Effect of Oxygen on Biochemical Networks and the Evolution of Complex Life." *Science* 311: 1764–67.

Bettina Schirrmeister vd. (2016). "Cyanobacterial Evolution During the Precambrian." *International Journal of Astrobiology* 15:187–204.

5 | HAYVAN DÜNYASI

Kolay Okunabilir Kaynaklar

Mikhail Fedonkin vd. (2007). *The Rise of Animals: Evolution and Diversification of the Kingdom Animalia*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD, s. 344.

Richard Fortey (2001). *Trilobite; Eyewitness to Evolution*. Vintage, New York, s. 320.

John Foster (2014). *Cambrian Ocean World: Ancient Sea Life of North America*. Indiana University Press, Bloomington, IN, s. 416.

Stephen Jay Gould (1990). *Wonderful Life: The Burgess Shale and the Nature of History*. W. W. Norton and Company, New York, s. 352.

Daha Teknik Kaynaklar

Graham Budd ve Soren Jensen (2000). "A Critical Reappraisal of the Fossil Record of the Bilaterian Phyla." *Biological Reviews* 75:253–95.

- Allison Daley vd. (2018). "Early Fossil Record of Euarthropoda and the Cambrian Explosion." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, ABD 115: 5323–31.
- Patricia Dove (2010). "The Rise of Skeletal Biominerals." *Elements* 6: 37–42.
- Douglas Erwin ve James Valentine (2013). *The Cambrian Explosion: The Construction of Animal Biodiversity*. W. H. Freeman, New York, 416 s.
- Douglas Erwin vd. (2011). "The Cambrian Conundrum: Early Divergence and Later Ecological Success in the Early History of Animals." *Science* 334: 1091–97.
- P.U.P.A. Gilbert vd. (2019). "Biomineralization by Particle Attachment in Early Animals." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, ABD 116: 17659–65.
- Paul Hoffman (2009). "Neoproterozoic Glaciation." *Geology Today* 25: 107–14.
- Andrew H. Knoll (2011). "The Multiple Origins of Complex Multicellularity." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 39: 217–39.
- M. Gabriela Mangano ve Luis Buatois (2020). "The Rise and Early Evolution of Animals: Where Do We Stand from a Trace-Fossil Perspective?" *Interface Focus* 10, no. 4:20190103.
- Guy Narbonne (2005). "The Ediacara Biota: Neoproterozoic Origin of Animals and Their Ecosystems." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 33: 421–42.
- Erik Sperling ve Richard Stockey (2018). "The Temporal and Environmental Context of Early Animal Evolution: Considering All the Ingredients of an 'Explosion.' " *Integrative and Comparative Biology* 58: 605–22.
- Alycia Stigall vd. (2019). "Coordinated Biotic and Abiotic Change During the Great Ordovician Biodiversification Event: Darriwilian Assembly of Early Paleozoic Building Blocks." *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 530: 249–70.

Shuhai Xiao ve Marc Laflamme (2008). "On the Eve of Animal Radiation: Phylogeny, Ecology and Evolution of the Ediacara Biota." *Trends in Ecology and Evolution* 24: 31–40.

6 | YEŞİL DÜNYA

Kolay Okunabilir Kaynaklar

Steve Brusatte (2018). *The Rise and Fall of the Dinosaurs: A New History of a Lost World*. HarperCollins, New York, s. 404.

Paul Kenrick (2020). *A History of Plants in Fifty Fossils*. Smithsonian Books, Washington, s. 160.

Neil Shubin (2008). *Your Inner Fish: A Journey into the 3.5-Billion-Year History of the Human Body*. Pantheon Books, New York, s. 229.

Daha Teknik Kaynaklar

Jennifer Clack (2012). *Gaining Ground: The Origin and Evolution of Tetrapods*. Second edition. Indiana University Press, Bloomington, IN, s. 544.

Blake Dickson vd. (2020). "Functional Adaptive Landscapes Predict Terrestrial Capacity at the Origin of Limbs." *Nature*: doi.org/10.1038/s41586-020-2974-5.

Else Marie Friis vd. (2011). *Early Flowers and Angiosperm Evolution*. Cambridge University Press, Cambridge, Birleşik Krallık, s. 595.

Patricia Gensel (2008). "The Earliest Land Plants." *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 39: 459–77.

Patrick Herendeen vd. (2017). "Palaeobotanical Redux: Revisiting the Age of the Angiosperms." *Nature Plants* 3: 17015, doi:10.1038/nplants.2017.15.

Zhe-Xi Luo (2007). "Transformation and Diversification in Early Mammal Evolution." *Nature* 450: 1011–19.

Jennifer Morris vd. (2018). "The Timescale of Early Land Plant Evolution." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, ABD 115: E2274–83.

Eoin O’Gorman ve David Hone (2012). "Body Size Distribution of the Dinosaurs." *PLOS One* 7(12): e51925.

Jack O’Malley-James ve Lisa Kaltenegger (2018). "The Vegetation Red Edge Biosignature Through Time on Earth and Exoplanets." *Astrobiology* 18: 1127–36.

P. Martin Sander vd. (2011). "Biology of the Sauropod Dinosaurs: the Evolution of Gigantism." *Biological Reviews* 86: 117–55.

Chistine Strullu-Derrien vd. (2019). "The Rhynie Chert." *Current Biology* 29: R1218–23.

7 | FELAKETLER DÜNYASI

Kolay Okunabilir Kaynaklar

Walter Alvarez (güncellenmiş basım, 2015). *T. rex and the Crater of Doom*. Princeton University Press, Princeton, NJ, s. 208.

Michael Benton (2005). *When Life Nearly Died: The Greatest Mass Extinction of All Time*. Thames & Hudson, Londra, s. 336.

Douglas Erwin (güncellenmiş basım, 2015). *Extinction: How Life on Earth Nearly Ended 250 Million Years Ago*. Princeton University Press, Princeton, NJ, s. 320.

Daha Teknik Kaynaklar

Luis W. Alvarez vd. (1980). "Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-tertiary Extinction." *Science* 208: 1095–108.

Richard K. Bambach (2006). "Phanerozoic Biodiversity: Mass Extinctions." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 34: 127–55.

- Richard K. Bambach vd. (2004). "Origination, Extinction, and Mass Depletions of Marine Diversity." *Paleobiology* 30: 522–42.
- Seth Burgess vd. (2014). "High-precision Timeline for Earth's Most Severe Extinction." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, ABD 111: 3316–21.
- Jacopo Dal Corso vd. (2020). "Extinction and Dawn of the Modern World in the Carnian (Late Triassic)." *Science Advances* 6:eaba0099.
- Seth Finnegan vd. (2012). "Climate Change and the Selective Signature of the Late Ordovician Mass Extinction." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, ABD 109: 6829–34.
- Sarah Greene vd. (2012). "Recognising Ocean Acidification in Deep Time: An valuation of the Evidence for Acidification Across the Triassic-Jurassic Boundary." *Earth-Science Reviews* 113:72–93.
- Pincelli Hull vd. (2020). "On Impact and Volcanism Across the Cretaceous- Paleogene Boundary." *Science* 367: 266–72.
- Wolfgang Kiessling vd. (2007). "Extinction Trajectories of Benthic Organisms Across the Triassic–Jurassic Boundary." *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 244: 201–22.
- Andrew H. Knoll vd. (2007). "A Paleophysiological Perspective on the End-Permian Mass Extinction and Its Aftermath." *Earth and Planetary Science Letters* 256: 295–313.
- Jonathan L. Payne ve Matthew E. Clapham (2012). "End-Permian Mass Extinction in the Oceans: An Ancient Analog for the Twenty-First Century?" *Annual Review of Earth and Planetary Science* 40:89–111.
- Bas van de Schootbrugge ve Paul Wignall (2016). "A Tale of Two Extinctions: Converging End-Permian and End-Triassic Scenarios." *Geological Magazine* 153: 332–54.
- Peter Schulte vd. (2010). "The Chicxulub Asteroid Impact and Mass Extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary." *Science* 327: 1214–18.

Kolay Okunabilir Kaynaklar

Sandra Diaz vd., editörler (2019). Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES), Summary for Policymakers of the Global Assessment Report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES Secretariat. <https://ipbes.net/global-assessment-report-biodiversity-ecosystem-services>.

Yuval Noah Harari (2015). *Sapiens: A Brief History of Humankind*. HarperCollins, New York, s. 443.

Louise Humphrey ve Chris Stringer (2019). *Our Human Story*. Natural History Museum, Londra, s. 158.

Elizabeth Kolbert (2014). *The Sixth Extinction: An Unnatural History*. Henry Holt and Company, New York, s. 319.

Daniel Lieberman (2013). *The Story of the Human Body: Evolution, Health and Disease*. Vintage, New York, s. 460.

Mark Muro vd. (2019). "How the Geography of Climate Damage Could Make the Politics Less Polarizing." Brookings Institution Report; <https://www.brookings.edu/research/how-the-geography-of-climate-damage-could-make-the-politics-less-polarizing>. (Ayrıca bkz. *The Economist*, Eylül 21–27, 2019, s. 31–32.)

Callum Roberts (2007). *The Unnatural History of the Sea*. Island Press, Washington, D.C., s. 435.

Daha Teknik Kaynaklar

Jean-Francois Bastin vd. (2019). "Understanding Climate Change from a Global Analysis of City Analogues." *PLOS One* 14(7):e0217592.

Glenn De'ath vd. (2012). "The 27-Year Decline of Coral Cover on the Great Barrier Reef and Its Causes." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, ABD 109: 17995–99.

- Sandra Diaz vd. (2019). "Pervasive Human-driven Decline of Life on Earth Point to the Need for Transformative Change." *Science* 366: eaax3100, doi:10.1126/science.aaw3100.
- Rudolfo Dirzo vd. (2014). "Defaunation in the Anthropocene." *Science* 345: 401–6.
- Jacquelyn Gill vd. (2011). "Pleistocene Megafaunal Collapse, Novel Plant Communities, and Enhanced Fire Regimes in North America." *Science* 326: 1100–103.
- Peter Grant vd. (2017). "Evolution Caused by Extreme Events." *Philosophical Transactions of the Royal Society, London*. 372B: 20160146.
- Ove Hoegh-Guldberg vd. (2019). "The Human Imperative of Stabilizing Global Climate Change at 1.5°C." *Science* 365: eaaw6974.
- Paul Koch ve Anthony Barnosky (2006). "Late Quaternary Extinctions: State of the Debate." *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics* 37: 215–50.
- Xijun Ni vd. (2013). "The Oldest Known Primate Skeleton and Early Haplorhine Evolution." *Nature* 498: 60–64.
- Bernhart Owen vd. (2018). "Progressive Aridification in East Africa over the Last Half Million Years and Implications for Human Evolution." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, ABD 115: 11174–79.
- Felisa Smith vd. (2019). "The Accelerating Influence of Humans on Mammalian Macroecological Patterns over the Late Quaternary." *Quaternary Science Reviews* 211: 1–16.
- John Woinarski vd. (2015). "Ongoing Unraveling of a Continental Fauna: Decline and Extinction of Australian Mammals Since European Settlement." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, ABD 112: 4531–40.
- Bernard Wood (2017). "Evolution: Origin(s) of Modern Humans." *Current Biology* 27: R746–69.

Dizin

A

Adam Sedgwick 79, 80
adaptasyon 129, 134, 140, 166, 174, 191
Adrienne Mayor 180
akciğerli balıklar 134, 135
Alaska'daki büyük patlama, MÖ. 43 167
alçı taşı 89, 90
Alec Brenner 57
Alfred Wegener 46
algler 72, 91, 184
Allende göktaşı 28
Alvarez hipotezi 156
amino asitler 36, 67, 69
amip 97, 133
amonyak 26, 67
Antroposen Çağ 194
arborea 112, 115
Ardipithecus ramidus (Ardi) 175
arkeler 66, 93, 95, 98, 99
arkeopteriks 144, 146
Atlantik Okyanusu 46, 47, 49, 53, 54, 140, 173

australopithecinerler 175, 177, 205, 213
avcı-toplayıcılar 178, 183

B

Baba Dioum 16
bakteriler 66, 71, 93
bilateraller 108, 109, 112, 113, 115, 117, 119
biyolojik çeşitlilik kaybı 163, 187, 194
biyomoleküller 95, 99, 137, 186
Bruce Heezen 47, 48
Burgess Şeyli 116, 129
buzul çağları 110, 111, 164
buzullar 28, 71, 72, 111, 123, 165, 174, 181, 190, 192
buzullaşma 15, 110, 111, 165
Büyük Oksidasyon Olayı 94, 96, 97, 99
Büyük Set Resifi 193

C-Ç

Charles Darwin 175
Charles David Keeling 188
Charles Dickens 195
Chris Scotese 55
Clovis 182
çört 72, 77, 88, 128

D

dallı bacaklılar 157, 162, 166, 167
Dan McKenzie 52
Daniel Lieberman 179
Deccan Tuzakları 164
demir oluşumları 89
Denisovanlar 178
deniz yosunları 44, 74, 97, 119,
120, 158
depremler 14, 29, 43, 50, 51,
52, 116
Devoniyen Dönemi 45, 108,
135, 137, 166
Dickinsonia 111, 112, 115
dinozorlar 15, 80, 138, 139, 140,
141, 142, 145, 146, 152, 154,
155, 163, 167, 173, 196
dinozoromorflar 140
doğal gaz 67, 79, 187, 189
Drummond Matthews 48

E

Ediyakaran Dönemi 109, 110,
111, 113, 115, 116, 118, 119, 120
eklembacaklılar 117, 119, 120,
132, 162
elmaslar 15, 30
Epimetheus 180
Erik Sperling 108
erozyon 26, 27, 34, 44, 45, 46,
96, 110, 187

F

Fanerozoik Devir 80, 81, 110,
156
fermantasyon 93, 97
filogenezi 108
fosfor 23, 24, 95, 96, 130
fossil yakıtlar 183, 187, 188
fotosentez 90, 91, 94, 95, 96,
98, 111, 115, 116, 128, 130, 186,
188, 189
Frank Asaro 152
Frankie Dunn 112, 115, 199
Frederick Vine 48

G

Galileo (uzay aracı) 128
George Gaylord Simpson 155
George Washington 196
gergedanlar 16, 185
gezegenimsiler 29
glossopetrae 44
Glossopteris 47, 54
Gods and Robots (Mayor) 180
Gondwana 54
grafit 35, 78
granit 33, 34, 35, 55, 56, 57,
58, 81

H

Hadean Devri 81
Hans Otto Pörtner 161
Harold Urey 67
Harry Hess 48
Kambriyen patlaması 119, 133
Helen Michel 152
heterotrofi 107
hidrotermal sistemler 78
HL Tauri 25
homininiler 174, 175, 176, 177,
178

Homo erectus 177, 178
Homo sapiens 177, 178, 181, 182

I-İ

iskeletler 113, 116, 117, 119, 120, 121, 122, 132, 144, 151, 153, 161, 162, 175, 193
izotoplar 31, 32, 36, 49, 75, 76, 77, 78, 80, 81, 90, 188

J

J. Tuzo Wilson 55
Jack Hills Oluşumu 34
Jack Sepkoski 156, 157
Jakob Vinther 108
James Hutton 44, 46, 56
John McPhee 43
John Playfair 45
John Sutherland 67
Julia Child 66
Jura Dönemi 144

K

kalsiyum karbonat 113, 120, 151
Kambriyen Dönemi 116, 120, 121, 127, 136, 156, 164
karanlık enerji 23
karbon döngüsü 76, 92, 93, 110, 111, 137, 187
karbon-12 32, 75, 80, 128, 188
karbon-13 75, 78, 80, 81, 137, 188
karbon-14 32, 75, 80, 81, 188, 189
son 140 yıl içindeki küresel sıcaklık 191
Karbonifer Dönemi 137, 138
karbonlu kondritler 28, 36, 68
Kartopu Dünya hipotezi 110, 120

Kenneth Oakley 177
Kimberella 112, 113, 115
kitap akciğerleri 132
kloroplastlar 98
kondritler 27, 28, 36, 68
Konstantin Mereschkowski 98
Kölofiz 144
Kretase Dönemi 148, 153, 156, 162, 164, 173
kuvars 30, 31, 65, 71, 154
kuyruklu yıldızlar 15, 35, 36
küresel ısınma 79, 138, 161, 186, 187, 190, 195
küresel soğuma 15, 122, 173, 174
kütle spektrometreleri 75
kütleçekim 22, 23, 25

L

levha tektoniği 49, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 141, 187
lipitler 67, 76, 115
litosfer 50, 56, 58
lityum 22
Lucy (iskelet) 175, 178
Luis Alvarez 152

M

mağara resimleri 179, 80
mantarlar 76, 91, 93, 97, 99, 130, 131, 133, 137, 186
manyetik alan 30, 49, 53, 152
manyetizma 49, 57
Maria Zuber 138
Marie Tharp 47, 48, 198
Mars 29, 37, 58, 63, 64, 70, 198, 199
Martin Sander 141
Mary Leakey 177
Melanezyalılar 178

metabolizma 65, 66, 70, 93, 99,
143, 161, 162, 184
metamorfizma 64, 78
meteor krateri 154
meteorlar 15, 37, 38, 70, 152,
156
Mezozoik Çağ 139, 152, 163,
164, 194
Mikhail Budyko 110
Miller-Urey deneyi 66, 67
Missouri depremi 52
Mistaken Point fosilleri 106,
107, 108, 110
mitokondriler 98

N

Neandertaller 178, 179
Neodarwinci sentez 155
Nicolas Steno 44
Niels Bohr 195
nitrojen 23, 32

O-Ö

omurgalılar 133, 134, 135, 139,
140, 163, 165
oomisetler 133
Opabinia 117, 119
Opportunity (gezgin robot) 63
Ordovisyan Dönem 121, 122,
156, 164, 165, 166
ökaryotlar 97, 98, 100, 101, 116

P

Paleozoik Çağ 137, 138, 139, 162,
164, 194
Pangea 54, 55, 136, 140, 173
panspermi 70
Paris Anlaşması (2016) 190
Patagotitan mayorum 142
patates hastalığı 133

peptitler 68

Permiyen Dönem 156, 157, 158,
160, 161, 162, 166, 187, 192
Permiyen-Triyas sınırı 159
petrol 15, 187, 189
pirit (ahmak altını) 76, 89, 90
Placozoa 107
Platon 180
Pompei 106, 167
Proterozoik Devir 81, 101, 110,
115
protozoalar 72, 91, 98, 108, 131,
151, 158
pterozor 140, 146

R

radyoaktif izotoplar 31, 32, 49,
78, 80, 81, 188
radyometrik tarihleme 81, 158,
164
Rhynia 129, 130, 131, 132
Rhynie Çörtü 129, 132
Richard Bambach 160
rizoidler 130
RNA Dünyası hipotezi 70
Roderick Murchison 80
Roger Fu 57
Roger Revelle 194

S-Ş

Samanyolu 24, 65
Sanayi Devrimi 138, 184, 187
saropodlar 142, 143, 144
Senozoik Çağ 80, 152, 173
sera gazı etkisi 161, 173
sera gazları 79, 110, 187, 189
sıcakkanlı 143
Sibiryaya Tuzakları 158, 160, 161
Siccar Point 45, 46
silika 33, 35

silikat mineralleri 30, 34
silisyum dioksit 23, 24, 30
Simon Turner 58
siyanobakteriler 72, 92, 94,
95, 96, 97, 98, 116, 133, 139,
197
soğukkanlı 143
sölekanlar 133, 134
sölenteralar 108, 109, 112
sporopollenin 132
Stanley Miller 68
stomata 130
stromatolitler 74, 75, 76, 77
sülfür 29, 77, 90, 91, 92, 93
süngerler 108, 109, 117, 122
süper kıtalar 54, 55, 136, 140,
173
süpernova 23, 24, 28

T

T. H. Huxley 144
Tambora Dağı'nın patlaması
167
tarım 182, 183, 184, 187, 193
Tempo and Mode in Evolution
(Simpson) 155
Tetis 54
tetrapodlar 133, 134, 135, 138,
139, 141, 146
The Origins of Continents and
Ocean (Wegener) 47
Tiktaalik 135, 136, 146
timsahlar 140, 143, 163, 173,
174
titanozorlar 142
Trichoplax adhaerens 107, 108,
109
trilobitler 15, 117, 121, 127, 155,
167, 196

Triyas Dönemi 140, 162, 163
Tunguska Olayı 168

U-Ü

uranyum 23, 32, 34, 81

V-W

Vegetation Red Edge 218
volkanik faaliyetler 160, 162,
163, 164, 166, 167, 187
vücut ısısı 143
William Mackie 128
Wilson Döngüsü 55
Wonderful Life (Gould) 119

Y

yerçekimi 13
yosun hayvancıklar 121, 158
yumuşakçalar 117, 119, 162, 167

Z

zirkonlar 33, 34, 35, 57, 78, 81

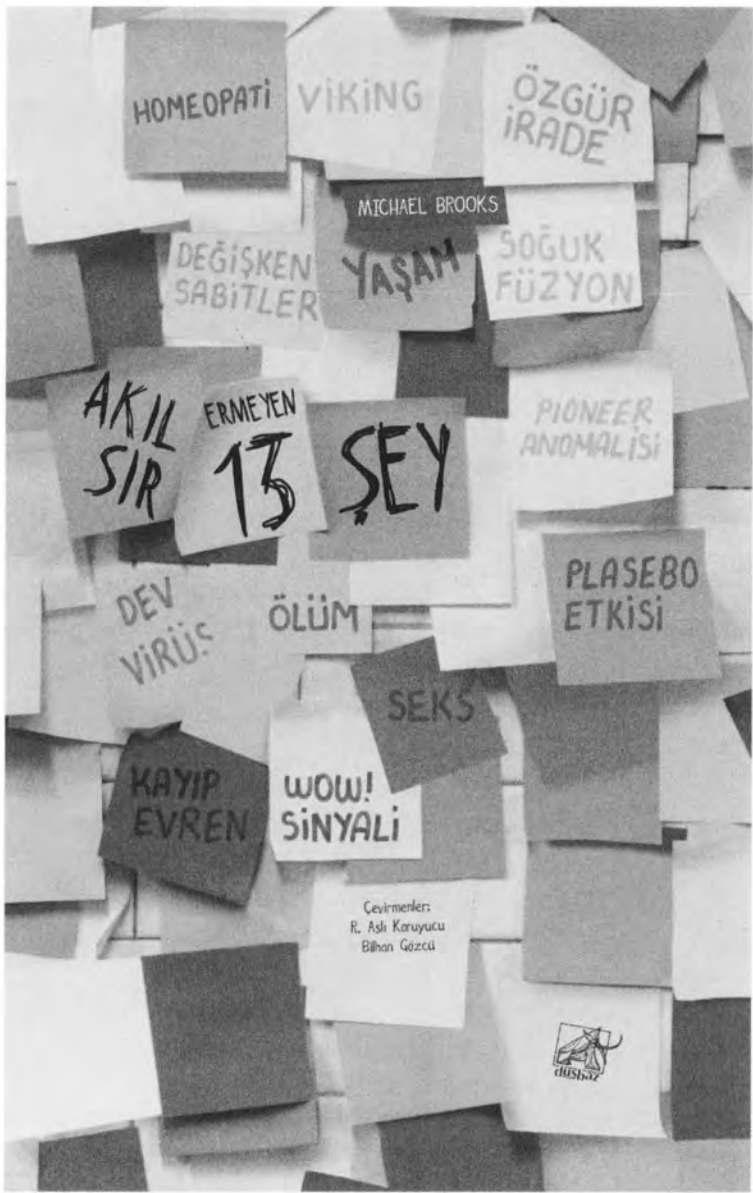
STUART CLARK

GEÇENİN IŞILTILI ÖRTÜSÜ

yıldızlar insanlık tarihimize
nasıl yön verdi?

ÇEVİRMEN: ELİF ALKAN





BİR PORSİYON SANAT



RÖPORTAJ

ERHAN AITUNAY, ZEYNEP ORAL, İSMAİL ACAR, DENİZ GÜVENSOY,

RAFET ARSLAN, TEMÜR KORAN, MURAT GÜLLÜ, GÜLÇİN ANMAÇ,

GÜNSELİ KATO, CEM MANSUR, SİNAN BÜDEYRİ, SERHAN BALI,

REFİK HAKAN TALU, EMRE KARTARI, EREN NOYAN, OKAY TEMİZ, ASLI PERKER,

HAKAN BIÇAKCI, AHMET ÜMİT, ÖZLEM KUMRULAR, SEVİN OKYAY,

ALİN TAŞCIYAN, ÜMİT ÜNAL, SEMİH KAPLANOĞLU, SİMGE GÜNSAN,

MÖSYO ŞOKOLA, SEVİM GÖKYILDIZ, OSMAN SERİM, ZAFER YENAL



kalori ALACAKSAN BUNA değecek

**KAAN
YARMAN**

