

Gelecekte Sağlık Takibi Genetiği Değiştirilmiş Bakterilerle M¼mk¼n Olabilir mi?

Hayriye Yetiř Avcı [*T¼BİTAK Bilim ve Teknik Dergisi*



Bilim ve Teknik řubat 2026

Arılan dünya nüfusuyla birlikte sağlık hizmetlerine duyulan ihtiyacı mevcut sistemlerle karşılamak gittikçe zorlaşıyor. Özellikle yaşlı nüfusta görülen artış, insanların sağlık durumunu sürekli ve doğru bir şekilde takip edilmesini daha da önemli hâle getirdi. Vücuda yerleştirilen çeşitli sensörler (implant sensör olarak isimlendirilir) sayesinde hastalık belirtileri daha ortaya çıkmadan sağlık sorunlarını tespit etmek mümkün olabilir. Bu sayede sağlık hizmetlerine duyulan ihtiyaç daha etkin bir şekilde karşılanabilir. Ancak henüz geliştirilme aşamasında olan ve sağlık alanında köklü

bir değişimin önünü açabilecek bu teknolojinin geliştirilme ve uygulamaya geçme sürecinde çeşitli zorluklar bulunuyor. Türkiye’den bilim insanları bu zorlukları aşmak amacıyla genetiği değiştirilmiş bakteriler kullanarak yeni nesil implant sensörler geliştirdi. Bu sensörler vücut içinde moleküler düzeyde izleme yapabiliyor, kablosuz çalışabiliyor ve pil gerektirmiyor.

Kan basıncı, vücut sıcaklığı, glikoz seviyesi gibi vücuttaki fizyolojik değişkenler vücut dışından yapılan ölçümlerle belirlenebilir. Ancak bu ölçümler çoğu zaman dolaylı yollarla yapıldığı ve çevresel faktörlerden etkilendiği için sonuçların hatalı olma ihtimali yüksektir. Vücut içine yerleştirilerek doğrudan ölçüm yapan implant sensörler ise kesintisiz olarak gerçek zamanlı veri sağlayabilir ve dış etkenlerden daha az etkilenir. Ayrıca dışarıdan ölçülmesi mümkün olmayan biyolojik sinyalleri algılayabilir. Bu sayede hastalıkların teşhisinden tedavisine kadar birçok aşamada kullanılabilirler.

Günümüzde kullanılan implant sensörlerin çoğu sıcaklık, basınç, pH ya da elektriksel sinyal gibi fiziksel değişkenleri ölçebiliyor. Ancak hastalıkların erken teşhisi için hayati önem taşıyan hastalığa özgü belirli moleküllerin gerçek zamanlı olarak izlenmesi mevcut teknolojiler ile henüz mümkün

değil. Örneğin günümüzde kandaki glikoz düzeyini ölçmek amacıyla vücut içine yerleştirilen sensörlerin birçoğu glikoz molekülünü doğrudan algılayarak değil, glikozun dokularda meydana getirdiği dolaylı elektriksel değişimleri ölçerek çalışır. Ancak bu değişimlere sadece glikoz değil, farklı tür moleküller de sebep olabileceği için glikoza özgü ölçüm yapmak hayli zordur. Ayrıca pek çok farklı biyolojik değişken sonucu etkileyebilir. Dolayısıyla özellikle erken tanı gerektiren durumlarda güvenilir ölçüm yapmak zorlaşır.

Canlı hücreler işlevlerini sağlıklı bir şekilde devam ettirebilmek için çevrelerindeki molekülleri tanıyabilen son derece gelişmiş algılama sistemlerine sahiptir. Çevrelerindeki moleküler değişimleri algılayarak hücre sel tepkiye dönüştürürler. Böylece değişen koşullara uyum sağlayarak işlevlerini sürdürebilirler. Türkiye’den bilim insanları, hücrelerin sahip olduğu bu “doğal yeteneği” sentetik biyoloji teknolojisi ile birleştirerek yeni nesil implant sensörler tasarladı. Geliştirilen bu yeni nesil sensörler genetiği değiştirilmiş bakteri hücrelerinde gerçekleşen biyokimyasal değişimleri vücudun dışından algılanabilen sinyallere dönüştürüyor. Bu sayede vücut içinde gerçekleşen süreçleri moleküler düzeyde izleme imkânı sağlıyorlar.



Boğaziçi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Sema Dumanlı ve öğrencisi Ahmet Bilir, Bilkent Üniversitesi Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde (UNAM) bulunan Synthetic Biosystems Laboratory'nin kurucusu Doç. Dr. Urartu Özgür Şafak Şeker ile Türkiye Sağlık Enstitüleri Başkanlığında (TÜSEB) doktora sonrası araştırmacı olarak görevini yürüten Dr. Merve Yavuz'un yürüttüğü araştırmanın sonuçları *Nature Communications* dergisinde yayımlandı.

Vücut hücrelerinde çevresel uyarıların etkisiyle küçük ölçekli elektriksel aktiviteler meydana gelir. Ancak bu süreçte lokal düzeyde bir elektrik alan ortaya çıksa da oluşan elektriksel sinyaller

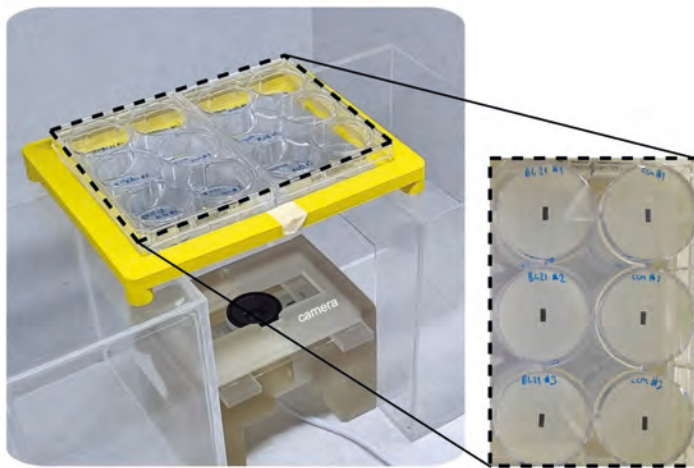
vücut dokusunun içinde sönmülenererek kaybolur. Bu nedenle vücut dışından algılanabilecek düzeyde elektromanyetik sinyaller oluşmaz. Geliştirilen yeni yaklaşım, bu sınırlamayı aşmak için hücrel aktivitenin neden olduğu sinyalleri doğrudan ölçmeye çalışmak yerine vücuda yerleştirilen bir implant sayesinde hücrel bilgiyi vücut dışından algılanabilir bir sinyale dönüştürüyor.

Çalışmada geliştirilen implant sensör, genetiği değiştirilmiş *Escherichia coli* bakterileri ve biyoyumlu bir malzeme olan magnezyumdan yapılmış ince katman şeklindeki bir antenden oluşuyor. *E. coli* bakterileri, hedef molekülü tespit ettiğinde belirli proteinleri üretecek şekilde genetik düzenlemeler yoluyla programlandı. Bakteriler hedef molekülle etkileştiğinde

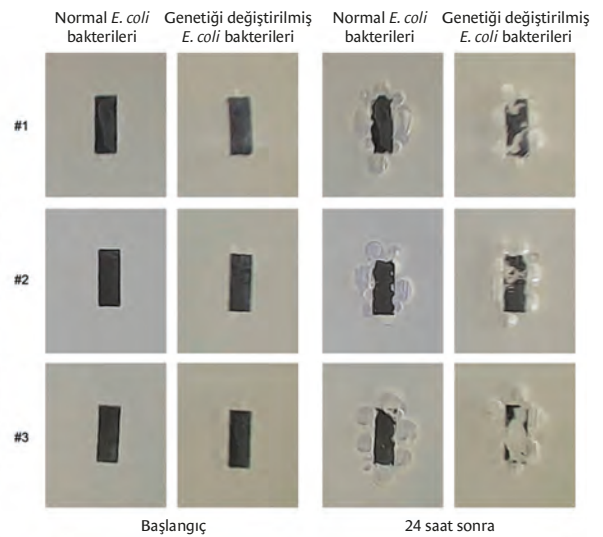
bu proteinler, bakteriden metal implantın yüzeyine doğru gerçekleşen elektron transferini hızlandırıyor. Bu süreçte metal yükseltgenerek hızlı ve kontrollü bir şekilde aşınıyor.

Vücudun dışına yerleştirilen harici bir anten radyo dalgaları yayıyor. Vücut içine yerleştirilen implant anten bu sinyalleri geri yansıtıyor. İmplant anten aşındıkça geri yansıttığı radyo dalgalarının frekansı da değişiyor. Vücut dışındaki anten bu sinyalleri kablosuz olarak algılayarak implantta meydana gelen değişimlerin dışarıdan izlenmesine olanak sağlıyor. Araştırmanın en önemli yanlarından biri *E. coli* bakterilerine elektronik bir bileşen gibi davranabilme özelliğinin kazandırılmış olması.

Normal şartlarda *E. coli* bakterileri metal yüzeylerle



6 farklı kaptaki bulunan magnezyum örnekleri



Genetiği değiştirilmiş *E. coli* bakterileri normal *E. coli* bakterilerine göre magnezyum şeritleri çok daha hızlı bir şekilde aşındırıyor.



çoğunlukla etkileşime girmez. Ancak elektroaktif bakteri olarak isimlendirilen bazı bakteriler çevreleri ile elektron alışverişi yapmalarına imkân veren proteinlere sahiptir. Bu çalışmada bu tür bakterilerden alınan bazı genler *E. coli*'ye aktarıldı. Böylece bakteri hedef molekülü algıladığında elektron transferinden sorumlu proteinleri üretebildi ve bakteriden metal yüzeye doğru gerçekleşen elektron transferi hızlandı. Normal *E. coli* bakterileri ile metal yüzeyin aşınması neredeyse 14 saat sürerken genetiği değiştirilmiş *E. coli* bakterileri ile bu süreç yaklaşık 8 saat sürdü. Ayrıca yapılan testler, sensörün gerçek insan dokusunun elektriksel özelliklerini taklit eden kas dokusu benzeri ortamda 25 milimetre derinlikte,

kablosuz olarak moleküler düzeyde algılama yapabildiğini gösterdi. Üstelik implant antenin maksimum algılama derinliğini belirlemek için yapılan testlerde sinyalin yaklaşık 55 milimetre derinlikten bile algılanabildiği anlaşıldı.

İmplant sensörlerin en büyük sorunlarından biri pil ihtiyacıdır. İmplant sensörlerde kullanılan piller sistemin boyutunu büyütür, kullanım süresini sınırlar ve cerrahi müdahale ile vücuda yerleştirilmelerini gerektirebilir. Ayrıca vücudun karmaşık ve değişken biyolojik ortamında uzun süre stabil bir şekilde çalışmaları zordur. Geliştirilen yeni sistemde ise implant sensörler aktif bir güç kaynağına ya da pile ihtiyaç duymuyor.

Araştırmacılar geliştirdikleri sistemin biyouyumluluğunu (sistemin vücutta olumsuz bir biyolojik tepkiye yol açmaması) artırmak amacıyla biyolojik temelli yüzey kaplamaları geliştirmeyi planlıyor. Bu sayede implant sensörün vücut tarafından yabancı bir etken olarak algılanarak bağışıklık sistemini tetikleme olasılığı azalabilir.

Araştırma, vücut içi sensör teknolojilerine yeni bir yaklaşım getiriyor. Gelecekte farklı moleküllere duyarlı olacak şekilde programlanabilen bakteriler sayesinde pek çok hastalığın belirteci olan moleküllerin vücutta bulunup bulunmadığının sürekli ve gerçek zamanlı olarak izlenmesi mümkün olabilir. Bu sayede bir ilacın vücutta hedef dokuya ulaşip ulaşmadığı, bakterilerin ileteceği sinyallerle anlık olarak takip edilebilir ya da bu tür sensörler ameliyat sonrasında cerrahi müdahalenin yapıldığı bölgeye yerleştirilerek bir enfeksiyonun oluşup oluşmadığını henüz semptomlar ortaya çıkmadan doktorlara bildirebilir. ■

Kaynak

<https://www.nature.com/articles/s41467-025-65416-5#Sec1>