Prof. Dr. Metin Sitti ve Ekibinden
Mikro Ölçekli İki Yeni Üretim Teknolojisi

Hayriye Yetiş Avcı [*TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi*

Bilimsel ve teknolojik araştırmaların sınırlarını daha ileriye taşıma çalışmaları tüm dünyada hızla devam ederken ülkemizden bilim insanlarının uluslararası araştırma ekosistemine önemli katkılar sağlayan çığır açıcı nitelikteki başarılarına şahit oluyoruz. Geçtiğimiz ocak ayında *Nature* dergisinde yayımlanan ve Koç Üniversitesi Rektörü Prof. Dr. Metin Sitti liderliğinde gerçekleştirilen iki araştırma, biyomedikal alanı ile mikro ve nano ölçekli üretim teknolojileri alanında yeni yaklaşımlar ortaya koyuyor. Gelin, bu çalışmaların detaylarına ve getireceği potansiyel yeniliklere birlikte göz atalım.

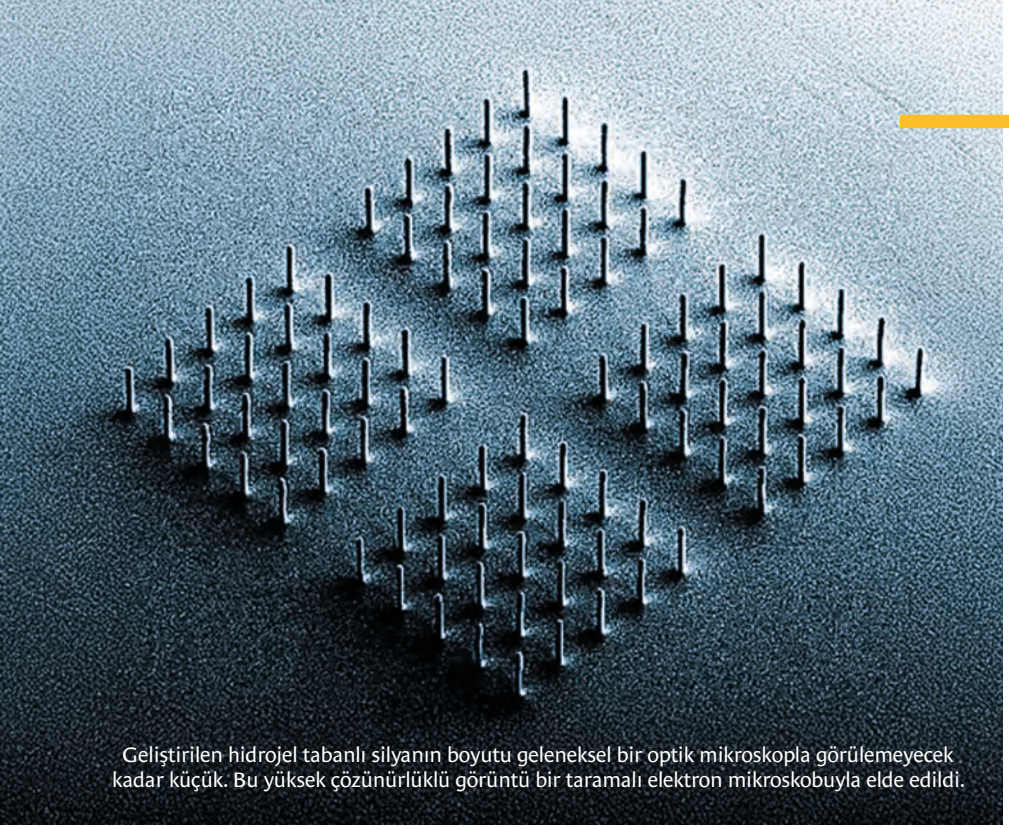
Matveev_Aleksandr / iStock

Biyolojik Silyanın Yapay İkizi Üretildi

Bazı hücrelerde bulunan silya (silyumun çoğulu) belirli işlevlere sahip, mikrometre (metrenin milyonda biri) ölçeğinde bir organeldir. Saniyede 5 ila 40 kez hareket edebilen bu yapılar vücutta çok sayıda hayati işlevi yerine getirir. Bu hareket yetenekleri, beyinde nöronların gelişip işlevsel hâle gelmesinde, akciğerde solunum yollarının temizlenmesinde, üreme sisteminde ise üreme hücrelerinin taşınmasında önemli rol oynar. Hasar gördüğünde ise vücuttaki bazı sistemlerin işlevlerinde önemli aksaklıklar meydana gelebilir. Ayrıca pek çok tek hücreli mikroorganizma sahip olduğu silya sayesinde sıvı ortamda daha az enerji harcayarak yüzebilir.

Koç Üniversitesi rektörü Prof. Dr. Metin Sitti liderliğinde yürütülen bir araştırmada Max Planck Akıllı Sistemler Enstitüsü ve Hong Kong Bilim ve Teknoloji Üniversitesinden bilim insanları, biyolojik silyanın hareket ve işlevlerini taklit edebilen yapay silya geliştirdi. Her biri yaklaşık 2 mikrometre çapında ve 18 mikrometre uzunluğunda olan yapay silyanın boyutları, canlı hücrelerdeki kadar küçük. Hidrojel tabanlı bu yapılar tek tek veya gruplar hâlinde hareket ettirilebiliyor.

Araştırmacılar yüzlerce yapay silyumu, üzerinde mikroelektrotlar bulunan folyo benzeri esnek bir tabaka üzerine yerleştirdi. Hidrojelden üretilen silyanın her birinin etrafında dört adet mikroelektrot bulunuyordu.



Geliştirilen hidrojel tabanlı silyanın boyutu geleneksel bir optik mikroskopla görülemeyecek kadar küçük. Bu yüksek çözünürlüklü görüntü bir taramalı elektron mikroskobuyla elde edildi.

Matveev_Aleksandr / iStock

Elektrotlara uygulanan potansiyel fark sonucu oluşan elektrik alan, hidrojel içindeki iyonların hareket etmesini sağladı ve belirli bölgelerde yoğunlaşmalarına yol açtı. Bu durum saf suda hidrojelin büzülmesine ve silyumun katoda doğru eğilmesine, tuzlu ortamda ise hidrojelin şişmesine ve silyumun anoda doğru bükülmesine neden oldu. Silyumun dönme hareketi yapmasını sağlamak içinse çevresindeki elektrot çiftleri sırayla çalıştırıldı. Böylece silyanın kontrollü bir şekilde hareket etmesi sağlandı.

Sonuçları geçtiğimiz ocak ayında *Nature* dergisinde yayımlanan makalenin başyazarı Zemin Liu, hidrojel tabanlı silyanın geliştirilmesinde insan vücudundaki kasların elektriksel uyarılarla çalışmasını sağlayan biyolojik süreçlerden ilham aldıklarını belirtiyor. Sinir sistemimiz kaslara elektrik sinyalleri gönderir. Bu sinyaller kas dokusundaki iyonların dağılımını değiştirerek hareket etmemizi sağlar. Tıpkı vücudumuzdaki kaslar gibi hidrojel içindeki iyonlar da elektrik sinyalleriyle uyarıldığında hareket ediyor. Ayrıca çalışmada uygulanan potansiyel farkı sadece 1,5 volt. Bu da yapay silyanın insan vücudunda kullanılmasının tamamen güvenli olduğu anlamına geliyor.

Hidrojel tabanlı silya, iki fotonlu polimerizasyon adı verilen son derece hassas, lazer tabanlı, nano ve mikro ölçekli üretim yapabilen bir 3D baskı tekniğiyle üretildi. Araştırmacılar yapay silyayı 330.000'den fazla kez test etti. Bu değer, saniyede 5 kez hareket eden silyanın yaklaşık bir günlük hareket sayısıyla eş değer. Buna rağmen yapay silyada neredeyse hiç aşınma belirtisi gözlemlenmedi. Ayrıca yapay silyanın insan kan serumu ve fare plazması gibi biyolojik sıvılarda da çalışabildiği gösterildi.
Prof. Dr. Metin Sitti, geçmişte silyanın sadece hareketi gözlemlenebilirken geliştirdikleri teknoloji sayesinde bu yapıların nasıl hareket ettiğini, birlikte nasıl çalıştığını ve ne tür sıvılar taşıyabildiğini incelemenin mümkün hâle geldiğini belirtiyor. Araştırmadan elde edilen bulgular bir yandan da hasar görmüş silyanın yerini alabilecek ya da işlevini yeniden kazanmasını sağlayacak biyomedikal uygulamaların geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

3D Mikro Üretimde Malzeme Sınırı Sona Eriyor

Polimerler, monomer adı verilen küçük moleküllerin kimyasal bağlarla bir araya gelmesi sonucu oluşan uzun zincirli yapılardır. Hafif, korozyona karşı dayanıklı ve kolay işlenebilir olmaları nedeniyle günlük hayatta yaygın olarak kullanılırlar. Polimerlerin üretiminde kullanılan çok çeşitli teknikler vardır. Bunlardan biri de fotopolimerizasyondur. Bu yöntem endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılması ve istenilen özelliklere sahip malzemelerin kolay ve hızlı bir şekilde üretilmesine olanak sağlaması nedeniyle önemli bir araştırma alanı hâline gelerek son yıllarda hızlı bir ilerleme kaydetti.

Fotopolimerizasyon temelli bir üretim yöntemi olan iki fotonlu polimerizasyon ise yüksek çözünürlükte, üç boyutlu, çok küçük ölçekli karmaşık yapılar basılmasına imkân tanıyor. Bu nedenle günümüzün en gelişmiş mikro ve nano üretim tekniklerinden biri olarak kabul ediliyor. İnsan saçından daha ince malzemeler üretmeyi mümkün kılan bu teknoloji tıp, mühendislik ve robotik gibi birçok alan için büyük önem taşıyor.

Son yirmi yılda gelişen bu tekniğin şimdiye kadar sınırlı kaldığı bazı noktalar mevcuttu. Çok küçük ölçekli üç boyutlu malzemeler genellikle aralarında polimerlerin de olduğu sınırlı sayıda malzemeden üretilebiliyordu. Prof. Dr. Metin Sitti'nin liderliğindeki araştırma ekibi, sonuçları geçtiğimiz ocak ayında *Nature* dergisinde yayımlanan araştırmada iki fotonlu polimerizasyon tekniğinin malzeme sınırlamasını aşacak bir yöntem geliştirdi. Max Planck Akıllı Sistemler Enstitüsü ve Singapur Ulusal Üniversitesinden bilim insanları metallerden metal oksitlere, karbon temelli malzemelerden yarı iletkenlere kadar farklı malzemeleri, çok küçük ölçekli üç boyutlu yapıların üretiminde yapı taşı olarak kullanmanın mümkün olduğunu gösterdi.

İki fotonlu polimerizasyon yönteminde lazerle yönlendirilen sıvı akışı sayesinde, sıvı içindeki mikro veya nanoparçacıklar belirli bir alan içinde bir araya getirilebiliyor. Bu yöntemde öncelikle polimer malzemeden üç boyutlu bir mikro kalıp üretiliyor. Daha sonra yan tarafında küçük bir açıklık bulunan bu kalıp, içinde mikro veya nanoparçacıkların rastgele dağılmış olduğu bir sıvı ortama yerleştiriliyor. Femtosaniye (saniyenin 10^{-15}'te biri) ölçeğinde atım üretebilen lazerle sıvının içindeki belirli bir bölgenin sıcaklığı hızla artırılıyor ve bu bölgede sıcak bir nokta oluşuyor. Sıcak nokta ile görece daha soğuk çevresi arasında oluşan sıcaklık farkı nedeniyle sıvı hareket etmeye başlıyor. Bu yönlendirilmiş sıvı akışı sayesinde sıvı içinde dağılmış olan parçacıklar gelişigüzel hareket etmek yerine belirli bir yönde sürükleniyor. Bu parçacıklar polimer kalıbın yan tarafındaki açıklıktan geçerek kalıbın içinde birikmeye başlıyor ve zamanla bir araya gelerek kalıbın şeklini alıyor. Böylece üç boyutlu bir yapı oluşturuyorlar. Polimer kalıp çıkarıldıktan sonra ise istenilen şekil ve boyutta, tamamen hedeflenen parçacıklardan oluşan üç boyutlu bir mikroyapı elde edilmiş oluyor.

Prof. Dr. Metin Sitti geliştirilen bu yöntemin geleneksel iki fotonlu polimerizasyon tekniğini, malzeme sınırlamasını aşarak neredeyse her malzemeden üç boyutlu mikroyapılar üretmeyi mümkün hâle getiren bir teknolojiye dönüştüreceğini belirtiyor. Yeni yöntemle mikrorobotlar ve mikro ölçekli işlevsel yapıların geliştirilme çalışmaları devam ediyor. Birçok farklı malzemeden mikro ve nano ölçekte karmaşık yapılar üretmeye olanak sağlayan bu teknolojinin uygulama alanları mikroakışkan sistemlerden ileri robotik teknolojilerine kadar uzanıyor. Diğer yandan bu yenilik, malzeme bilimi ve nanoteknoloji araştırmaları açısından da yeni bir üretim yaklaşımı sunuyor. ■

Silisyum dioksit (SiO_2) parçacıklarından oluşan 3D bir mikro yapının taramalı elektron mikroskobuyla elde edilmiş görüntüsü

Kaynaklar

https://www.nature.com/articles/s41586-025-09944-6
https://www.nature.com/articles/s41586-025-10033-x#Sec6