

doğanın nanoteknolojisi nature's nanotechnology¹

Mühendisler Doğanın en hayranlık uyandırıcı maddelerinin sırlarını açığa çıkardıkça, davranışları radikal farklılıklar içeren yüzeylerin şaşırtıcı benzerliklere sahip olduklarını saptamışlardır.

Bharat Bhushan²

Ofiste çalışmış olan hemen herkesin geçici yapıştırıcılarla bir deneyimi olmuştur. Yaygın kullanımlı Post-it not kâğıtları bir yüzeye tutturulduklarında yapışan, küçük akrilik tabakalardan oluşan bir arka yüzeye sahiptir; bu özellik onlara iki parça kâğıdı birbirine tutturmaya yetecek gücü sağlamakta, ancak kâğıtları birbirlerinden ayırdığımızda onları yırtmaya yetecek gücü vermemektedir. Yapışkanın hafif dokunuşu, yeniden ve tekrar tekrar kullanımına olanak tanımaktadır.

Post-it'ler 1980'lerde ilk kez piyasaya sürüldüklerinde, sihir gibi algılan-

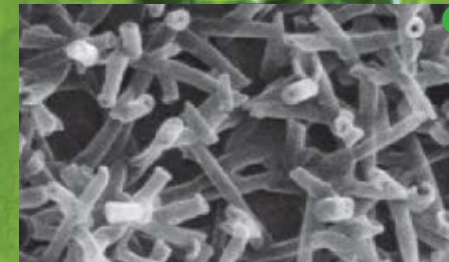
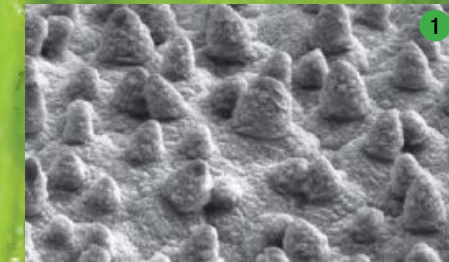
mışlardı. Ancak, doğa aslında yeniden kullanılabilir yapışkan sorununu milyonlarca yıl öncesinde çözmüştü. Geko türünün de dahil olduğu bazı kertenkeleler ayak parmaklarının altında yapışkan bir dokuya sahiptirler ve bu doku onların düz duvara tırmanmalarına olanak tanımaktadır.

Araştırmacılar, geko ayağındaki yapışkanın – ve diğer ilginç yapıya sahip biyolojik yüzeylerin – nasıl işlev gördüğünü ancak son yirmi beş yıl içerisinde anlamaya başlamışlardır. Bunun nedeni bu özelliklerin nanoölçekte yapılandırılmış olmalarıdır ve bu ölçekteki ya-

pıların karakterize edilebilmesi ancak 1990'ların başından sonra mümkün olmuştur. Bilim insanları ve mühendisler doğal yüzeylerin sunduğu özelliklerden ilham alarak bunları mühendisliğe kopya etme çabasına girmişlerdir. Biyolojiden ilham alan bu tasarım şekline “biyomimetik” adı verilmektedir. Biyomimetik alanı çok disiplinli bir alandır. Bu alan, biyolojik fonksiyonları, yapıları ve biyologlar, fizikçiler ve malzeme bilimcileri tarafından doğada bulunmuş olan çeşitli objelerin prensiplerini anlamak üzerine temellendirilmiştir ve biyoesinlenmeden (bioinspiration) ha-



Lotus çiçeği yaprağının yüzey dokusu sayesinde su, yaprağın üzerinde damlalar halinde birikmektedir. Yaprak küçük tümseklere sahiptir (1), bunlar büyütle gittikçe büyütüldüklerinde (2 ve 3) mumsu borulardan oluşan kalı bir yapıyla kaplı oldukları görülmektedir. Su damlacıkları bu tüplerin uçlarında tutulup daha sonra kaymaktadır.



reketle, ticari amaçlı pek çok malzemenin tasarım ve üretimine dayanak oluşturmaktadır.

Bugün biyomimetik malzemeler, laboratuvarlardan çıkıp endüstriyel uygulamalar arasında yerlerini almaktadırlar. Doğal yüzeylerin özelliklerini ve onları yapay olarak kopya etmenin yollarını anlama konusunda daha gelişmiş bir aşamaya ulaştığımızda, bu malzemelerden daha pek çoğu – belki de sihirli özelliklere sahip olarak – piyasadaki yerlerini alacaktır. Biyolojik evrim yoluyla Doğa, 3,8 milyar yıllık bir araştırma ve geliştirme programı yürütmüştür ve biz bugün onun keşiflerinden ticari yarar elde etmeye hazırlanmaktayız.

Ben, kendi laboratuvarımda üzerinde çalıştığımız, çok iyi bilinen ancak görünüşte alakasız olan iki yüzeyden bahsetmek istiyorum: Lotus bitkisinin suyu akıtmaya elverişli yaprakları ve duvara tutunmayı sağlayan geko ayakları. Bu yüzeyleri kopya etmenin yolunu bulmaya çalışırken bu iki yüzeyin aslında derin fiziksel bağları olduğunu keşfettik.

Lotus yaprağı uzun zamandır bir paradoks kaynağı olmuştur: Yüzeyi pürüzlüdür ancak en çamurlu suların içinde yetişse bile yaprak temiz kalmaktadır. Aslında bu etki öylesine belirgindir ki Budizm'de Lotus saflığın simgesidir.

Bu bitkinin gizemi ancak 1990'ların sonuna doğru bilim yoluyla çözülebilmştir. Almanya'nın Bonn Üniversitesi'nden Wilhelm Barthlott ve Christoph Neinhuis, tarayıcı elektron mikroskop kullanarak yaprakların oldukça yüksek çözünürlüğe sahip görüntülerini incelemeye başlamışlardır. İncelemelerinin sonucunda lotus yapraklarının sadece makro ölçekte değil aynı zamanda mikro ve nanoölçekte pürüzlü bir yapıya sahip olduklarını keşfetmişlerdir. Yaprığın yüzeyi su damlacıklarını geri püskürtün miniskül mumsu borularla kaplıdır. Su damlacıkları süreğen düz bir zemin üzerinde yer almak yerine bu boruların üzerinde tutulduklarından, yaprağı ıslatmak yerine kayarak üzerinden düşmektedirler. Yuvartlanan su damlaları kir partiküllerini taşımakta, böylece yaprakları temiz kılmaktadır.

Lotus etkisi olarak bilinen bu etki, suyu akıtan yüzeyler üretmenin bir yolunu göstermektedir: Yüzey pürüzlülüğünü artırmak. Yüksek derecede hidrofo-bik özellikler gösteren yüzeyler üzerinde yapılan araştırmalar, bu yüzeylerin suyu akıtmasında rol oynayan çeşitli faktörleri belirlemişlerdir. Yüzey hem mikro hem de nanoölçekte pürüzlü olmalıdır ve genel olarak tümsekli bir yapıya sahip olmalıdır.

¹ Mechanical Engineering (The Magazine of ASME) dergisinin Aralık 2012 sayısında yer alan bu yazı, Yeliz Demir tarafından dilimize çevrilmiştir.

² Bharat Bhushan, Columbus'taki Ohio Eyalet Üniversitesi'nin Biyo ve Nanoteknoloji ve Biyometrik Nanosonda Laboratuvarının müdürüdür.

Yüzeydeki borular veya iğneler, göreceli olarak, kılcal dalgalara karşı koymaya yetecek yükseklikte olmalı, bu iğneler üzerindeki nanotümsekler, veya pürüzler, su damlalarının, iğneler arasındaki vadicekleri suyla doldurmasını önlemelidirler.

Ohio Eyalet Üniversitesi'ndeki laboratuvarımda bu etkiyi yapay olarak kopya etmeye çalıştık. Yaklaşımlardan biri, karbon nanoborularının (CNT) bir kompozitini kullanmaktır; bu boruların özelliği lotus yaprağının üzerindeki pürüzler gibi uzun ve dar olmalarıdır. CNT kompozitleri, nanoölçek ve hiyerarşik yapılar oluşturmak amacıyla düz bir epoksi reçinesi ve bir bikroyapı üzerine süskürtüldü. Lisansüstü öğrencisi Yong Chae Jung ile beraber, hem CNT ile oluşturulan nanoölçeğin hem de hiyerarşik yapıların üstün hidrofobisite ve kendini temizleme özelliği gösterdiğini saptadık. Bu açıdan, lotus yaprağı davranışını gösterdiler.

Bu yüzeyler aynı zamanda oldukça dayanıklıdır. Ucuna borosilikat topu yerleştirilmiş atomal kuvvet mikroskopuyla (AFM) bu CNT nanoyapılarını bastırarak, bir dizi aşınma testi gerçekleştirdik. AFM ucu 100 nM kuvvetle yüzeyi tırmıklamıştır; bunun üzerine aşınma izlerini kontrol ettik ve hiçbir aşınma olmadığını gördük. Kuvveti 100 faktör artırarak 10 mikronewton yaptık ve testi tekrarladık. Yine herhangi bir aşınma izi bulamadık ancak tabii ki borosilikat topunun kuvvetine bağlı olarak CNT'lerin bir parça eğildiğini ve kaydığını gözlemledik, tıpkı diş fırçası kıllarının dişin baskısı sonucunda deforme olmaları gibi.

Görünen o ki, doğal yüzey pürüzlülüğü yerine, karbon nanotüpler kullanılarak, yapay bir lotus etkisi yaratılabilmektedir. Bu insan yapımı yüzeyler, kendini temizleme ve hidrofobisite özelliğine ihtiyaç duyulan endüstriyel uygulamalarda kaplama olarak kullanılabilirler. Bu yapıyı kullanarak, kendini temizleyen ve dayanıklı bir yüzey elde edilebilir.

Daha önce de belirtildiği gibi, geko ayağı bazı faydalı özelliklere sahiptir. Duvara tırmanabilen tek canlılar gekolar değildir pek tabii ki. Böceklerin, örümceklerin ve kertenkelelerin birçoğunun sahip olduğu tutunucu tabanlar pek çok yüzeye tutunabilir ve ayrılabilir özelliğe sahiptirler ve bu özellik onlara dikey duvarlarda ve tavanlarda dahi hareket kabiliyeti sağlamaktadır. Milyonlarca yıllık biyolojik evrim sonucunda, bu canlıların bacak tutunma sistemleri optimize edilmiştir. Bu dinamik tutunma yeteneği, tersinebilir yapışkanlık veya akıllı yapışkanlık olarak adlandırılmaktadır.

Tutunucu tabanlar iki türdür: Göreceli olarak pürüzsüz olanlar ve kıllı olanlar. Arolia ve euplantulae adı verilen göreceli olarak pürüzsüz tabanlar yumuşak ve deforme olabilir niteliktedir. Bu tür tabanlar, ağaç ve akarsu kurbağaları gibi bazı amfibi türlerinde ve hamamböcekleri, çekirgeler ve diğer bazı böcek türlerinde gözlenebilmektedir. Pürüzsüz tabanlarını kullanarak bu hayvanlar ıslak ve hatta taşkın su bulunan çevrelerde düşmeden tutunabilmekte veya hareket edebilmektedirler.

Ağaç kurbağasının tutunma tabanları, yassı başlı epidermal hücrelerin altıgen dizilimine sahiptir. Bu epidermal hücreler 10 mikrometre genişliğindedir ve

yaklaşık 1 mikrometre genişliğindeki mukusla dolu kanallarla bölünmektedir. Her bir hücrenin düz yüzeyi, 100 ila 400 nm çapa sahip nanosütunlardan veya peglerden oluşan mikronaltı diziler içermektedir. Ayak parmağı tabanları oldukça yumuşak ve homojen olmayan bir maddeden yapılmıştır. Epitelyumun kendisi yaklaşık 15 MPa'lık, silikonlu kauçuğa eşdeğer, etkili bir elastik modüle sahiptir. Tabanlar sürekli olarak epidermal hücreler arasındaki kanallara

açılan bezlerde saklı olan mukus tarafından ıslatılmakta ve ıslak yapışkan vasıtasıyla temas edilen yüzeylere tutunmaktadır.

Kurbağalar, yüzey üzerindeki suyu akarken bile ıslak kayalara tırmanabilme yeteneğine sahiptirler. Örneğin akarsu kurbağaları sel suyu akıntısının bulunduğu yüzeylerde bile tutunabilmektedirler. Akarsu kurbağalarının geniş su akıntılara karşı koyabilmelerini sağlayan tabanlarındaki bazı yapısal farklılıkları bir kenara koyarsak, ayak parmağı tabanlarının yüzeyi, ağaç kurbağalarınıninkine benzemektedir.

Diğer taraftan, kıllı tutunma tabanları seta adı verilen uzun deforme olabilir kıllara sahiptir ve kınkanatlı böcekler ve sineklerle beraber örümceklerde ve kertenkelelerde görülmektedir. Kınkanatlı böcekler, sinekler, örümcekler ve gekolar tarafından kullanılan mikroyapılar benzer özelliklere sahiptir. Canlıların kitlesi büyüdükçe, terminal tutunma öğelerinin yarıçapı küçülür. Bu sayede bir alana düşen seta sayısı artmakta ve bununla beraber temasın lineer boyutu ve yapışma kuvveti de artmaktadır.

En yüksek vücut kitlesine ve doğada bilinen en çok yönlü ve etkili yapıştırıcı özelliğe sahip olduklarından, gekolar, hayvanlarda yeniden kullanılabilir yapışkanlığı çalışan araştırmacıların dikkatini en çok çeken tür olmuşlardır. Araştırmalar sonucunda geko tabanlarındaki derinin lameller, setalar, dallar ve spatüllerden oluşan hiyerarşik bir yapıya sahip olduğu bulunmuştur.

Lameller, bir veya iki milimetre uzunluğundaki yumuşak yükseltilerdir; pürüzlü yükseltili yüzeylerle temas edebilecek şekilde kolayca sıkışabilir.



Tokay gekosunun ayak parmağı tabanları (1) hiyerarşik yapıdan oluşmaktadır - nanoölçekli spatül şeklindeki yapılarla biten dallanmış uçlara sahip kıllarla kaplı esnek yükseltiler. Araştırmacılar bu yapıyı, 100 ila 600 nanometre çapındaki yönlendirilmiş (oriented) polipropilen fiberler kullanarak, yapay olarak türetebilmişler (2, 3 ve 4) ve sonuç olarak aşağı yukarı aynı yapışkanlığı elde ettiklerini görmüşlerdir. Daha geniş çapa sahip fiberler (5) lotus etkisini göstermişlerdir.



mektedirler. Setalar, her biri yaklaşık 30 ila 130 mikrometre uzunluğa sahip, milimetre karede 14.000'e kadar özkütlelerde lameller üzerinde toplanmış olan keratin kıllardır. Her bir setanın bittiği noktada, yüzeyle teması sağlayan, sayıları 100 ila 1000 arasında değişen dallar ortaya çıkmaktadır. Her bir dalın ucu ise her biri sadece 10 nanometre kalınlığında olan bir spatül içerisine yassı bir şekilde girmiş durumdadır.

Tokay gekosunun dört ayağındaki tutunucu tabanlar sadece yaklaşık 220 milimetre kare alana sahiptir – bu alan yaklaşık bir insan tırnağının sahip olduğu alan kadardır. Ayak parmaklarında yer alan ortalama 3 milyon seta dört ayakta aşağı yukarı 3 milyar spatül dalına ayrılmaktadır. Portland, Oregon'da bulunan Lewis and Clark College'dan Kellar Autumn tarafından yürütülen araştırma, bölünmüş temas noktalarının ayak parmakları arasındaki van der Waals çekim kuvvetini artırmaya yaradığını ortaya koymuştur (Tipik olarak, pürüzlü sert yüzeyler, görünen temas alanına kıyasla iki ila altı ölçek daha küçük olan nanoölçekli temas alanlarına sahiptir.). 3 milyar spatül toplu halde, bir gekoyu duvardan ayırmaya çalışırken harcanan 20 newtonluk dikey güce karşı koyabilmektedir.

Gekolar yüksek yapıştırma kuvveti üretebilseler de, istemleri doğrultusunda ayaklarını tuttukları yüzeyden ayırabilmektedirler. Geko setalarının yapıştırıcı kuvveti üç boyutlu yönelim ve tutunma sırasında uygulanan ön yüklemeye bağlıdır. Buna bağlı olarak, gekolar yürüme esnasında karmaşık bir ayak hareketi geliştirmişlerdir. Temas yüzeyinden ayrılma esnasında ayak parmakları dikkatle açılır, böylelikle setalar ve yüzey arasında açılma kavramını sağlar. Bu aşamadan sonra geko, setalarının bir yüzeyle temas ettiği açıyı değiştirerek, ayağını, bir seferde bir seta sırası olmak üzere,

*Alta yatan mekanizmaları
anladıkça, bunları
ticari uygulamalar için
kullanmaya başlayabiliriz.
Bazıları ilk başta sihirli
gibi görünebilir, ama
olay sadece bilim ve
mühendisliği doğanın
gizemini ortaya çıkarmak
için kullanmaktan
ibarettir.*

yüzeylerden ayırabilmektedir. 30 derecenin üzerindeki tutunma açısında geko yüzeyden ayrılacaktır.

Gekonun milisaniyeler içerisinde ayak parmaklarıyla bir yüzeye tutunup buradan ayrılabilme yeteneği sayesinde, bu kertenkeleler 10 fit uzunluğundaki bir duvara sadece 3 saniye içerisinde tırmanabilmektedirler.

Geko ayağının yeniden kullanılabilir yapıştırıcısına dayalı nanoölçekle tasarlanmış bir malzemenin, yapıştırıcı bantlar ve ataçlar gibi günlük kullanımdaki objelerden duvara tırmanan robotlar gibi egzotik ürünlere kadar uzanan çok sayıda kullanım alanı olabilirdi. Ancak bu tarz bir malzemenin üretimi kolay değildir. Tasarım, fibrillerin sert bir yüzeye bastırıldıklarında kolayca deforme olabilecek kadar uyumlu ancak kendi ağırlıkları altında çökmeyecek kadar sağlam olduklarını garanti etmek durumundadır. Her bir fibril arasındaki boşluğu ayarlamak da aynı ölçüde önemlidir. Çok küçük ve birbirine yakın fibriller birbirlerini moleküllerarası kuvvetle çekerler ve bu da öbekleşmeye neden olur. Günümüzdeki üretim yöntemlerinin sınırları göz önünde bulundurulmalıdır.

Hyungoo Lee ve ben laboratuvarımızda çalışırken, gözenekli zarı şablon olarak kullanarak, polipropilenden lotus etkili bir süperhidrofobik yüzey elde edebileceğimizi keşfettik. Hiyerarşik yapıdaki nanofiberlerin özkütlesini ve çapını değiştirerek, suyu akıtmaya elverişli bir malzemeyi, gekonun ayak tabanları gibi yapışkan bir hâle getirebilirsiniz.

100 ila 600 nm çapındaki yönlendirilmiş (oriented) fiberler, yüksek fiber özkütlesine ve geniş temas alanlarına bağlı olarak geko etkisi göstermişlerdir. Aynı tipteki yönlendirilmiş fiberin çapı ortalama bir ölçek daha büyük olduğunda – 5 ila 14 mikrometre arası – malzeme daha düşük fiber özkütlesine bağlı olarak lotus etkisi göstermektedir.

Gelişmekte olan bir alan olan biyomimetik, bilimsel ve teknolojik alanda kendisine yer bulmaya başlamıştır. Milyarlarca yıllık evrim sonucunda Doğa, basit bir malzemeyi kullanarak nefes kesici bir fonksiyonelliğe ulaşmıştır ve bunu yapmanın yollarından birinin hiyerarşik yapıyı akıllıca kullanmak olduğunu keşfediyoruz.

Alta yatan mekanizmaları anladıkça, bunları ticari uygulamalar için kullanmaya başlayabiliriz. Nanoüretimdeki önemli gelişmeler, mühendislerin akıllı malzemeler kullanarak ilgi çekici yapıları biyomimetik alanında kopya etmelerine olanak tanımaktadır. Ticari uygulamalar arasında nanomalzemeleri, nanocihazları ve yüzeylerin kendi kendisini temizlemesine olanak tanıyan süreçleri veya çengel ya da tel gerektirmeden resimleri asmaya yarayan mekanizmaları sayabiliriz. Bu uygulamaların bazıları ilk başta sihirli gibi görünebilir, ama olay sadece bilim ve mühendisliği Doğanın gizemini ortaya çıkarmak için kullanmaktan ibarettir. ■