

# Keyifli Okumalar Dileriz

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

## RESMİ WEB SİTEMİZ

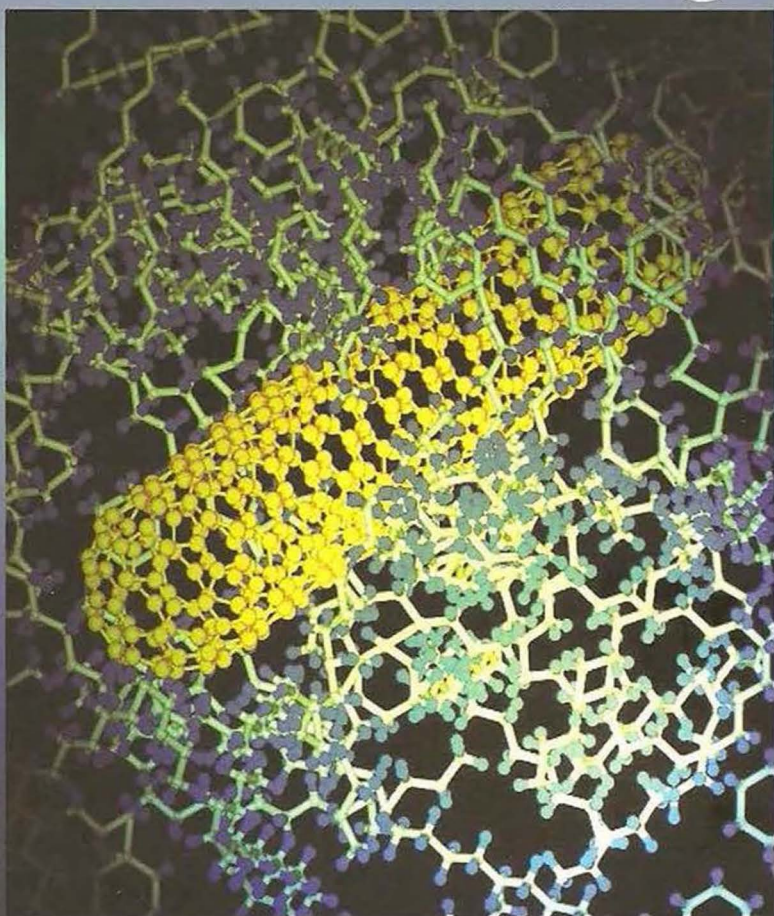
<https://rantey.org>

### 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>

# Nanobilim ve Nanoteknoloji



Şakir Erkoç

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

# NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİ

Şakir ERKOÇ



ODTU YAYINCILIK

# NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİ

ODTÜ Bilim ve Toplum Kitapları Dizisi

ISBN 978-9944-344-28-9



**ODTÜ Yayıncılık**

*Tüm yayın hakları ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.'ne aittir. Yazarın izni olmaksızın, hiçbir biçimde ve hiçbir yolla, bu kitabın içeriğinin bir bölümü ya da tümü yeniden üretilemez ve dağıtılamaz.*

**Kapak Tasarımı**

İdil ABA

**Redaksiyon**

Yener Lütfü MERT

**Sayfa Düzeni**

Fikirci Reklam Mat. Tic. Ltd. Şti.

**Baskı**

Aydoğdu Ofset Mat. Ambalaj San. Tic. Ltd. Şti.

2. Baskı - Kasım 2007

ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.

İnönü Bulvarı, ODTÜ Yerleşkesi 06531 ANKARA

Tlf: (312) 210 38 70 - 210 38 73

Faks: (312) 210 15 49

E-posta: [odtuyayincilik@odtuyayincilik.com.tr](mailto:odtuyayincilik@odtuyayincilik.com.tr)

İnternet: [www.odtuyayincilik.com.tr](http://www.odtuyayincilik.com.tr)

# İÇİNDEKİLER

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| ÖNSÖZ .....                                                    | V  |
| BAŞLARKEN .....                                                | 1  |
| <b>BÖLÜM I</b>                                                 |    |
| Bilim ve Teknolojinin Gelişim Süreci .....                     | 3  |
| <b>BÖLÜM II</b>                                                |    |
| Nanobilim ve Nanoteknolojide<br>Gelişmeler ve Uygulamalar..... | 7  |
| <b>BÖLÜM III</b>                                               |    |
| Nanobilim ve Nanoteknoloji Açısından<br>Karbon .....           | 29 |

## **BÖLÜM IV**

Nanobilim ve Nanoteknoloji Açısından

Topaklar.....55

## **BÖLÜM V**

Nanoölçekte Ölçme ve İnceleme

Yöntemleri .....71

**BİTİRİRKEN** .....85

**KAYNAKÇA** .....87

## **EK**

ODTÜ’de Nanobilim ve

Nanoteknoloji Çalışmaları .....97

# ÖNSÖZ

Ülkemizde bilime ve teknolojiye olan ilgiyi arttırarak toplumdaki farkındalık düzeyini yükseltmek, bilimin gündelik yaşamda kullanımını yaygınlaştırmak ve toplumun her katmanında bilimsel yaklaşım, araştırma, yaratıcılık ve analiz yeteneğini geliştirmeyi özendirmek üzere, 2006 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde Toplum ve Bilim Merkezi kurulmuştur. Bu Merkez çeşitli etkinliklerle toplum ve bilim arasındaki bağları güçlendirmeyi hedeflemektedir.

Toplum ve Bilim Merkezi Üniversitemizin 50. kuruluş yılında, çeşitli konularda merak edip, bir türlü öğrenmeye fırsat bulamadığımız genel bilgileri küçük kitaplar halinde yayınlamaya karar vermiştir. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Toplum ve Bilim Merkezi tarafından bir dizi olarak hazırlanan bu kitaplar, ilk etapta hepimizin günlük yaşamda sıklıkla duyduğumuz elli değişik konuyu kapsayacaktır.

Toplumumuzda önemli bir boşluğu doldurmak üzere tasarlanmış olan kitapların tümünü severek ve ilgi ile okuyacağınıza inanıyorum. Üniversitemizde görev yapmakta olan bir öğretim üyemizce yazılan elinizdeki bu kitap, nanobilim ve nanoteknolojiyi tanıtıcı güncel bilgileri okuyucuya sunmaktadır.

Saygılarımla,

**Prof. Dr. Ural AKBULUT**

**Orta Doğu Teknik Üniversitesi Rektörü**

# BAŞLARKEN

Bu küçük hacimli kitapçıkta nanobilim ve nanoteknolojiyi tanıtıcı bilgiler sunmak hedeflenmiştir. Konunun tarihi gelişiminden, bazı uygulama alanlarından özetle bilgi verilmiştir. Karbon, nanoteknolojinin gelişiminde önemli bir yer aldığı için ayrı bir bölüm olarak incelenmiş, nanoteknolojinin gelişmesi ve uygulanması bakımından topraklar (atom ve molekül toprakları) da ayrıca ele alınmıştır. Nanoölçekte ölçme ve inceleme yöntemleri de, ayrıca ele alınıp kısaca incelenmiştir. ODTÜ’de nanobilim ve nanoteknoloji alanında yapılan çalışmalar özetlenmiş ve ek olarak kitapçığın sonuna konmuştur.

Konu hakkında daha fazla bilgi kaynaklardan elde edilebilir. Bu kitabın düzeltmelerine katkılarından ötürü Arş. Gör. Osman Barış Malcıoğlu’na teşekkür ederim.

Kısa sürede hazırlanan bu kitabımızda mutlaka gözden kaçan hatalar olmuştur. Bunların tarafımıza iletilmesi ile gelecek baskılarda daha faydalı olunmasına çalışılacaktır. Kitap ile ilgili eleştiri ve önerilerinizi de yine aynı açıklıkla bekliyoruz.

Şakir ERKOÇ

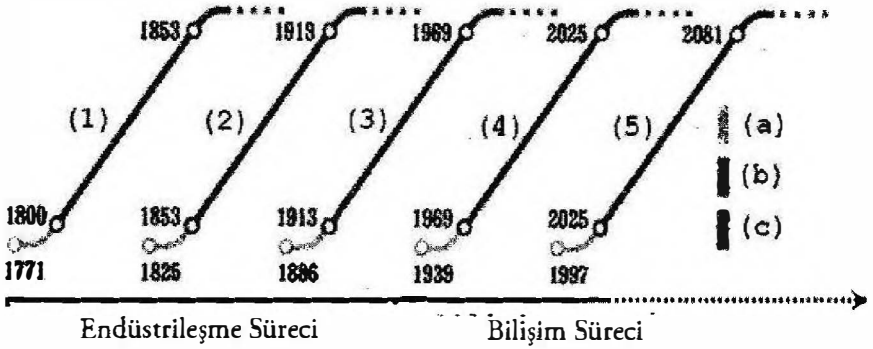
# BÖLÜM 1

## BİLİM VE TEKNOLOJİNİN GELİŞİM SÜRECİ

Bilim ve teknolojiadaki gelişmelerin sonucunda toplumların refah seviyesi yükselmektedir. Burada iki soru sorulabilir: Birincisi, “Refah seviyesini arttırmak için mi bilim ve teknolojiye gelişmeler oluyor?”, ikincisi ise “Bilim ve teknolojiadaki gelişmeler sonucunda mı refah seviyesi kendiliğinden artıyor?”. Bu iki soru birbirinden ayrı düşünülmemelidir. İhtiyaçlar sonucunda talep arttıkça gelişmeler olmakta, bazı durumlarda da gelişmeler sonucunda yeni talepler ortaya çıkabilmektedir.

Özellikle teknolojik gelişmeler sözkonusu olunca şu analizi yapmak yanlış olmayabilir: İnsan gücünün yetmediği ve yetersiz kaldığı durumlarda insanoğlunun düşünerek bu yetersizlikle baş etmeye yönelik çabaları sanayi devrimini başlatmıştır. Bilim tarihi incelendiğinde görülecektir ki bilim ve teknolojiye temel gelişmeler yüzyılda iki defa olmakta ve sonuçta toplumun refah seviyesi yükselmektedir. Son iki buçuk asır-

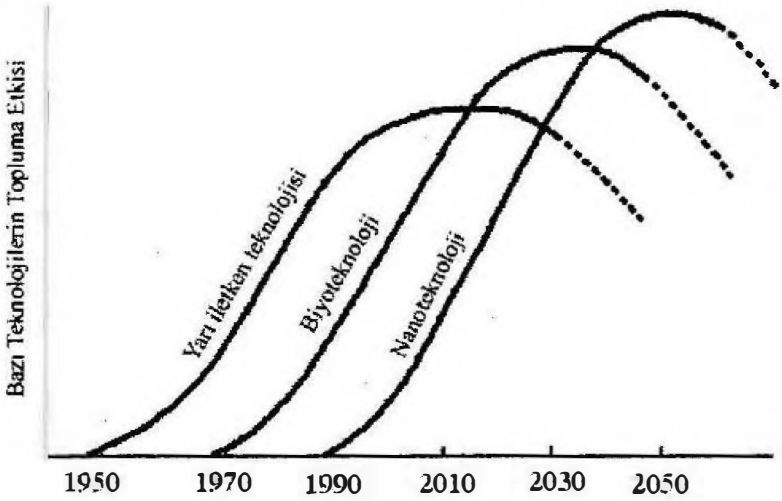
daki teknolojik gelişmeler buna iyi bir örnektir. 1700'lü yılların son çeyreğinde başlayan tekstil endüstrisindeki gelişmeler, ardından 1800'lü yılların ortalarında başlayan demiryollarındaki gelişmeler, 1900'lü yılların başlarında gelişen otomobil endüstrisi, 1900'lü yılların ortalarına yakın bir zamanda gelişen bilgisayar teknolojisi ve nihayet 1900'lü yılların sonlarında henüz başlangıç aşamasında olan nanoteknoloji. Söz konusu teknolojik gelişmeler şematik olarak gösterilmiştir:



*Son iki buçuk asırdaki teknolojik gelişmeler. (1) tekstil, (2) demiryolu, (3) otomobil, (4) bilgisayar, (5) nanoteknoloji. (a) başlaması, (b) yaygınlaşması, (c) gelişimini tamamlaması.*

Burada sözü edilen her bir teknolojik gelişmenin başlangıç (yahut buluş), gelişme ve olgunluğa erişme (ya da gelişimini tamamlama süreçlerinden geçtiği söylenebilir) dönemlerinden günümüze kadar ilk üç teknolojik gelişme sürecini tamamlamış görünüyor, bilgisayar teknolojisi henüz gelişme sürecinde, nanoteknoloji ise henüz başlangıç safhasındadır.

Temel bilimlerin doğrudan uygulaması olarak nitelenebilecek teknolojik gelişmelerin başında yarıiletken teknolojisi (elektronik teknolojisi), biyoteknoloji (biyolojik yapılardaki gelişmeler, yani hücre seviyesinde yapılan gelişmeler) ve nanoteknoloji sayılabilir. Bu teknolojik gelişmelerin toplum refahını yükseltmedeki etkileri zamana göre şematik olarak gösterilmiştir.



*Bazı teknolojik gelişmelerin toplum refahını yükseltmedeki etkilerinin zamana göre değişimi.*

Yukarıdaki şemalardan da anlaşılacağı gibi nanoteknoloji henüz başlangıç aşamasında olduğundan, bu sahada çalışma yapma fırsatı her toplum için vardır. Nanoteknoloji alanında ise Türkiye için bu kaçırılmayacak bir fırsattır.



# BÖLÜM 2

## NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİDE GELİŞMELER VE UYGULAMALAR

Nanoteknoloji, atom ve moleküllerin bir araya getirilmesi ile nanometre ölçeklerde işlevli yapıların oluşturulması şeklinde özetlenebilir. Peki neden nanometre? Bunu anlamak ve nanometrenin büyüklüğünü zihnimizde daha iyi canlandırabilmek için önce değişik uzunluk ölçülerini fiziksel açıdan karşılaştıralım:

| İsim      | Sembol | Değeri | Eşdeğeri                                                 | Açıklama                                                     |
|-----------|--------|--------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Kilometre | Gm     | $10^9$ | 1 gigametre<br>= 1.000.000.000 metre<br>= 1 milyar metre | Güneşin çapı yaklaşık olarak 1.390.000 kilometre veya 1.39Gm |
| Megametre | Mm     | $10^6$ | 1 megametre<br>= 1.000.000 metre<br>= 1 milyon metre     | Yaklaşık olarak İzmir - Elazığ arası kuş uçuşu mesafe        |

# NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİ

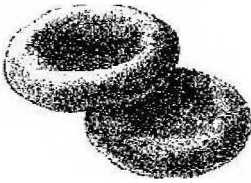
| İsim                        | Sembol        | Değeri    | Eşdeğeri                                                     | Açıklama                                              |
|-----------------------------|---------------|-----------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| kilometre                   | km            | $10^3$    | 1 kilometre<br>=1000 metre<br>=bin metre                     | Boğaz Köprüsünün uzunluğu yaklaşık olarak 1,5 km      |
| hektometre                  | hm            | $10^2$    | 1 hektometre<br>=100 metre<br>=yüz metre                     | Bir futbol sahası uzunluğu                            |
| dekametre                   | dam           | 10        | 1 dekametre<br>=10 metre<br>=on metre                        | Orca cinsi balinanın uzunluğu                         |
| metre                       | m             | 1         |                                                              | Kır yılanının uzunluğu                                |
| desimetre                   | dm            | $10^{-1}$ | 1 desimetre<br>=0,1 metre<br>=metrenin onda biri             | Bir beyaz farenin uzunluğu                            |
| santimetre                  | cm            | $10^{-2}$ | 1 santimetre<br>=0,01 metre<br>=metrenin yüzde biri          | İnsan elinde serçe parmağının tırnak genişliği        |
| milimetre                   | mm            | $10^{-3}$ | 1 milimetre<br>=0,001 metre<br>=metrenin binde biri          | Pirenin boyu                                          |
| mikrometre<br>(veya mikron) | $\mu\text{m}$ | $10^{-6}$ | 1 mikrometre<br>=0,000001 metre<br>=metrenin milyonda biri   | Bakterilerin boyu                                     |
| nanometre                   | nm            | $10^{-9}$ | 1 nanometre<br>=0,000000001 metre<br>=metrenin milyarda biri | Yaklaşık olarak insan saçı kalınlığının yüzbinde biri |

1 nanometre (nm)  $10^{-9}$  metre (m), metrenin milyarda biri, atomların büyüklüğü yaklaşık 0,1 nanometre (nanometrenin

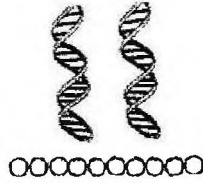
onda biri), insan saçının kalınlığı yaklaşık 100.000 nanometredir. Kullanılabilir bir nanoyapının büyüklüğünün 1 – 100 nanometre olduğu dikkate alınırsa nanoteknolojinin uğraş alanının atomlar ve moleküller düzeyinde olduğu açık bir şekilde görülür. Aslında, nanometre gerçekten de tam sınırdaki bir büyüklük, atomlar tek tek ele alındığında onların kendine has kuantum dünyası (mikroskopik dünya) için büyük, el ile tutulan, göz ile görülen davranışları (makroskopik dünya) için ise çok küçük olduğundan nanometre boyutlarında bir maddenin bu iki dünyanın karışımı ilginç özellikler taşıyacağı kuşku götürmez.



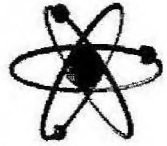
Bir milyon nanometre



Binlerce nanometre



Nanometre



Nanometre'den daha küçük

Farklı büyüklüklerin karşılaştırılması: Karıncanın başının genişliği bir milyon nanometre, biyolojik hücrelerin çapı bin nanometre, on tane yan yana konmuş hidrojen atomu bir nanometre, DNA molekülleri yaklaşık 2.5 nanometre, atomların çapları nanometrenin onda biridir. Bir insan saçının kalınlığı yaklaşık 100.000 nanometredir.

Nanoteknoloji, nanoölçek ebatlardaki yapıların ve bileşenlerinin fiziksel, kimyasal, biyolojik özellikleri değişen malzeme ve sistemlerle ilgilenir. Nanoölçekte belli bir işlevi olabilecek yapıların malzemelerini ve kendilerini kontrollü bir şekilde

üretebilmek, özelliklerini ve işlevlerini belirleyecek nanoebatlarda aygıt yapabilmek, bu aygıtları günlük hayatımızda kullanılır hale getirmek nanobilim ve nanoteknolojinin hedefidir.

Nanoebattaki yapıların özelliklerini makroskopik ölçekteki yapıların özelliklerini inceleyen, ölçen yöntemlerle tam olarak belirlemek mümkün değildir. Nanoölçekteki yapıların farklılıkları sadece ebatlarının küçüklüğü ile ilgili değil, ayrıca küçük ebatlarda farklı fiziksel özelliklerin ortaya çıkması ile de ilişkilidir. Ebatlar küçüldükçe kuantum özellikler (mikroskobik özellikler) daha belirgin hale gelir. Bunun en önemli sonuçlarından birisi atomların geometrik düzeninin maddenin bazı fiziksel özelliklerini etkilemesidir. Karbondan yapılmış malzemeler bu konuda çok iyi örneklerdir. Işın ilginç tarafı, karbondan başka elementlerden oluşmuş yapıların da boyutu azalınca benzer özellikler göstermesidir. Örneğin, bizmut kristali ile bizmut nanotelini ele alalım. Bizmut kristali makroskobik ebatla yarımetal bir malzemedir, fakat nanotel halinde yarıiletken bir malzeme özelliği göstermektedir. Aynı atomlardan oluştuğu halde farklı geometride birbirinden apayrı davranışa sahip iki farklı malzeme karşımıza çıkmaktadır, üstelik her iki yapıda da atomların birbirlerine bağlanma şekilleri aynıdır. Başka bir örnekte altını ele alalım; altın elementi makroskobik büyüklükte sarı renkli görünürken nanoebatlarda kırmızı renkte görünür. Yani maddenin sırf elektronik özellikleri değil, optik özellikleri de boyutu ile değişir. Bundan şu sonuç çıkarılabilir; malzemelerin nanoölçekteki yapılarını kontrol etmeyi başarmakla birçok özelliği ve dolayısı ile işlevleri kontrol edilebilmektedir.

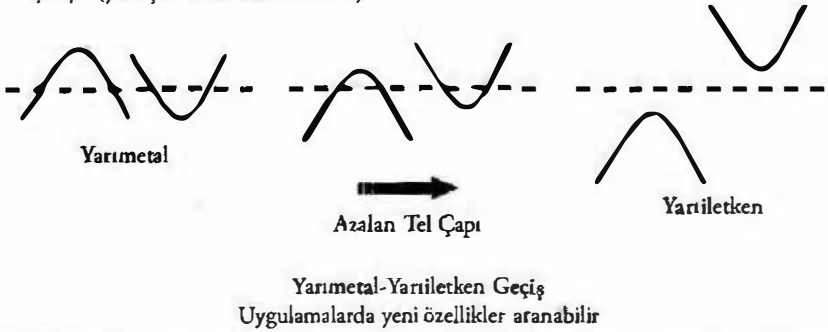
## Kuantum Sınırlama Yeni Malzeme Sınıfları Oluşturur

### • Bizmut Kristal

- Grup V elementi
- Kristal yapıda yarı metal
- İletkenlik bandı (elektron) valans bandı (boşluk) ile çakışır (yaklaşık 38 milielektronvolt)

### • Bizmut Nanotel

- Yaklaşık 50 nanometre tel çapı civarında kuantum sınırlama etkisiyle yarımetal-yarıiletken geçişi olur

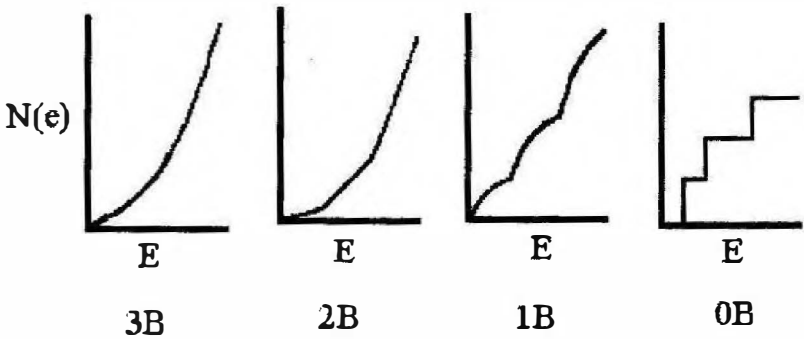


*Bizmutun metal ve yarıiletken özelliği malzemenin boyutuna bağlıdır.*

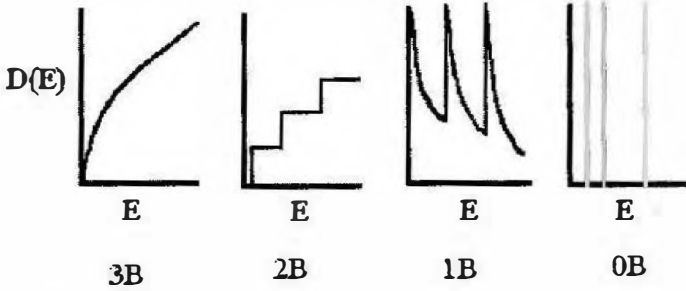
## Malzemelerde Boyut

Malzemelerde boyut ile ebat arasında fark vardır; malzemelerin ebatlarının küçülmesi farklı bir olay, boyutlarının azaltılması ise daha farklı bir olaydır. Malzemelerin boyutları bulundurdıkları serbest elektronların hareket serbestlikleri ile ilgilidir. Hareket serbestliğinden elektron akımının olabileceği anlaşılır. Eğer serbest elektronlar üç yönde de hareket edebiliyorlarsa o zaman malzeme "3B" (üç boyutlu) yapı olarak adlandırılır, bütün kristal yapılar bu sınıfa girer. Katı madde olarak bilinen yapılar "3B" yapılarıdır. Eğer serbest elektronlar sadece iki yönde hareket edebiliyorlarsa o zaman malzeme "2B" (iki boyutlu) yapıya sahip demektir. Hemen hemen bütün katmanlı yapılar bu sınıfa girer. Katmanlı yapılarda bir kat

bir cins atomdan oluşurken başka bir kat da başka bir cins atomdan oluşur. Örneğin Silisyum/Germanyum gibi katmanlı yapılar hep 2B yapılarıdır. Serbest elektronları tek yönde hareket kabiliyetine sahip olan malzemeler de “1B” (bir boyutlu) yapılar olarak adlandırılır. Nanotel, nanotüp gibi yapılar bu guruba girer. Ayrıca serbest elektronların bulunduğu, ama yapının üç boyutla sınırlı olması sebebi ile hareket kabiliyeti olmadığı yapılar da vardır; bunlara da “0B” (sıfır boyutlu) yapılar denir. Nanotop, kuantum nokta, topaklar bu sınıftadır. İlk başta belirli bir elektronik işlevi olamazmış gibi gözükse de, bu tür yapılar kuantum bilgisayarlar da dahil birçok uygulamanın vazgeçilmez bileşenidir. Malzemelerin elektronik özellikleri, işlevleri boyutu ile doğrudan ilgilidir. Nanobilim olarak adlandırılan alanda bu tür çalışmalar yapılmaktadır. Malzemelerin elektronik özelliklerinin boyutlarına göre farklılığı şematik olarak görülmektedir:



*Malzemelerin boyutlarına göre değişen elektronik özellikleri: Elektron sayısının ( $N(e)$ ) enerjiye göre değişiminin farklı boyutlardaki görünümü.*



*Malzemelerin boyutlarına göre değişen elektronik özellikleri: Durum yoğunluğunun ( $D(E)$ ) enerjiye göre değişiminin farklı boyutlardaki görünümü.*

Herhangi bir boyutta olan bir malzemenin tek yapı örneği olmayabilir, örneğin 1B'lu olan bir malzemenin birden fazla farklı yapısı olabilir. Yine bizmuttan örnek verilecek olursa 1B'lu bizmutun üç farklı yapısı vardır; çubuk yapısı, tüp yapısı ve atom dizisi yapısı. Çubuk yapısının iç kısmı kristal yapı özelliğindedir, tüp yapısının içi boştur, atom dizisi şeklindeki yapılar ise bir kristal yüzeyine dizilmiş atomlardan oluşur. Bunların hepsi nanotel olarak değerlendirilebilir.



Bizmut nanotel



Bizmut nanotüp



Bizmut atom dizisi

Bir boyutlu bizmutun üç ayrı yapısı: Çubuk (içi dolu), tüp (içi boş) ve atom dizisidir, herbiri farklı yapı ve özelliklere sahip olduğundan uygulamada seçim önemlidir.

## Nanoteknolojinin Gelişme Süreci

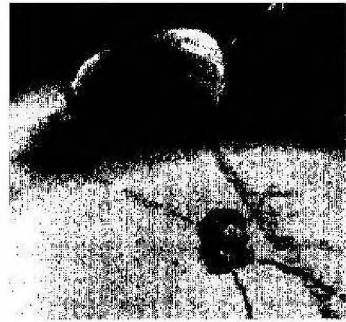
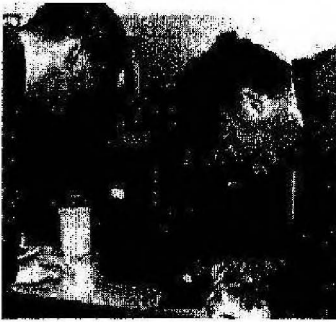
Şimdi biraz da nanoteknolojinin tarihçesinden söz edelim. Bu konuya ünlü fizikçi Richard Feynman (1918-1988) ile başlamak uygun olacaktır. Richard Feynman, öngörülleri, bilimi herkese yayma çabaları ve verdiği seminerleri ile fizikçiler arasında tanınmış bir bilim adamıdır. Kuantum elektrodinamiği sahasında yapmış olduğu çalışmlarla 1965 yılında Fizik Nobel ödülünü almıştır. Bu ünlü fizikçi 1959’da bir konferansta “There is plenty of room at the bottom” (Aşağıda daha çok yer var) başlıklı bir konuşma yapmıştır. Feynmann bu konuşmasında eğer atom ve molekül büyüklüklerinde imalat yapılabilirse birçok yeni keşiflerin olabileceğini söylemiş, Feynmann bu konuşmasında ayrıca böyle bir şeyin gerçekleşebilmesi için ilk başta nano ölçekte özel ölçme ve üretim yöntemlerinin geliştirilmesi gerektiğini belirtmiştir. Feynmann’ın bu meşhur konuşması nanobilim ve nanoteknolojinin başlangıcı kabul edilmektedir.

Feynmann 1959’da yaptığı konuşmasında özetle şunları öngörmüştür:

- 24 ciltlik Brittanica Ansiklopedisini bir toplu iğne başına neden yazamayalım?
- Küçük ölçekte bilgi
- Daha iyi elektron mikroskobu
- Fevkalade biyolojik yapılar
- Bilgisayarları minyatürleştirme
- Buharlaştırma yolu ile minyatürleştirme
- Sürtünme sorunları
- Yüzlerce minik el

- Atomları yeniden organize etme
- Küçük bir dünyada atomlar

Feynmann'ın 1959'daki konuşmasında şu önemli gözlemle karşılaşırız: Herhangi bir konuda bir gelişme, atılım yapmak istenirse insanları, özellikle gençleri, sözkonusu konu ile ilgili olarak yarışmalar düzenleyerek rekabete sokmak itici bir güç olacaktır. Feynman konuşmasında şöyle bir hayali de örnek vermiştir: Bir lisenin öğrencileri bir toplu iğne başına "iyi mi?" yazısını yazıp rakip lise öğrencilerine gönderirler, onlar da bunun üzerine toplu iğnenin başı üzerindeki yazının i harflerinden birisinin noktası içine "o kadar da değil!" yazısını yazıp gönderirler. Feynmann gerçekleşmesini hayal ettiği bu düşünceye göre 1960'lı yılların başında Feynmann üniversite öğrencileri arasında bir yarışma düzenlemiştir. Kim çalışır vaziyette dünyanın en küçük elektrik motorunu yapabilirse ona 1000 \$ ödül vereceğini vaat etmiştir. Kısa süre içinde bunu gerçekleştirmiştir de. Önemli gelişmeleri, hayal gücü geniş insanların gerçekleştirebileceği bir kez daha kanıtlanmış oluyor.



*R. Feynmann optik mikoskopta W. McLellan tarafında yapılan elektrik motoruna bakıyor. Sağ taraftaki resimde elektrik motoru toplu iğne başı ile mukayese edilmektedir.*

Feynmann'ın öngördüğü düşünceler 1980'lere kadar gerçekleşmedi. 1980'li yılların başlarında nanoyapıların bazı fiziksel büyüklüklerini ölçmek ve nano ölçekte malzeme üretmek maksadıyla kullanılabilecek bazı yöntemler ve aygıtlar geliştirildi, böylece Feynman'ın bahsettiği ilk adım atılmış oldu; taramalı tünellemeli mikroskoplar, atom kuvveti mikroskopları, yakın alan mikroskopları bunlardan bazılarıdır. Daha sonra yer alan en önemli gelişmelerden biri 1985'te karbon nanotopların ve hemen ardından 1991'de karbon nanotüplerin keşfidir. Çok yakın tarihli önemli bir gelişme ise 2001'de nanolaser gerçekleştirilmesidir. Bu gelişmelerle beraber bilgisayarların gelişmesi de bu konuda kuramsal çalışmaların, özellikle bilgisayar (benzetişim) simülasyon çalışmalarının yaygınlaşmasını sağlamıştır. Deneylerin mümkün olmadığı durumlarda veya çok zor deney şartlarında bilgisayar benzetişimleri çok değerli ön bilgiler sağlar. Gelişmeler (hem deneysel hem de kuramsal açıdan) artan bir hızla devam etmektedir. Gelişmiş ülkeler bu sahada araştırma ve geliştirme yapabilmek için bütçelerinden çok miktarda para ayırarak sırf bu sahada çalışma yapan merkezler (Nanoteknoloji Merkezleri) kurmuşlardır.

Nanobilim ve Nanoteknolojinin gelişmesi ve yaygınlaştırılmasındaki öncü çalışmalar olarak nanoölçekte ölçme ve inceleme yapabilen mikroskoplar ile karbon nanotoplar ve nanotüplerin keşfinin olduğu söylenebilir. Bu konulardaki öncülerin resimleri arka sayfada görülebilir.



Gerd Binnig



Heinrich Rohrer



Sumio Iijima



Robert F. Curl Jr.



Harold W. Kroto



Richard E. Smalley

Taramalı tünellemeli mikroskopun mucitleri G. Binnig (Almanya) ve H. Rohrer'e (İsviçre) bu başarılarından ötürü 1986 yılında Fizik Nobel Ödülü verildi. Karbon nanotopların keşifleri R.F. Curl Jr. (ABD), H.W. Kroto (İngiltere) ve R.E. Smalley (ABD) bu başarılarından ötürü 1996 yılında Kimya Nobel Ödülü kazanmış. Karbon nanotüpleri keşfeden Japon bilim adamı S. Iijima bu başarısından dolayı 2002 yılında Benjamin Franklin Fizik Madalyası ile ödüllendirilmiştir.

### **Nanobilim ve nanoteknolojinin kronolojik gelişimi**

1959: Richard Feynman meşhur konuşmasını yaptı.

1974: Aviram ve Seiden ilk moleküler elektronik aygıt için patent aldı.

1981: G.K. Binnig ve H. Rohrer atomları tek tek görüntüleyebilmek için STM'yi icat ettiler.

- 1985: R. Curl Jr., H. Kroto, R. Smalley  $C_{60}$ 'ı keşfettiler.
- 1986: G.K. Binnig, C.F. Quate, C. Gerber AFM'yi icat ettiler.
- 1986: K.E. Drexler "Engines of Creation" kitabını yayınladı (moleküler nanoteknoloji fikri).
- 1987: İletkenliğin kuantum özelliği ilk defa gözlemlendi.
- 1987: T.A. Fulton ve G.J. Dolan ilk defa tek elektron transistörü yaptı.
- 1988: W. De Grado ve ekibi ilk defa suni protein yaptılar.
- 1989: IBM (Zurich)'de 35 Xe atomundan IBM yazısı yazıldı.
- 1991: Iijima çok duvarlı karbon nanotüpleri keşfetti.
- 1993: Iijima ve Bethune tek duvarlı karbon nanotüpleri keşfetti.
- 1993: Rice Üniversitesi'nde (ABD) ilk "nanoteknoloji" laboratuvarı kuruldu.
- 1997: N. Seeman ilk defa DNA molekülü kullanarak nanomekanik aygıt yaptı.
- 1997: İlk defa nanotüp kullanarak elektrik akımı ölçüldü.
- 1998: C. Dekker ve ekibi TUBEFET yaptı.
- 1999: M. Reed ve J.M. Tour ilk defa tek organik molekül ile elektronik anahtar yaptı.
- 2000: ABD'de ilk defa nanoteknoloji araştırmaları için 422 Milyon \$ kaynak ayrıldı.
- 2001: İlk defa nanotüplerden transistör ve mantık devreleri yapıldı.
- 2001: ZnO nanotel laseri yapıldı.

2002: Superörgü nanoteller yapıldı.

2005: İlk dört tekerlekli nano araba modeli hareket ettirildi.

### **Nanoteknolojinin uygulama alanları ve etkileri**

Nanoteknolojinin uygulama alanları geniş olmakla beraber bazı sahalarda etkisi ve önemi daha da fazladır. Bunlardan bazılarını özetleyelim:

**Malzeme ve imalat:** Nanoteknoloji gelecekte yapılması düşünülen malzeme ve aygıt üretim yöntemlerinin değişmesini; nanoölçekte işlevi olan malzeme ve aygıtların makroskobik boyutlardaki malzeme içine yerleştirilmesini ve bunların çok miktarda hatasız üretilmesi için yeni yöntemlerin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Nanoölçekteki malzemelerin daha hafif, daha sağlam, programlanabilir malzemeler olması, daha az malzeme kullanımı, üretim safhasında daha az enerji gereksinimi, artık malzeme üretmemesi gibi avantajlar nanoimalatta önemli hususlardır.

Nanoölçekte imalat “yukarıdan-aşağıya” ve “aşağıdan-yukarıya” yöntemleri olmak üzere başlıca iki kısma ayrılabilir:

#### **Nanoyapıları imal etme yöntemleri Nano imalat (Nanoüretim)**

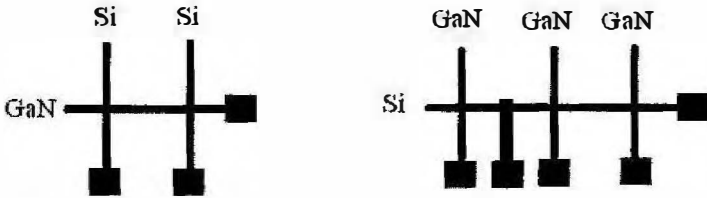
**Yukarıdan - Aşağıya Yöntemi**  
Nanoyapıların makroyapılardan üretilmesi

**Aşağıdan - Yukarıya Yöntemi**  
Nanoyapıların atomların veya moleküllerin dizilmesiyle oluşturulması

Tabiatta mevcut olmayan yeni yapıların tasarlanması mümkün olabilir; biyolojik malzemeler de dahil olmak üzere düşük maliyetli üretim yöntemleri geliştirilebilir. Muhtemel

uygulama alanları: Sonradan işlenmeye ihtiyaç duyulmadan tam istendiği şekli ile nanoyapıda metal, seramik, polimer malzemeler; nanoölçekte parçacıklardan yapılmış boya ve boyar maddeler kullanılarak geliştirilen baskı yöntemleri; nanoölçekte kaplama yapılmış kesme aletleri, elektronik, kimyasal uygulamalar; nanoölçekte yeni ölçüm standartları; yonga üzerinde nanoölçekte karmaşık ve çok işlevli nanoüretimdir.

**Nanoelektronik ve Bilgisayar Teknolojisi:** Nanoölçekte elektronik devre elemanlarının üretilmesiyle bilgisayar mimari tasarımında yeni gelişmeler beklenmektedir. Henüz sözkonusu elemanların üretimi, birbirleri ile uyumlu çalışacak şekilde birleştirilme işlemleri tam olarak bilinmemektedir. Nanoölçekte bilgi depolama elemanları ayrı bir önem kazanmaktadır. Nanoölçekte elektronik devre elemanları daha az enerji ile işlevlerini yerine getirebildiğinden nanoteknoloji ürünü bilgisayarların günümüz teknolojisi ile üretilen bilgisayarlara kıyasla ebat olarak daha küçük, hız ve kapasite olarak daha büyük, harcadığı enerji bakımından çok daha ekonomik olacağı beklenmektedir. Bu sahadaki gelişme, bilişim teknolojilerinin gelişmesini de sağlayacaktır. Nanoteller kullanılarak nanoölçekte “ve”, “veya” gibi mantık devreleri için tasarım örnekleri yapılmıştır.



*Silisyum (Si) ve galyum nitrür (GaN) nanotellerden yapılmış “ve”, “veya” mantık devre örnekleri (şematik).*

**Havacılık ve Uzay Çalışmaları:** Uzay yolculuklarında gerekli olan yakıt hem ağırlık bakımından hem de hacim bakımından günümüz teknolojileri ile sınırlı miktarda alınabilmektedir. Nanoteknoloji ürünü malzemeler ve aygıtların kullanılması bu sahadaki zorluklara da çözüm getirecektir. Nanoyapılı malzemeler daha hafif, daha sağlam, sıcaklığa karşı daha dayanıklı olmaları sebebiyle roket ve uzay istasyonlarının yapımında önemli olmaktadır. Muhtemel uygulamalar: Az enerji gerektiren, radyasyona karşı dayanıklı, yüksek verimli bilgisayarların yapımında; mikro ölçekteki uzay araçlarında kullanılabilecek nano ölçekte aletler; nanoyapılı algılayıcılar ve nanoelektronik ile desteklenen uçuş istemleri yapımı; ısıya dayanıklı nanoyapılı kaplama malzemeleri olabilir.

**Tıp ve Sağlık:** Canlıların yapıtaşı hücreler nanometre ölçekteki moleküllerden oluşur. Nanoteknolojinin doğadaki işlevsel karşılığı olarak hücreyi göstermek mümkün, dolayısı ile bu konudaki anlayışımızı ilerletmek için canlıları ayrıntılı incelememiz kaçınılmazdır. Bu yapılara nanoölçekte bakıldığında fizik, kimya, biyoloji ile beraber (bilgisayar benzetişimlerinin) “simülasyon, modelleme” de uygulandığı disiplinler arası bir araştırma sahası ile karşılaşılır. Böylece disiplinler arası işbirliği nanobiyoteknoloji gibi sahalarda önemli gelişmeler yapılmasını sağlayacaktır. Hayatın yapıtaşları, proteinler, nükleik asitler, lipidler, karbohidratlar, ebatları ile kıvrımları ile dizilişleri ile belirli özellikleri olan nanoölçekteki malzemelere örnek sayılabilir. Günümüzde gen çalışmalarının zorluğunun nanoölçekteki aygıtlarla giderilebileceği görüşü yaygındır. Bu sahadaki gelişmelerin hem teşhiste hem de tedavide yeni yöntemlerin geliştirilmesini sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca yeni biyolojik malzeme üretiminin gerçekleşmesiyle suni

organ yedeklemenin mümkün olacağı inancı kuvvetlenmektedir. Bu sahada bilgisayar modelleme çalışmaları ile gerçek ortamlardaymış gibi makromoleküllerin davranışları hakkında bilgi edinmek mümkün olacaktır. Böylece modellemelerin yapılması biyolojik malzeme geliştirilmesinde ve yeni ilaç tasarımlarında zorunlu hale gelmiştir. Muhtemel uygulamalar: Daha hızlı gen çalışmalarının yapılması ile teşhis ve tedavide yeni gelişmeler olabilir, vücut içerisine yerleştirilebilen muhtelif ölçüm cihazları hem daha hassas sonuç verebilir hem de daha ekonomik olabilir, ilaçların vücutta sadece gerekli olduğu bölgede kullanımını sağlayarak olası yan etkiler yok edilebilir, vücut tarafından reddedilmeye dayanıklı suni doku ve organ malzemesi üretilebilir, görme ve duyma işlevlerinde yeni gelişmeler sağlanabilir, tehlikeli hastalıkları haber veren algılayıcı sistemler vücuda yerleştirilebilir. Yakın vadede beklenen en önemli katkı, nanoölçekte malzemelerin nasıl kendi kendini ürettiğinin anlaşılmasıyla “self-assembly” proteinlerin ve çeşitli organik maddelerin üretim şekli kopyalanabilir, nanoteknoloji çok daha iyi uygulanabilir ve kontrol edilebilir.

**Çevre ve Enerji:** Nanoteknolojinin enerjinin verimli kullanılmasında, depolanmasında ve üretilmesinde önemli etkileri vardır. Çevre sorunlarının gözlenmesinde ve giderilmesinde kullanılabilir, çeşitli kaynaklardan gelen atıklar önlenebilir, daha az atık yapan üretim sistemleri geliştirilebilir. Gelecekte yaşamsal bir ihtiyaç haline gelecek olan temiz su elde edilmesinde nanofiltreler kullanılabilir. Kataliz işlemlerinde katalizör malzemelerinin nano ölçekte olmasından dolayı nanoteknolojinin kimya endüstrisinde önemli bir yeri vardır. Petrol endüstrisinde kullanılan gözenekli yapıdaki malzemeler “porus malzemeler” nanoteknoloji ürünü olarak karşımıza çıkmakta-

dır. Otomobil endüstrisinde kullanılan nanoteknoloji ürünü malzemelerden yapılmış daha hafif otomobiller daha az yakıt harcadacağı için çevreyi daha az kirletecek, ayrıca daha ekonomik olacaktır. Otomobil tekerleklerindeki lastiklerde siyah-carbon yerine nanoteknoloji ürünü inorganik kil ve polimer kullanılması çevre dostu lastiklerin yapımında nanorobotların ve akıllı sistemlerin nükleer atıkların kontrolünde ve filtrelenmesinde kullanılma olasılığı vardır.

Nanoteknolojinin uygulama alanlarından önemli sayılabilecek başka bir konu da temiz enerji kaynağı olarak kabul edilen hidrojen enerjisi ile ilgilidir. Bu konu başlı başına incelemeye değer ve önemli olmasına rağmen nanoteknoloji ile ilişkisinden kısaca bahsedelim. Hidrojen enerjisi konusunda üç önemli husus vardır, bunlar; hidrojen gazının üretilmesi, hidrojen gazının depolanması ve hidrojen gazının depoya konması ve depodan çekilmesi safhalarıdır.

Bu üç husus birbirinden bağımsız olarak araştırma yapılabilecek önemdedir; henüz araştırmalar devam etmekte olduğundan, özellikle hidrojen gazını depolama işi şimdilik tamamen nanobilim ve nanoteknoloji konusu olarak görülmekte, hidrojen gazını depolama işine nanoölçekte çözüm aramak gerekmektedir.

**Biyoteknoloji ve Tarım:** Biosentezleme ve biyoişleme yeni kimyasal ve ecza malzemesi sağlayabilir. Biyolojik yapı taşlarının suni malzemelerin ve aygıtların içine yerleştirilmesiyle biyolojik işlev ve başka istenen özelliklere sahip malzemeler üretilebilir. Tarımda da nanoteknolojinin kullanım alanları vardır. Örneğin bitkileri böceklerle karşı korumak için moleküler seviyede kimyasalların geliştirilmesi; hayvanlar ve bitkilerin

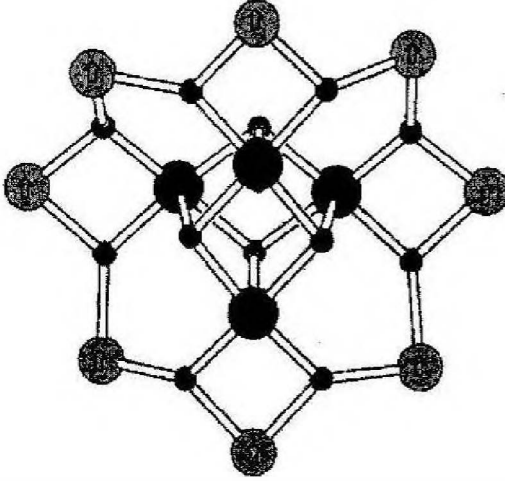
genlerinin, hayvanlar için ilaçların, DNA testleri için nano ölçekte kontrol yöntemlerinin geliştirilmesi sağlanabilir.

**Savunma:** Savunma sanayiinde nanoteknolojinin önemli bir yer vardır. Bazı uygulama alanları: Nanoelektronik yardımı ile haberleşme askeri açıdan çok önemlidir; yine nanoelektronik yardımı ile çok karmaşık eğitim sistemleri yapılabilir, robot sistemlerinin etkin kullanılması ile daha az insan gücü kullanımı sağlanabilir, böylece insan vücudunun tahammül sınırları dışında da etkin kullanımı gerçekleştirilebilir, nanomalzemelerden yapılmış bazı aygıtlar daha hafif ve daha sağlam, daha uzun ömürlü olabilir, nano algılayıcılar ile zararlı gazlar ve radyoaktif serpinti tespit edilebilir, nano ve mikro mekanik aygıtların birleştirilmesi ile nükleer savunma sistemleri kontrol edilebilir. Nanoteknoloji ürünü tekstil malzemeleri ile akıllı giyecekler yapılabilir.

**Bilim ve Eğitim:** Nanobilim ve nanoteknoloji fizik, kimya, biyoloji gibi temel bilimlerle malzeme, elektronik, kimya, makine, bilgisayar mühendisliği gibi uygulamalı bilimlerin ortak ilgi alanına girdiğinden nanoteknoloji disiplinleri arası işbirliği yapılarak sonuç alınabilecek bir sahadır, eğitim programlarında da bu gelişmeye uygun olarak yeni düzenlemeler yapılması gerekir. Birçok gelişmiş ülkede bu alandaki gelişmeler dikkate alınarak yeni programlar açılmaktadır. Türkiye’de de bu yönde gelişmelerin başlamış olması sevindiricidir.

**Başka Muhtemel Uygulamalar:** Nanobilim ve nanoteknoloji yukarıda belirtilen uygulama alanları ile sınırlı değildir. Başka uygulama alanları da olabilir. Bunlardan bazıları: Daha hafif ve daha emniyetli taşıma sistemleri geliştirilebilir; kirlilik ölçümleri, kontrolü, azaltıcı yöntemleri geliştirilebilir; güveni-

lir adli araştırmalar yapılabilir, kaliteli baskı işleri yapılabilir, kuantum özellikleri çeşitli işlerde, özellikle yeni ve devrimsel bilgisayar uygulamalarında kullanılabilir, örneğın elektronların spinleri bilgi iletimi için kullanılabilir “spintronik”; çeşitli maksatlar için kullanılabilcek nanometre boyutlarında mıknatıs yapılabilir, vb.



*Bir nanomıknatıs, moleküler mıknatıs örneğı.*

*Bu örneğ üç farklı atom içermekte.*

Nanoboyutta makine (veya robot) yapmak ilerisi için düşünölen en önemli ve heyecan verici konulardan birisi olmaya şimdiden adaydır. Yapılabilecek nanomakinelerin elemanlarını birçok araştırmacı şimdiden tasarlamaya başlamıştır. Böyle makine elemanlarına birkaç örneğ gösterilmiştir.



*Nanomakineler için tasarlanmış eleman örnekleri.  
(www.somewhereville.com'dan derleme.)*

## NANOYAPI

## İŞLEVİ

**Protein  
motorlar**



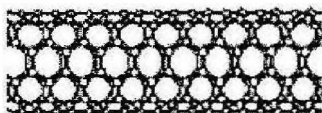
**Nano-mekanik  
yapı**

**DNA**



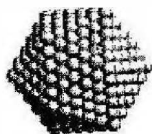
**Bilgi depolama,  
çok seçici  
molekül zanka**

**Nanotüp**



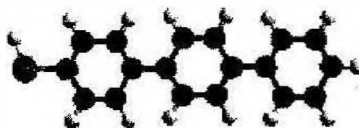
**Nanoteller,  
kimyasal  
algılayıcılar**

**Topaklar**



**Kuantum  
noktalar**

**Konjuge  
moleküller**



**Nanoteller**

*Farklı nanoyapılar ve muhtemel işlevlerine örnekler.*



# BÖLÜM 3

## NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİ AÇISINDAN KARBON

### Giriş

Biyolojik yapılar nanoteknolojinin gelişmesinde ilham kaynağı olmuştur. Karbonun organik maddelerdeki yaygınlığı ve vazgeçilmezliği düşünüldüğünde, -sonuçta bütün canlıların karbon esaslı hayatı var-, nanoteknoloji açısından karbon atomunun ne kadar önemli olduğu açıkça görülecektir.

Altmış tane karbon atomunun futbol topu şeklinde bir kafes yapısı halini alarak oluşturduğu  $C_{60}$  molekülünün 1985 yılında deneysel olarak ilk defa elde edilmesinin, nanobilimin kapısını araladığını söyleyebiliriz. Arkasından 1991 yılında yine deneysel olarak ilk defa karbon nanotüp yapıların elde edilmesi nanoteknoloji sürecini başlattı ve bu alandaki deneysel ve kuramsal

çalışmaları hızlandırdı. Karbon nanotüpler sahip olduğu yapısal ve mekanik özellikler açısından nanoölçekteki malzemelere en güzel örneklerden biridir ve belki de ilk nanoteknolojiye has uygulamalar bu yapı kullanılarak gerçekleşmiştir. Daha sonraki gelişmeler nanobilim ve nanoteknolojide farklı malzemeler ve yapılar üzerinde de çalışmaların yapıldığını göstermektedir; ancak günümüzde yapılan çalışmaları da göz önüne aldığımızda nanoyapılar üzerindeki çalışmaların çoğu karbon esaslı malzemeleri oluşturmaktadır. Nanobilim ve/veya nanoteknoloji denildiğinde akla ilk önce karbon nanoyapılar gelmektedir, çünkü bu sahada öncü element karbon atomudur, öncü malzeme de karbon esaslı malzemelerdir. Bu bölümde karbon nanoyapılar üzerinde durulacaktır.

Karbon atomlarından oluşan malzemeler karbon atomlarının kendi aralarındaki bağlanma geometrisine göre çok farklı fiziksel ve kimyasal özellikler gösterir. Karbon atomunun böyle bir özelliğe sahip olmasının sebebi 6 tane elektronunun olmasıdır. Karbon atomu 6 elektronu ile periyodik tabloda IV. grup elementlerinin ilk elemanıdır. Karbon atomunun elektronlarından ilk ikisinin bağlanmaya hiç etkisinin olmaması, ayrıca ilk iki elektron ile geri kalan elektronların enerjileri arasındaki farkın da büyük olması karbonun farklı yapılar oluşturabilmesini sağlamaktadır. Bu özelliklerde başka bir elementin olmaması karbonu rakipsiz yapmakta ve belki de dünyada hayatın karbon esaslı olması bu sebebe dayanmaktadır.

Karbon atomları kendi aralarında üç farklı bağlanma gösterir; bunlar bağlanmaya dahil olan elektronların karışımına göre  $sp$ ,  $sp^2$  ve  $sp^3$  gösterimi ile ifade edilir. Bu gösterimler aynı zamanda bağlanma geometrisini de temsil ederler:  $sp$  ile tanımlanan bağlanmada karbon atomları birbirleri ile doğrusal

bir geometri oluşturur ve her atomda iki bağ bulunur; asetilen molekülünde olduğu gibi ( $C_2H_2$ ).  $sp^2$  ile tanımlanan bağlanmada karbon atomları birbirleri ile üçgen bir geometri oluşturur ve her atomda üç bağ bulunur, grafit plakalarında olduğu gibi,  $sp^3$  ile tanımlanan bağlanmada karbon atomları birbirleri ile piramit bir geometri oluşturur ve her atomda dört bağ bulunur, elmas kristalinde olduğu gibi. Buradaki her bir farklı geometrik şekil farklı bir malzeme anlamına gelir. Karbon elementi her üç bağlanma geometrisini gösterebilen tek element olması bakımından istisnai bir özelliğe sahiptir.



*Karbon atomlarının  $sp$ ,  $sp^2$  ve  $sp^3$  bağlanma şekilleri.*

**Karbon esaslı malzemeler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:**

**Elmas:** Karbonun çok iyi bilinen kristal yapısıdır. Atomlar birbirleri ile  $sp^3$  şeklinde bağlanır. Tabii olarak bulunduğu gibi laboratuvar da tek kristal olarak üretilir. Çok sert bir yapıya sahip olması başlıca özelliğidir.

**Grafit:** Grafit de karbonun çok iyi bilinen başka bir kristal yapısıdır. Grafit yapıda (grafit plakalarda) karbon atomları birbirleri ile  $sp^2$  şeklinde bağlanır. Grafit tabii olarak bulunduğu gibi laboratuvar da tek kristal olarak üretilir, buna “kish” grafit denmektedir.

**Karbon Şiberler:** Grafit özellikli, silindir şeklinde ve farklı kesit yapıları olan bu malzemeler çok sağlam olmaları bakımından önemli mekanik özelliklere sahiptir.

**Camsı Karbon:** Daha ziyade polimerimsi ve/veya gözenekli yani süngerimsi yapıda olan bu malzemeler hazırlanış şartlarına göre farklı özellikler gösteren, genellikle sert bir malzemedir. Gözenekli yapıda yüzey alanı geniş ve açık bağlı karbon atomlarının miktarı çoktur.

**Siyah Karbon:** Genellikle hidrokarbonlardan hidrojen çıkartılması ile elde edilen karbon topaklarıdır. Üretilme şartlarına göre farklı isimlendirilirler; endüstride bazı malzemelerin mekanik, elektrik ve optik özelliklerini düzenlemek için dolgu maddesi olarak kullanılırlar.

**Karbin ve Karbolitler:** Zincir veya polimer şeklindeki bu yapılar genellikle hızlı soğutma işlemlerinden sonra meydana gelir, kristal yapıda da oluşan karbinler sert bir yapıya sahiptir.

**Amorf Karbon:** Uzun mesafeli düzeni olmayan, bazen kısa mesafeli düzeni olan, genellikle düzensiz yapıda oluşan karbon malzemedir. Hazırlanış şartlarına göre fiziksel özellikleri değişebilir. Amorf yapıda atomlar birbirleri ile (%90)  $sp^3$  ve (%10)  $sp^2$  şeklinde bağlanırlar.

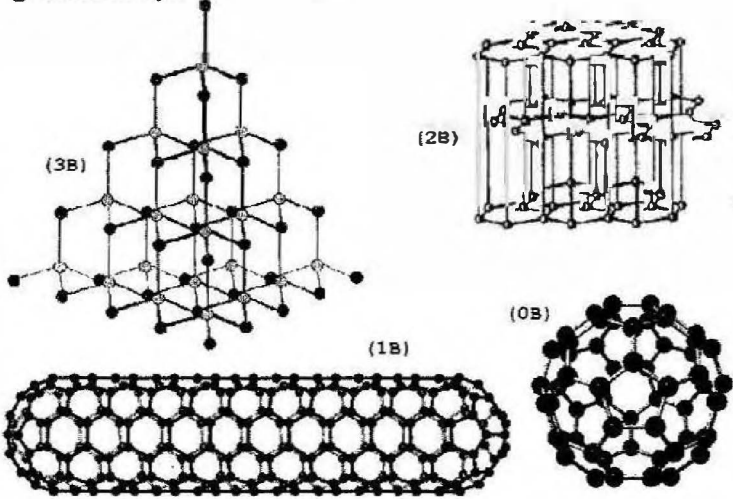
**Sıvı Karbon:** Elmas, grafit veya başka bir yapıdan eritilerek elde edilen (4450 K), metal özelliği fazla olan bir maddedir.

Karbon, elmas ve grafit gibi kristal yapılarından başka yukarıdaki sınıflamadan ayrı olarak, sonlu boyutlarda (nanometre ölçüsünde) sağlam yapılara sahip olması bakımından da ilginç bir elementtir. Karbonun nanoyapıları genel olarak top, tüp, çubuk ve halka şeklinde sınıflandırılabilir. Karbonun bu özelliği son onbeş yıldır bilinmekte ve üzerinde hem deneysel hem de kuramsal olarak çalışma yapılan malzemelerden birisi

olma özelliğini hâlâ korumaktadır.

Karbon esaslı malzemelerin  $sp$ ,  $sp^2$ ,  $sp^3$  şeklinde bağ yapıları aynı zamanda bu malzemelerin boyutu ile de ilişkilendirilebilir. Karbon periyodik tabloda mevcut elementler içerisinde 0 (sıfır) boyuttan 3 (üç) boyuta kadar izomerleri olabilen tek ve yegâne elementtir. İzomer, aynı atom sayısında farklı şekillere sahip olabilen yapılardır. Karbon üç boyutlu (3B) yarıiletken elmas yapıdan iki boyutlu (2B) yarımetalik grafitte, bir boyutlu (1B) iletken ve yarıiletken nanotüplere ve sıfır boyutlu (0B) nanotoplara kadar farklı kararlı yapıları ve birçok ilginç özellikleri olan harikulâde ve yegâne elementtir.

Karbonun 1B ve 0B yapıları nanometre mertebesinde oldukları için bu yapılara genel olarak karbon nanoyapılar denir. Karbonun oluşturabileceği farklı boyuttaki yapı örnekleri şekilde gösterilmiştir:

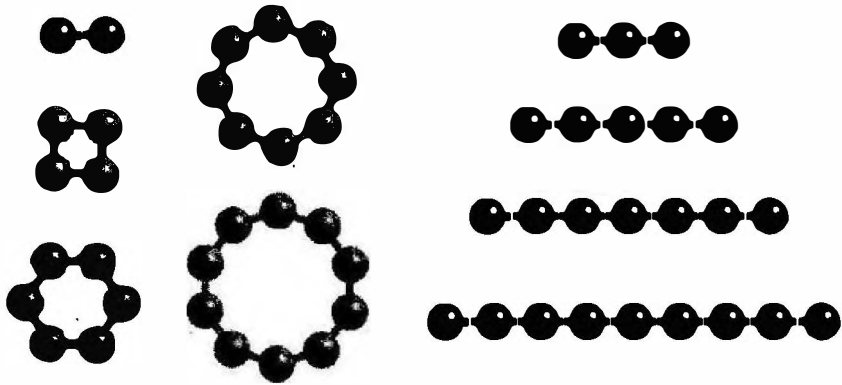


*Karbonun elmas (3B), grafit (2B), tüp (1B) ve top (0B) yapıları. Elmas yapıda  $sp^3$  bağlanma şekli (piramit şekil), diğer yapılarda  $sp^2$  bağlanma şekli (üçgen şekil) görülür.*

## Karbon Nanoyapılar

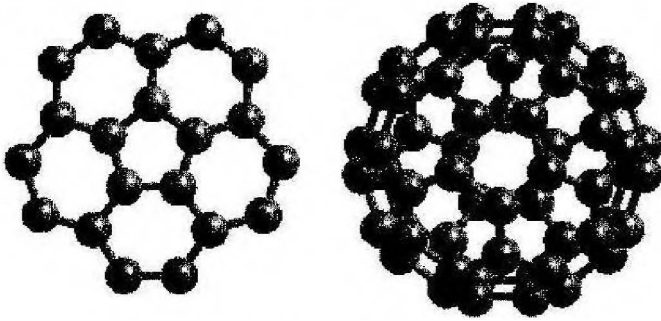
Nanometre ölçüsünde sadece karbon atomlarından oluşan ilginç yapılar vardır. Bunlar genellikle topraklar, tüpler, çubuklar ve halkalar şeklinde sınıflandırılabilen kafesimsi yapılardır. Karbon nanoyapıların pratikte uygulama alanları elektronikten tıbbi malzemelere kadar geniş bir yelpazede yer almaktadır.

Karbon atomlarının oluşturduğu nanoyapılar kafesimsi yapılarla sınırlı değildir. Örneğin  $n$  tane karbon atomundan oluşmuş bir toprak yapı da mümkündür. Karbon topraklarının ilginç yapısal özellikleri vardır;  $C_n$  ile temsil edilebilecek bir toprak yapının nasıl olabileceği  $n$  değerine göre belli şekiller alır.  $n$ 'nin 2 ile 10 arasındaki değerleri için karbon topraklarının oluşturduğu yapılar aşağıdaki şekilde gösterilmiştir:



*Atom sayısı 2-10 arasında olan karbon mikrotopakların geometrik şekilleri. Atom sayısı tek sayı ise toprak yapı zincir gibi tek boyutlu, atom sayısı çift sayı ise toprak yapı halka gibi iki boyutlu oluşmaktadır (iki atomlu hariç).*

**Karbon Nanotoplar:** Karbonun top şeklinde kafes yapısı oluşturabileceği fikri ilk defa 1966 yılında D.E.H. Jones tarafından ortaya atılmıştır, ancak bu düşünce o zamanlar bilim çevrelerinin pek ilgisini çekmemiştir. 1970 yılında E. Osawa kâse şeklinde olan “coranulene” molekülünü sentezledikten sonra bunun birkaçının biraraya gelmesi ile top şeklinde kafes yapı olabileceği fikrini ileri sürmüştü, ancak bu görüş de fazla ilgi görmemiştir.



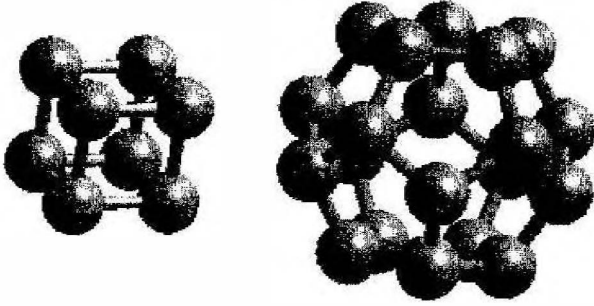
*Coranulene molekülü ve karbon-60 ( $C_{60}$ ).*

1984 yılında R.E. Smalley ve arkadaşlarının grafit kristalini laser ile eritip buharlaştırma yaptıkları sırada karbon atomlarının topaklar halinde farklı büyüklüklerde top şeklinde kafes yapılar oluşturduğunu farketmişlerdir. Bu karbon topları 20-130 kadar karbon atomu içermekteydi. 1985 yılında R.F. Curl, H.W. Kroto ve R.E. Smalley oluşan karbon toplarını ayırtırmayı başardılar, böylece karbon nanotopların yapılarının ayrıntılı bilinmesinin yolu açılmıştır. Bu ekibe yapmış oldukları öncü çalışmalarından dolayı 1996 yılında Kimya Nobel ödülü verilmiştir. Grafitin buharlaştırılması sırasında oluşan topların %75 kadarını 60 atomlu toplar ( $C_{60}$ ), %23 kadarını 70 atomlu toplar ( $C_{70}$ ), kalanını da daha küçük ve daha büyük toplar

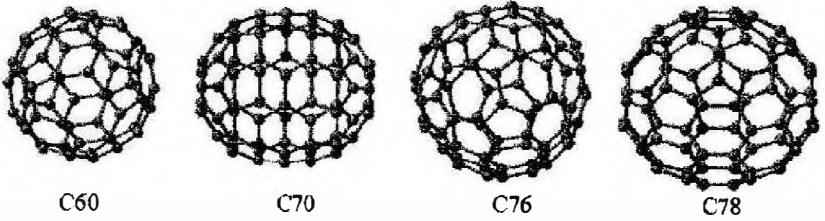
oluşturmaktadır. Bu topların içerisinde yapısı ve özellikleri en iyi bilineni, aynı zamanda en sağlamı,  $C_{60}$  dır. Karbon toplarında atomlar birbirleri ile  $sp^2$  şeklinde bağlanırlar. Karbon toplarının hepsinde çift sayıda karbon atomu vardır, ayrıca kararlı yapıdaki karbon toplarda atomlar altıgen ve beşgen geometrik şekiller oluşturarak ve sadece üç komşusu olacak şekilde bir araya gelerek kafes yapıyı meydana getirmektedirler. Kafes yapıdaki karbon toplarına genel olarak “fullerene” adı verilmektedir. Bu adlandırma başlangıçta  $C_{60}$  için düşünülmüş olsa da günümüzde her boydaki karbon toplarına kısaca fullerene denmektedir. Fullerene adı,  $C_{60}$ ’in yapısının Mimar Buckminsterfullerene’nin yaptığı mimari tasarımlara benzemesinden dolayı mimarın adına izafeten verilmiştir.

Karbon topların en küçüğünde 20 tane atom vardır, bunlar 12 tane düzgün beşgenden oluşan bir yapıdadır. 12 yüzlü yapılara veya bu yapıların simetrisime sahip yapılara da ikoza-hedral yapılar denir. 20 atomdan başlayarak 1000’ler ölçüsüne kadar varan büyüklüklerde karbon nanotoplar mevcuttur. Karbon nanotopların en çok üretileni ve yaygın olarak kullanılanı 60 karbon atomundan oluşan  $C_{60}$  dır.  $C_{60}$  12 tane beşgen ve 20 tane altıgen yüzden oluşan 12 yüzlü simetrisi olan (ikozahedral simetri) küre şeklinde bir yapıya sahiptir. Genellikle ikozahedral simetrideki karbon topları farklı büyüklüklerde tek duvarlı olduğu gibi, iç içe geçmiş soğan katmanları gibi yapıları da oluşturmakta, ayrıca ikili gruplar (dimer) halinde de bulunabilmektedir. Karbon topları sınıfına konabilecek başka bir yapı da 8 karbon atomundan oluşan küp şeklindeki  $C_8$  (küban) olabilir. Her ne kadar bu yapı top şeklinde değilse de kafes yapı özelliği göstermesi bakımından bu grupta yer almaktadır.

$C_8$  ve  $C_{20}$  modelleri ile farklı büyüklüklerdeki karbon top modelleri şekillerde görülmektedir.

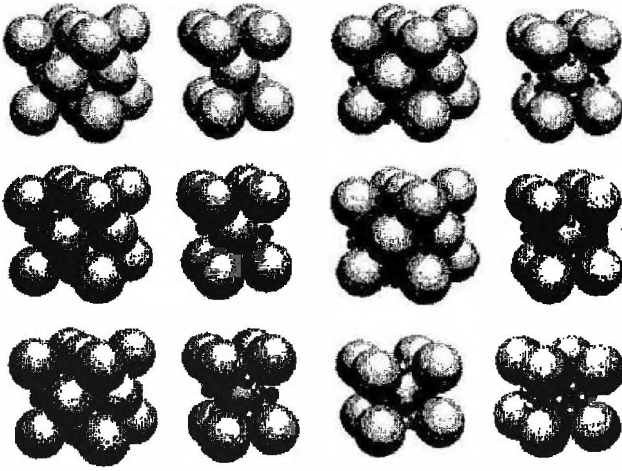


*Küp şeklinde karbon-8 (küban,  $C_8$ ) ve top şeklinde karbon-20 ( $C_{20}$ ) kafes yapıları.*



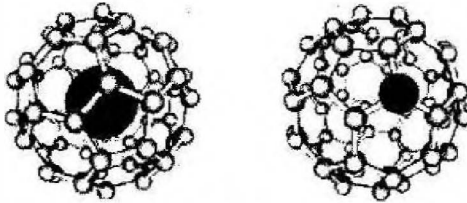
*Kafes yapıli karbon topları  $C_{60}$   $C_{70}$   $C_{76}$   $C_{78}$*

Karbon toplardan oluşmuş kristal yapılar da vardır; bu kristaller genellikle yüzey merkezli kübik, basit kübik ve hacim merkezli kübik yapılarındadırlar. Özellikle  $C_{60}$  ve  $C_{70}$ 'den oluşturulmuş kristal yapıların fiziksel özellikleri iyi bilinmekte, ayrıca karbon topların arasına başka atomlar yerleştirmek suretiyle katkılandırılmış farklı özelliklerde yeni malzemeler özellikle süperiletken malzemeler, yapmak mümkün olabilmektedir. Karbon-60'dan oluşturulmuş kristal yapılarda katkısız ve katkılı modeller şekillerde görülmektedir:



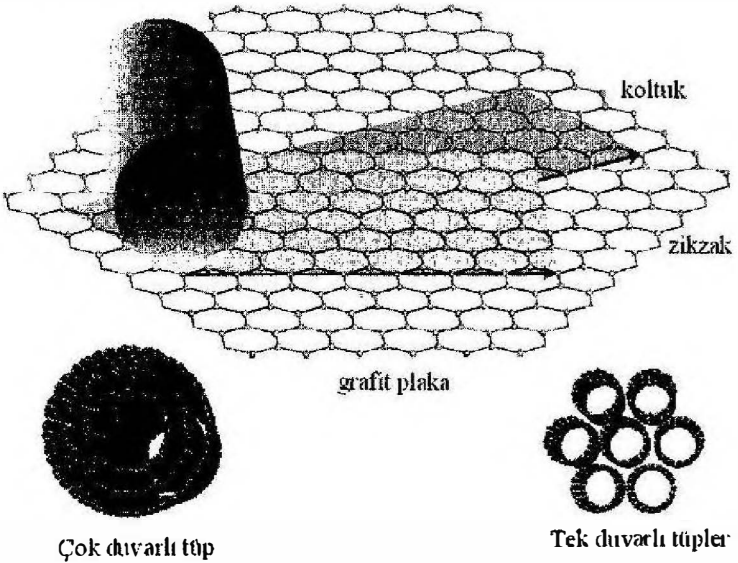
*Karbon-60'dan oluşturulmuş yüzey merkezli kübik ve hacim merkezli kübik yapıda katkısız ve katkılı kristal modelleri.*

Karbon topları saf oldukları gibi, katkılandırılmış olarak da elde edilebilmektedir. Katkılandırma topların içine yerleştirilen başka bir element ile olduğu gibi, top atomlarından birisinin yerine konan başka bir atom ile de yapılabilir. Toplardan oluşturulmuş kristal yapıda toplar arasına da başka bir atom yerleştirilebilmektedir. Karbon toplar kristal yüzeylerine yerleştirildiğinde konduğu yüzeyin elektronik ve optik özelliklerini değiştirmektedir.

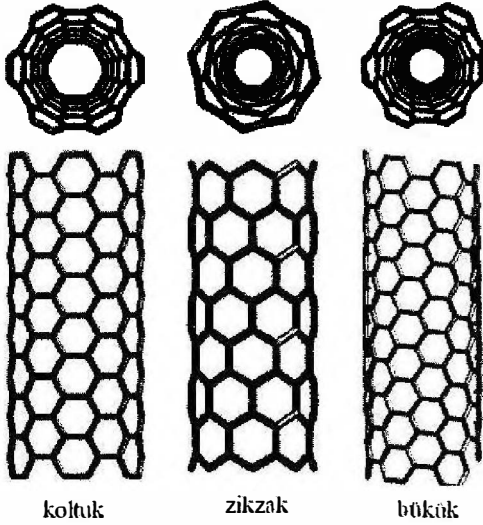


*Katkılandırılmış karbon top modelleri. Soldaki şekilde başka bir atom karbon-60'ın içine yerleştirilmiş, sağdaki şekilde ise karbon atomlarından birinin yerine başka bir atom yerleştirilmiş.*

**Karbon Nanotüpler:** Karbonun tüp şeklinde yapı oluşturmaya başladığı ilk defa 1991 yılında Iijima tarafından deneysel olarak farkedilmiştir. Grafitten “ark-discharge” buharlaştırma yöntemi ile elde edilen tüpler grafit plakasının kıvrılarak silindir şekline gelmesi ile oluşan yapılardır. Farklı çap ve boyda olabilen bu yapılar uçları açık olabileceği gibi kapalı da olabilir. Tek duvarlı olabileceği gibi iç içe geçmiş silindirler şeklinde çok duvarlı yapıları da olabilir. Grafit plakasının kıvrılma yönüne göre tüpler değişik mekanik ve elektronik özellikler göstermektedir; çok esnek ve sağlam olmaları gibi.

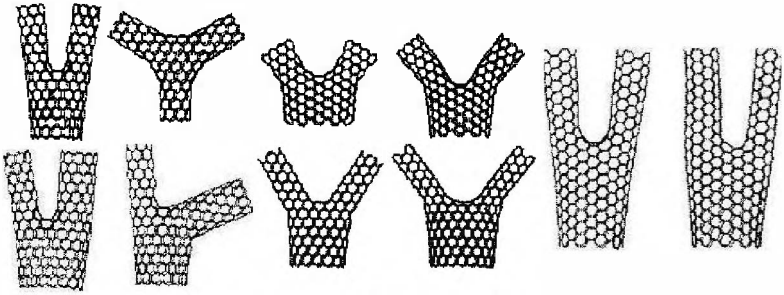


Grafit plakanın kıvrılma yönüne göre tüpler ya zikzak ya da koltuk yapıda olur. Ayrıca her iki yapıdan birinin biraz bükülmesi ile bükük yapıda tüpler oluşabilmektedir. Nanotüpler tek duvarlı olduğu gibi iç içe geçmiş olarak çok duvarlı yapıları da vardır.

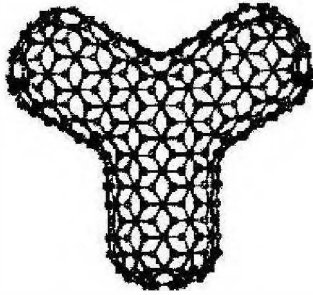


*Grafit plakanın kıvrılma yönüne göre şekillenen tek duvarlı karbon nanotüp modelleri.*

Koltuk modeli metal özelliği gösterirken, zikzak modeli yarıiletken özelliği göstermekte, eğer zikzak modelde tüpün çevresindeki halka sayısı 3'ün katları ise metal özelliği göstermektedir. Düzgün karbon nanotüp yapılarında atomlar birbirleri ile  $sp^2$  şeklinde, grafit plakada olduğu gibi bağlanır, atomlar sadece altıgen geometri oluşturur ve her atomun sadece üç komşusu vardır. Koltuk ve zikzak modellerinden başka karbon nanotüpler bu her iki modelin de biraz bükülmüş hallerine benzeyen bükülmüş yapıları vardır. Karbon nanotüplerin uçları açık alabileceği gibi kapalı da olabilir. Karbon tüplerin koni şeklinde yapıları da mümkün olmaktadır. Farklı çaplardaki karbon tüpleri birbirleri ile eklenebilmekte, eklem yerlerinde, bükülme veya kıvrılma yerlerinde farklı geometrik şekiller (beşgen, yedigen gibi) oluşmaktadır.



*Karbon nanotüplerde Y şekilli eklem modelleri.*

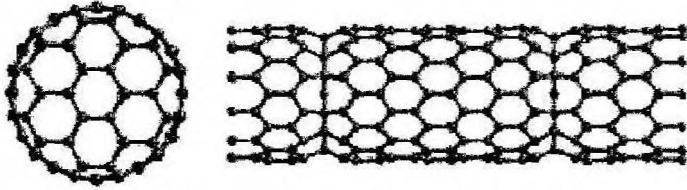


*Karbon nanotüp eklemlerinde altıgenden başka beşgen ve yedigen geometri de görülür.*

Nanotüpler tüp eksenini yönünde çekilmeye karşı çok sağlamdır, hasar görmeden mukavemet gösterebilirler. Küçük çaplı (yaklaşık 1–2 nanometre) tüplerden oluşturulmuş bir demeti koparabilmek için uygulanan çekme kuvvetinin büyüklüğü yaklaşık 36 gigapaskal ölçüsündedir. Bu bilinen en sağlam malzemelerden daha sağlam bir yapı özelliği gösterir. Nanotüp fiberler gerilmeye karşı en sağlam malzemedir.

Tek duvarlı karbon nanotüpler ender olabilecek mekanik ve elektromekanik özelliklere sahip malzemeler oluşturabilmektedir. Karbon tüpler makroskopik büyüklüklerde de oluş-

turulabilmektedir, ancak bunlar çok kırılğan olmakta, nanometre ölçüsündeki ebatlarda oluşan tüpler çok esnek ve sağlam olmaktadır. Karbon nanotüpler şerit halinde ve helezon şeklinde de üretilebilmektedir. Karbon nanotüpler bambuya benzer yapılar da oluşturmaktadır.

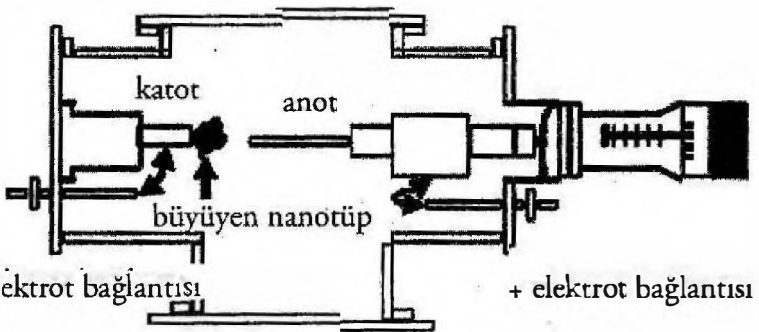


*Karbon nanobambu yapısı modeli.*

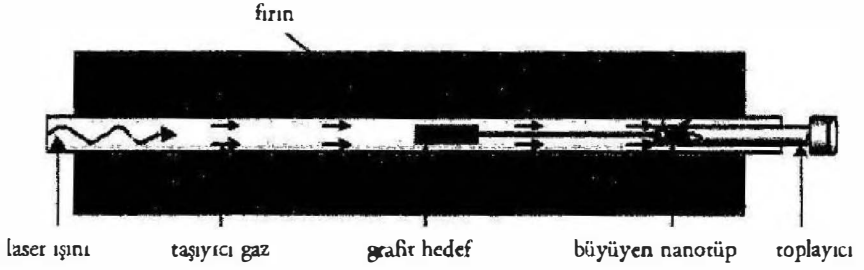
Karbon nanotüplerin çapları nanometreölçüsündedir, boyları 1 mikrometre kadar olabilmektedir. Nanotüplerin çapları şimdiye kadar yapılabilen en ileri yarıiletken aygıtlardan çok daha küçüktür. Karbon nanotüplerin yarıiletken teknolojisinde kullanılmaya başlaması elektronik aygıt yapımında çok büyük bir atılım yapılmasına vesile olacaktır, çünkü nanotüplerin çok özel elektronik özellikleri vardır. Nanotüplerin elektronik özellikleri tüp geometrisine, çapına ve silindirik yüzeyin yönüne göre metal veya yarıiletken özellik göstermektedir. Tüpün elektronik özellikleri katkı maddesi olmadan sadece geometrik şekli ile ayarlanabilir. Nanotüplerin elektronik özellikleri tüp geometrisini değiştirerek elde edilebilmektedir.

Karbon nanotüplerin üretilmesi için uygulanan birbirinden farklı birkaç yöntem vardır. Bu yöntemler kısaca “ark yöntemi”, “laser yöntemi” ve “kimyasal buharlaştırma yöntemi” olarak adlandırılırlar. Bu yöntemler şematik olarak gösterilmiştir.

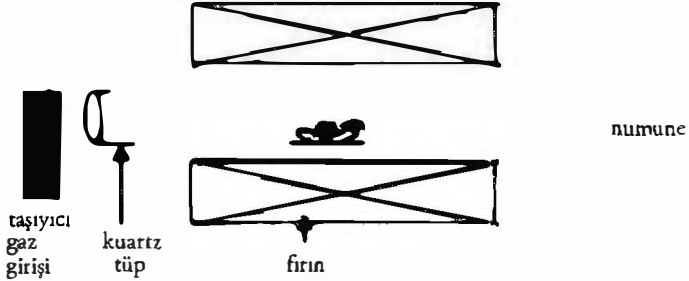
**Karbon nanoçubuklar:** İç içe geçmiş karbon tüplerinde (çok duvarlı tüpler) iki tüp arasındaki mesafe genellikle tüpü oluşturan karbon atomları arasındaki bağ mesafesinden büyüktür. Eğer iç içe geçmiş tüplerde tüplerin duvarları arasındaki mesafe karbon atomlarının bağ yapabileceği kadar yakın ise (0.15 nanometre'den küçük) o zaman karbon atomları birbirleri ile  $sp^3$  (gibi) bağlanmakta, başka bir deyişle, her karbon atomunun dört bağlı komşusu bulunmaktadır. Bu durumda oluşan çok duvarlı tüp yapısına çubuk denmektedir. Bu yapılar tüplere göre daha az esnekler, bu yapılar tek duvarlı tüplerden farklı mekanik ve elektronik özellikler göstermektedir. Karbon nanoçubuklar sadece tüp modellerinden oluşmamakta, kristal (elmas) yapı örgüsünden de nanoçubuk yapılar oluşabilmektedir. Ayrıca yan yana dizilmiş benzen halkalarından da (hidrojenleri olmadan) nanoçubuk yapıların mümkün olabileceği öngörülmektedir, böyle yapılara "benzorod" (benzoçubuk) adı verilmektedir.



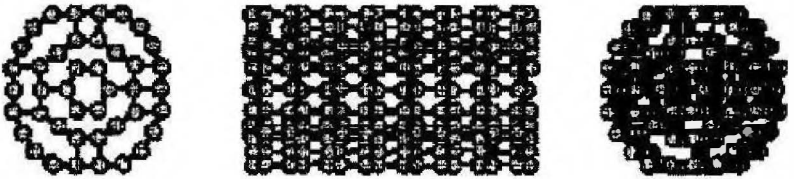
*Karbon nanotüp üretme yöntemlerinden ark yöntemi.*



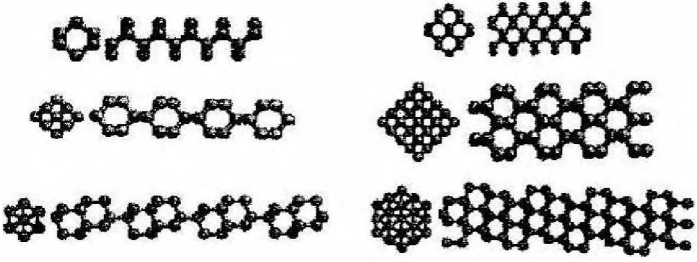
*Karbon nanotüp üretme yöntemlerinden laser yöntemi.*



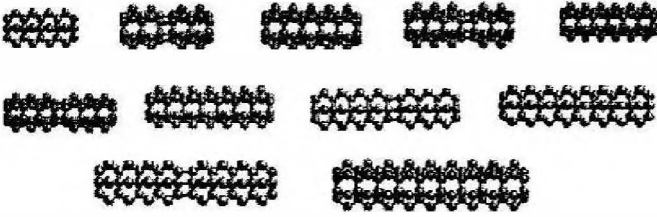
*Karbon nanotüp üretme yöntemlerinden kimyasal buharlaşma yöntemi.*



*Çok duvarlı nanotüplerden oluşmuş nanoçubuk modeli.*

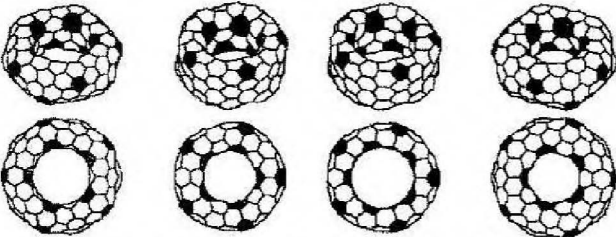


*Elmas yapı örgüsünden oluşmuş nanoçubuk modelleri.*

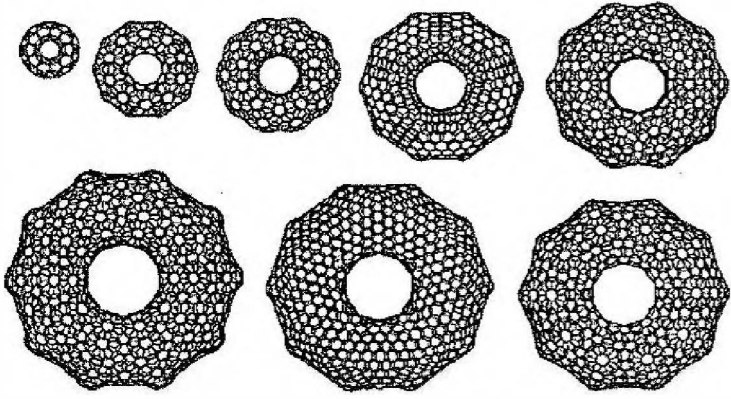


*Benzoçubuk modelleri.*

**Karbon nanohalkalar:** Karbon tüplerin iki ucu birleştirilerek halka “toroid” şeklinde yapılar da oluşturulabilir. Bu yapılar şimdilik kuramsal olarak düşünülmekle beraber, deneysel olarak da kısa zamanda yapılabileceği şüphesizdir. Farklı iç ve dış çaptaki halkalarla çok değişik halka modelleri oluşturulabilir. Her farklı halka farklı özellikler gösterecektir.

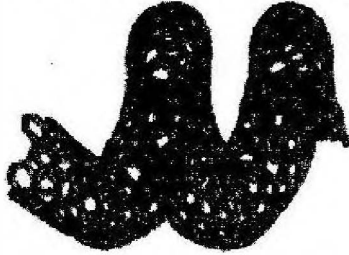


*Karbon nanohalka modelleri.*



*Karbon nanohalka modelleri.*

Karbon tüplerin kıvrılarak helezon şeklinde yapılar da oluşturulabileceği şimdilik kuramsal olarak öngörülmektedir. Helezon şeklindeki tüp yapıların da ilginç özellikleri olabilir.



*Karbon nanotüplerden oluşmuş helezon modeli.*

## **Karbon Nanoyapıların Uygulama Alanları**

Karbon nanotopların elektronik olarak uyarılmış seviyelerde doğrusal olmayan soğurma özelliği göstermesinden dolayı optik sınırlayıcı aygıt olarak kullanılabileceği, fotoyansıtıcı polimer tabaka elde edilebileceği, fotoiletken, fotodiyot ve transistör olarak, ayrıca güneş pillerinde de kullanılabileceği laboratuvar şartlarında gösterilmiştir. Malzeme bilimi açısından

karbon topraklar suni elmas yapımında, silisyum karbür ince plaka yapımında, katalizör olarak, yüzey kaplamada, biyolojik ve tıbbi malzeme yapımında kullanılabileceği gibi elektrokimya uygulamaları olarak da hidrojen depolamada ve pil yapımında kullanılabileceği laboratuvar şartlarında gösterilmiştir. Karbon nanotopların sağlam yapılarından ve üzerlerindeki yük dağılımının homojen olmasından dolayı malzemeler arasında sürtünmeyi azaltıcı madde olarak da kullanılabileceği bilinmektedir. Karbon toptardan yapılmış katkılandırılmış kristallerin süperiletken özellik göstermeleri yeni ileri malzeme sahasının kapısını aralamaktadır.

Nanotoplar optik sınırlayıcı olarak kullanılırlar; optik sınırlayıcılar malzemeleri aşırı ışıktan korumak için kullanılan kaplama malzemeleridir. Karbon topraklar ihtiva eden polimerler fotoiletkenlik özelliği gösterdiklerinden karbon nanotoplar fotodiyot olarak, transistör olarak ve güneş pillerinde kullanılmaktadır. Karbon nanotop katkılı polimer ince tabakaların ilginç kırınım özelliği göstermeleri bakımından optik malzeme olarak da kullanılmaktadır. Karbon nanotoplar yüzey kaplama malzemesi olarak oksitlenmeye karşı malzemeleri korumak için de kullanılmaktadır. Metallerde eşpotansiyel yüzeyleri oluşturmakta karbon nanotopların önemli yeri vardır. Karbon nanotoplar malzemelerin yüzeylerini ince elmas tabakası ile kaplamada kullanıldığı gibi silisyum yüzeylerinde ince silisyum karbür tabakası oluşturmak için de kullanılır; silisyum karbür ince tabakaların yüksek sıcaklığa dayanıklı elektronik aygıtlarda ve micromekanik sistemlerde önemli bir yeri vardır. Karbon nanotopların katalizör olarak da kullanım alanı vardır; özellikle hidrokarbon birleştirme reaksiyonları, organik solventlerin oksitlenmesi ve hidrojenlendirilmesi vs. gibi reaksiyonlarda katalizör etkisi göstermektedir. Karbon

nanotoplar katmanlı yapıların oluşturulmasında da önemli roller oynamaktadır. Katmanlı yapıların pek çok elektronik ve optik uygulamaları vardır. Karbon nanotoplardan yapılan yeni malzemelerin polimer teknolojisinden biyolojiye, hatta tıbbi uygulamalara kadar geniş bir kullanımı vardır. Suda çözülebilen karbon topu türevlerinden oluşturulan bir maddenin HIV virüsünün faaliyetlerini sınırladığı tesbit edildiğinde karbon nanotopların AIDS tedavisinde bile yeri olduğu söylenebilir. Karbon nanotoplar hidrojen depolamada ve yüksek enerjili pil yapımında kullanılabilir. Karbon nanotopların küre şeklinde ve simetrik yapılarından dolayı, üzerlerinde elektrik yükü homojen olarak dağılır, iki ayrı malzeme arasında sürtünmeyi azaltıcı madde olarak da kullanılabilir. Karbon nanotopların muhtelif özellikler için (çeşitli gazlar, nem vs.) algılayıcı yapımında da kullanım alanı vardır. Nanotoplardan oluşturulan katkılı kristal yapıların süperiletkenlik özelliği göstermesi nanotopların süperiletken malzeme yapımında da önemli bir yeri olduğunu göstermektedir.

Karbon nanotüplerin daha ziyade elektronik malzeme olarak kullanılabileceği öngörülmektedir. Tek boyutlu yapı özelliğine daha uygun gibi görünen tüplerin bir boyutlu silindir şeklinde teller olarak, hafıza ve anahtar aygıtları olarak, optik ve manyetik malzeme olarak da kullanılabileceği laboratuvar şartlarında gösterilmiştir. Süperiletken malzeme olarak da kullanılabileceği öngörülmektedir. Karbon toplar iki yüzey arasında zıplayarak hareket edebilirler; topların bu özelliğinden faydalanarak nanotransistörler yapılabilir. Hatta tek elektron transistörü yapmak veya tek elektron akımı elde etmek mümkündür. Karbon nanotüplerin geometrisine bağlı olarak yarıiletken ve metalik özellik göstermesi çok önemli bir özelliğidir. Hiçbir katkı maddesi olmadan sadece nanotüpün çapını, tüp yüzeyinin yönünü değiştiri-

rerek elektronik özelliklerini değiştirebilmek tüplere elektronik uygulamalarda önemli bir yer vermiştir. Nanotüplerin içlerini uygun başka atomlarla katkılandırarak düşük boyutlu genellikle “1B” yeni malzemeler üretilebilir. Karbon nanotüplerin elektronik malzeme olarak manyetik ve optik nanoaygıt yapımında, hafıza elemanı, kapasitör, transistör, diyot, mantık devresi ve elektronik anahtar yapımında kullanım alanları vardır. Karbon nanotüplerin karşılaştırmalı özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir. Karbon nanotüplerin çeşitli kullanım alanları başka bir tabloda farklı uygulamalar için çeşitli işlevlere sahip karbon nanoyapıları şekillerle gösterilmiştir.

### Karbon Nanotüplerin Karşılaştırmalı Özellikleri.

| Özellik                       | Tek Duvarlı Karbon Nanotüp                                              | Başka Malzemeler                                                |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Ebadı                         | 0.6-1.8 nm çapında                                                      | elektron demeti ile 50 nm5 nm ebadında çizgiler oluşturulabilir |
| Yoğunluk                      | 1.33-1.40 g/cm <sup>3</sup>                                             | alüminyum: 2.7 g/cm <sup>3</sup>                                |
| Gerilme Mukavemeti            | 45 gigapaskal                                                           | en sağlam çelik alaşımları 2 megapaskal'da kopar                |
| Esneklik                      | düğüm yapılabilecek kadar esnek                                         | metaller ve karbon fiberler kırılır                             |
| Akım Taşıma Kapasitesi        | 1 gigaamper/cm <sup>2</sup>                                             | bakır teller 1 megaamper/cm <sup>2</sup> de yanar               |
| Alan Yayma                    | 1 mikrometre uzaklıktan fosfor atomlarını 1-3 Volt civarında uyarabilir | molibdenum uç 50-100 V/μm (kısa ömürlü)                         |
| Isı İletimi                   | oda sıcaklığında 6000 W/mK                                              | saf elmas 3320 W/mK                                             |
| Sıcaklığa Bağlı Dayanıklılığı | havada 750 C'ye kadar, vakumda 2800 C'ye kadar                          | mikroçiplerdeki metal teller 600-1000 C'de erir                 |
| Maliyet                       | 1500 \$/gram                                                            | altın: 10 \$/gram                                               |

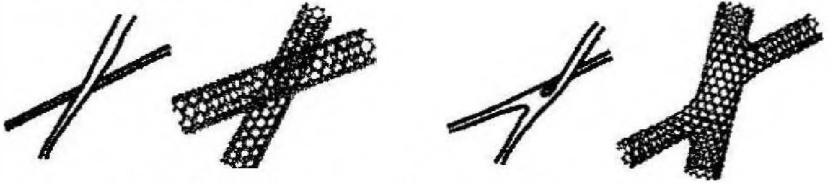
## NANOİLİM VE NANOTEKNOLOJİ

1 nanometre = 1 nm = 10 Angstrom ( $\text{\AA}$ ) =  $10^{-9}$  m (metrenin bir milyarda biri);

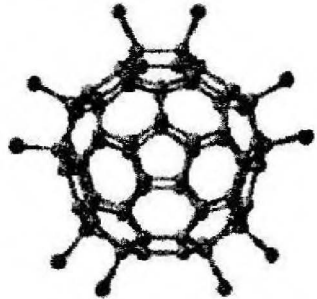
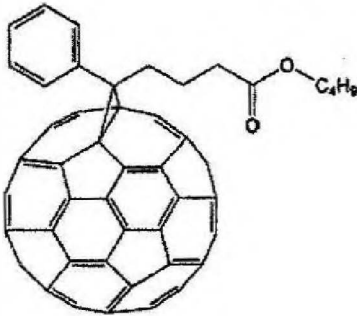
1 mikrometre = 1  $\mu\text{m}$  =  $10^{-6}$  m (metrenin bir milyonda biri);

1 gigapaskal = 1 milyar paskal =  $10^9$  paskal; 1 paskal = 1 N/m<sup>2</sup>.

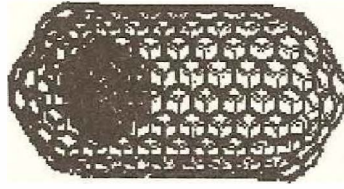
Karbon nanoyapıların muhtemel kullanım alanlarını göstermesi bakımından bu konuda alınan patentler çalışmaların nereye doğru gittiğini çok iyi göstermektedir. Ayrıca bu konuda yapılan deneysel ve kuramsal çalışmalar gün geçtikçe artmış, karbon nanoyapıların kullanım alanları ile bu malzemelerden elde edilebilen nanoaygıtların imali ve uygulamaya konmaları nanoteknoloji çağını başlatmıştır. Bu çağa mutlaka ayak uydurmamız gerekmektedir.



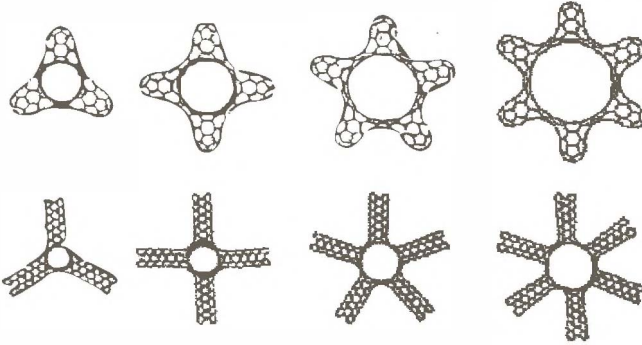
*Farklı uygulamalar için karbon nanoyapılar.  
Çeşitli yapılarda eklemeler.*



*Farklı uygulamalar için karbon nanoyapılar. Çeşitli moleküller veya atomlar bağlanarak işlevlendirilen karbon-60.*



*Farklı uygulamalar için karbon nanoyapılar. Elektronik anahtar olarak kullanılabilecek nanokapsül içine yerleştirilmiş karbon-60.*



*Farklı uygulamalar için karbon nanoyapılar. Çeşitli nanodışlı ve eklem modelleri.*

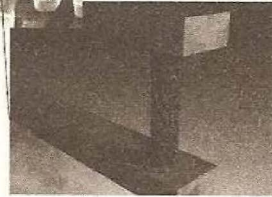
### Çok Duvarlı Karbon Nanotüplerle Bağlantı



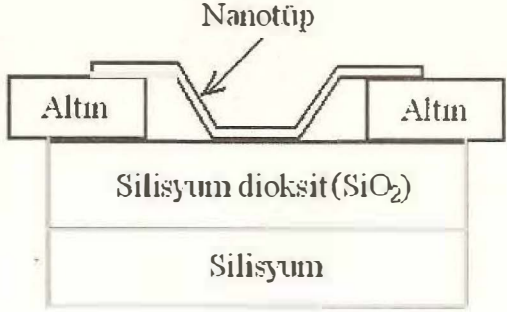
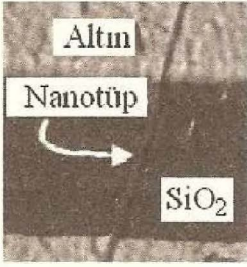
Karbon nanotüplerin avantajları:

- 1- Kalınlıkları küçük
- 2- Hacim-ağırlık oranı yüksek
- 3- İletkenliği çok iyi
- 4- Çok sağlam

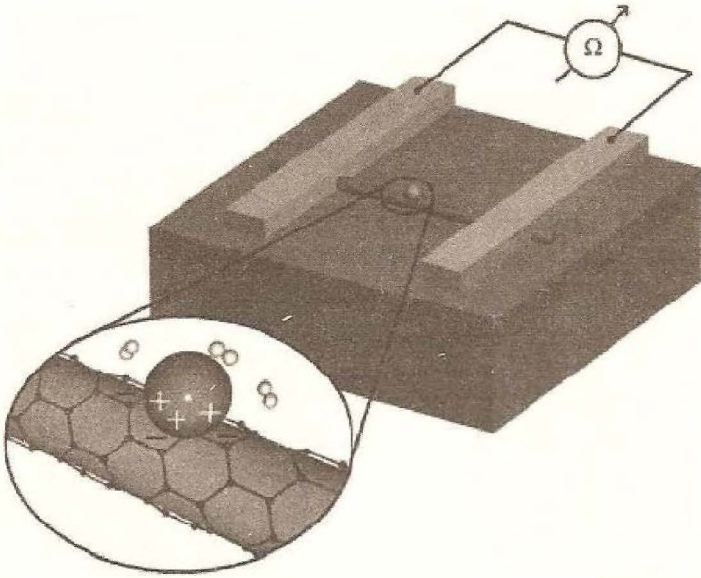
Soru: Nasıl yapılacak?



*Farklı uygulamalar için karbon nanoyapılar. Karbon nanotüpler elektronik devrelerde bağlantı elemanı olarak kullanılabilir.*



*Farklı uygulamalar için karbon nanoyapılar. Karbon nanotüp kullanılarak yapılmış bir nanotransistör.*



*Farklı uygulamalar için karbon nanoyapılar. Karbon nanotüp kullanılarak yapılmış bir hidrojen gazı algılayıcısı.*

| Kullanım alanı                   | Fikir                                                                                                                                                                                                                                       | Enseller                                                                                                                                                                                                                               |   |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Kimyasal ve genetik sonda.       | Bir nanotüp uçlu atomik kuvvet mikroskobu, DNA iplikçisini izleyerek bir genin birkaç olası değişkeninden hangisinin iplikçikte bulunduğunu belirleyen kimyasal "işaretleri" ortaya çıkarabilir.                                            | Bir yüzeyin kimyasını görün rülemek için bulunmuş tek yöntem bu olsa da, henüz yaygın şekilde kullanılmamaktadır. Şu ana kadar yalnızca DNA'nın görece kısa parçalarında uygulanmıştır.                                                | 1 |
| İşaretlenmiş DNA iplikçisi       |                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                        | 3 |
| Mekanik hafıza.                  | Destek blokları üzerine yerleştirilen nanotüpten yapılmış bir ekran, ikili hafıza cihazı olarak denenmiş. Bu cihazda voltaj, bazı tüplerin temasına ("açık" durum), bazılarının ayrılmasına ("kapalı" durum) vol acmaktadır.                | Cihazın açılıp kapanma hızı ölçülmemiş; ancak bir mekanik hafıza için hız sınırı olsa olsa 1 MHz civarındadır. Bu da geleneksel hafıza çipleriyle kıyaslandığında oldukça düşük bir hız.                                               | 2 |
| Nonvolatile RAM.                 |                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                        |   |
| Nano cımbız.                     | Bir cam çubuk üzerindeki elektrotlara bağlı iki nanotüp, voltajın değiştirilmesiyle açılıp kapatılabilir. Bu tür cımbızlarla, büyüklüğü 500 nm olan nesneler kaldırılıp hareket ettirilebilmiş.                                             | Cımbızlar, kendi enlerinden büyük nesneleri yakalayabildikleri halde, nanotüpler öylesine yapışkan ki, bu sefer de nesneyi bir türlü bırakmıyorlar. Üstelik, bu küçüklükteki nesneleri hareket ettirmek için daha basit yöntemler var. | 2 |
| 5 mikronluk cımbız.              |                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                        |   |
| Üstün duyarlılıkta algılayıcı    | Yarıiletken nanotüpler, oda sıcaklığında alkalilere, halojen ve diğer gazlara maruz kaldıklarında elektriksel dirençlerini belirgin şekilde değiştiriyorlar. Bunun anlamıysa daha duyarlı kimyasal algılayıcılar için umut olduğu.          | Nanotüpler o kadar çok şeye (oksijen ve su dahil) karşı yüksek duyarlılık taşıyor ki, bir kimyasal gazı diğerinden ayırt edememeleri riski söz konusu.                                                                                 | 3 |
| Oksijen tüplere yapışıyor        |                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                        |   |
| Hidrojen ve iyon deposu.         | Nanotüpler, içi boş olan orta kısımlarında hidrojeni depolayabilir ve bunu verimli ve ekonomiyakıt hücrelerinde kademeli olarak serbest bırakabilirler. Lityum iyonlarını da depolayabilme durumunda, daha uzun ömürlü pillere kavuşacağız. | Şu ana kadarki en iyimser veriler, %6.5'luk hidrojen alımına işaret ediyor; buysa yakıt hücrelerini ekonomik hale getirmeye yetecek bir oran değil. Lityum iyonlarıyla yapılan çalışmalar halen başlangıç aşamasında.                  | 1 |
| Nanotüpün iç kısmındaki atomlar. |                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                        |   |

## NANO BİLİM VE NANOTEKNOLOJİ

|                                          |                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                               |   |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Keskin görüntü veren taramalı mikroskop. | Bir taramalı mikroskopun uç kısmına bağlı nanotüpler, görüntünün yan kısımlarındaki çözünürlüğü 10 kat daha artırarak, protein ve diğer büyük moleküllerin daha açık bir şekilde görünmelerini sağlayabiliyor. | Artık piyasada bulunabilen bu uçlar, yine de talep üzerine tek tek üretiliyor. Nanotüp uçları çözünürlüğü dikey yönde artırmasa da, nanoyapılarda daha önceleri gizli kalmış olan derin çukurlukları görüntülemeye olanak tanıyor.                            | 4 |
| Tek tek seçilebilen IgM antikoru.        |                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                               |   |
| Süper güçlü malzemeler.                  | Kompozi malzeme içine gömülü nanotüpler, büyük bir esneklik ve gerilme kuvvetine sahip olduklarından zıplayan arabaların, ya da depremde çökmek yerine ileri geri sallanan binaların yapımında kullanılabilir. | Nanotüplerin maliyeti, kompozitler de günümüzde kullanılan karbon fiberlerin maliyetinden 10-1 000 kat fazla. Ayrıca nanotüplerin yüzeylerinin fazla düzgün ve pürüzsüz olması malzemenin içinden kolayca dışarıya kaymalarına, kırılmalarına yol açabiliyor. | 0 |
| Nanotüp gerilme testi                    |                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                               |   |

*Karbon nanotüplerin elektroniğin ötesinde çeşitli kullanım alanları. (U: Uygulanabilirlik dereceleri; 0: bilim kurgu; 1: üzerinde çalışılıyor; 2: uygulanmış; 3: pazarlanmaya hazır; 4: ticarileşmiş).*

# BÖLÜM 4

## NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİ AÇISINDAN TOPAKLAR

Atom kuramının kabul görmesinden sonra maddenin davranışı üzerine yapılan çalışmalar başlıca iki kolda ilerlemiştir. Birisi atomların ve moleküllerin tek tek özelliklerinin incelenmesi şeklindeydi. 1930'larda bu yolda yapılan çalışmalar çekirdek fiziğinin, daha sonra da parçacık fiziğinin gelişmesini sağlamıştır. Diğer ise çok sayıda atom veya molekül özelliklerinin incelenmesi şeklindeydi. Bu koldaki çalışmalar da yoğun madde çalışmalarının gelişmesini sağlamıştır. 1970'li yıllardan sonra iki alan arasındaki çalışmalar "atom ve molekül topakları" olarak adlandırılmıştır. Atom ve molekül topakları büyüklük olarak nanometre ölçekte oldukları için bu saha doğrudan nanobilim ve nanoteknolojinin ilgi alanına girmektedir. Topaklar günümüzde nanobilim ve nanoteknolojinin vazgeçilmez ve en aktif sahalarından biri haline gelmiştir.

Farklı alanlarda çalışan bilim insanları atom ve molekül topaklarına ilgi göstermeye başlamıştır. Topaklar konusu hem deneysel hem de kuramsal çalışmaların beraber yapıldığı, birbirlerini desteklediği önemli alanlardan birisidir. Bu bölümde topaklar hakkında genel olabilecek bazı bilgiler özetle verilecektir. Örneğin, tanımı, sınıflaması, özellikleri, önemi, deneysel olarak üretme ve inceleme yöntemlerinin yanında kuramsal olarak inceleme yöntemleri de özetle anlatılacaktır.

Topaklar genellikle “farklı şartlarda bir arada tutulan atom grupları” olarak tanımlanır. Kimi araştırmacılar topakları maddenin beşinci hali olarak kabul ederken yaygın tanımı ile “topaklar farklı bilim dallarını birleştiren sonlu yapılardır”. Belki topakların oynadığı rol bakımından daha anlamlıdır.

Topaklar yapıları ve içerdiği atomlar bakımından moleküllerden farklılık gösterirler. Moleküller belli bir yapıya ve atom grubuna sahiptir, değişmez. Ancak topaklar herhangi bir sayıda atomdan oluşabilir, değişik geometrilere yapılar oluşturabilirler.

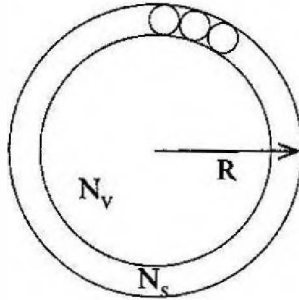
Topaklar farklı özelliklere göre sınıflandırılabilirler: Örneğin içerdikleri atom cinslerine göre tek cins atomdan oluşan topaklar, birden fazla cins atomdan oluşan topaklar gibi. Başka bir sınıflama da çevrelerine göre yapılır, yalıtılmış (gaz fazında), hapsolmuş, destekli (yüzeye konmuş) topaklar. Topaklar elektronik durumlarına göre de sınıflandırılır; yüksüz, yüklü (artı veya eksi yüklü) topaklar. Topaklarda en önemli sınıflama büyüklüklerine (atom sayılarına) göre yapılır. Büyüklüklerine göre topaklar başlıca beş grupta sınıflandırılır:

- Çok küçük (2-10 atom) (mikrotopaklar),
- Küçük (10-100 atom),
- Orta (100-1000 atom),

- Büyük (1000 – 10000 atom),
- Çok büyük (100000 atomdan fazla).

Topaklar büyüklüklerine göre başka türlü üç grupta sınıflandırılır. Bu sınıflama küremsi yapıdaki topaklar için kullanılmaktadır. Topaktaki toplam atom sayısı  $N$  ile, küremsi yapıdaki topağın yarıçapı  $R$  ile, yüzey atomlarının sayısı  $N_s$  ile, hacim atomlarının sayısı da  $N_v$  ile gösterilmiş olsun:

- Çok küçük (toplam atom sayısı 2-20 arasında veya çapı 1.1 nanometreden küçük, yüzey ve hacim atomları ayırt edilemez),
- Küçük (toplam atom sayısı 20-500 arasında veya çapı 1.1-3.3 nanometre arasında veya yüzey atomlarının hacim atomlarına oranı 0.9-0.5 arasında),
- Büyük (toplam atom sayısı 500-10 milyon arasında veya çapı 3.3-100 nanometre arasında veya yüzey atomlarının hacim atomlarına oranı 0.5'den küçük).



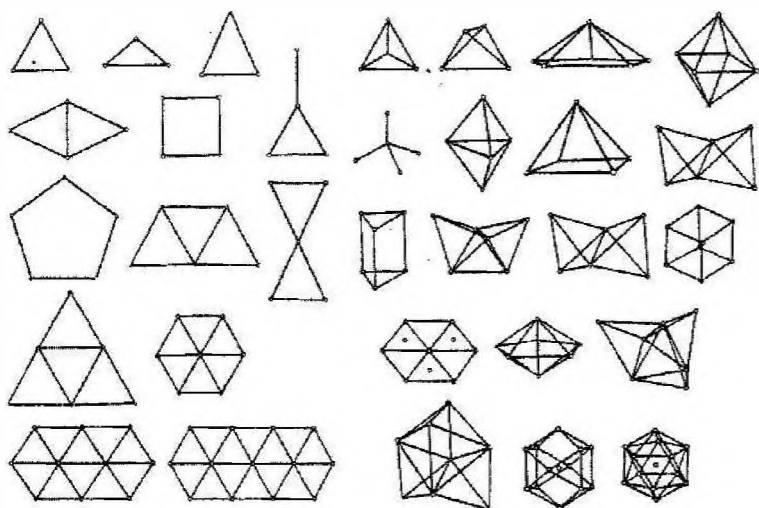
Küremsi yapıdaki topaklarda yüzey atomlarının ( $N_s$ ) ve hacim atomlarının ( $N_v$ ) konumu.  $R$  topağın yarıçapını gösterir. Topaktaki toplam atom sayısı  $N$ ,  $N_s$  ile  $N_v$ 'nin toplamına eşittir.

Topakların büyüklüklerine göre sınıflanmasının gerekçesi şöyle açıklanabilir: Eğer topakların bazı fiziksel özellikleri atom

sayılarına göre muntazam değışmiyor, çok farklılık gösteriyorsa o zaman topaklar çok küçük demektir, şayet fiziksel özelliklerin topaklardaki atom sayılarına göre değışimi muntazam bir seyir gösteriyorsa o zaman topaklar büyük demektir. Değışik topak modelleri şekillerde gösterilmiştir.

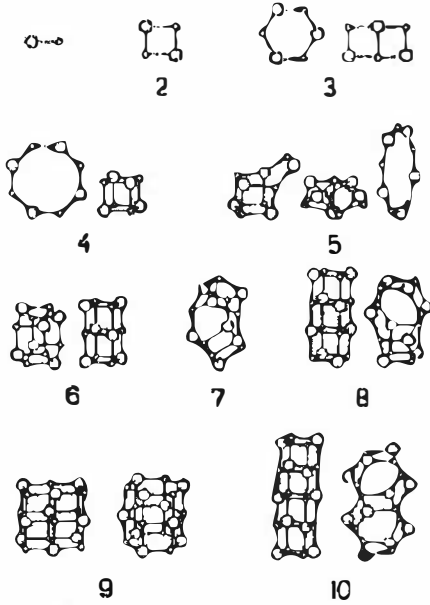
Topakların içerdikleri atomların cinslerine göre sınıflaması altı grupta toplanabilir:

- Metal topakları (lityum, sodyum, alüminyum, nikel, bakır, gümüş, altın, v.s. gibi)
- Yarıiletken topakları (karbon, silisyum, germanyum, galyum-arsenik, v.s. gibi)
- İyonik topaklar (sodyum klorür, magnezyum oksit, v.s. gibi)
- Asal gaz topakları (helyum, neon, argon, v.s. gibi)
- Molekül topakları (azot gazı, hidrojen florür, benzen, su, v.s. gibi)
- Topak molekülleri (çeşitli topaklardan oluşmuş moleküller)

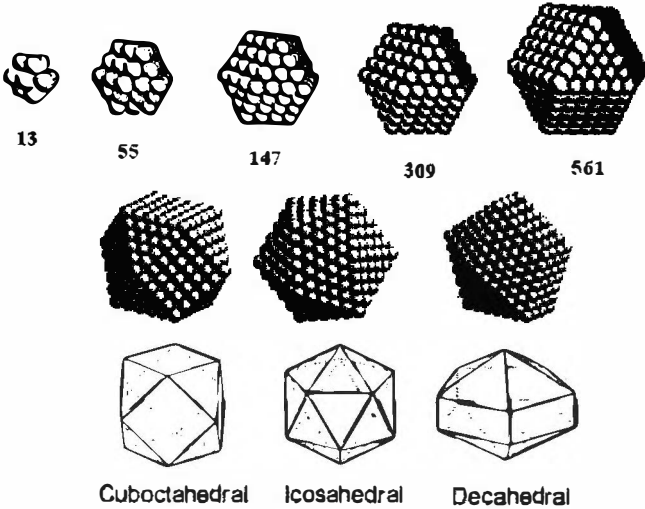


*İki ve üç boyutlu mikrotopak modelleri.*

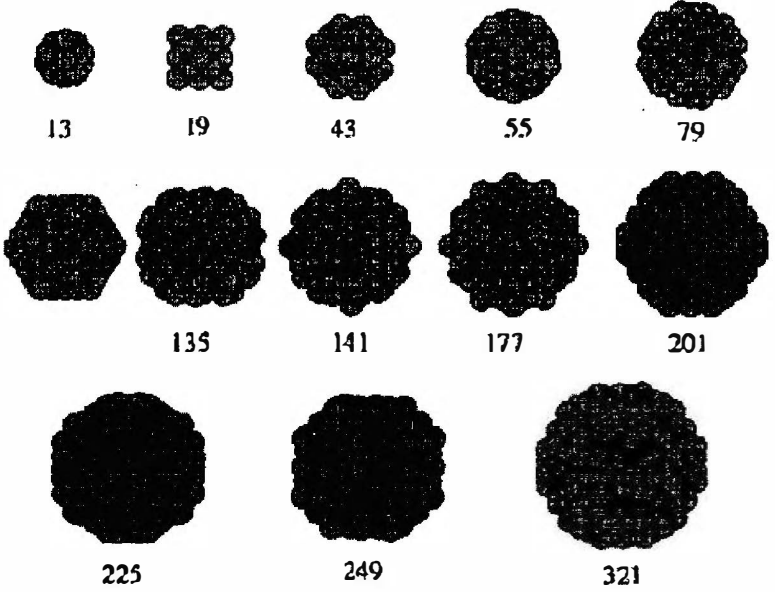
## Bölüm 4



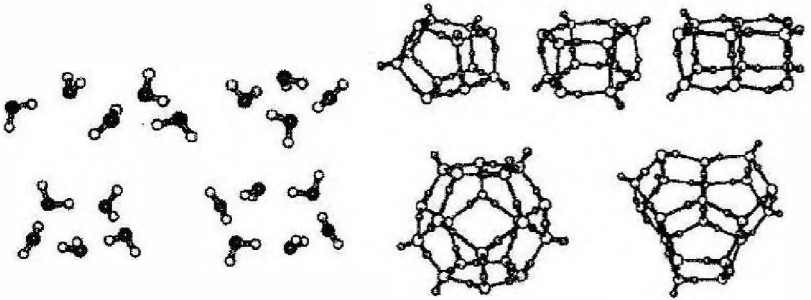
$(MX)_n$  bileşenli (iki cins atomlu) mikrotopak modelleri.



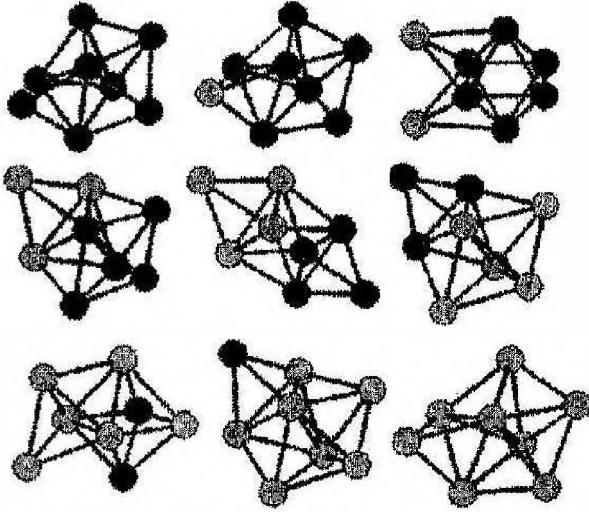
Sihirli sayılı yüzey merkezli kübik topak modelleri ile farklı simetrilere sahip topak modelleri.



*Değişik büyüklüklerde küremsi yapıda metal topak modelleri  
(rakamlar topaktaki atom sayısını göstermektedir).*



*Değişik büyüklük ve kafes yapılarda su molekülü topakları.*

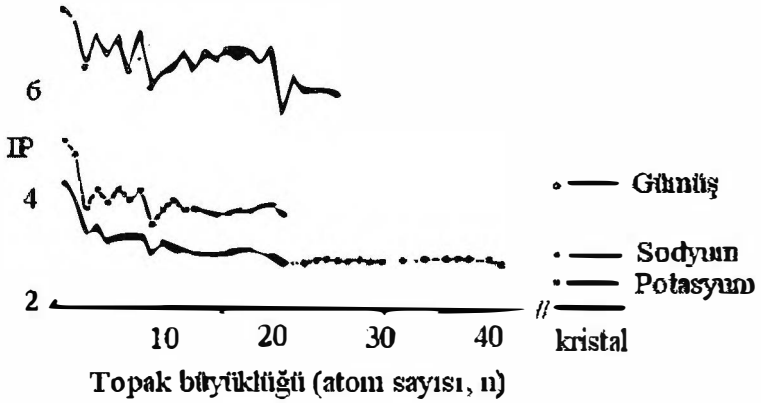


*Toplam 8 atomu olan iki cins atomlu topak modelleri.*

Topakların, özellikle küçük topakların, bazı özellikleri şöyle ifade edilebilir: Topaklarda bulunan atomlar kristal yapıdaki atomlardan farklı çevreye sahiptirler. Örneğin birinci komşu sayısı her zaman kristal yapıdaki gibi olmayabilir, genellikle daha az olur. Topaklar kristalografi açısından ilginç özellikler gösterebilir, kristal yapılarda beşgen geometri görülmezken topaklarda görülebilir. Elektronik uyarılmalar ve iyonlaşma özellikleri kristallerden çok farklılık gösterir, kristallerde tanımı tam olarak yapılabilen bazı fiziksel büyüklükler, örneğin sıcaklık, yüzey gerilimi, yüzey alanı, hacim, vs., topaklarda tam olarak yapılmadığından topakların bazı özellikleri termodinamik bulgulardan hesaplanamamaktadır.

Topakların bazı özellikleri topak büyüklüğüne bağımlılık gösterebilir. Topaklarda atom sayısı arttıkça bu değişimin muntazam

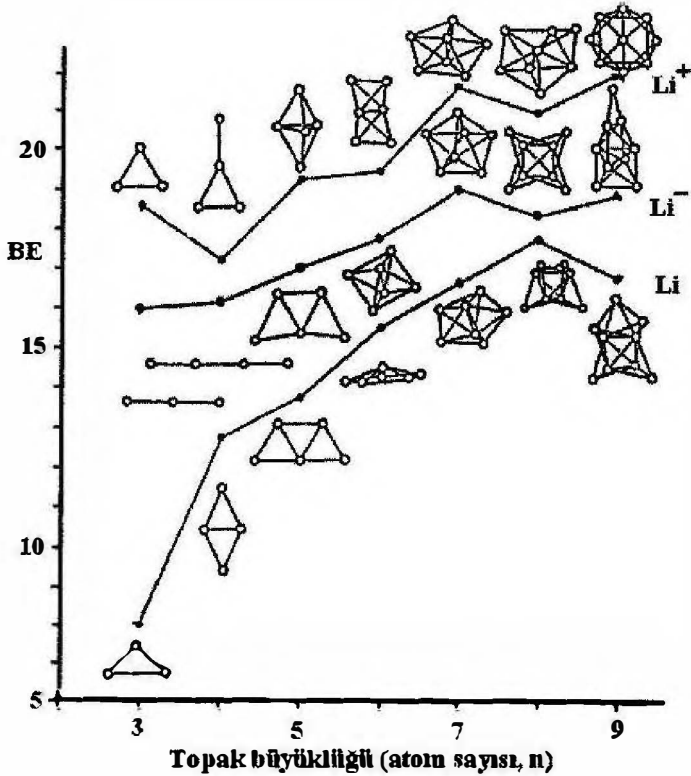
olması beklenir, ancak bu değişimler muntazam olmaz, farklı fiziksel özellikler için farklı değişim eğrileri görülebilir. Topakların kararlılığı atomların bağlanma enerjileri ile anlaşılabilir. Enerji yönünden topaklar iki gruba ayrılabilir. Zayıf etkileşmeler: Asal gaz topakları, molekül topakları bu gruba girer. Kuvvetli etkileşmeler: Birçok metal topakları bu gruba girer.



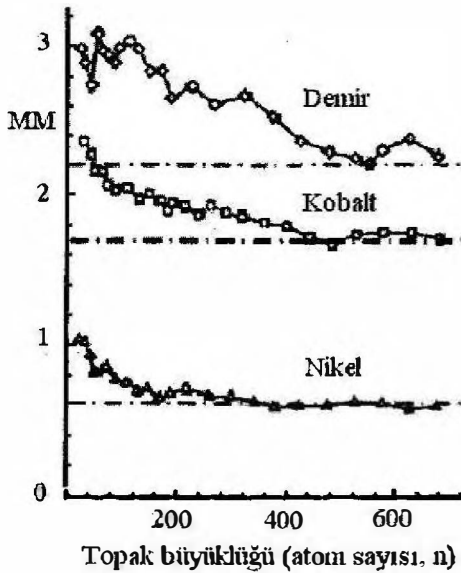
*Gümüş, Sodyum ve Potasyum topaklarının iyonlaşma potansiyelinin (IP, elektronvolt cinsinden) topak büyüklüğüne göre değişimi.*

Nanoyapılarda fiziksel özelliklerin çok değişken olduğunu gösteren iyi bir örnek için aşağıdaki şekle bir göz atalım. Bu şekilde lityum topaklarının bağlanma enerjisinin ve topak geometrisinin topaktaki atom sayısına ve topağın elektron sayısına göre nasıl değiştiği çarpıcı bir şekilde görülmektedir. Topakta bir atomun fazla olması veya bir atomun eksik olması beklendiği gibi bir değer vermeyebilir, ya da bir topakta tek bir elektronun fazlalığı veya eksikliği beklenmeyen bir değer verebilir. Örneğin dört atomlu nötr lityum topağı baklava dilimi şeklinde (eşke-

nar dörtgen) olurken, bir elektron fazlası olan eksi iyon halinin şekli doğrusal oluyor, bir elektron eksik olan artı iyon durumunun şekli ise kürek gibi oluyor. Maddede bu tür özellikleri incelemek ve anlamaya çalışmak için bilim tarafı, yani nanobilim; bunları pratik hayatımıza uygulamak da için teknolojik tarafı, yani nanoteknolojidir.



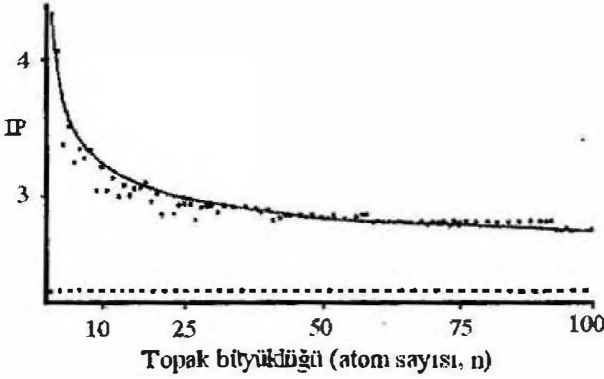
*Lityum topaklarında (artı yüklü, eksi yüklü ve nötr) bağlanma enerjisinin (BE, kcal/mol cinsinden) topak büyüklüğüne göre değişimi.*



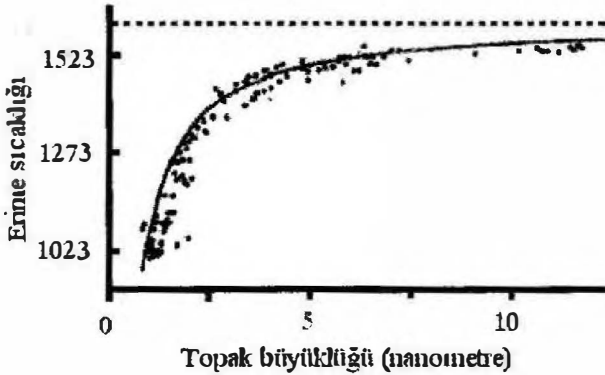
*Demir, Kobalt ve Nikel topaklarında atom başına düşen manyetik momentin (MM) topak büyüklüğüne göre değişimi. Yatay kesikli çizgiler kristal değerini gösteriyor.*

Topakların bazı fiziksel özellikleri seçilen uygun bir fonksiyon ile topakların büyüklükleri cinsinden ifade edilebilir. Bu ifadeler ya atom sayıları,  $N$  ya da topağın yarıçapı (küremsi yapıdaysa),  $R$  cinsinden tanımlanabilir. Bu tür yaklaşımlar kimyasal ve fiziksel yaklaşımlar arasında bir köprü işlevini görür. Kimyasal yaklaşımlarda molekül seviyesinde, birkaç atom büyüklüklerde inceleme yapılırken, fiziksel yaklaşımlarda kristal yapı seviyesinde inceleme yapılır, yani çok sayıda atom dikkate alınır. Seçilen uygun bir fonksiyon ile topakların bağlanma enerjisi, iyonlaşma potansiyeli, erime sıcaklığı, vs. gibi birtakım fiziksel özellikleri topak büyüklüğüne bağlı olarak kolayca hesaplanabilir. Bu yöntemle hesaplanmış potasyum topaklarının

iyonlaşma potansiyeli ile altın topaklarının erime sıcaklığı şekillerde görülmektedir.



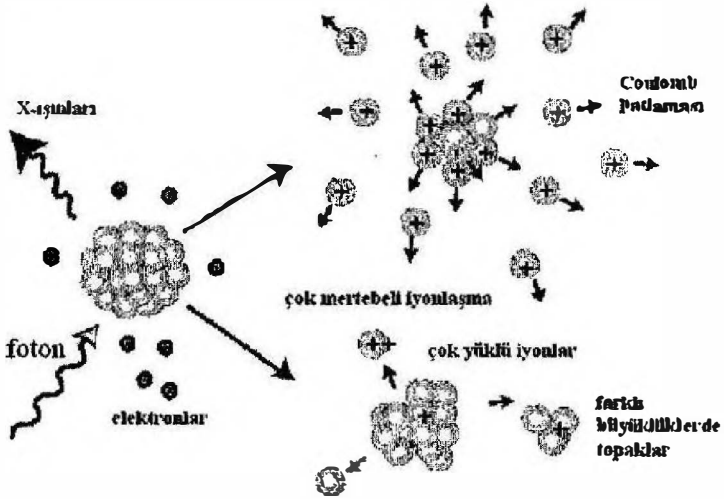
*Potasyum topaklarında atom başına düşen iyonlaşma potansiyelinin (elektronvolt cinsinden) topak büyüklüğüne göre değişimi. Alt kısındaki kesikli çizgi kristal değerini göstermektedir.*



*Altın topaklarında erime sıcaklığının (Santigrat derece cinsinden) topak büyüklüğüne göre değişimi. Yukarı kısındaki kesikli çizgi kristal değerini göstermektedir.*

Topaklarda, özellikle artı yüklü metal topaklarda, Coulomb Patlaması (CP) olarak bilinen ilginç bir özellik vardır.

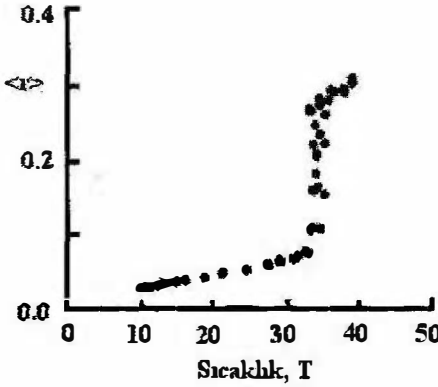
Bu özellik topağın kararlılığı (sağlamlığı) hakkında bilgi verir. Topaklardaki artı yük fazlalığı bazı hallerde atomlar arasındaki çekici etkileşmeyi yenebilir ve topak atomları bir arada durmakta zorlanır ve topak dağılır. Artı yük fazlalığı aslında elektron kaybı demektir. Topaklar yüksek düzeyde iyonlaştırılırsa (elektron kopartılırsa) artı yükçe zenginleşirler. Elektron azlığı bir bakıma Coulomb patlamasına sebep olur; çünkü topaktan belli sayıda elektron kopartılınca atomlar birbirlerinden ayrılmaktadır.



*Topaklarda Coulomb patlaması (CP) olayının temsili gösterimi.*

Topaklarda erime konusu ilginçtir. Topaklarda erime topak büyüklüğüne bağlı bir özellik gösterir. Topaklarda erimenin tanımı kristal yapılardan farklıdır. Kristallerde erime sıcaklığının belli bir değeri vardır ve bu değer sabittir. Topaklarda ise atomlar arası mesafelerin ( $\langle r \rangle$ ) sıcaklığa göre değişiminde görülen atlama noktası topağın erime sıcaklığı olarak alınır.

Bu değer toprak büyüklüğüne göre değiştiğinden topraklarda sabit bir erime değeri yoktur.

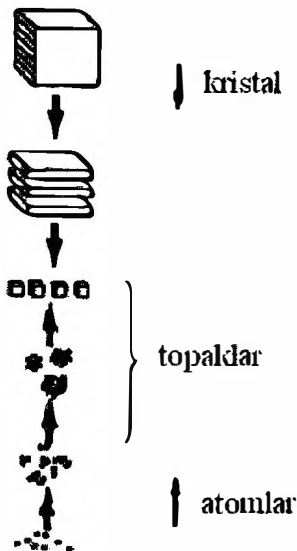


*Topaklarda erime toprak büyüklüğüne göre değişir, dolayısı ile topraklar için kristallerde olduğu gibi belli bir erime tanımı yoktur.*

Topakları, özellikle yalıtılmış toprakları incelemenin önemi aşağıdaki gibi sıralanabilir: Temel fizik açısından ilginç yapılarıdır, fiziksel özellikler toprak büyüklüğüne bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Atomdan kristal yapıya doğru giderken sürekli bir değişimin olduğu görülmektedir. Makroskopik olaylara mikroskopik yaklaşımın yolunu açmaktadır; kristal büyütme, kataliz, yüzeye yapışma ve tutunma gibi. Birçok teknoloji uygulaması toprak fiziki ve kimyasına dayanır; fotoğrafçılık (film), sprej, toz metalürjisi, nano miknatıslar ve üstün iletkenler, vs. Astrofizik uygulamalar da yapılabilir; kozmik tozların oluşumu ve özellikleri toprak bilimi ile anlaşılabilir. Topaklar günlük hayatımızın bir parçasıdır ve çevremize önemli katkıları vardır; taşıtların eksoz gazı, endüstride kullanılan killeri, renkler (gözlüklerde kullanılan renkli camlar), vs.

Topaklar ya serbest parçacıklar olarak yalıtılmış, parçacık

demetleri halinde ya homojen olan veya homojen olmayan örgülerin içinde veya yüzeye yapışmış olarak, buhardan biriktirme, ya da nano parçacıklar olarak üretilebilirler. Kısaca topakların üretilmesinde başlıca iki yol vardır; ya atomlardan buharlaşma yöntemi ile biriktirilerek ya da kristal yapıdan ufalayarak elde edilebilirler, aynen nano imalatı olduğu gibi. Topaklar elektron ve foton çarpışmaları ile incelenebilir. Demet yansıma yöntemleri de topakların tespit edilmesinde kullanılır. Özellikle küçük topakların hem deneysel olarak hem de kuramsal olarak çok sayıda araştırmacı tarafından incelenmesinin başlıca sebebi kataliz, kristal büyütme, fotoğrafçılık gibi alanlardaki olayların atom seviyesinde anlaşılmasına yardımcı olmasındandır.



*Topakların üretilme yöntemleri.*

Topaklar deneysel olarak üretilirken aynı zamanda birkaç çeşit inceleme yöntemi de beraberinde uygulanır. Örneğin, çok

fotonlu iyonlaşma spektroskopisi süpersonik akışkanlar içinde bulunan küçük toprakların incelenmesinde kullanılır. Fotoelektron spektroskopisi yöntemleri eksi yüklü küçük toprakların incelenmesinde, elektron saçılma yöntemleri de toprakların yapılarını incelemeye kullanılır. X-ışınları ile de yüzey üzerine konmuş toprakların yapıları incelenebilir. Yüzeye konmuş toprakları inceleme yöntemleri başlıca iki guruba ayrılır: Dar alanlı hassas yöntemler (taramalı-tünellemeli elektron mikroskopları gibi), geniş alanlı yöntemler (X-ışınları spektroskopileri) gibi. Genellikle incelemeler bu yöntemlerin birkaçı birden kullanılarak incelemeler yapılmaktadır.

Küçük topraklar genellikle demet deneylerinde incelenir. Kütle spektroskopisi doğrudan yapıları ve sağlamlıkları hakkında bilgi verebilir. Elektronik yapıları hakkındaki bilgiler de elektrik polarizasyon, manyetik moment, fotoiyonlaşma potansiyelleri ve ayrışma (dağılma) süreçlerinin ölçümlerinden elde edilebilmektedir.

Toprakların kuramsal olarak incelenmesinde başlıca iki yaklaşım vardır. Birincisi küçük toprakların yapıları ve elektronik özelliklerinin kuantum yöntemleri ile incelenmesidir. İkinci yaklaşım ise atom seviyesinde klasik mekanik kurallarına dayanan bilgisayar benzetişim yöntemleridir. Bu tür hesaplar Moleküler dinamik yöntemi, Monte Carlo yöntemi ve Statik yöntem olarak üç gruba ayrılabilir.

Benzetişim yöntemlerinin uygulanabilmesi için toprakta-ki atomlar arası etkileşimleri tanımlayan bir potansiyel enerji fonksiyonunun olması gerekir. Böyle bir fonksiyon elde etmek genellikle işin en zor ve önemli kısmını oluşturur. Literatürde birçok malzeme için tanımlanmış ve katsayıları tayin edilmiş potansiyel enerji fonksiyonu bulunmaktadır.



# BÖLÜM 5

## NANOÖLÇEKTE ÖLÇME VE İNCELEME YÖNTEMLERİ

Nanometre ebatlarda üretim yapmak, ayrıca bu ölçekte olup bitenleri gözlemek kolay değildir. Nanoölçekte ölçme ve görüntüleme özel yöntemler gerektirir, makroskobik büyüklükler için geliştirilen ve kullanılan yöntemler nanoölçekte kullanılamazlar. Bu bölümde nanoölçekteki büyüklükler için geliştirilmiş ve kullanılan başlıca ölçme ve görüntüleme yöntemlerinden özetle bilgi verilecektir.

### Saçılma Yöntemleri

Adından da anlaşılacağı gibi bu yöntemler elektronların veya fotonların malzeme ile çarpıştırılması sonucu saçılmaları esasına dayanır. Yani elektron-malzeme veya foton-malzeme çarpışması

sözkonusudur. Burada foton olarak genellikle X-ışınları kullanılmaktadır. Malzemeleri incelemek için birçok saçılma yöntemi vardır. Bu yöntemlerle kristal yapılı malzemelerin kristal yapıyı oluşturan tabakaları arasındaki mesafe ölçüsü hassasiyette (nanometrenin onda biri ile beşte biri arasında) ölçüm yapılabilmektedir. Ancak bu yöntemler birçok atomdan gelen bilgilerin ortalamasını vermektedir. Nanoteknolojide önemli olan yerel bölge bilgisi vermediğinden, saçılma yöntemleri tam olarak nanoölçek yöntemleri sayılmaz, makroskopik bilgi edinmek için daha uygundur.

### **Taramalı Elektron Mikroskobu**

Adından da anlaşılacağı gibi bu yöntemde elektron demeti kullanılır; elektron demeti incelenecek bölge üzerinde tarama yapacak şekilde gezdirilir. Bu yöntem hakkında bilgi vermeden önce elektron-malzeme çarpışması sonucu oluşan bazı fizik olaylarını şematik olarak anlatmak konuyu daha iyi anlamaya yardımcı olacaktır. Bir elektron demeti bir malzemeye çarptığı zaman birtakım elektronlar ve ışınlar (radyasyon) yayar.

Elektron-malzeme çarpışması sonucu yayılan ışınların (radyasyonun) ve elektronların kaynakları ve işlevleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

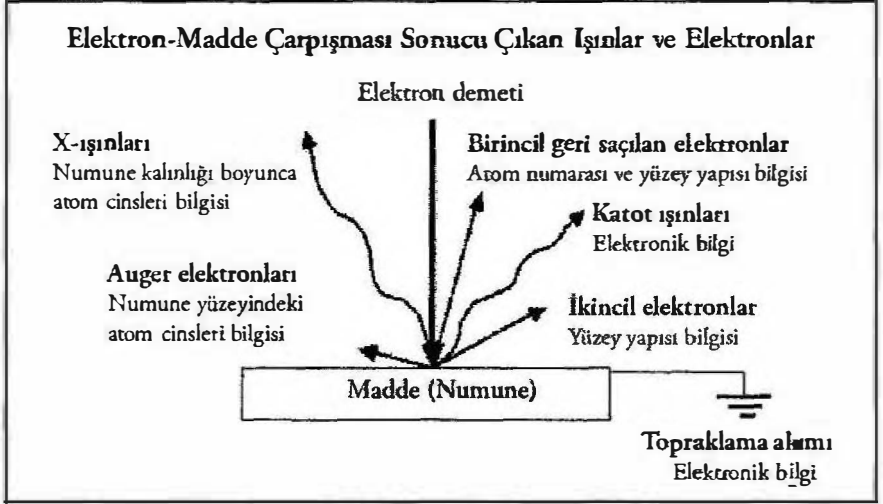
*X-ışınları:* Malzeme atomlarının iç kabuk elektronlarının geçişleri sonucunda oluşan ışınlardır, malzeme atomlarının bileşimi (cinsleri) hakkında bilgi verir.

*Katot ışıması:* Malzeme atomlarının valans (dış kabuk) elektronlarının geçişleri sonucunda oluşan ışınlardır, malzeme atomlarının elektronik yapısı hakkında bilgi verir.

*Auger elektronları:* Malzeme atomlarının iç kabuklarından gelen elektronlardır, malzeme atomlarının bileşimi hakkında bilgi verir.

**Birincil geri saçılan elektronlar:** Elektron demetine ait elektronlardır, malzeme atomları ve yüzey yapısı hakkında bilgi verir.

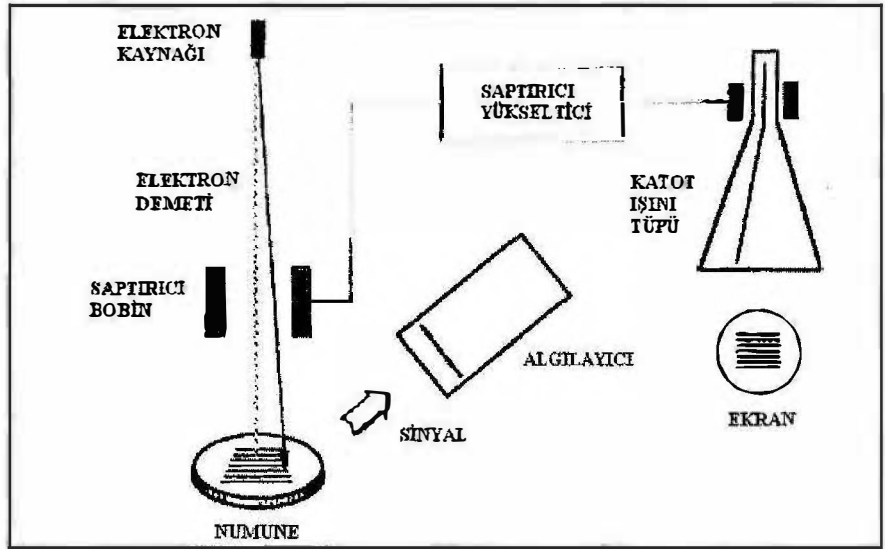
**İkincil elektronlar:** Malzeme atomlarından gelen elektronlardır, malzeme yüzeyi hakkında bilgi verir.



*Elektron-madde (malzeme, numune) çarpışması sonucu oluşan olaylar.*

Elektron demetindeki elektronların enerjisi 1-40 kilovolt civarında değişebilir. Elektron demeti ile incelenecek malzeme vakumlu ortamda bulunmalıdır. Elektron kaynağından çıkan elektron demeti birtakım manyetik merceklere geçtikten sonra odaklanmış olarak malzeme üzerine gönderilir. Gelen elektronlar ile malzeme arasında esnek olmayan çarpışma sonucu malzemeden birtakım elektronlar çıkar, bu tür malzemeden çıkan elektronlara ikincil elektronlar denir. İkincil elektronlar algılayıcılarla (dedektör) tesbit edilir. Algılayıcıya ge-

len elektronların oluşturduğu sinyal görüntüye dönüştürülür, böylece incelenen malzemenin yüzeyi hakkında bilgi edinilir. Elektron demetini üretmek için farklı yöntemler kullanılabilir; örneğin ısıtılmış tungusten telden, lantan-bor filamandan veya alan yayıcılarından elde edilebilir. Taramalı elektron mikroskobu yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.

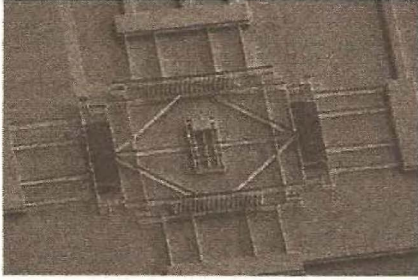


*Taramalı elektron mikroskobunun şematik gösterimi.*

Bu yöntemin uygulanabilmesi için malzemenin biraz iletken olması ve topraklanması, yüzeyin çok temiz olması gerekir. Bu yöntemle ağır atomlardan oluşmuş malzeme yüzeyleri (altın gibi) çok iyi görüntülenebilir, ancak hafif atomlardan oluşmuş malzemeler için görüntüler pek iyi olmaz.

Bu yöntemde görüntü hassasiyeti oluşturulacak elektron demetinin hassasiyeti ile orantılıdır, çok dar bir bölgede oluşturulan elektron demeti (1 nanometre ölçüsünde olabilir) ile daha

hassas görüntü elde edilir. Ayrıca elektron demetindeki elektronların enerjisi de görüntüyü etkiler. Vakum sistemindeki kirlilik de (bunlar genellikle vakum pompasının yağlarından gelen hidrokarbonlar olabilir) görüntünün iyi olmamasını etkileyebilir. Bu tür etkiler büyük numune ölçümlerinde etkili olmayabilir ancak nanoölçekteki numunelerin ölçümleri için önemlidir. Bu yöntemle elde edilmiş örnek görüntüler şekilde gösterilmiştir.



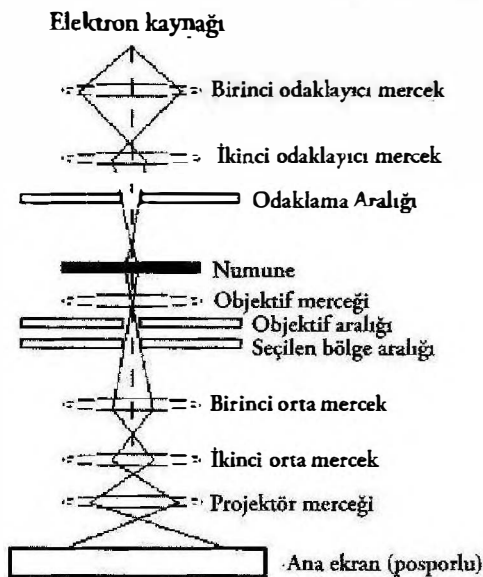
*Taramalı elektron mikroskobu ile elde edilmiş görüntü örnekleri. Nanofabrikasyon ile üretilmiş elektronik devre ve bilgisayar yongası örneği (www.scharfphoto.com'dan alınmıştır.)*

Taramalı elektron mikroskobunun iki türü vardır; bunlardan birisi geri saçılan elektronları dikkate alır, diğeri ise ikincil elektronları dikkate alır. İkincil elektronlar malzemeden gelir, geri saçılan elektronlar ise elektron demetinden gelir, malzemeye ait değildir, ancak malzeme hakkında sınırlı da olsa bilgi verebilir. Ayrıca ikincil elektronlar malzemeden çıkarken onlarla beraber X-ışını da yayar, X-ışınlarının da ayrıca dedektör yardımı ile incelenmesi sonucu malzeme hakkında ilave bilgiler de edinilir.

### **“Transmission” Elektron Mikroskobu**

“Transmission” elektron mikroskobuna kısaca TEM diye-

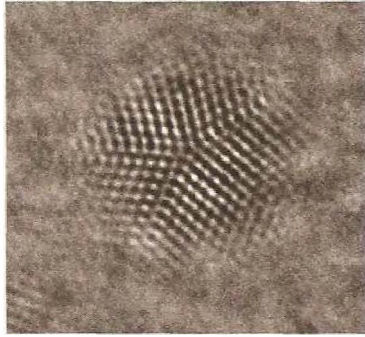
lim. TEM atom seviyesinde görüntü elde edebilen hassas bir yöntem ve cihazdır. Bu yöntemin önce bahsedilen “taramalı elektron mikroskobu” yönteminden farkı (her iki yöntemde de elektron demeti kullanılıyor) TEM’de elektron demetinin numune malzemenin içinden geçerek yol almasıdır. Malzemenin içinden geçen elektronlar bir ekranda izlenerek malzemenin yapısı ile ilgili görüntü oluştururlar. “Transmission” kelimesinin Türkçe karşılığı “gelip-geçen” olarak verilebilir, yöntemin adı kullandığı elektron demetinin nasıl iş gördüğü ile doğrudan bağlantılıdır. Bu yöntemde kullanılan elektron demetindeki elektronların enerjisi 100-500 kilovolt civarındadır. Yüksek enerjili elektron demeti, birtakım mercekle sistemlerinden geçtikten sonra numune üzerine odaklanır, malzemeden geçtikten sonra yine birtakım mercekle sistemlerinden geçer ve ekrana yansıtılır. TEM’in yapısı şematik olarak şekilde gösterilmiştir.



*“Transmission” elektron mikroskobunun (TEM) şematik yapısı.*

TEM ile görüntü alabilmek için malzemenin ince olması gerekir, çünkü elektronlar içinden geçip gidecektir. Malzeme kalınlığı birkaç yüz nm'yi geçmemelidir. Dolayısı ile TEM görüntüsü alınacak numuneler özenle hazırlanmalıdır.

TEM'in birkaç çeşidi vardır. Bunlardan birisi elektron enerjisi kaybını dikkate alan spektroskopi yöntemidir, ki bu yöntemde malzemedan geçip giden elektronların enerjisine bakılarak numunenin elektronik yapısı hakkında bilgi edinilir. Diğer bir yöntem de Lorentz mikroskobu olarak adlandırılır, numuneden geçip giden elektronların dağılımına bakarak (girişim vs.) malzemenin manyetik yapısı hakkında bilgi edinilir. Bir altın nanotopağın TEM görüntüsü şekilde gösterilmiştir.



*Bir altın nanotopağının TEM görüntüsü.*

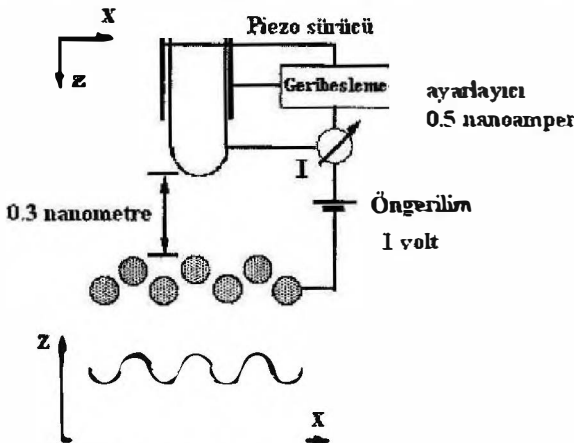
### **Taramalı Sonda Mikroskobu**

Taramalı sonda mikroskobu, genel bir isim olup iki farklı görüntüleme yöntemini ifade eder. Bunlardan biri taramalı tünelleme mikroskop, diğeri ise atomik kuvvet mikroskobudur. Taramalı sonda mikroskobunun genel yapısı sonda adı verilen iğne şeklinde bir ucun tarama yapabilen piezoelektrik bir kola tutturulması ile oluşur. Sonda uç incelenecek yüzeye çok yakın mesafede (nanometrenin onda biri beşte biri arasında) yüzeyi tarayacak şekilde

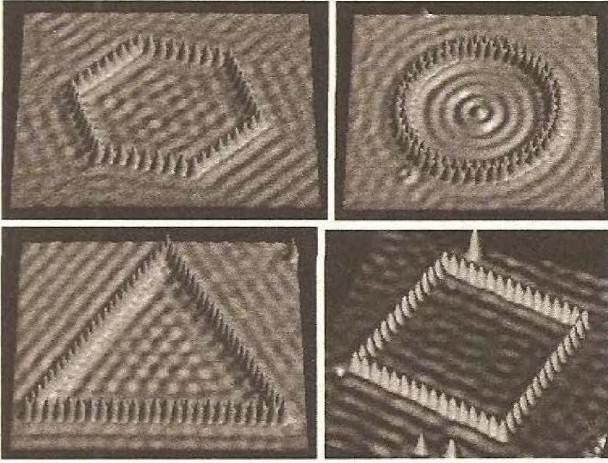
düzenlenir ve birtakım değerler ölçülerek yüzey hakkında bilgi edinilir. Bütün bu işlemler bilgisayar kontrollü olarak yapılmaktadır.

### Taramalı Tünellemeli Mikroskop

Taramalı tünellemeli mikroskop, iletken numuneler için çok uygun bir görüntüleme yöntemi ve aygıtıdır. İletken bir uç kullanılır, uç yüzeye nanometrenin onda biri beşte biri kadar yaklaştırılır, iletken uç ile iletken numune yüzeyi arasında yaklaşık 1 Volt kadar bir öngerilim uygulanır. Bu mesafede uç ile yüzey atomları arasında elektron tünellemesi olur (elektron akımı). Tünelleme akımını sabit tutmak için uç ile yüzey arasındaki mesafe devamlı kontrol edilir (ayarlanır). Uç tarama sırasında iki boyutta (x,y yönünde) harekete sahiptir, aynı zamanda yüzeye olan mesafesi de değişerek (z yönünde) üç yönde de hareket edebilir. Böylece taramalı tünellemeli mikroskop yardımı ile incelenen yüzeyin elektronik ve atom yapısı hakkında bilgi ve görüntü elde edilir. Taramalı tünellemeli mikroskop ve çalışma ilkeleri ile taramalı tünellemeli mikroskopta alınmış birkaç görüntü örneği şekilde gösterilmiştir.



*Taramalı tünellemeli mikroskopun şematik görünümü.*



*Metal yüzeyine yerleştirilmiş atom dizilerinin taramalı tünellemeli mikroskop ile görüntüleri ([www.almaden.ibm.com/vis/stm/](http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/) den alınmıştır).*

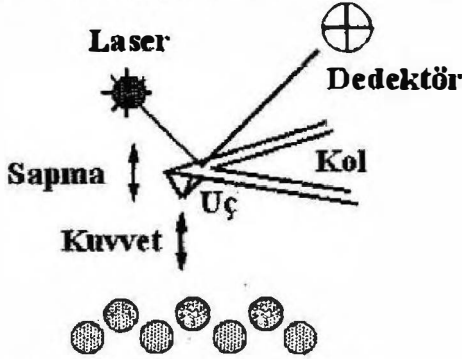
Taramalı tünellemeli mikroskopta görüntü alabilmek için numunenin iletken olması bir çeşit sınırlama getirebilir. Yalıtkan yüzeyleri bu yöntemle incelemek mümkün olmamaktadır. Ayrıca mikroskop düzeniğinin vakumlu ortamda olması ve düşük sıcaklıkta ölçüm (Helyum gazı sıcaklığında,  $\sim 4.2$  Kelvin) yapılabilmesi de bu yöntemin sınırlamalarındandır. Böyle sınırlamalardan dolayı bu yöntem biyolojik yapılar için (canlı doku incelemesi) uygun değildir.

Taramalı tünellemeli mikroskop yönteminin de birkaç çeşidi vardır. Bir tanesi polarize spinli taramalı tünellemeli mikroskop türüdür. Bu yöntemde mıknatıslı uç kullanarak manyetik yüzeylerin incelemesi yapılabilir. Diğer bir çeşidi de balistik elektron yayınlayan mikroskop türüdür. Bu yöntemde numune katkılı yarıiletken ince film ise, uç ile numune arasında balistik elektron akımı oluşur (balistik elektronlar saçılma olmadan ilerleyen

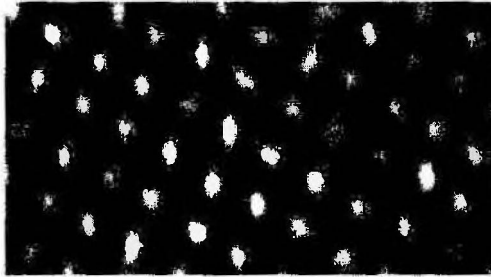
elektronlardır). Böylece balistik elektron akımı ölçümü ile numune içindeki saçılma olayları hakkında bilgi edinilmektedir.

### Atomik Kuvvet Mikroskobu

Atomik kuvvet mikroskobu bir kola tutturulan sondanın (uç) mekanik hareketleri ilkesine dayanır. Sondalı kol inceleyecek yüzey üzerinde tarama şeklinde hareket ettirilerek koldaki sapmalar optik bir düzeneğe (genellikle laser ışını ile) tesbit edilir, böylece incelenen yüzeyin yapısı hakkında bilgi edinilir. Atomik kuvvet mikroskobu ve çalışma ilkesinin şematik şekli ile örnek bir görüntü aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



*Atomik kuvvet mikroskobunun çalışma ilkesi şeması.*



1 nanometre

*Atomik kuvvet mikroskobu ile alınmış molibdenum trioksit kristalinin yüzey görüntüsü.*

Atomik kuvvet mikroskobunun birkaç çeşidi vardır:

*Dokunmalı Modeli:* Bu model atomik kuvvet mikroskobunun ilk modelidir. Uç sanki bir gramofon iğnesi gibi çalışır; uç incelenecek yüzey üzerinde gezdirilirken (tarama işlemi) çok az bir kuvvet uygulanır (nanonewton ölçüsünde), kol üzerindeki kuvvet sabit kalacak şekilde tarama işlemi yapılırken böylece yüzeyin görüntüsü de alınmış olur. Bu yöntemle yüzey yapısı hakkında bilgi edinilir. Bu yöntemin hassasiyeti birkaç nanometre kadardır. Burada en önemli husus uç malzemesi ve yapısıdır, ucun taramalı tünellemeli mikroskopta olduğu gibi çok ince olması istenir. Gerçekte ucun yapısında tek atom olmaz, belli bir eğrilikte birçok atom yüzey atomları ile etkileştiğinden bu yöntem ile tek atom ölçüsünde görüntü elde etmek oldukça zordur. Bütün bunlara rağmen bu yöntemin avantajı özel ortam gerektirmemesidir; açık havada, hatta sıvı içinde bile bu yöntemle yüzey görüntüsü alınabilmektedir.

*Dokunmasız Modeli:* Dokunmalı modelin yenileştirilmiş olan bu model kolun sahip olabileceği tabii titreşim frekansı ile titreştirilerek rezonansa getirilmesi ilkesine dayanır. Kol ve ona bağlı uç yüzeye yakın tutularak yüzey taranır, bu sırada uç-yüzey etkileşmesinden kaynaklanan kuvvetle hareket eden kol üzerindeki kuvvetin sabit tutulması sonucu yüzey görüntüsü alınmış olur. Bu yöntemin de hassasiyeti dokunmalı modelinki ölçüsündedir, bazı hallerde (hassas yapılmış uç, iyi ayarlanmış elektronik ve mekanik düzenek sayesinde) daha iyi de olabilir. Dokunmasız modelde uç-yüzey arasındaki etkileşme kuvveti birçok şeye bağlı olabileceği için bu durum bir bakıma avantaj da sağlar. Bu modelin kendi içinde birtakım alt modelleri de geliştirilmiştir, örneğin:

- **Manyetik Kuvvet Mikroskobu:** Mıknatıslı uç kullanarak yüzeyin manyetikliği hakkında bilgi edinilir.
- **Elektrostatik Kuvvet Mikroskobu:** İletken uç kullanarak ve uç ile yüzey arasına gerilim uygulayarak yüzeyin potansiyel görüntüsü hakkında bilgi edinilir.
- **Kimyasal Kuvvet Mikroskobu:** Uca birtakım moleküller tutturularak işlev kazandırılır ve yüzey ile işlevlendirilmiş uç arasındaki etkileşmelerden yüzey hakkında bilgi edinilir. Bu yöntem özellikle biyoteknoloji çalışmaları için çok kullanışlıdır.
- **Manyetik Rezonans Kuvvet Mikroskobu:** Bu model yüzeydeki polarize olmuş çekirdek spinlerini tesbit etmede kullanılır. Titreşen mıknatıslı kol ile çekirdek spinlerinin rezonansa gelmesi ilkesine dayanır. Bu yöntemle tek bir spin bilgisi bile elde edilebilmektedir.

### **Yakın Alan Taramalı Optik Mikroskop**

Optik mikroskopların hassasiyeti difraksiyon ile sınırlı olduğundan optik mikroskoplar ile mikron altı hassasiyette görüntü elde etmek çok zordur. Bu zorlukları kısmen aşmak için yeni yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan bir tanesi yakın alan taramalı optik mikroskobudur. Şerit haline getirilmiş optik fiber ( $\sim 100$  nm kalınlığında) atomik kuvvet mikroskoplarının çalışma ilkesine benzer şekilde kullanılarak yüzey taraması yapılır. Yüzeyin fiberden gelen ışınlarla karşı tepkisi fiber uç boyutları ölçüsündeki hassasiyette görüntülenerek yüzey hakkında bilgi edinilir. Bu yöntemin sınırlamaları kullanılan fiber ucun imalindeki zorluktan gelir. Optik fiber ne kadar ince olursa hassasiyet de o oranda yüksektir.

## Nanomanyetik Algılama

Daha önce söz edilen atomik kuvvet mikroskobu dokunmasız modellerinden olan manyetik kuvvet mikroskobu ile manyetik rezonans kuvvet mikroskoplarına ilave olarak nanoebattaki malzemelerin manyetik özelliklerini belirlemek için iki ayrı yöntem ve mikroskop modelleri daha vardır; bunlar süper iletken kuantum girişim aygıtları ve Hall manyetometrelerdir. Süperiletken kuantum girişim aygıtların çalışma ilkesi adından da anlaşılacağı gibi süperiletken halkadan geçen manyetik akının kuantlaşması esasına dayanır. Böyle süperiletken halkalar manyetik alana çok hassas sondalar olarak atomik kuvvet mikroskobu gibi bir düzenekte kullanılarak. Böylece nanoebattaki numunelerin manyetik özellikleri incelenebilir. Bu tür aygıtlarda süperiletken malzeme kullanıldığı için ancak çok düşük sıcaklıklarda (30 Kelvin'in altında) çalışabilir. Ayrıca bu tür aygıtlar çok hassas olduğu için dış manyetik etkilerden çok iyi korunması gerekir, aksi takdirde ölçülen değerin numuneden mi yoksa dış etkiden mi geldiği ayırt edilemez.

Manyetik algılamanın ikinci yöntemi Hall olayına dayanır. Katmanlı yarıiletken bir malzeme kullanarak Hall sondası yapılır, böyle katmanlı bir yapıda elektronlar iki boyutta hareket edebilirler (2B'lu elektron gazı elde etmenin en uygun yöntemi). Hall sondası atomik kuvvet mikroskobu gibi bir düzenekte kol ucuna yerleştirilerek numune üzerinde gezdirilir veya sabit bir yerde tutularak numune Hall sondasının üzerinde gezdirilir. Hall sondasındaki Hall gerilimi ölçülerek numunenin manyetik özelliği hakkında bilgi edinilir. Bu yöntemin duyarlılığı süperiletken kuantum girişim aygıtındaki kadar değildir.



# BİTİRİRKEN

Tarihçilerin nasıl adlandıracağı bilinmez, ama yeni bir çağa girmektediriz. Maddenin atom boyutundaki kontrolü ve kuantum özelliklerinin gündelik hayatta işlevsellik kazanmaya başlaması başka nasıl yorumlanabilir? Bu büyük değişime şimdilik nanobilim ve nanoteknoloji denmektedir.

Şimdiye kadar bilinen bütün teknoloji, uzay çalışmalarından tıba kadar bu değişimden etkilenmiştir. Nanobilim ve nanoteknoloji bu doğası gereği disiplinler arası bir çalışma alanıdır. Öyle ki nano ölçekteki bir yapıyı tam anlamıyla kavramak için fizik, kimya ve biyoloji temel bilimleri hakkında derin bir anlayışın yanı sıra malzeme, elektronik, makine ve kimya mühendisliği uygulama bilgisi de gerekmektedir. Bu kadar geniş bir yelpazede yer alan farklı bilim dallarının bir araya toplanması ve gerekli işbirliği ancak üniversite içi önem-

li değişimler ile mümkün olabilir. Bazı derslerin içeriklerinin yeniden gözden geçirilmesi, yeni dersler açılması, hatta yeni programlar geliştirilmesi ve açılması artık kaçınılmaz olmuştur. Bu gelişmeleri vakit kaybetmeden hemen hayata geçirmek gerekir. Nanobilim ve nanoteknoloji sahasında yapılacak araştırma ve geliştirmeleri devamlı kılabilmek için yatırım programlarında bu sahaya öncelik verilmelidir. Bu sahada araştırma ve geliştirme yapacak merkezler kurulması, araştırmacıların yetiştirilmesi programlarının yapılması gerekir. Gelişmiş ülkeler bu konunun önemini ve önceliğini kavramış, gerekli atılımları başlatmışlardır. Nanobilim ve nanoteknoloji alanında hem eğitim hem araştırma hem de üretim için yapılacak yatırımlar en kısa zamanda geri dönüşümünü yapabilecek durumdadır. Üniversitelerin, araştırma merkezlerinin, hatta özel sektör girişimcilerinin bu sahaya ilgi duyması sevindirici ve ümit vericidir.

Nanobilim ve nanoteknoloji sahasında gelişmeler sürmekte olduğundan yapılan çalışmaları izlemek gerekir. Nanoteknoloji çağının henüz başında bulunuyor olunmasından dolayı Türkiye için tren henüz kaçmış değildir.

# KAYNAKÇA

**Bölüm 1, 2 ve 3 için faydalanılan ve konu ile ilgili bazı kaynaklar:**

## **Web sayfaları:**

1. <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>
2. <http://e-drexler.com/p/idx04/00/0325nanoOverview.html>
3. <http://www.msc-nanoscience.tudelft.nl/nanotimeline.html>
4. <http://www.bhs.k12.nj.us/coltech04/>
5. <http://www.zyvex.com/nanotech/CDAarticle.html>
6. <http://www.zyvex.com/nanotech/convergent.html>
7. <http://www.aleph.se/Trans/Tech/Nanotech/>
8. <http://nano.physics.metu.edu.tr>
9. <http://nanotechweb.org/articles/news>

10. <http://www.edinformatics.com/nanotechnology/>
11. <http://www.somewhereville.com>
12. <http://www.scharfphoto.com>
13. <http://www.nano.gov/>
14. <http://www.nanoforum.org>
15. <http://www.edinformatics.com/nanotechnology/>
16. <http://nanotube.msu.edu>
17. <http://www.nanotubes.com.cn>
18. <http://physicsweb.org>
19. <http://mgm.mit.edu/shared/>

### **Makaleler:**

1. G. Binning, H. Rohrer, Ch. Gerber, E. Weibel, Phys. Rev. Lett. **49**, 57(1982).
2. H.W. Kroto, J.R. Heath, S.C. O'Brien, R.F. Curl, R.F. Smalley, Nature (London) **318**, 162(1985).
3. S. Iijima, Nature (London) **354**, 56(1991).
4. R.C. Merkle, Nanotechnology **8**, 47(1997).
5. S. Ihara, S. Itoh, and J.I. Kitakami, Phys. Rev. B **47**, 12908(1993); **48**, 5643(1993).
6. S. Itoh and S. Ihara, Phys. Rev. B **48**, 8323(1993); **49**, 13970(1994).
7. P.M. Ajayan and T.W. Ebbesen, Rep. Prog. Phys. **60**, 1025(1997).
8. Y.K. Kwon and D. Tomanek, Phys. Rev. B **58**, 16001(1998).
9. Y.K. Kwon, D. Tomanek, and S. Iijima, Phys. Rev. Lett. **82**, 1470(1999).

10. L.M. Peng, et al., Phys. Rev. Lett. **85**, 3249(2000).
11. Ş. Erkoç, Int. J. Mod. Phys. C **11**, 175(2000).
12. Ş. Erkoç, Int. J. Mod. Phys. C **11**, 1247(2000).
13. R.H. Baughman, Science **290**, 1310(2000).
14. B. Vigolo, et al. Science **290**, 1331(2000).
15. M.F. Jarrold, Nature **407**, 26(2000).
16. L. Kouwenhoven, Nature **407**, 35(2000).
17. Ş. Erkoç, Bilim ve Teknik (TÜBİTAK), Ocak 2001.
18. Ş. Erkoç and D.C. Vural, , Int. J. Mod. Phys. C **12**, 685 (2001).
19. Ş. Erkoç and O.B. Malcıoğlu, Int. J. Mod. Phys. C **12**, 865(2001).
20. Ş. Erkoç, Nano Letters **2**, 215(2002).
21. Ş. Erkoç and O.B. Malcıoğlu, Int. J. Mod. Phys. C **13**, 367(2002).
22. O.B. Malcıoğlu and Ş. Erkoç, Int. J. Mod. Phys. C **14**, 441(2003).
23. Ş. Erkoç and L. Türker, J. Mol. Struc. (Theochem) **634**, 195(2003).
24. L. Forro and L. Mihaly, Rep. Prog. Phys. **64**, 649(2001).
25. S. Ciraci, S. Dag, T. Yildirim, O. Gulseren, R.T. Senger, J. Phys.: Condens. Matter **16**, R901(2004).
26. O.B. Malcıoğlu, E. Taşcı, Ş. Erkoç, Int. J. Mod. Phys. C **17**, 187(2006).

### Kitaplar:

1. D. Koruga, S. Hameroff, J. Withers, and M. Sundaresan, *Fullerene C<sub>60</sub>*, North-Holland, 1993.
2. Eds. H.W. Kroto and D.R.M. Walton, *The Fullerenes*, Cambridge Univ. Press, 1993.

3. A. Hirsch, *The Chemistry of the Fullerenes*, Georg Thieme Verlag, 1994.
4. M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, and P.C. Eklund, *Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes*, Academic Press, San Diego, 1996.
5. R. Saito, G. Dresselhaus, and M.S. Dresselhaus, *Physical Properties of Carbon Nanotubes*, Imperial College Press, 1998.
6. P.F.J. Harris, *Carbon Nanotubes and Related Structures*, Cambridge Univ. Press, 1999.
7. Ed. E. Osawa, *Perspective of Fullerene Nanotechnology*, Kluwer Academic Publishers, 2002.
8. K.E. Drexler, *Nanosystems: Molecular machinery, manufacturing, and computation*, Wiley, 1992 .
9. R. Saito, G. Dresselhaus, S. Dresselhaus, *Physical properties of carbon nanotubes*, Imperial College Press, London, 1998.
10. G. Timp,Ed., *Nanotechnology*, AIP Press, Springer, New York, 1999.
11. P.J.F. Harris, *Carbon nanotubes and related structures: new materials for the 21st century*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
12. Z.L. Wang, *Characterization of nanophase materials*, Wiley-VCH Verlag, GmbH, 2000.
13. M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, P. Avouris, Eds., *Carbon nanotubes: synthesis, structure, properties, and applications*, Springer, Berlin, 2000.
14. E.A. Rietman, *Molecular engineering of nanosystems*, Springer, New York, 2001.

15. E. Osawa, Ed., Perspectives of fullerene nanotechnology, Kluwer Acad. Pub., London, 2002.
16. G. Fishbine, The investor's guide to nanotechnology and micromachines, J. Wiley & Sons, New York, 2002.
17. A.N. Cleland, Foundations of nanomechanics: from solid-state theory to device applications, Springer, Berlin, 2002.
18. C.P. Poole, Jr., F.J. Owens, Introduction to nanotechnology, J. Wiley & Sons, NJ Hoboken, 2003.
19. Z. Tang and P. Sheng, Eds., Nano science and technology: Novel structures and phenomena, CRC Press, Taylor and Francis, London, 2003.
20. C.P. Poole, F.J. Owens, Carbon nanostructures: Introduction to nanotechnology, J. Wiley & Sons, NJ Hoboken, 2003.
21. V. Balzani, A. Credi, M. Venturi, Molecular devices and machines: a journey into the nano world, Wiley-VCH, Weinheim, 2003.
22. W.A. Goddard, III, et al., Eds., Handbook of nanoscience, engineering, and technology, CRC Press, Boca Raton, 2003.
23. S.L. Scott, C.M. Crudden, C.W. Jones, Eds., Nanostructured catalysts, Kluwer Academic, New York, 2003.
24. L. M. Liz-Marzan, M.G. Dordrecht, Low-dimensional systems: theory, preparation, and some applications, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2003.
25. G. Cao, Nanostructures and nanomaterials: synthesis, properties and applications, Imperial College Press, London, 2004.

26. D.S. Goodsell, *Bionanotechnology: lessons from nature*, Wiley-Liss, NJ Hoboken, 2004.
27. V.E. Borisenko, *What is what in the nanoworld: a hand book on nanoscience and nanotechnology*, Wiley-VCH, Weinheim, 2004.
28. B. Bhushan, Ed., *Springer handbook of nanotechnology*, Springer-Verlag, Berlin, 2004.
29. M. Kohler, W. Fritzsche, *Nanotechnology: an introduction to nanostructuring techniques*, Wiley-VCH, Weinheim, 2004.
30. R.A. Broglia, et al., *Solid state physics of finite systems : metal clusters, fullerenes, atomic wires*, Springer, Berlin, 2004.
31. E. Meyer, H.J. Hug, R. Bennewitz, *Scanning probe microscopy: the lab on a tip*, Springer, Berlin, 2004.
32. D.S. Goodsell, *Bionanotechnology: lessons from nature*, Wiley-Liss, NJ Hoboken, 2004.
33. M. Di Ventra, S. Evoy, J.R. Heflin, Jr., Eds., *Introduction to Nanoscale Science and Technology*, Kluwe Acad. Pub., New York, 2004.
34. G.A. Mansoori, *Principles of nanotechnology: Molecular-based study of condensed matter in small systems*, World Scientific, 2005.
35. R.W. Kelsall, I.W. Hamley, M. Geoghegan, *Nanoscale science and technology*, J. Wiley & Sons, Chicester, 2005.
36. R.S. Greco, F.B. Prinz, R.L. Smith, *Nanoscale technology in biological systems*, Eds., CRC Press, Boca Raton, 2005.
37. C.A. Ronan, *Bilim Tarihi: Dünya kültürlerinde bilimin*

tarihi ve gelişmesi, TÜBİTAK, 2005 (Çev. E. İhsanoğlu, F. Günergun).

#### **Bölüm 4 için Kaynaklar**

1. M.R. Hoare, Adv. Chem. Phys. **40**, 49(1979).
2. Ber. Bunsenges., Phys. Chem. Vol. **88** (1984).
3. Surf. Sci. Vol. **156** (1985).
4. Chem. Rev. Vol. **86** (1986).
5. M. Moskovits, Ed., *Metal Clusters*, Wiley, 1986.
6. NATO-ASI Series B Vol. **158** (1987).
7. S. Sugano, Y. Nishina, and S. Ohnishi, Eds., *Microclusters*, Springer-Verlag, 1987.
8. T. Halicioglu and C.W. Bauschlicher, Jr., Rep. Prog. Phys. **51**, 883(1988).
9. Z. Phys. D Vol. **19** (1991).
10. H. Kroto, A.W. Allat, and S.P. Balm, Chem. Rev. **91**, 1213(1991).
11. J. Jortner, Z. Phys. D: At. Mol. Clusters **24**, 247(1992).
12. NATO-ASI Series B Vol. **283** (1992).
13. H. Haberland, Ed. *Clusters of Atoms and Molecules*, Springer-Verlag, 1994.
14. G. Schmid, Ed., *Clusters and Colloids*, VCH Pub., 1994.
15. U. Kreibig and M. Vollmer, *Optical Properties of Metal Clusters*, Springer, 1995.
16. P. Jena and S.N. Behera, Eds., *Clusters and Nanostructured Materials*, Nova Science Pub., 1996.
17. T. Kondow, K.Kaya, A. Terasaki, *Structures and Dynamics of Clusters*, Universal Academic Press, Tokyo, 1996.

18. G.N. Chuev, V.D. Lakhno, and A.P. Nefedov, Eds., *Progress in the Physics of Clusters*, World Scientific, 1999.
19. K.H.M. Broer, Ed., *Metal Clusters at Surfaces*, Springer, 2000.
20. H. Oymak and S. Erkoc, Phys. Rev. A **66**, article no: 033202 (2002).
21. R.L. Johnston, *Atomic and Molecular Clusters*, Taylor and Francis, New York, 2002.
22. *Advances in Metal and Semiconductor Clusters*, Series Editor M.A. Duncan, Elsevier.
23. *Cluster Physics*, Series Editors A.W. Castleman, Jr., R.S. Berry, H. Haberland, J. Jortnar, T. Kondow, Springer.
24. Z. Phys. D: Atoms, Molecules and Clusters (1986'dan beri).
25. J. Cluster Science (1990'dan beri).
26. Nanostructured Materials (1992'den beri).
27. Fullerene Science and Technology (1993'den beri).
28. O. Sinanoglu, Adv. Chem. Phys. **12**, 283(1967).
29. S. Erkoc, Physics Reports **278**, 79(1997).
30. S. Erkoc, in Ann. Rev. Comp. Phys. IX, Ed. D. Stauffer, World Scientific, 2001, pp: 1-103.
31. P. Fantucci, V. Bonacic-Koutecky, J. Koutecky, Z. Phys. D **12**, 307(1989).

### **Bölüm 5 için Kaynaklar**

1. [http://www.veeco.com/pdf/SPM\\_Guide\\_0829\\_05.pdf](http://www.veeco.com/pdf/SPM_Guide_0829_05.pdf)
2. H.-J. Güntherodt and R. Wiesendanger, Eds., "Scanning tunneling microscopy I: general principles and applications to clean and adsorbate-covered surfaces", Springer-Verlag, Berlin (1994).

3. E. Meyer, H. J. Hug, and R. Bennewitz, "Scanning probe microscopy : the lab on a tip", Springer, New York (2004).
4. B. Bhushan, Ed., "Springer handbook of nanotechnology", Springer-Verlag, Berlin (2004).
5. William A. Goddard, III ...[et al.], Eds., "Handbook of nanoscience, engineering, and technology", Boca Raton: CRC Press (2003).
6. Z.L. Wang, Ed., "Characterization of Nanophase Materials", Wiley-VCH Verlag GmbH (2000).
7. <http://mse.iastate.edu/fileadmin/www.mse.iastate.edu/microscopy/beaminteractions.html>
8. C.R. Brundle, Ca.A. Evans, Jr., S. Wilson, Eds., "Encyclopedia of Material Characterization", Butterworth-Heinemann, Stoneham (1992).

### **Ek için Kaynaklar**

1. <http://nano.physics.metu.edu.tr>
2. <http://erkoc.physics.metu.edu.tr>
3. O.B. Malcıoğlu, "Stability of carbon nanotubes and nanorods under heat treatment: Molecular dynamics simulations", M.S. Thesis, METU (2003).
4. Bilim ve Teknik (TÜBİTAK), Ağustos 2006.
5. Ş. Erkoc, O.B. Malcıoğlu, E. Taşcı, "Thermal Stability of Carbon Nanosystems: Molecular-Dynamics Simulations", in "Nanomaterials: Design and Simulation", Eds. P.B. Balbuena, J.M. Seminario, Elsevier, 2006.



# Ek

## ODTÜ'DE NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİ ÇALIŞMALARI

Nanobilim ve nanoteknolojinin dünyada 20-25 yıllık bir geçmişi olmasına rağmen Türkiye'de bu sahadaki çalışmalar ve gelişmeler henüz başlamış sayılabilir. Türkiye'de nanobilim ve nanoteknoloji faaliyetleri genellikle üniversitelerde yapılmaktadır. Araştırma merkezleri olarak TÜBİTAK-MAM'ın bir kamu kuruluşu olması bakımından önemli bir yeri vardır. Ayrıca Bilkent Üniversitesi bünyesinde Fizik Bölümü öncülüğünde Ulusal Nanoteknoloji Merkezi kurulmasına başlanmış olması bu sahada çok önemli bir gelişmedir. Bu merkez ileride Türkiye için bu sahada bir cazibe merkezi olmaya adaydır.

Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde nanobilim ve nanoteknoloji sahasında yapılan faaliyetler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Topaklar ile ilgili çalışmaların 1985'lerden beri ODTÜ Fizik Bölümü'nde yapılıyor olmasından Türkiye'de bu sahada ODTÜ Fizik Bölümü'nün öncülük ettiği söylenebilir. Bu çalışmalar kuramsal olup daha ziyade topakların yapılarının ve elektronik özelliklerinin incelenmesi şeklindedir. ODTÜ Kimya Bölümü'nde de topaklarla ilgili deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Nanotüplerle ilgili ilk çalışmalar yine ODTÜ Fizik Bölümü'nde kuramsal olarak yapılmıştır (1998). Kuantum noktalarla ilgili kuramsal çalışmalar ODTÜ Fizik Bölümü'nde çalışılmaya başlanmıştır. Avrupa Birliği Projeleri (FP6) kapsamında ODTÜ Fizik Bölümü'nde nanokristaller ile ilgili deneysel çalışmalar yapılmaktadır. ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde MEMS çalışmaları yapılmaktadır. ODTÜ Biyoloji Bölümü'nde biyonanoteknoloji sahasında deneysel araştırmalar yapılmaktadır. ODTÜ Kimya Bölümü'nde bazı nanoyapılar kuramsal olarak incelenmektedir. ODTÜ Malzeme ve Metalürji Mühendisliği Bölümü'nde nanoteknolojik öneme sahip seramik malzemelerle ilgili deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Yine aynı bölümde hidrojen depolama ile ilgili çalışmalar da yürütülmektedir. ODTÜ Kimya Mühendisliği Bölümü'nde karbon nanotüp üretimi ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. ODTÜ Makine Mühendisliği Bölümü'nde nanotüplerde akışkanlar ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. ODTÜ'de Merkezi Laboratuvar açılması ve nanobilim ve nanoteknoloji sahasında araştırma yapabilecek donanıma sahip olması, bu alanda yapılacak çalışmalara hız kazandıracaktır.

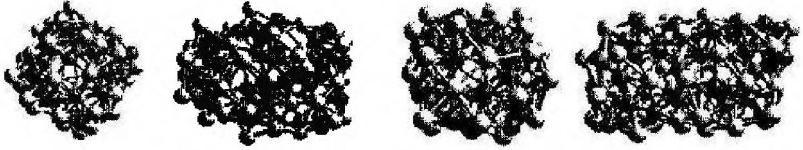
İşin eğitim yönüne bakıldığında “Nanobilim ve Nanoteknolojiye Giriş” adında lisansüstü seviyede bir ders 2005-2006 ders yılında açılmış, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü bünye-

sinde lisansüstü bir Mikro ve Nanoteknoloji Programı açılmış (Y.Lisans ve Doktora programları), 2006-2007 ders yılından itibaren öğrenci kabulüne başlanmıştır.

### **Nanoyapıların Kararlılığı**

Nanoyapılar değişik özelliklerine göre sınıflandırılabilir ve/veya incelenebilir. Örneğin, elektronik, optik, manyetik özelliklerinin yanında termal özellikleri de bazı hallerde önemli olabilir. Termal özelliklerinin başında ısıya karşı dayanıklılıkları gelir. Nanoyapıların kullanılacağı yere göre bazı özelliklere sahip olması istenir. Örneğin, nanotel olarak kullanılacak bir yapının ısıya karşı dayanıklı olması, malzeme ısınınca yapısının bozulmaması gerekir. Bu özellik nanoyapılarda çok önemlidir; bazı durumlarda tek bir atomun varlığı veya yokluğu veya atomun yapıdaki yerinin değişmesi nanoyapının bazı fiziksel ve mekanik özelliklerini değiştirebilir. Isı etkisinde kalabilecek nanoyapıların kararlılığını kuramsal olarak incelemenin en iyi yolu “molekül-dinamiği” simülasyon (benzetişim) bilgisayar yöntemidir. Bu yöntemle nanoyapıların ısıtılınca nasıl davranacakları, ısıya karşı sağlamlıkları ayrıntılı bir şekilde incelenebilir. ODTÜ Fizik Bölümü’nde bu tür çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar genellikle karbon esaslı nanoyapıların ısıya karşı dayanıklılıklarının molekül dinamiği benzetişimi ile incelenmesi olarak nitelendirilebilir. Çalışılan nanoyapılar “fullerene”ler (top şeklindeki karbon nanoyapılar), nanotüpler (tek duvarlı, çok duvarlı), nanoçubuklar (tüplerden veya kristal yapıdan oluşmuş), nanotorus, nanohelis ve nanodışlı yapılar olarak sınıflandırılabilir. Ayrıca atom veya molekül toprakları da inceleme alanları arasındadır. Topaklar nanometre ölçüsünde olan nanoyapılardır. Topak yapıları metal, yarıilet-

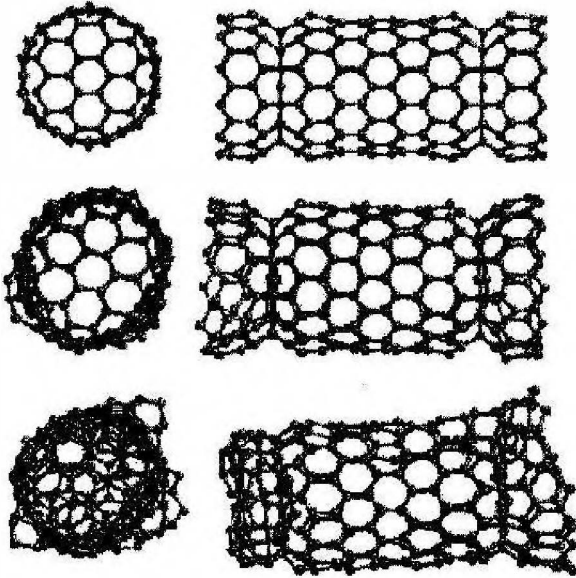
ken ve diğler elementlerden oluşabilir; tek cins atomdan olduğı kadar çok cins atomdan da oluşabilir. Bu yapıların ısıya karşı dayanıklılıkları kullanıldığı yerlere göre önem kazanır. Çalışılan bazı nanoyapılardan örnekler şekillerde verilmiştir.



Çok düşük sıcaklık

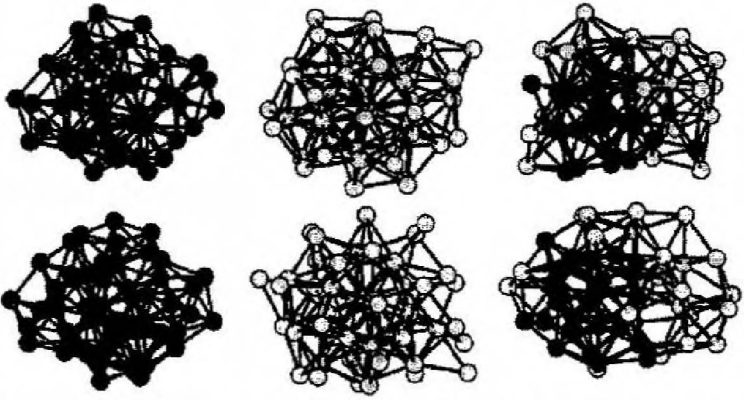
Oda sıcaklığı

*Titan karbür topaklarının farklı sıcaklıklardaki yapıları.*

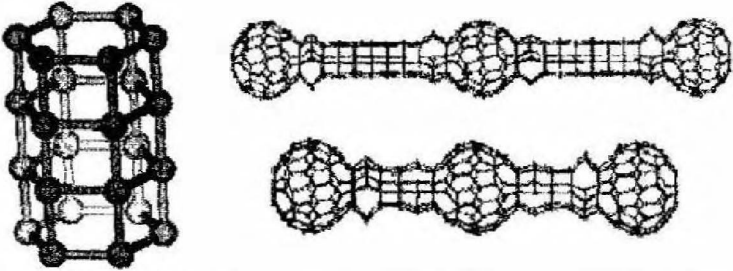


*Karbon nanobambu'nun farklı sıcaklıklardaki yapıları (üst: çok düşük, orta: 2873 Santigrat derece, alt: 3573 Santigrat derece).*

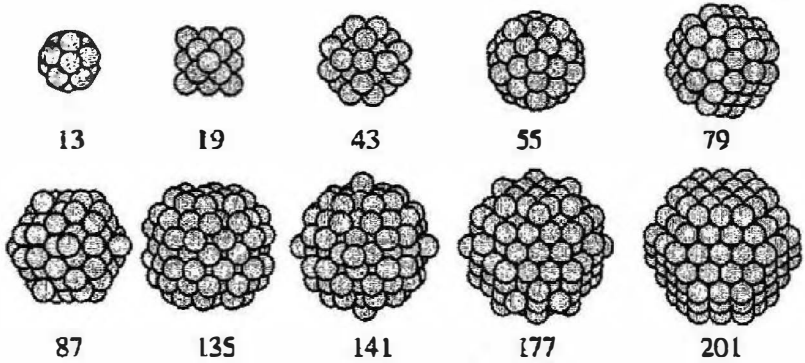
*Sıcaklık arttıkça yapı bozuluyor.*



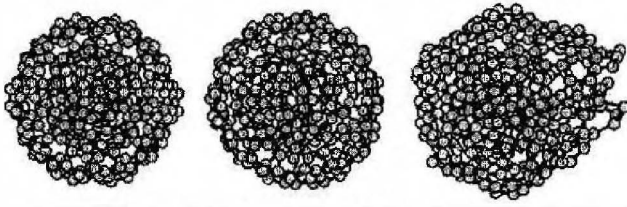
Çinko-kadmiyum topaklarının farklı sıcaklıklardaki yapıları  
(üst sıra: çok düşük; alt sıra: oda sıcaklığı).



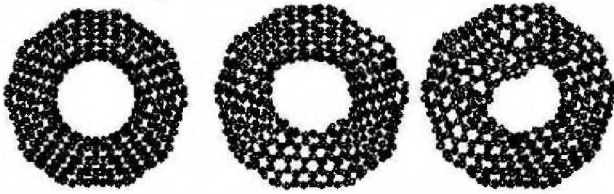
Benzoçubuk modeli ile benzoçubuklarla bağlanmış karbon-60 topları.



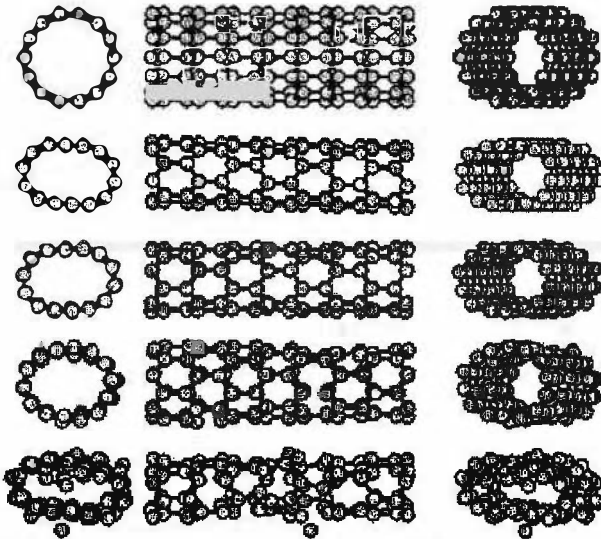
Farklı büyüklüklerde altın topakları  
(rakamlar atom sayılarını göstermektedir).



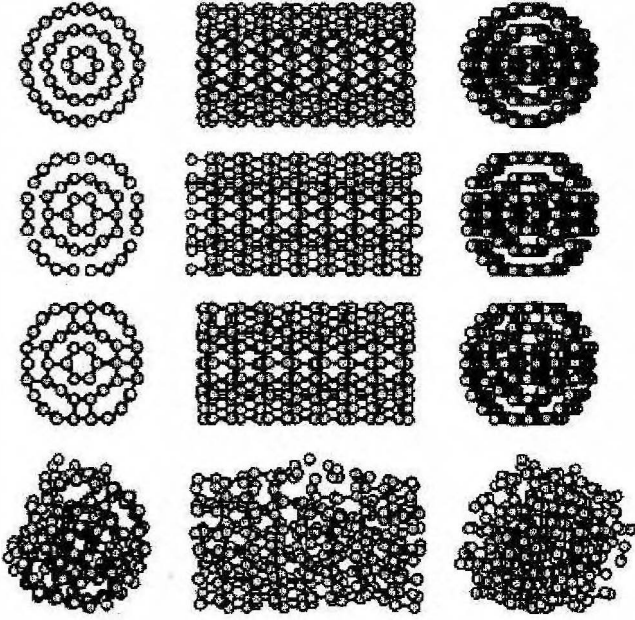
*İç-içe geçmiş karbon toplar. Karbon-240'ın içinde karbon-60 var, karbon-60'ın içinde de karbon-20 var. Böyle yapılara soğan modeli deniyor (karbon nanosoğan yapısı). Soldaki çok düşük sıcaklıkta, ortadaki 2873 Santigrat derecede, sağdaki 2973 Santigrat derecede yapısı bozulmuş.*



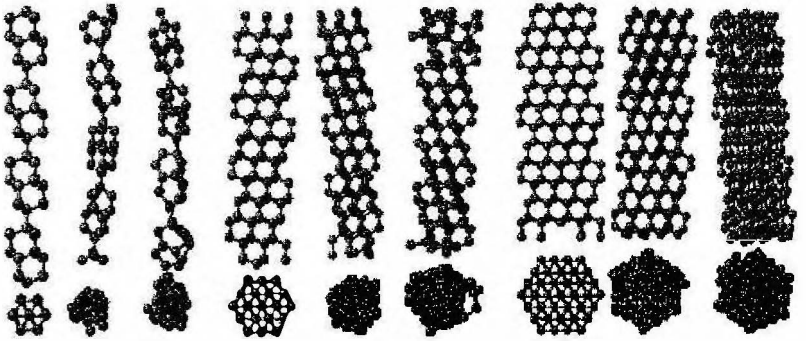
*Karbon nanotorus yapılar. Sıcaklık arttıkça iç-içe geçmiş toplarda olduğu gibi yapıda bozulmalar görülmektedir.*



*Tek duvarlı karbon nanotüp yapısının sıcaklık arttıkça nasıl değiştiği görülmektedir.*



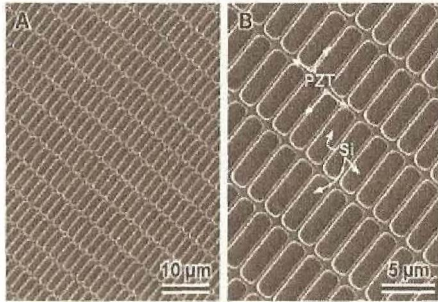
*İç içe geçmiş (çok duvarlı) karbon nanotüp yapısının sıcaklık arttıkça nasıl değiştiği görülmektedir.*



*Elmas yapıdan türetilmiş farklı kesitteki karbon nanoçubuk yapılarının sıcaklık arttıkça nasıl değiştiği görülmektedir.*

## Algılayıcı Uygulamaları İçin Ferroelektrik İnce Filmlerin Mikronaltı Boyutlarda Üretimi

Ferroelektrik seramik ince filmler son zamanlarda gerek elektronik sanayiinde hafıza uygulamaları açısından, gerekse algılayıcı uygulamaları (biyoalgılayıcı ve kimyasal algılayıcılar gibi) açısından yoğun ilgi görmekte. Ferroelektrik malzeme olarak da kurşun zirkonat titanat (PZT) kullanılmaktadır. Sözkonusu ince filmler mikrokalıplama yöntemi ile üretilmektedir. Bu yöntemle üretilen seramik yapılara örnek şekilde gösterilmiştir.



*Mikrokalıplama tekniği kullanılarak silisyum alılık üzerinde oluşturulmuş ağ şeklinde kurşun zirkonat titanattan (PZT) üretilmiş ferroelektrik seramik ince film.*

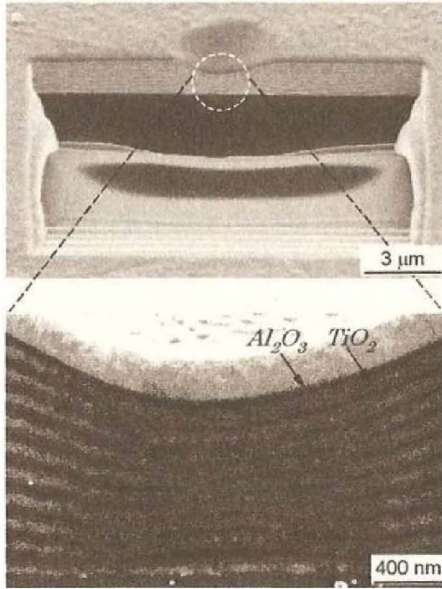
Ferroelektrik seramik ince filmlerin ilginç bir özelliği vardır: Bu malzemeler bir elektrik alan içine konduğu zaman tersine çevrilebilir, kendiliğinden oluşan bir polarizasyona sahip olur. Ferroelektrik etki olarak tanımlanan bu özellik kristal malzemelere dışarıdan elektrik alan uygulandığında bu malzemelerde kendiliğinden bir polarizasyon oluşumuna neden olur ve dış elektrik alan kaldırıldığında bu polarizasyon malzeme

içinde kalır. Ters elektrik alan uygulandığında malzemede ki polarizasyon ters yöne çevrilir. Ferroelektrik malzemelerde kaydedilen bilgiler elektrik alan kesilse ve radyasyona maruz kalsa bile malzemede saklandığından, bu malzemeler hafıza uygulamaları için idealdir. Bu malzemeler ayrıca kapasitör, piezoelektrik malzeme, piroelektrik dedektör, elektro optik malzeme, termistör ve dielektrik malzeme olarak da çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadırlar. Son zamanlarda bu malzemelerin mikroelettronik-mekanik (MEMS) ve nanoelettronik-mekanik (NEMS) sistemlerde de uygulama alanları bulması sebebiyle ferroelektrik seramik ince filmlerin mikrokalıplama tekniği kullanılarak mikronaltı boyutlarda üretimi önem kazanmaktadır.

### **Nano Yapılı Çok Katmanlı Hibrid Yüzey Kompozitlerin Üretimi**

Elektronik paketleme, şarj edilebilir piller ve akıllı kaplamalar başta olmak üzere, günümüz ileri teknolojilerindeki hızlı gelişim ve buna bağlı olarak yükselen performans beklentileri, mekanik ve termal özellikleri eniyileştirilmiş yüzey malzemelerine olan ilgiyi arttırmaktadır. Bu bakımdan, çeşitli seramik katmanlardan ya da değişimli polimer ve seramik katmanlardan oluşan hibrid yüzey kompozitlerin, iç yapılarını nano boyutta kontrol etmek suretiyle sıradışı mekanik özellikler gösterecekleri öngörülmektedir. Bu yüzey kompozitlerinin üretiminde kullanılan fiziksel buhar çökeltme yöntemleri nano boyutta iç yapı ve yüzey yapısının kontrolüne izin vermektedir. Etkin iç yapı tasarımı ve ara yüzey mühendisliği ile oluşturulan

bu nano yapılı kompozitlerde, yapı içindeki kritik çatlak boyutunun nano düzeyde sınırlanması ile mukavemetin korunması ve ilerleyen çatlakların farklı katman ara yüzeylerinde durdurulmasıyla, kırılma tokluk arttırımı mümkün olmaktadır. Üretilen titanyum dioksit ( $\text{TiO}_2$ ) ve alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) seramik katmanlarından oluşan nano yapılı yüzey kompozitlerinin küresel kontak gölgesinin kesitinin taramalı elektron mikroskop fotoğrafı aşağıda gösterilmiştir.



*Titanyum dioksit ( $\text{TiO}_2$ ) ve alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) seramik katmanlarından oluşan nano yapılı yüzey kompozitlerinin küresel kontak gölgesinin kesitinin taramalı elektron mikroskop fotoğrafı.*

***Prof. Dr. Şakir ERKOÇ***

1948 Konya doğumludur. Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nin Fizik Bölümünden 1972 yılında lisans, Kimya Bölümünden ise 1974 yılında yüksek lisans, 1977 yılında ise doktora derecelerini almıştır. 1980 yılından beri aynı üniversitenin Fizik Bölümünde çalışmalarını sürdürmekte olan Prof. Dr. Şakir Erkoç'un araştırma alanları atom ve molekül fiziği, yoğun madde fiziği ve nanobilim konularıdır. Çeşitli dergilerde 200'den fazla makalesi yayınlanmıştır.

Maddenin atom boyutunda kontrolü ile kuantum özelliklerinin gündelik hayatta işlevsellik kazanmaya başlaması sürecine şimdilik nanobilim ve nanoteknoloji denmekte. Uzay çalışmalarından tıp bilimine kadar bütün teknolojiler bu gelişmelerden etkilenmekte ve hiç düşünülmeyen yeni uygulama alanları ortaya çıkmakta.

Bu kitabı okuduktan sonra nanobilimin ve nanoteknolojinin ne olduğu, ne işe yaradığı hakkında fikir sahibi olacaksınız. Belki de konu çok ilginizi çekecek ve üzerinde çalışmayı düşüneceksiniz çünkü parçaları atomlardan, moleküllerden oluşan bir lego ile kim oynamak istemez ki ?

