

# HAYALLE GERÇEĞİN ARAYÜZÜNDE BİLİM NANOTEKNOLOJİ

Derleyen: Raşit Gürdilek

Ünlü fizikçi Richard Feynman, 1950'li yılların sonlarında bir inçin 64'te birinden (cm'nin yaklaşık 25'te biri) daha küçük, çalışır bir motor yapana 1000 dolar ödül vadederken, herhalde kısa süre sonra William McLellan adlı gencin cımbız ve mikroskop kullanarak istenen küçüklükte bir motoru yapıp parayı götürüleceğini hesaplamamıştı. Bugün California Teknoloji Enstitüsü'nde sergilenen mini motor tabii ki artık çalışmıyor. Ancak, dünyanın her yerinde, çok daha küçük makineler üretmek için yoğun çabalar harcanıyor. Bu makinelerin bazılarını yapabilmek için, McLellan'ın yaptığı gibi mikroskop gerekebi-

li. Bazılarıysa akıl almaz küçüklükte tasarlandıklarından, bunları görebilmek, optik mikroskopların bile erimi dışında. Bunların yapımında kullanılacak "cımbızlar" bile, öyle bildiklerimizden, tanıdıklarımızdan değil.

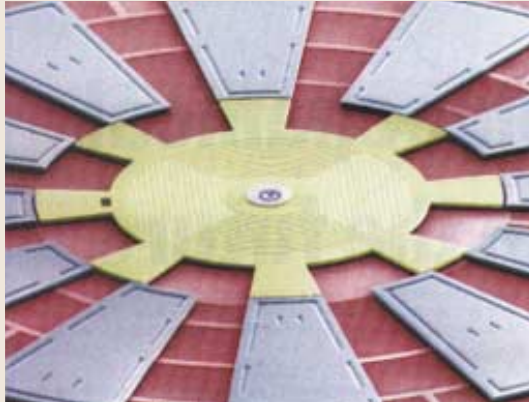
Büyüklik, küçüklük, görelilik kavramları. Elbette sonsuza kadar bölüneleceğimiz matematik büyüklükler olduğunu biliyoruz. Maddeyi oluşturan temel yapıtaşlarının da çok küçük parçacıklar olması gerektiğini mantığımızla çıkarıyoruz. Ancak iş algılamaya gelince işler biraz çatallaşıyor. Bu iş için duyularımıza başvurmak zorundayız. Algılarımız, duyularımızsa, kendi bedenimize, bu bedenimizin yeteneklerine

ayarlı. Başlangıçta uzaklıkları karışla, ayak boyuyla, adım hesabıyla, ya da kulaçla tanımlamışız. Sonra matematik imdada yetmişmiş, işlerimizi kolaylaştıran mantıksal, standart ölçülere kavuşmuşuz. Hareket yeteneğimiz geliştikçe daha büyük uzaklıklar referans çerçevemize girmiş. Önce kilometreyle tanışmışız. Sonra çok daha büyük ölçülerle. Ama bu görece kolay. Gerçi evrenin uçsuz bucaklığı, algı çerçevemizi zorluyor; ama ister yayan gidelim, ister otomobille ya da uçakla, bir türlü sonuna varamadığımız bir ufuk olduğunu görüyoruz. Rotayı tersine çevirdiğimizdeyse, gidebileceğimiz yol çok daha kısa. Küçük bir cis-

## Nanoteknolojide Ara Durak: MEMS

Mekanikle elektroniğin evliliğinin ürününün adı, tahmin edilebileceği gibi elektromekanik. Üstelik bu ürünlerin albenisi de fazla. Zaten minyatürleştirme deyince akla gelenler de bunlar. Mikro-elektromekanik sistemler (MEMS) adıyla tanınan alan, bu nedenle kamuoyunun ilgisinin odak merkezlerinden birinde. Metrenin milyonda biri ölçekteki ürünleriyse, nanoteknoloji için hem gerekli reklam getirisini sağlıyor, hem de uygun mesafede bulunan bir ara durak işlevini görüyor. Aslında neyin MEMS, neyinse nanomakine sayılacağını belirlemek de pek kolay değil. Bugün bazı MEMS ürünlerinin kütleleri birkaç attogram ( $10^{-18}$ ), uzunluklarıysa 10 nanometre kadar olabiliyor. Aşağı yukarı 15 yıl içinde gösterdiği hızlı gelişmeyle MEMS, bugün McLellan'ın motorundan yüzlerce kez küçüklükte motorları piyasaya taşımış bulunuyor. Günümüzde yaygın olarak kullanılmaya başlayan dijital projektörler, elektrikle çalışan milyonlarca küçük aynacıktan yararlanırken, gene bir MEMS uygulaması olan mikro hareket algılayıcıları da otomobillerdeki hava yastıklarında kullanılıyor.

Nano ölçekte makine parçaları ve nanolitografi gibi yüzey işleme teknikleri sayesinde bugün 10 GHz'nin üzerindeki frekanslar üreten rezonatörler gerçekleştirilebiliyor. Böylesi mekanik düzeneklerle, örneğin mikrodalga frekanslarda mekanik temelli sinyal işleme teknikleri geliştirilecek. Ayrıca daha gelişkin tarama uçlu mikroskoplar da gündeme gelebilecek.



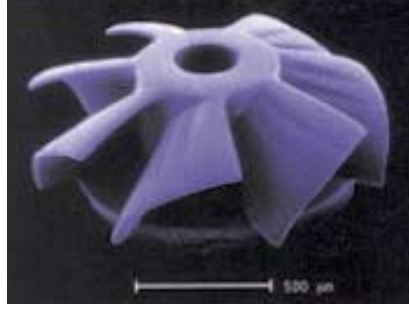
MEMS'lerdeki titreşen parçaların küçüklüğü, bunları kütlelerine eklenen son derece küçük ağırlıklara karşı da olağanüstü duyarlı yapıyor. Birkaç atomluk ek bir yükü bile algılayan sarkaçlar, daha duyarlı tarama mikroskopları geliştirilmesine olanak veriyor.

MEMS'leri, büyük bilişim ve iletişim firmaları için çekici kılan, yalnızca küçüklükleri değil. Bir önemli özellikleri de enerji kaybını son derece önemsiz düzeylere indirmeleri. Bu özellikleriyle enerji kaybına yol açacak dış etkenlere dirençli olduklarından, son derece duyarlı algılayıcılar için ideal yapıtaşları oluşturuyorlar.

MEMS'lerin çekici bir özelliği de son derece düşük enerjilerle çalışmaları. Titreşen MEMS rezonatörlerinden bir milyon kadarının bir arada harcadığı güç, bir mikrowattı geçmiyor. Bu miktar, titreşen mekanik sistemler yerine, elektronik yük paketlerinin iletimi temeline dayanan sinyal işleme düzeneklerine göre 30-40 kat daha az enerji demek.

Nihayet MEMS'lerin bir özelliği de silisyum, galyum arsenid ve indiyum arsenid gibi elektronik sanayiinin temel malzemelerinden yapılabilmesi ve böylece transistör gibi yardımcı elektronik parçaların da, mekanik parçalarla aynı çip üzerinde üretilebilmesi. Bu da çok daha karmaşık devrelerin küçük yüzeylere basılabilmesine, ve nanometre ölçeğindeki parçaları diğer parçalarla ilintilendirme darboğazının aşılabilmesine olanak sağlıyor.

mi anlatmak için çoğumuz hala farkında olmadan parmağımızı gösteririz. Cisimler biraz daha küçülünce hem algılamakta, hem de tarif etmekte zorlanırsınız. Çünkü tarif etmeye alışık olduğumuz en küçük boyut bir milimetre, hadi olsun olsun bir toz zerreciğinin boyutları kadardır. Teknoloji deyince, her türlü soyutlama, kavramsallaştırma da devre dışı kaldığı, tümüyle duyularımız ön plana çıktığı için iş daha da zorlaşıyor. Çok değil, 30-40 yıl önce ileri Batı teknolojisinin gurur kaynağı, cebe sığacak boyutlarda, Japon malı bir transistörlü radyodan başka birşey değildi. Bugünse biz sade vatandaşlar için, resimlerde gördüğümüz, parmak ucunda bir pul gibi duran bir bilgisayar mikroişlemcisi, minyatürleşme sürecinin en uç noktası.



Bu zihinsel sınırı aştığımızda bizi gri bir alan bekliyor. Önünde de bir kapı. Üzerinde yazılı olan şu: "Duyularınızı burada bırakın!" Nedeni basit; normal dünyamıza ayarlanmış gözlerimizle, ya da herhangi bir başka bir duyuyla burada birşeyler algılamamız olanaksız. Bir toz zerreciği bile bu nanoteknoloji dünyasına sığamayacak kadar dev bir yapı. Duyularımız bir tarafa,

soyutlama yeteneğimiz, hatta matema-tığımız bile zorlanmaya başlıyor. Söz-konusu olan metrenin milyarda biri mertebesinde yapılar. Bir başka tanımla, alıştığımız, tanıdığımız en küçük uzunluk birimi olan, milimetrenin milyonda biri. Bu uzunluğa sığabilense, yalnızca birkaç atom. İşte nanoteknoloji, bu yapıtaşlarını kullanarak, yalnızca çalışabilen değil, iş gören, makro dünyamızda bize kapanmış olan kapıları açabilecek hünerlere sahip aygıtların üretilmesini ve kullanılmasını içeren bir alan. Kanseri hücreleri arayıp bulan ve içlerine girip özel ilaçlardan oluşan yüklerini boşaltan biyolojik taşıtlar, nanometre kalınlığındaki tellerden akan elektronların sağladığı, akıl almaz hızda ve genişlikte iletişim ve hesaplama gücü. Sınır yok; daha aklınıza ne gelirse...

Bu durumda, nanoteknoloji de, füzyon enerjisi gibi atın başı önüne bağlanmış bir havuç demeti olmaya aday. Bir türlü erişemiyorsunuz; ama insanlık için vaat ettiği ufuklar öylesine geniş ki, kimse yol yakinken geriye döneyim diyemiyor.

Kamuoyunun nanoteknolojiye bakışı, kaçınılmaz olarak popüler bir çerçevede. Bu perspektiften bakınca nanoteknoloji konusundaki anlayış, ve beklentiler, bilimsel ölçeklerle, hedeflerle ve teknolojinin gelişim hızıyla değişiyor. Kamuoyu sabırlı ve bilimkurgudan hoşnut. Nanoteknoloji derken sokaktaki insanın kastettiği çok daha büyük yapıları da içerebiliyor. Hayret duygusunu tetiklesin de, milyarda bir yerine, milyonda bir ölçüde oluver-sin!..

Ancak, teknoloji, nano değil de mikrometre (metrenin milyonda biri) boyutlarında olunca, araştırmacılar için iş o kadar zor değil. Yalnızca tüketicileri şaşırtmak için değil, popüler ve bilimsel kullanımlı, çok işlevli, çok yetenekli makinelerin bazıları ya üretilmiş, ya da prototip aşamasında bulunuyor. Tabii ki reklamı da unutmamak gerek. Kamuoyunun ilgisini çekmek için, ne iş yaptığını kavramak teknik bilgi gerektiren aygıtlarla fazla yol alınmıyor. Bu nedenle büyük araştırma laboratuvarları bile, halkın ilgisinin (dolayısıyla da devlet yardımının) sürmesi için zaman zaman "dünyanın en küçük gitarı", "en küçük otomobili" türünden ilginçlikler üretiyorlar.

## Moleküler Aygıtları Kendilerine Yaptırmak

Japonya'nın Nagoya Üniversitesi'nden kimyacı Makoto Fujita, küçük alanlarda veri depolamak için büyük düşünerek, doğanın sorunu nasıl çözüldüğüne bakıyor. Araştırmacı canlı bir hücrenin, bir kompakt diske kıyasla karşılaştırılmayacak kadar küçük olduğuna, ama hücrenin DNA'sının çok daha büyük hacimde bilgiyi taşıdığına dikkat çekiyor. Molekülleri kullanmanın daha etkili yöntemlerinin geliştirilmesi halinde, bilgiyi DNA'ların moleküler düzeyinde işleyerek dev süperbilgisayarların elde taşınabilir aygıtlar haline dönüştürebileceğini söylüyor. Fujita'nın ve benzer çalışmalar yürüten başka araştırmacıların da "yönlendirilmiş otomontaj" diye adlandırılan bir teknikle gerçekleştirilmeye çalıştıkları da bundan başka bir şey değil. Doğal molekülleri bir bütün halinde tutan kimyasal ve elektriksel bağlardan yararlanarak, moleküllerin arzu edilen biçimde nanoölçekli yapılar kurmalarını sağlayabiliyorlar. Araştırmacılar, bu yolla günümüzde var olan bilgisayar mantık ve hafıza parçalarından 100 kez daha küçük parçalar yapılabileceğini düşünüyorlar. Kendi kendilerini inşa eden moleküllerle ayrıca, kararsız tıbbi malzemelerin tutulup hedeflerine taşınabileceği kafesler, ya da içlerinde kimyasal tepkimeler gerçekleştirilebilecek çanaklar yapmak da mümkün.

Kullanılan teknik, maddenin iki özelliğini temel alıyor. Bunlardan biri, DNA sarmalının iki ipliğini birarada tutan hidrojen atomları arasındaki bağ; ötekiyse artı elektrik yüklü organik iyonlar (elektronlarının bazılarını yitirmiş atomlar) ile eksi yüklü metal iyonları arasındaki elektriksel çekim. Organik iyonlar, ligand da denen, ve lego ve benzeri oyunlardaki çubuklara benzeyen organik moleküllerin üzerinde yer alırlar. Metal iyonlarysa, gene legoların çubuklarını bir arada tutan delikli disklerle benzerler. Bu metal iyon ve ligandlar, bir eriyik içinde doğru oranda ve doğru ter-

modinamik koşullarda karıştırılırsa, kendiliklerinden bir yapı oluştururlar. 1990 yıllarının başlarında geliştirilen metal-iyon tekniğinin öncülerinden olan Fujita, önce dörder ligand ve metal iyonu kullanarak kare biçimli, tek boyutlu makromoleküller, sonra da ekip arkadaşlarıyla birlikte sekiz kenarlı, ortak tabanlı iki piramit biçiminde üç boyutlu bir nanoyapı geliştirmeyi de başardı. Yapı, 3 nanometre boyunda ve içindeki boşluk, "buckyball" denen küre biçimli bir karbon molekülünün rahatlıkla sığabileceği genişlikte. Fujita ve öteki araştırmacılar ayrıca, ağı, tüp, kafes ve katenan denen iç içe geçmiş halkalardan oluşan yapılar da geliştirmişler.



Fransa'nın Strasbourg kentindeki Louis Pasteur Enstitüsü kimyaçılarından J.P. Sauvage, katenanların bilgisayar mantık kapıları olarak kullanılabilmesini söylüyor. Araştırmacının tasarruflarında halkalardan biri sabit tutulurken, ikincisi dönebilecek bir biçimde bırakılıyor. Eğer ikinci halkada fazladan bir iyon bulunuyorsa, halka, bitişindeki bir elektrik yüküne tepki

olarak ileri-geri 180 derece dönebiliyor. Bu hareket de mantık kapısında kullanılan 1 ve 0 veri değerlerini oluşturuyor. Ayrıca moleküler kafesler, atomların girebileceği genişlikte kapıları olacak biçimde de kurgulanabiliyorlar. Kapıdan giren atom, içeride başka atomlarla tepkimeye girerek, dışarıya çıkamayacak kadar büyük bir molekül oluşturuyor. Bu, normal olarak eriyik içinde serbestken hızla tepkimeye girip kaybolacak moleküllerin uzun süre kararlı yapıda tutulmalarını sağlıyor. Araştırmacılar, düzeniğın ilacı belirli hedeflere taşıyacak ideal bir iletim sistemi olabileceğini söylüyorlar.

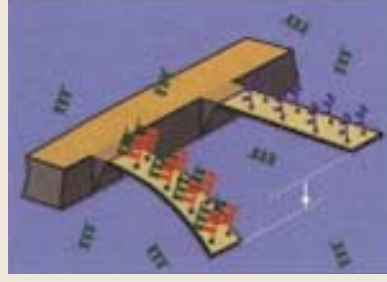
Hâlâ varlığını sürdüren problemlere karşın Fujita, metal iyonları kullanan otomontaj araştırmalarında çalışanların sayısının çoğaldığını ve bu araştırma alanının hızla geliştiğini vurguluyor.

## Tahteravalliyile Hesap ve Tedavi

En basit nanomakineleri yapabilmeyen sayılan güçlüklerine karşın, şimdiye kadar geliştirilen basit modellerin olağanüstü başarısı gelecek için umut veriyor. Özellikle 1980'li yıllarda atomik kuvvet mikroskoplarında kullanılan ve minik tramprenlere benzeyen nanoölçekli "tahteravalli"ler, gelecek için umutlu kapılar açan birçok yeni deneyin de temelini oluşturuyorlar. Molekül yüzeylerinin biçimini çıkarmak için atomik kuvvet mikroskoplarında tahteravallinin ucu, incelenen cisim üzerinde gezdiriliyor; uç ve üzerinde gezdiği cismin molekülleri arasındaki kuvvet, ucun yüzey üzerinde aşağı-yukarı oynamasına yol açıyor; yansıtılan bir lazer ışını da bu hareketi algılayıp görüntüye dönüştürüyordu.

Bir sonraki kuşak tahteravalli aygıtlarının özelliği ise, bu minyatür tramprenlerin istendiği biçimde ve yerde oynatılabilmesi. Bu iş için de biyolojinin yardımına başvuruluyor. Tahteravalli dediğimiz, 500 nanometre uzunlukta, 100 nanometre genişlikte, silisyumdan yapılmış cetveller. Kullanılan yöntemlerden biri, bu cetvellerin üst yüzeyini oligonükleotid denen kısa DNA zincirleriyle kaplamak. Araştırmacılar daha sonra bu tahteravallilerin içinde bulunduğu eriyiğe, üstlerindeki doğal eşleri olan oligodendrositleri ekliyorlar. Oligonükleotid çiftleri birbirlerini bulup bağlandıklarında, birbirlerine moleküllerarası bir kuvvet uyguluyorlar; bu da kaplamanın kalınlaşmasına ve tahteravallinin ucunun ağırlaşmış aşağı doğru inmesine neden oluyor.

Bir tarayıcı lazer, oligonükleotid çiftlerinin tahteravalliyi ne kadar eğdiğini bulabilir. Üzerinde ne kadar çok baz çifti birleşmişse, tramprenin ucu da o ölçüde eğilecektir. Araştırmacılar böylece bu kaplanmış tahteravalli düzeneklerinin, özel DNA dizilimlerini arayıp bulacak, bu arada bozuk genleri de saptayacak hassas sondalar olarak kullanılabilirliğini belirtiyorlar. Nitekim bu düzenek-



lerin geliştirildiği IBM'in Zürih'teki laboratuvarlarından "tahteravalli ustası" James Gimzewski, tek bir baz çiftindeki hatayı bile saptayabildiklerini söylüyor. Düzenekler, daha şimdiden biyoteknoloji firmalarının dikkatini çekmiş. Firmalar, bunları ilginç yapıdaki genleri, örneğin hastalık yapıcı genleri bulmak için şimdiye kadar yararlandıkları özel DNA dizgeleri yerine kullanmayı tasarlıyorlar.

Araştırmacılar, bu düzeneklerin ayrıca pasif değil, aktif olarak da, örneğin, belirli moleküler sinyallere göre yükünü boşaltan damperli kamyonlar gibi kullanılabilirliğini belirtiyorlar. Yatıp kalkan kapılara sahip bir kanser önleyici tablet, tümöre özgü bir protein tahteravalli üzerindeki özel tabakaya yapıştığına, terazinin aşağıya kaymasıyla açılan kapısından güçlü bir ilacı tümör üzerine boşaltabilir.

Nanoteknoloji'nin işlevsel ürünleriyse, şimdilik aşılması gibi görünen darboğazlarla mücadelede. Bu engellerin aşılması için yılmadan sürdürülen çalışmalarda sağlanan ve bilim dünyasında fırtınalar koparan ilerlemeler, çoğu kez konunun uzmanları dışındakiler için anlaşılmasız oluyor. Örneğin, araştırmacılar nanoteknolojinin tuğlaları olarak görülen ve birer atom kalınlığında duvarlara sahip silindir ya da küre biçimli karbon molekülleri olan "karbon nanotüpler" ile neler yapılabildiğini araştırmakla uğraşıyorlar ve bu konuda da oldukça mesafe almış görünüyorlar.

Tabi arada sırada, eskiden süvari alaylarında huysuzlanan atları sakinleştirmek için çalınan "yem borusu" kabilinden elle tutulur, piyasa kullanımı olan ürünler de çıkmıyor değil. Örneğin, nanomalzemenin çekici bir

özelliği, yüzey alanının hacme göre büyük olması. Bu özellik, kristal yapıdaki bazı bileşiklerin, farklı hacimlerine bağlı olarak ışığın değişik renklerinde parlamalarını sağlıyor. Bu tür malzemeler, biyoloji laboratuvarlarında işaretleyici olarak kullanılıyor. Nanomalzemenin, bu özellikleri nedeniyle kimyasal tepkimeleri hızlandıran katalizörler olarak da kullanım alanı buluyorlar.

Ancak nanoteknolojinin ereği, yalnızca çok küçük boyutlu hammadde üretmek değil. Ayrıca bir japon fir-



masının mikroskobik altın kürecikler kullanarak tuvaletler için geliştirdiği koku gidericiler de, bu alan için fazla uygun bir reklam sayılamaz. Bu nedenle, araştırmacıların pratik nano teknoloji ürünleri için gözlerini diktikleri alanların başında bilgisayar endüstrisi geliyor. Burada da nanoölçekli yapıları birbirlerine, daha da önemlisi, makro ölçekli parçalara bağlamanın güçlükleri araştırmacıların karşısına dikiliyor. Tüm bu darboğazlara karşın, nanoteknoloji araştırmacıları, yaratıcı çözümlerle engelleri aşabiliyorlar. Bir nanometre çaplı altın teller, avuca sığabilecek boyutlarda süperbilgisayarlar gibisinden bilimkurgu dünyasında görmeye çalıştığımız düzeneklerin, artık fantezi olmadığını habercileri. Nanometre ölçekli, güçlerini ışıktan alan dişli düzenekleri de. Teknolojide küçültmenin alt sınıra dayandığı ve mikrometre düzeyini aşmasının son derece güç olduğunu düşünenlerin kötümserlik, ya da "gerçekçilik"lerine karşın, araştırmacılar havlu atmaya niyetli görünmüyorlar. Aslında gerçekçilik de aldatıcı bir nitelendirme. Çünkü her ikisi de evreni tanımlamada olağanüstü başarılı olan kuantum mekaniği ve genel görelilik, gerçeğin tek değil, çok sayıda olabileceği düşüncesine kendimizi alıştırmamız gerektiğini söylüyor. Aslında kuramcılar bunun ayırdına çoktan varmış durumdadılar. Bu iki farklı dünyayı bir sentezde birleştirmek için kuramsal çalışmalar bütün hızıyla sürerken, kuantum bilgisayarlar gibi, mikro dünyanın şaşırtıcı kurallarından makro dünyada yararlanma hedefine yönelik uygulamalı çalışmaların temposu da artıyor. Belli ki, damarlarımızın içinde ya da beynimizdeki nöronlarımız arasında dolaşan mini-denizaltılar hemen yarın gerçekleşecek araçlar değil. Belki de bu tür araçlara hiç kavuşamayacağız. Ama şu da belli ki, tam bir evren tanımı için atom düzeyindeki evrenle, kozmos ölçeğindeki evrenin bir biçimde birleştirilmesi gerekiyor. Nanoteknoloji de bağdaştırmada zorlandığımız bu iki dünyanın birleştirilmesi için aradığımız bir arayüz olabilir.

**Kaynaklar:**  
Roukes, M., Nanoelectromechanical systems face the future, *Physics World*, Şubat 2001  
Service, R. F., "Atom-Scale Research Gets Real", *Science*, 24 Kasım 2000