

ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ  
BİTİRME TEZİ

NANOTÜPLER

MELEK BİLGE KOÇ  
96051272

DANIŞMAN: Prof. Dr. AYHAN ELMALI

2003

## TEŞEKKÜR

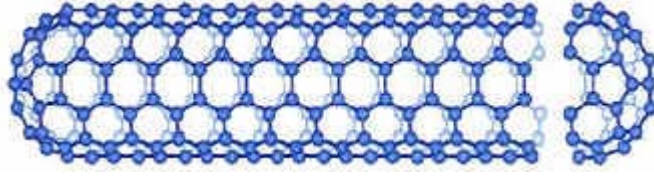
Yardımcılığından, yol göstericiliğinden, yorulmadan anlatmasından ve en çok da güler yüzlülüğünden dolayı danışman hocam sayın Prof. Dr. Ayhan Elmalı' ya çok teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ .....	1
2. NANOTÜPLERİN TARİHÇESİ .....	2
3. NANOTÜPLERİN ELDE EDİLMESİ .....	4
3.1. Ark-Buharlaştırma Tekniği .....	5
3.2. Ark-Buharlaştırılması İle Üretilen Nanotüplerin Kalitesi .....	7
3.3. Güvenlik Önlemleri .....	7
3.4. Nanotüplerin İşlenmesi .....	9
4. NANOTÜPLERİN YAPISAL VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ .....	12
4.1. Yapısal Özellikler .....	12
4.2. Elektriksel Özellikler .....	15
4.3. Mekaniksel Özellikler .....	18
5. TEKNOLOJİDEKİ POTANSİYEL KULLANIM ALANLARI .....	23
6. SONUÇ .....	25
7. KAYNAKLAR .....	26

# 1. GİRİŞ

Teknolojide yaşanan hızlı gelişmeler, nano teknolojinin doğmasına yol açtı ve çağımızın en öncelikli konularından biri oldu. Nanoparçacıklar, ince filmler ve nanotüpler olarak elde edilen malzemeler, gösterdikleri çok ilginç fiziksel özellikler ve boyutların çok küçülmesi nedeniyle teknolojide çok büyük bir kullanım alanı sunmaktadırlar. Nano teknolojinin en önemli konularından biri karbon nanotüpleridir.



Karbon nanotüpler önemli elektronik ve mekanik özelliklere sahip nano yapılarıdır. Nanotüpler ilk olarak tek boyutlu kuantum teller için prototip olarak düşünüldüğünden çok büyük bir ilgi çekti. Diğer kullanışlı özelliklerin keşfedilmesiyle ; özellikle dayanıklılığı, potansiyel kullanım alanlarını çoğalttı. Örneğin, karbon nanotüpler nanometrik boyutlardaki elektronik devrelerde ya da kuvvetlendirilmiş polimer malzemelerde kullanılabilir.

İdeal bir nanotüp düzgün silindir yapmak için yuvarlatılmış hegzagonal karbon atom ağı olarak düşünülebilir. Nanometrik aralıkta silindir, mikronun onda biri uzunluğunda olabilir ve her uç fulleren molekülün yarısı ile kapanır. Tek-katmanlı nanotüpler temel silindirik yapı gibi düşünülebilir ve bu da çok-katmanlı nanotüplerin yapı taşlarını oluşturur. Birçok teorik çalışma ile tek-katmanlı nanotüplerin özellikleri tahmin edilmeye çalışılmaktadır. Nanometrik boyutlardaki ilk karbon teli , 1970'lerde Fransa da Orleans Üniversitesinde doktora tez çalışmasının bir bölümü olarak , Morinobu Endo tarafından hazırlanmıştır.

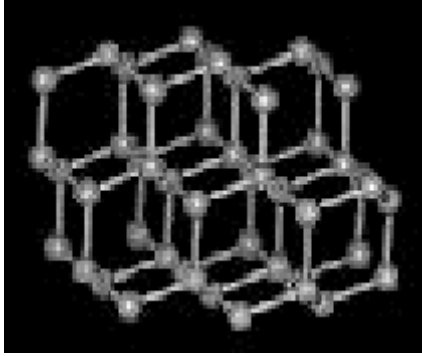
Buhar-Geliştirme tekniğiyle karbon fiberlerin çapı 7nm civarında geliştirilmiştir. Ancak önce bu tellerin nanotüp olduğunun farkına varılmamış ve sistemli bir şekilde çalışılmamıştır. 1991 yılında, Tsukuba Labaratuarından Sumi Iijima, yüksek çözünürlü "Geçirmeli Elektron Mikroskopunu" (TEM) kullanarak karbon nanotüpleri gözlemleyince, nanotüpler konusundaki araştırmalar yoğun bir şekilde başlamıştır.

Moskovadaki Kimyasal Fizik Enstütüsündeki araştırmacılar, bağımsız olarak aynı anda karbon nanotüpleri ve nanotüp demetlerini keşfettiler, fakat genel olarak bunların çap uzunluğu oranları oldukça küçüktü. Sussex Üniversitesinden Harold Kroto (İngiltere) ve Rice Üniversitesinden Richard Smalley ve çalışma arkadaşlarının (Amerika) fullerenleri keşfiyle, araştırmacılar daha yoğun bir şekilde karbon malzemeleri araştırmaya başlamışlardır. Bunun yanısıra lijima'nın ilk gözlemleri çok katmanlı nanotüplerdi. Tek katmanlı nanotüpleri gözlemlemesi, IBM araştırmadan (Kaliforniya) Donald Bethune ve meslektaşları tarafından ancak iki yıl sonra başarılabilirdi. 1996'da Smalley başkanlığında Rice Grubu sıraya konulmuş tek katmanlı karbon nanotüp demetlerini ilk kez sentezlediler. Demetler küçük bir aralıkta değişik çaplı birçok nanotüp içermektedir.

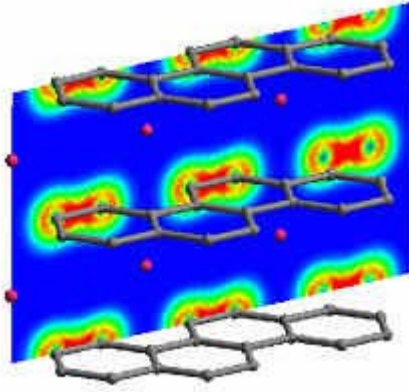
Birçok araştırma grubu tarafından, nanotüplerin özelliklerini belirlemek için deneysel ve teorik çalışmalar yoğun bir şekilde sürmektedir. Bu çalışmada, nanotüplerin elde edilmesi, fiziksel özellikleri ve potansiyel kullanım alanları kısaca anlatılmıştır.

## **2. NANOTÜPLERİN TARİHÇESİ**

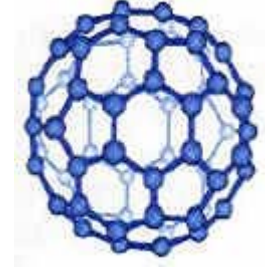
Karbon nanotüpler, silindirlerden oluşan fulleren tipi yapılardır. Karbon nanotüplerin bilimsel macerası 1985'te 60 ya da daha fazla karbon atomunun birleştirilmesiyle oluşan futbol topu şeklindeki moleküllerin keşfiyle başlamıştır. Bu topların diğer atom veya moleküllerle yaptığı bileşiklere "fulleren" denir. Bu keşiften sonra birçok laboratuvar sıcak karbon buharını yoğunlaştırarak futbol topu şeklindeki molekülleri elde etmeye çalışmış; bu elde etme işleminden küçük değişiklerle çeşitli şekil ve boyutlarda küreye benzer yapılar elde edilmiştir. İlk tüp şeklindeki molekülleri 1991'de elektron mikroskobu uzmanı Sumia lijima fullerenlerin ark-buharlaşması sentezi sırasında katodda biriken malzemeyi araştırma sırasında bulunmuştur. Kısa bir süre sonra Thomas Ebbeson ve Pulickel Ajayan (lijima'nın laboratuvarından) çeşitli ark-buharlaşması koşulları altında büyük miktarlarda nanotüp üretilebileceğini göstermiştir. Ama standart ark-buharlaşması metoduyla ancak çok katmanlı tüpler üretilebilmiştir. Sonraki araştırmalar sonucunda, grafit elektroduna kobalt gibi bazı metallerin eklenmesi sonucunda tek katmanlı mükemmel tüpler elde edilmiştir.



ELMAS YAPI



GRAFİT YAPI



C<sub>60</sub> YAPI

1993'de tek katmanlı nanotüplerin elde edilmesi, karbon nanotüplerin gelişmesinde büyük bir aşama olmuştur. 1996'da Rice Üniversitesi Araştırma Grubunun tek katmanlı nanotüp grupları oluşturmada daha etkin bir yöntem bulmasıyla, çok sayıda karbon nanotüp deneylerinin önü açılmış oldu. Arzu edilen nanotüpler 1200 °C fırında karbonun lazer-buharlaştırılmasıyla elde edildi. Daha sonra Montpellier Üniversitesinden Catherine Journet, Patrick Bernier ve çalışma arkadaşlarının karbon ark-buharlaştırma metoduyla iyonlaşmış karbon plazmasından tek katmanlı nanotüp elde etmişlerdir. Çok katmanlı karbon nanotüplerin büyütülmesi için katalizör gerekmezken, tek katmanlı karbon nanotüpler ancak katalizör ile büyütülebilir.

Karbon nanotüpler tesadüfen keşfedilmiş olmasına rağmen dünyanın dört bir yanında yoğun bir şekilde karbon nanotüplerin özelliklerinin araştırılmasına yol açtı. Gerçekten de araştırmacılar karbon nanotüplerin nano ölçekte birçok fiziksel, kimyasal, yapısal, elektriksel ve optik özelliklerinin olduğunu buldular.

### 3. NANOTÜPLERİN ELDE EDİLMESİ

1996'da Rice Üniversitesindeki grubun daha verimli bir şekilde düzenli tek katmanlı nanotüp gruplarını üretmesiyle, karbon nanotüpler üzerine büyük miktarda deneyler yapılmasının önünü açtı. İstenilen nanotüpler 1200 °C bir fırında karbonun lazer buharlaştırılması sonucu elde edilir. Kobalt-nikel katalizörü, nanotüplerin oluşumunda kullanılır. Çünkü oluşum sırasında nanotüplerin sonlarının kapaklanmasını önler ve böylelikle %70-90 oranında karbon hedefleri tek katmanlı nanotüplere dönüştürülür. 2 adet 50 ns aralıklı atmalı lazer kullanılarak, aynı sürede daha yüksek miktarlarda nanotüp üretilebilir. Bu yöntem, daha homojen buharlaşma ve oluşum koşullarının daha iyi kontrolünü sağlar. Argon gazı, nanotüpleri fırından su ile soğutmalı bakır toplayıcıya toplar.

Fransa Montpellier Üniversitesinden Catherine Journet, Patrick Bernier ve meslektaşları, özdeş, dirençli, tek katmanlı nanotüp oluşturabilecek karbon-ark metodunu geliştirdiler. Ayrıca, iyonize karbon plazmadan ve yüksüz plazmadan Joule ısınmasıyla düzenli nanotüpler üretilmiştir. Diğer birçok araştırma grubu, günümüzde bu iki yöntemden türetilmiş yöntemlerle tek katmanlı nanotüpler üretmektedir. Yine de bu alanda en büyük etkiyi Rice Üniversitesi grubu yapmıştır. Çünkü ilk verimli üretim metodunu geliştiren ve tek katmanlı nanotüplerin özelliklerini incelemek üzere uluslar arası işbirliği yapan onlar olmuşlardır.

“Taramalı Elektron Mikroskopunda” (SEM), üretilen nanotüpler hangi yöntemle üretilmiş olursa olsun karbon iplerden oluşmuş bir yaygı gibi görünür. Bu ipler 10-20 nm eninde ve 100 nm boyundadır. (TEM) ile incelendiğinde bu iplerin tek yönde sıralanmış tek katlı karbon nanotüp demetleri olduğu görüldü. Aynı anda birçok ipi görüntüleyebilen X-ışını difraktometresiyle, yapılan ölçümlerde tek katmanlı nanotüplerin çaplarının sivri uçlu, dar dağılımlı olduğunu gösterir. Rice ve Montpellier grupları tarafından kullanılan oluşum koşullarında, çap dağılımı, ideal nanometri çapına (10,10) yakın olarak, “1,38+0,02”, “1,38-0,02” nm.de yoğunlaşmıştır. Joe Fisher ve arkadaşlarının Pennsylvania Üniversitesinde X-ışını difraktometresiyle yapılan ölçümlerde tek katmanlı nanotüp demetlerinin iki boyutlu üçgensel örgü oluşturduğu görülmüştür. Örgü sabiti 1,7 nm ve tüpler arası en yakın uzaklık 0,315

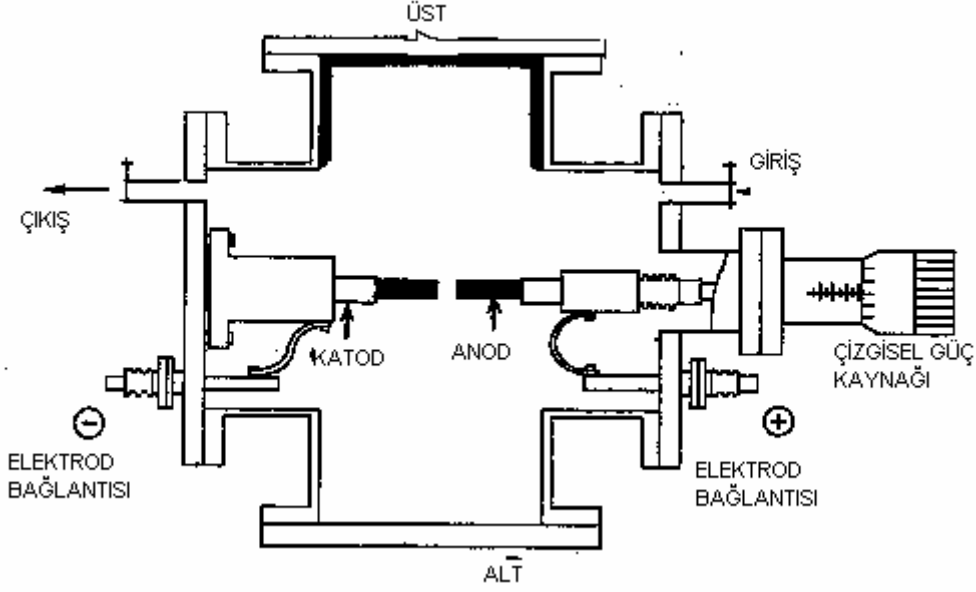
nm olarak ölçülmüştür. Bu da Belçika'daki Louvain-La-Neuve Unv.de daha önce yapılan teorik modellemeye uygun düşmektedir.

Çok katmanlı nanotüpleri büyütmek için katalizör gerekmezken, tek katmanlı nanotüpler ancak katalizör ile büyütülebilir. Büyüme ile ilgili mekanizmalar hala çok iyi anlaşılabilmiş değiller. Deneyler, çap dağılımının eni ve tepe noktasının, katalizörün kompozisyonuna, oluşum sıcaklığına ve diğer oluşum koşullarına bağlı olduğunu göstermiştir. Daha dar çap dağılımları ve daha kontrollü oluşum koşulları sağlayabilmek için halen büyük çabalar harcanmaktadır. Uygulama açısından bakacak olursak, önemli olan düşük maliyetli yüksek kazançlı nanotüp üretmek ve ticari ölçekte üretilebilecek sürekli bir sistemdir.

### **3.1 Ark-Buharlaştırma Tekniği**

lijima tarafından nanotüp elde etmek için kullanılan yöntemde, Kratschmer-Huffman tarafından  $C_{60}$  üretmek için kullanılan yöntemden biraz farklı olarak; grafit elektrodları arklama sırasında kontak halinde değil, birbirinden biraz ayrı tutuluyor. Bu koşullar altında, anodtan buharlaşan karbonun bir kısmı, katotta silindirik bir şekilde tekrar yoğunlaşıyor. Ijima bu silindirik tortunun tam merkezinde hem nanotüp hem de nanoparçacıklar olduğunu buldu. Ancak ilk deneylerde verim oldukça düşük olduğu için, bu alanda ilerleme de oldukça yavaş sağlandı. Daha sonra Ebbesen ve Ajayam tarafından geliştirilen yöntemdeki yenilikler ark-buharlaştırma ile elde edilen verimin çok daha fazla yükselmesini sağladı. Aşağıda Ebbesen tarafından geliştirilen nanotüp sentezi hakkında bilgi verilmektedir.





Nanotüp sentezi için, birçok değişik ark-buharlaştırma reaktörü kullanılmış, ancak görüntüleme bölümü olan paslanmaz çelik vakum odası en iyisi olmuştur. Kratschmer-Hoffman deneylerinde kullanılan cam kubbe oda ideal değildir. Çünkü buharlaşma sırasında çubukların ayrılmasına kolayca izin vermez. Oda hem bir difüzyon pompalı bir vakum hattına, hem de bir helyum kaynağına bağlı olmalıdır. Genelde durgun bir gaz basıncı yerine, istenen basınçta sürekli helyum akışı tercih edilir. Elektrodlar yüksek saflıkta iki grafit çubuktan oluşur. Çubukların saf olması gerektiğine dair bir bilgi olmasa da, saf grafit kullanılır. Anod 6 mm çapında, uzun, katod ise çok daha kısa, 9 mm çapındadır. Katodun su ile soğutulmasının etkin yapılması, iyi kalite nanotüp yapabilmek için gereklidir, ayrıca anodta soğutulur. Anodun konumu oda dışından ayarlanabilir olmalıdır, böylelikle ark-buharlaştırma sırasında sabit uzaklık korunabilir. Genelde gerilimi sabitlenmiş bir DC güç kaynağı kullanılır, boşaltma ise 20V bir voltaj olarak dışarı verilir. Akım, çubukların çapına, aralarındaki uzaklığa, gaz basıncına göre değişir ama genelde 50-100 A civarındadır. Gerilim, basınç sabitlenince verilmelidir. Deneyin başında akım geçmemesi için çubuklar birbirine değmemelidir. Hareket ettirilebilen anod, ark olayı gerçekleşinceye kadar katoda yaklaştırılır. Sabit bir ark elde edildiğinde, çubuklar arası uzaklık 1mm

ya da daha az tutulmalıdır. Çubuklar genelde dakikada birkaç mm'lik bir hızla erir. Çubuk eridiğinde güç kesilmeli ve oda açılmadan önce soğumaya bırakılmalıdır.

Yüksek kalitede nanotüp üretebilmek için bir dizi etken oldukça önemlidir. Belki de en önemlisi, Ebbessen ve Ajayan'ın 1992'deki çalışmalarında belirttikleri gibi, buharlaşma odasındaki helyum basıncıdır. Basınç arttırıldıkça, nanotüp sayısında da önemli bir artış olmaktadır. 500 Torr'un üstündeki basınçlarda ürün kalitesinde belli bir değişim olmamakla beraber, toplam verimde bir düşüş gözlenmektedir. Böylece 500 Torr'un nanotüp üretimi için en ideal helyum basıncı olduğu görülür. Ancak bu koşulların, 100 Torr altında basınç gerektiren C<sub>60</sub> üretimi için uygun olmadığı hatırlanmalıdır.

### **3.2 Ark-Buharlaştırılması ile Üretilen Nanotüplerin Kalitesi**

Ark-buharlaştırma sonucunda katodta oluşan tortunun şekli ve içeriği, kullanılan koşullara sıkı sıkıya bağlıdır. Optik mikroskop ve SEM kullanılarak, katod tortusu üzerine birçok çalışmalar yapılmış ve çeşitli sonuçlar elde edilmiştir. Yine de açıkça görülüyor ki, tortunun mikroskobik şekli soğutmanın yeterliliğine bağlıdır. Zayıf soğutma katman halinde tortuya sebep olur. Bu tip tortularda nanotüpler küçük cepler içinde rastgele yerleşmiş olarak bulunur. Öte yandan elektrodların iyi soğutulması daha silindirik ve homojen tortu oluşmasına sebep olur. Bu tip tortularda erimiş malzemedan bir dış kabuk ve içte daha yumuşak lifli, içinde nanotüpler ve nanoparçacıklar bulunan göbek bulunur. Bunlar dış kabuğu kesip açarak dışarı çıkarılabilir. Nanotüplerin kalitesini anlamak için karbona basit fiziksel bir test yapmak yeterlidir. Birkaç nanotüpten oluşan yetersiz bir örnek, genelde toz şeklinde bir doku olur, iyi malzemedan ise yaprağa benzer, gri, metalik, cilalı bir şekilde oluşur. Göbekteki lifli malzemenin SEM ile incelenmesi sonucu, nanotüp demetlerinin düzenlenmiş mikrolifler içerdiği gözlenmiştir.

### **3.3 Güvenlik Önlemleri**

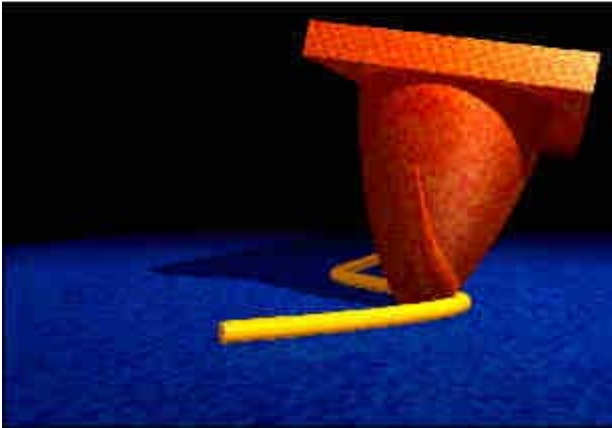
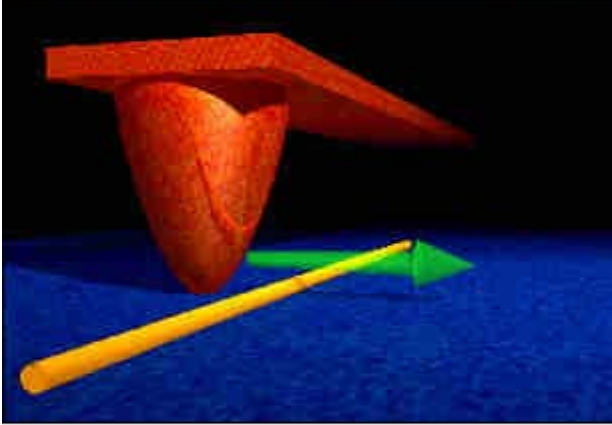
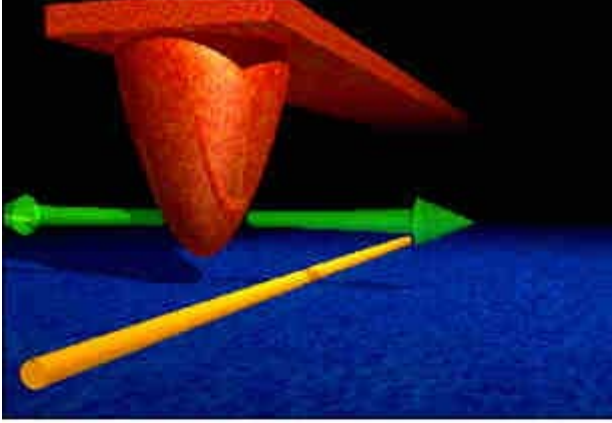
Karbon nanotüplerin sağlığa zararları üzerine görüşler farklılaşmıştır. Bazı çalışanlarca nanotüpler ve asbest lifleri arasında fiziksel benzerlik olduğu ileri sürülmüştür. İkisinin de çapları 10 nm civarında ve birkaç µm uzunluğundadır.

1960'lardan beri asbestin akciğer kanserine ve göğüs kafesi kanserine sebep olduğu bilinmektedir. Fakat, silikat liflerin zarar verme mekanizmasında, en azından akciğer kanseri vakasında reaktif oksijen bileşiklerin katalik oluşumunun da etkili olduğuna inanılıyor. Nanotüplerin de aynı etkiyi yapabileceği ihtimali gözüküyor. Yine de, elimizde fulleren bağlantılı karbonların zehirliliği hakkında kesin bir bilgi olmamasından dolayı, bu malzemeleri hazırlarken tedbirli davranmak gerekmektedir.

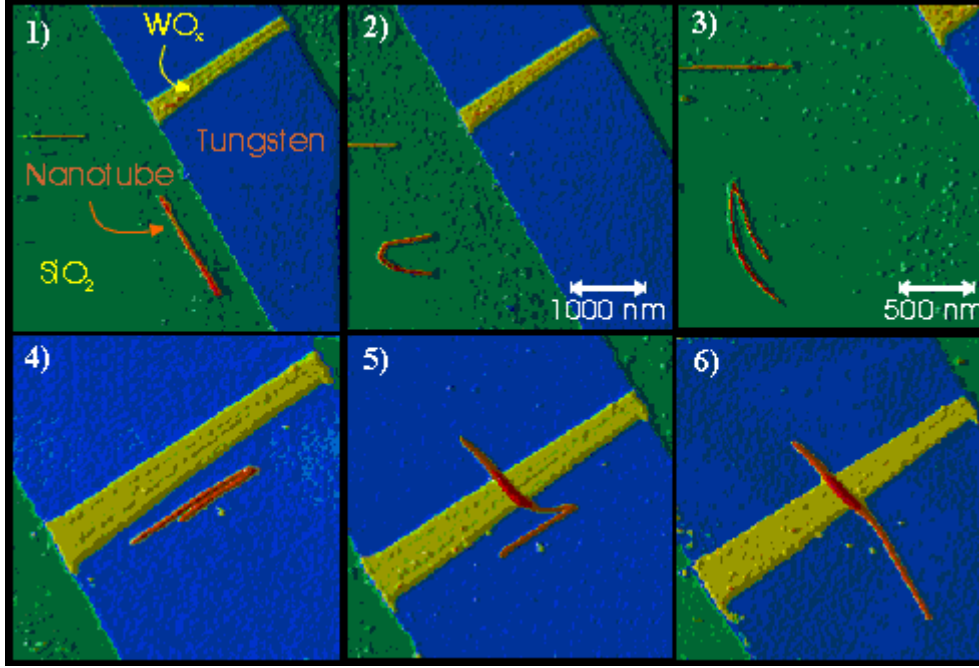
Ark-buharlaştırma metodunda dikkat edilmesi gereken bir başka konu da oluşan malzeme (kurum) çok hafif olmasından dolayı çok kolay havada asılı kalabilmesidir. Bu nedenle ark-buharlaştırma cihazının tamamının bir koruma kabının içinde bulundurulması tavsiye edilir. Ayrıca oda açılırken maske takılmalı ve fulleren bağlantılı malzemelerle çalışırken eldiven giyilmesi gerekir. Bunların yanısıra başka önlemlerde alınmalı; ark-buharlaştırmasını gerçekleştirmeden önce makine kısa devreye karşı kontrol edilmeli ve gazı içeri vermeden önce vakumda sızıntı var mı kontrol edilmelidir. Ek olarak her odanın gözleme bölümü olduğundan, operatörü arkın yoğun ışığından korumak için yüksek yoğunluklu optik filtreli gözlük kullanılması gerekir.

### 3.4 Nanotüplerin İşlenmesi

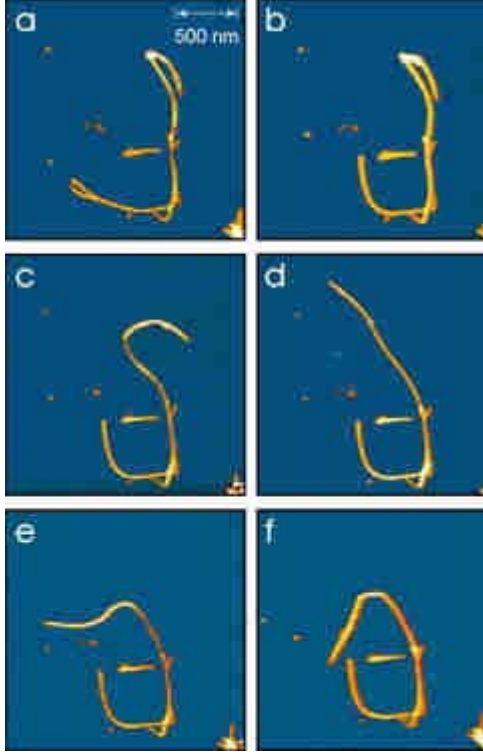
Nanotüplerden devre yapabilmek için, kontrollü bir şekilde nanotübün işlenebilmesi önemlidir. Nanotübün konumunu, şeklini ve yönelimini değiştirebilmek için atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanılır.



AFM ilk kez kontak yapmayan modelde, AFM ucunu tarayarak nanotüp görüntüsünü elde etmek için kullanıldı. Sonrasında AFM ucu zemine getirilerek, nanotüpü hareket ettirmek için kullanılır. Nanotüp ve zemin arasındaki güçlü Van der Waals etkileşmesinden dolayı doğal dik şekline dönmeyerek bırakıldığı gibi kalır, pozisyonunu korur. Aşağıda adım adım, içinden akımın geçebilmesi için nanotüpün izole edilmiş bariyer içine yerleştirilmesi görülüyor. (şemalar 1-2-3-4-5-6)



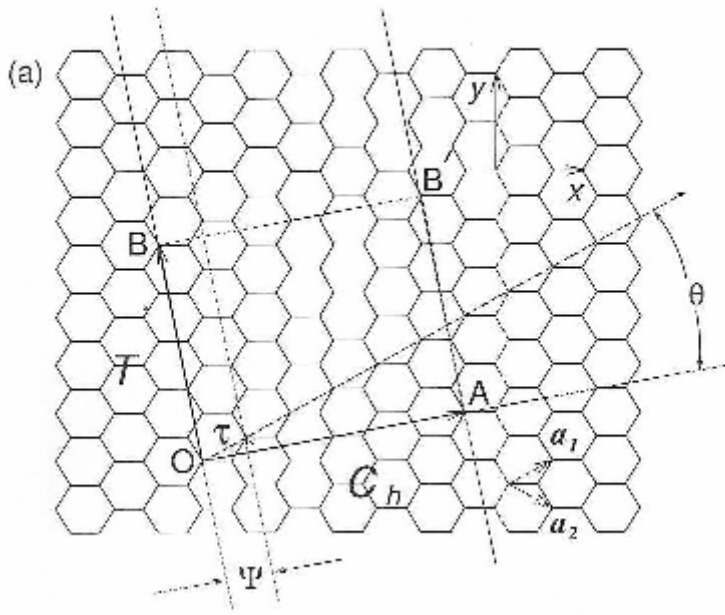
Aşağıda ki şekilde bir nanotüpün karmaşık şekiller oluşturmak üzere işlenebileceğini gösteren 6 adet, silikon üzerinde nanotüplerin AFM görüntüleri yer alıyor. AFM çubuğu ile 2,5 mikron boyunda "θ" oluşturulmuştur.



## 4. NANOTÜPLERİN YAPISAL ve FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

### 4.1 Yapısal Özellikler

Yüksek çözünürlü mikroskopi teknikleriyle karbon nanotüplerin yapısı araştırılmaktadır. Bu deneyler sonucunda nanotüplerin, kristal grafitlerden oluşan hegzagonal örgüdeki karbon atomlarının oluşturduğu silindirik yapılar olduğu anlaşılmıştır. 3 tip nanotüp olabilir: “armchair”, “zigzag” ve iki boyutlu grafit levhanın nasıl rulo yapıldığına bağlı olan “chiral”.



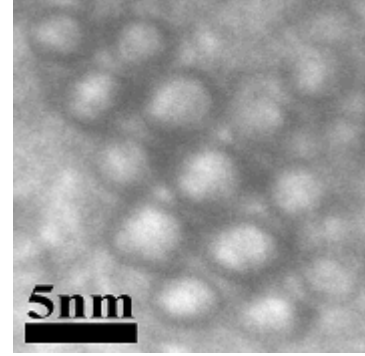
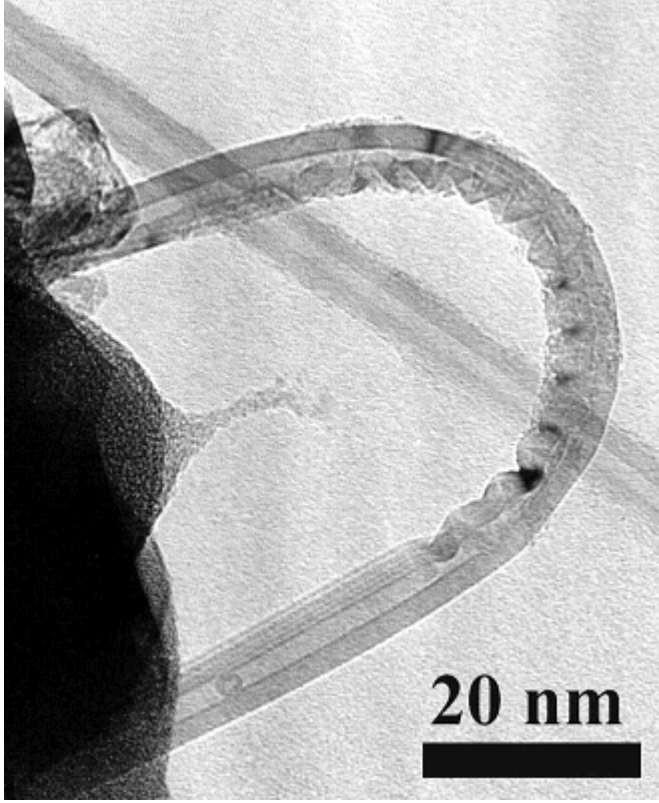
Değişik tip nanotüpler birim hücrelerine göre kolayca belirlenir, yani yapıyı belirleyen en küçük atom grubudur. Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi nanotübün giriş vektörü  $C_h$ ,  $\hat{a}_1$  ve  $\hat{a}_2$  hegzagonal örgüde birim vektörler olmak üzere (n ve m tamsayı)

$$C_h = n\hat{a}_1 + m\hat{a}_2$$

Başka bir önemli parametre ise kiriş açısıdır;  $\theta$  ile  $\theta_1$  arasındaki açı. Grafit levha nanotübün silindirik kısmını oluşturmak üzere rulo yapıldığında, kiriş vektörlerinin sonları çakışır. Böylelikle kiriş vektörü, nanotübün dairesel kesitinin çevresini oluşturur.  $m$  ve  $n$ 'in değişik değerleri farklı nanotüp yapılarına sebep olur. "armchair" nanotübü  $n=m$  ve kiriş açısı  $30^\circ$  olduğunda, "zigzag" ise  $n=0$  ya da  $m=0$  ve kiriş açısı  $0^\circ$  olduğunda oluşur. Kiriş açıları  $0^\circ$  ile  $30^\circ$  arasında değişen nanotüpler ise "chiral" nanotüp olarak adlandırılır. Nanotüplerin özelliklerini belirleyen çap  $d_t$ , kiriş vektörünün uzunluğunun  $\frac{1}{4}$ 'ü dür. Böylelikle,  $acc$  düzlemde en yakın karbon atomu ile uzaklık olmak üzere;  $d_t = (\sqrt{3}/\pi)acc(m^2+mn+n^2)^{1/2}$  ve kiriş açısında  $\tan^{-1}\sqrt{3n/(2m+n)}$  'dir.

Nanotüplerin çaplarının ve kiriş açılarının ölçümü tünelleme taramalı mikroskopu ve geçirmeli elektron mikroskopu ile yapılmaktadır. Yine de çapı ve  $\theta$  açısını ölçerken aynı anda örneğin direnç gibi fiziksel bir özelliğide ölçebilmek halen büyük bir zorluk teşkil etmektedir. Çünkü nanotüplerin boyutları çok küçük ve karbon atomları sürekli bir ısısal hareket halindedirler. Ayrıca mikroskoptan gönderilen elektron demeti nanotüplere zarar verebilirler. Her nanotüp birim hücresi 2'şer atom içeren altıgenlerden oluştuğuna göre, nanotüp birim hücresi birçok karbon atomu içerir. Nanotüp birim hücresi altıgenden  $N$  kere büyük ise, ters uzayda birim hücre altıgenden  $1/N$  oranında küçüktür.

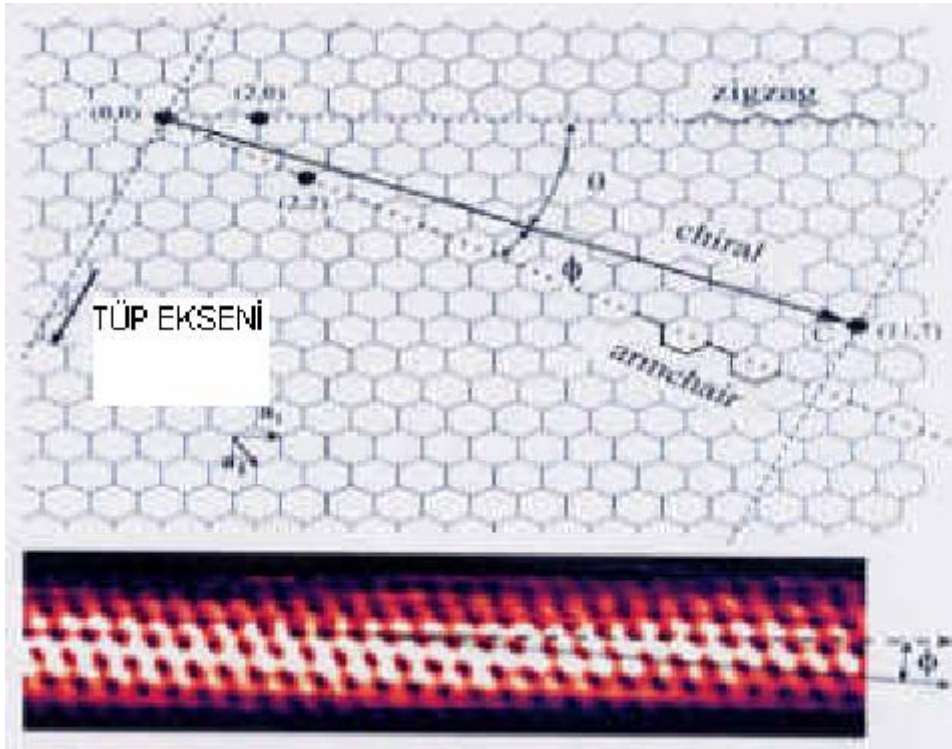




Taramalı tünelleme ve geçirmeli elektron mikroskobu ile elde edilen görüntüler.

## 4.2 Elektriksel Özellikler

Bir tek grafit levhası yarımetaldir. Bunun anlamı sahip olduğu özellikleri yarıiletken ile metal arasında ortadüzeyde olmasıdır. Grafit levha yuvarlanarak nanotüp oluşturulduğunda; daire çevresinde yalnızca karbon atomları sıralanmaz, aynı zamanda elektronların kuantum mekaniksel dalga fonksiyonları da uyumlu olarak düzenlenir. Radyal doğrultularda, elektronlar inceltilmiş tek katmanlı grafit düzlem tarafından sınırlanmıştır. Nanotübün daire çevresinde periyodik sınır şartları ortaya çıkmaktadır. Örneğin eğer bir nanotüp daire çevresinde 10 hekzagon bulunduyorsa, 11. hekzagonal 1. ile çakışmaktadır. Silindir etrafında  $2\pi$ 'lik faz farkı ile karşılaşılır.



Kuantum sınırlarından dolayı elektronlar sadece nanotüp eksenine boyunca etkili olmaktadır, böylece dalgavektörleri de bu doğrultuda işaretlenir. Bu basit düşünce tek

boyutlu bandın dağınım bağıntısını hesaplamakta kullanılır. Bu da çok iyi bilinen grafit levhası üzerinden, dalgavektörünü enerjiye bağlar. Noriaki Hamada ve meslektaşları, ve daha sonra NEC Labaratuarından (Tsukuba) küçük çaplı nanotüpler için dağınım bağıntısını hesaplamışlardır. Bu da gösteriyor ki küçük çaplı nanotüplerin 1/3'ü metalik, geri kalanı ise çaplarına ve kiriş açlarına bağlı olarak yarıiletkenidir. Genel olarak (n,m) bir karbon nanotüp  $n-m=3q$  (q tam sayı) olmak şartıyla metaliktir. Bütün "armchair" nanotüpler metaliktir, "zigzag" nanotüplerin 1/3'ü de metaliktir. Bu alanda Dr. Alex Zettle ve onun araştırma grubu (Berkeley Üniversitesi, California) gösterdiler ki; birbirine küçük farklarla benzemeyen iki nanotüp molekülü uç uca birleşirse, birleşme noktası diyod adı verilen bir elektrik devresi gibi işlev görür. Diyodlar devrelerde genellikle alternatif akımı, doğru akıma çevirmekte kullanılır ve doğrultucuların temelini oluşturur.

Bir başka heyecan verici araştırma da transistörlerle ilgilidir. Transistörler tamamlanmış devrelerin temel yapı bloklarıdır. Gelecekte nanotüplerin devrelerde kullanılmasıyla, bunlarla transistörlerin yapılıyor olması kaçınılmaz olacaktır. Bağımsız çok-katmanlı ve tek-katmanlı nanotüpler kullanılarak başarıyla üretilmiş ve test edilmiş nanotüp transistörleri, "Alan Etkili Transistör Kanalları" (AET) gibidir. AET oda ısısından 4 °K 'e soğuttuğumuzda, devrenin davranışlarındaki değişimi görülebilir. Devre oda ısısında alan etkili transistör gibi hareket ederken, 4°K'de davranışları "Tek Elektronlu Transistör" (SET) gibidir.

Elektriksel özelliklerin nanotüpün çapına ve kirişine son derece bağlı olduğunu daha önce vurgulamıştık. Bundan dolayı teorik tahminlerin doğruluğunu test etmek için yapılan deneyler güçlükle gerçekleştirilmiştir. Yapılar üstünde elektronik ve optik nano ölçekte ölçümler yapmanın zorluklarının yanı sıra, nanotübün simetrisi ile ilgili bilgilerin (n ve m değerleri) tahminini yapmakta oldukça önemlidir. Bu zorluklara rağmen deneysel çalışmaların öncülüğünde, nanotüplerin elektriksel özellikleri hakkında temel teorik tahminler doğrulanmıştır. Yüksek kaliteli tek-katmanlı nanotüplerin yeterli miktarlarda elde edilebilmesinden önce deneyler çok-katmanlı nanotüpler üzerinde odaklanmıştı. Bunun yanında başlarda bağımsız çok-katmanlı nanotüpler üzerinde yapılan ölçümlerde, tek boyutlu kuantum etkisi ölçülemedi. Çünkü nanotübün çapı çok geniş kalmış ya da çalışmalar yeterli düşük sıcaklıklarda yapılmamıştı. Fakat çok-katmanlı nanotüplerden alınan sonuçlar, farklı çap ve kirişlerdeki yoğunlaşmış nanotüplerden alınan eşzamanlı bilgiler ile

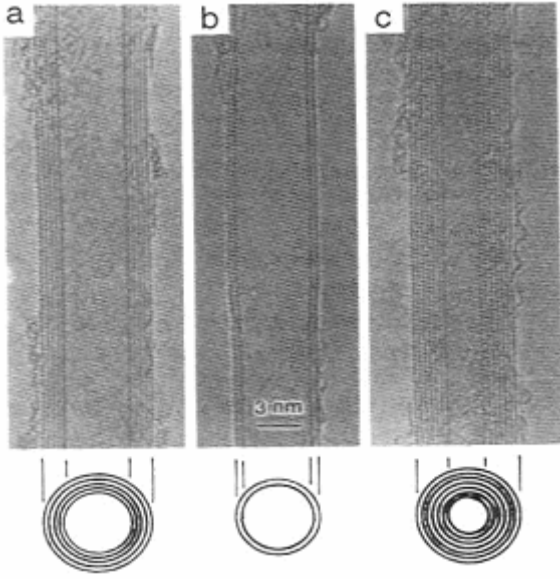
tamamlanmaktadır. Ek olarak, nanotüpteki kusurlar elektron seyrekliğine yol açabilir ve nanotübün tüm ögelerinde elektrik iletimi güvenilir olmayabilir. Elektriksel kontakların iletim özellikleri elektron iletimini etkileyebilir. Ayrıca bu ilgi çekici iletim olayı, tek boyutta kuantum etkisinin görülebildiği düşük sıcaklıklarda ve küçük çaplı çok-katmanlı nanotüpler üzerinde yapılmalıdır. General Motors Araştırma Laboratuvarından Charles Oik ve Joseph Heremans'ın (Michigan) taramalı tünelleme mikroskopuyla (STM), bağımsız çok katmanlı nanotüplerin özelliklerini 1994'te ölçmesiyle, çok önemli bir aşama kaydedildi. Bu sonuçlar ilk defa bazı nanotüplerin metalik, bazılarının yarıiletken olduğunu gösterdi. Ayrıca Oik ve Heremans yarıiletken nanotüplerin band aralığının teorik sonuçlarla uyumlu olarak  $1/d$  ile orantılı olduğunu gösterdiler. Bunun yanısıra, STM örneklerinin nispeten kısa uzaysal diziliş olduğundan, bu tür teknikler çok-katmanlı nanotüplerin dış kabukları için çok hassastır.

Tek-katmanlı nanotüpe bir elektron eklemek için gerekli enerjide ölçülmüştür. 3  $\mu\text{m}$  uzunluğunda ve 1nm çapında nanotüplerde elektronlar arasındaki coulomb itmesini yenebilmek için 2.6 meV'lik enerjiye ihtiyaç vardır. Araştırmacılar artık karbon nanotüp içinde düzenli olarak gerçekleşen "coulomb-durdurması" üzerinde çalışıyorlar.

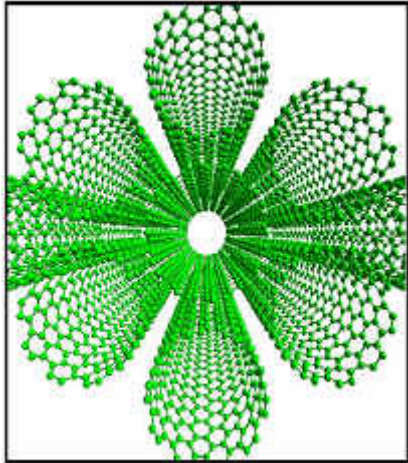
### 4.3 Mekaniksel Özellikler

Başka bir heyecan verici araştırma alanı ise karbon nanotüplerin mekaniksel özellikleridir. Grafit ve karbon fiberlerine benzer olarak, nanotüplerin çok sağlam ve yüksek elastikiyet modülüne sahip olmaları beklenmektedir. Ayrıca tek-katmanlı karbon nanotüplerin, tıpkı uzay teknolojisi uygulamalarında kullanılan karbon fiberi gibi, çok sağlam ve esneme altında kırılmama dayanıklılığına sahip olması beklenmektedir. North Caroline Üniversitesinden Jerzy Bernhole ve meslektaşlarının hesaplarına göre bir nanotüp kırılmadan yüksek oranda uzayabiliyor. Karbon fiberlerinin aksine, tek katmanlı nanotüpler dikkate değer oranda esnektir. Burkulabilir, düzleştirilebilir, küçük daireler şeklinde kıvrılabilir. Ya da başka çeşitli esnetmeler sonucunda kırılmadan kalabilir. Dahası Bernhole ve meslektaşları, nanotüp üzerindeki etki çekildiği zaman eski orijinal şeklini aldığını gözlemlemişlerdir. Baskı altında kolayca kırılan karbon fiberlerinin aksine, karbon nanotüpler etki uygulandığında elastikiyeti sağlayan tek benzer yapıyı oluştururlar.

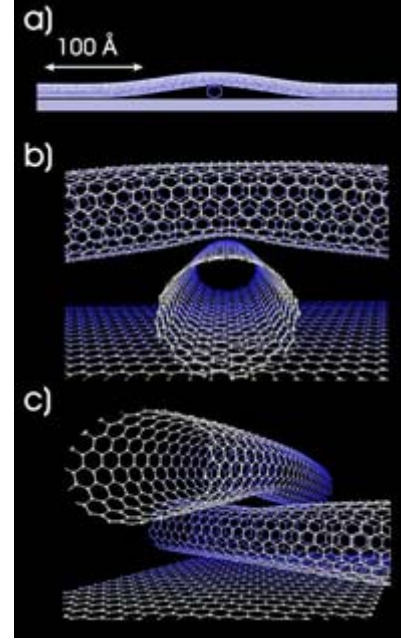
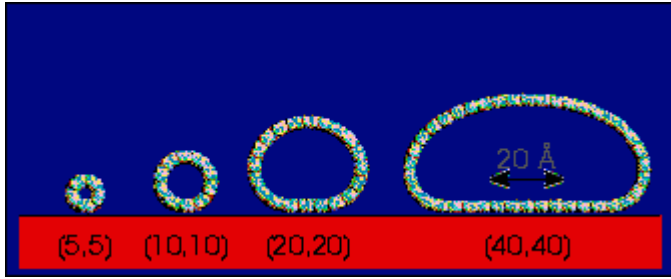
Sonuç olarak nanotüpler sadece karbon fiberlerinin avantajlarına sahip olmayıp, aynı zamanda çok daha esnek ve basınç altında kırılmaya dayanıklıdır. Bu özellikler tek başlarına ya da diğer özellikleriyle birleştirilerek kullanılabilir. Örneğin; Hyperion Catalysis International Company bu moleküllerden az miktarda plastiğe katarak, plastiği elektriksel olarak iletken hale getiriyor. İletken plastikler otomotiv sektöründe elektriksel olarak yüklü boya imal etmek üzere kullanılıyor. Bu elektrostatik boya, spreyci boya yöntemine göre daha fazla boya tasarrufu sağlamaktadır.



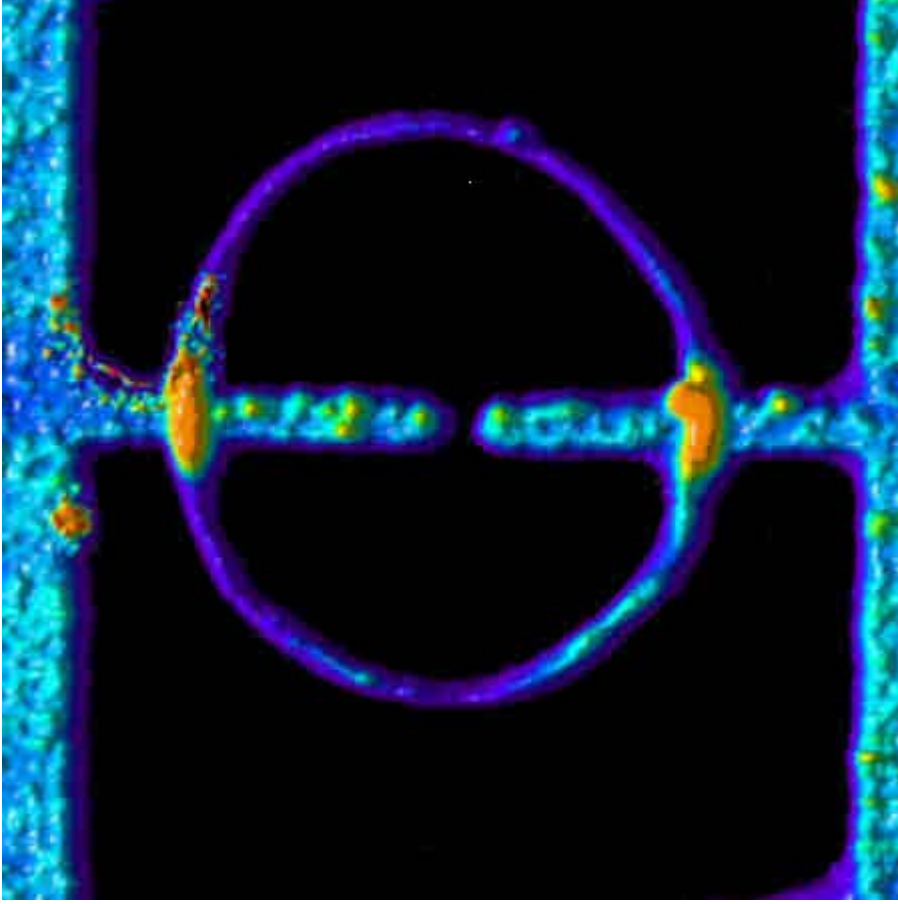
ÇOK-KATMANLI NANOTÜP



TEK-KATMANLI NANOTÜP

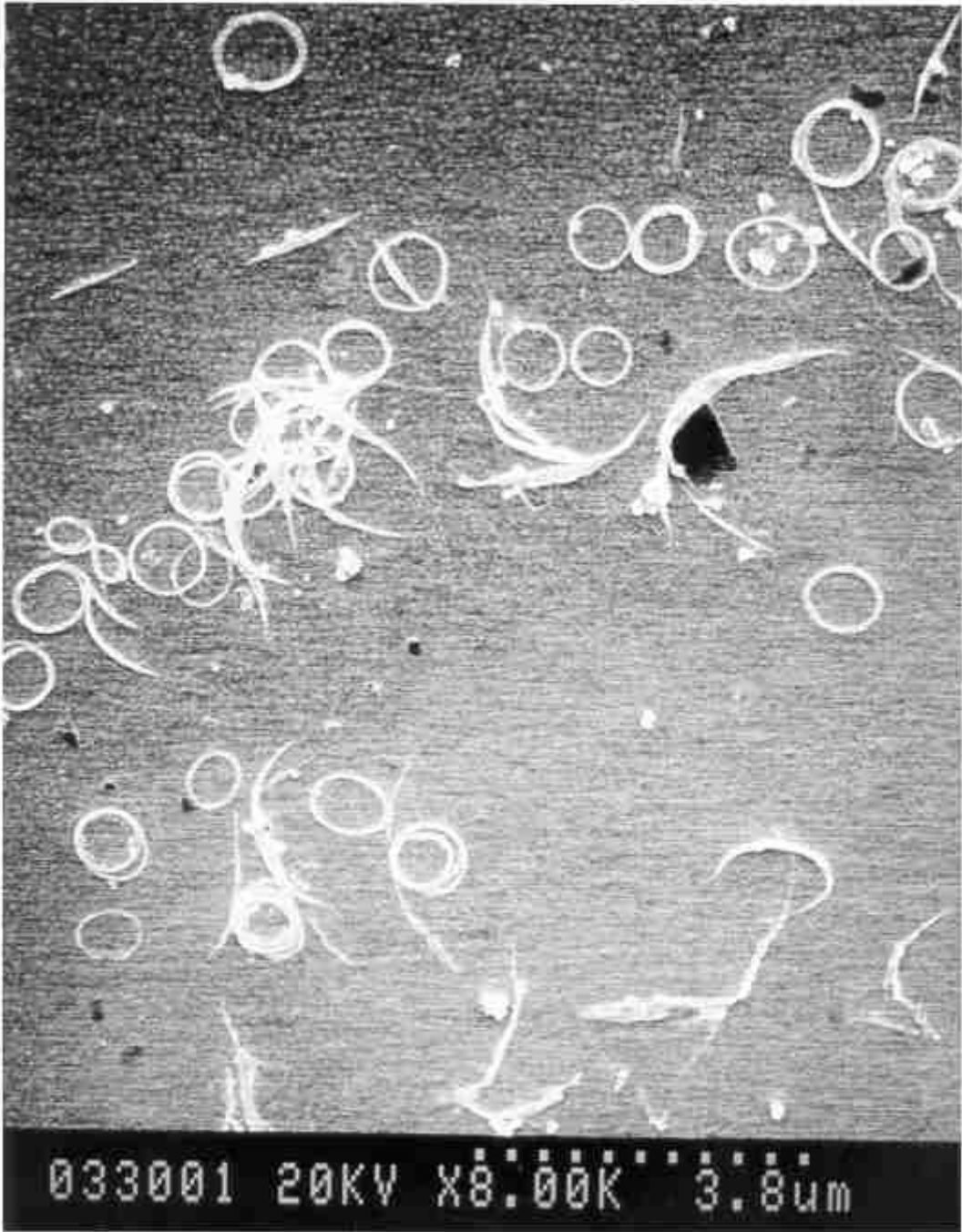


Düz ip şeklindeki nanotüpleri halka nanotüplere çevirmek için bir yol bulunmuştur; bu halkalar birçok katman olarak, tek-katmanlı nanotüplerden oluşuyor ve 0,7 mikron çapa sahip. Halka haline getirme, proteinlerde ve diğer biyomoleküllerde gözlenmiş ve sarım içi temel kuvvetin hidrojen bağından kaynaklandığı düşünülmekteydi. Karbon nanotüpler ise yeni bir özellik göstererek halka olayında sadece Van der Waals kuvvetlerinin etkili olduğu görülmüştür. Metal elektrodla yerleştirdiğimiz halkalar, yeni elektrik iletim olayını incelememizi sağlar. Halka oluşturmak için kullanılan nanotüpler son derece küçüktür; çapları sadece 1,4 nm'dir. Bu nanotüpler düşük sıcaklıklarda tek boyutlu iletkenlerdir, kuantumsal etkileşim tüpler arasındaki elektriksel iletimi yönetir. Halka şekli, bunun gibi tek boyutlu iletkenlerde kuantum etkilerini gözleyebilmemizi mümkün kılar.



Nanotüp halka görüntüleri

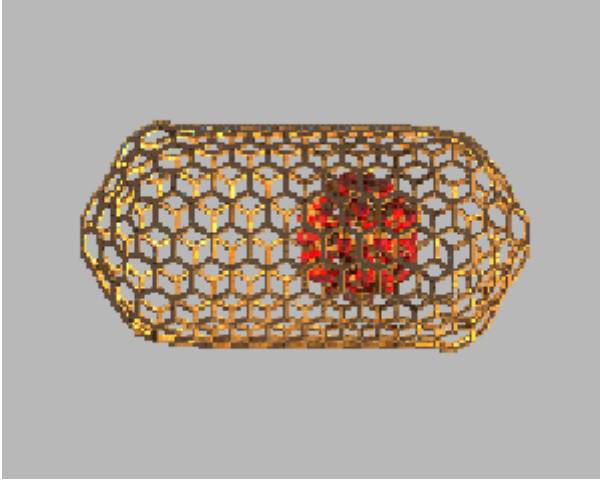




## 5. TEKNOLOJİDEKİ POTANSİYEL KULLANIM ALANLARI

IBM araştırmacıları, dünyada ilk defa tek bir molekül içinde mantıklı bilgisayar devresi geliştirerek, çalıştırmayı başardılar. Karbon atomlarının oluşturduğu, sa telinden 100.000 kat daha ince tp Şeklindeki bir molekülden, karbon nanotüplerden, günümüz bilgisayarlarında bulunan üç temel devreden biri olan “voltaj çevirici”yi üretmeyi gerçekleştirdiler. Nanotplerle, NOT kapısı adında bir voltaj çevirici devre elde edildi. Tek bir karbon nanotpnn boyuna çevirici mantık fonksiyonunu Őifreleyen bilimadamları, dünyanın ilk intra moleküler ya da tek moleküllü mantık devresini kurdular. Sıfırların ve birlerin hakim olduğu iki haneli dijital dünyamızda voltaj çeviricisi, bilgisayar çiplerinde 1’leri 0’a , 0’ları da 1’e dönüştürüyor. Günümüzde bilgisayar işlemcileri, “AND” ve “OR” kapıları gibi temel iki işlevin yanı sıra, “NOT” kapısının çok daha karmaşık ve geniş kombinasyonlarından oluşuyor.

Voltaj eviricilerde farklı elektronik özelliklere sahip iki tür transistör bulunuyor. Bunlar; elektronların elektrik akımını taşıdığı n türü transistörler ve elektronların bulunmadığı delik denilen bölgelerde elektrik akımının taşındığı p transistörleri. Bugüne dek geliştirilen tüm karbon nanotüpler sahip oldukları p türü transistörler nedeniyle, mantıklı bilgisayar devrelerinin kurulmasına elverişli değildi. Bilim adamları , potasyum atomlarını ekleyerek nanotüp transistörlerin özelliklerini değiştirdiler. Bu sayede p tipi nanotüp transistörlerinin, n tipi transistörlere dönüşümünü gerçekleştirmişlerdir. P tipi transistörler vakum içinde ısıtıldığında, n tipi transistörlere dönüşüyor, havaya maruz bırakıldığında ise, süreç tersine işliyor. Bilim adamları ayrıca bazı bölümleri n tipine dönüştürülen nanotpte bazı bölümlerinde p tipi olabileceğini ortaya çıkarttılar. Dünyanın ilk tek moleküllü mantıklı devresi de, bu bulgular ışığında inşa edildi.



### Alan Etkili Nanotüp Transistörü

Nanotüpler yapılarına göre değişerek metal veya yarıiletken olabilirler. Bunlar aynı zamanda aşırı dayanıklı maddelerdir ve iyi ısısal iletkenliğe sahiptir. Bu karakteristik özelliklerine bağlı olarak, nano-elektronik ve nano-mekanik devrelerde kullanım imkanı, nanotüplerin üzerinde büyük ilgi doğurmuştur. Örneğin; nano kablo gibi kullanılabilir ya da entegre devreler içinde, alan etkili transistörlerde olduğu gibi aktif bileşen olarak kullanılabilir. Transistörler entegre devrelerin yapı taşlarıdır. Sadece çok katmanlı ya da tek katmanlı nanotüpleri kullanarak, alan etkili transistör kanalı gibi, nanotüp transistörleri elde edilmiş ve başarılı olarak test edilmiştir. Elektriksel özellikleri incelenmiş ve nanotüp kanalından geçen akımı, giriş kapısına uygulanan gerilimi değiştirilerek, 100.000 çarpanına kadar değiştirilebildiği bulunmuştur.

Eğer alan etkili transistörü oda sıcaklığından 4°K'e soğutursak, cihazın davranışının da dolaylı olarak değiştiği görülür. Oda sıcaklığında cihaz (FET) alan etkili transistör gibi davranırken, 4°K'de (SET) tek elektron transistörü gibi davranmaktadır. Bütün bu bilgiler ışığında karbon nanotüpün , büyük bir hızla gelişmekte olan nano teknoloji ailesine çok rahat uyum sağladığı ve gelecekteki teknolojik uygulamalarda yerini alacağı açıkça görülmektedir.

## 6. SONUÇ

Bu çalışmada, nanotüplerin elde edilmesi ve fiziksel özellikleri anlatılmıştır. Nanotüpler konusundaki çalışmalar ve bulgular, 10 yıl gibi kısa sayılacak bir sürede büyük bir gelişme göstermiştir. Nanotüplerin elde edilmesindeki yöntemlerin gelişmesiyle, istenilen boyut ve şekilde nanotüpler elde edilebilmektedir. Bu konudaki çalışmalarla özellikle teknolojideki kullanım için seri üretim tekniklerinin kısa bir sürede geliştirilmesi beklenmektedir. Nanotüpler, pek çok farklı malzemenin gösterdikleri özellikleri tek başına bünyesinde toplamaktadır. Nanotüplerin yakın zamanda kuantum telleri, diyod ve transistör olarak uygulama alanları bulması beklenmektedir. Nanotüpler daha pek çok mekanik ve fiziksel özellikler göstermektedir. Bunlara örnek olarak, nanotüplerin çok sağlam olması ve yüksek elastikiyet göstermesi, plastiğin nanotüplerle katkılandırılmasıyla iletken elde edilmesi özelliklerini verebiliriz.

Keşfedilen özellikleri ile ileri teknoloji malzemeleri arasında önemli bir yer alan nanotüplerin, daha pek çok ilginç fiziksel özellikler göstereceği beklenmektedir. Bu konudaki çalışmalar gittikçe artan bir yoğunlukta sürmektedir.