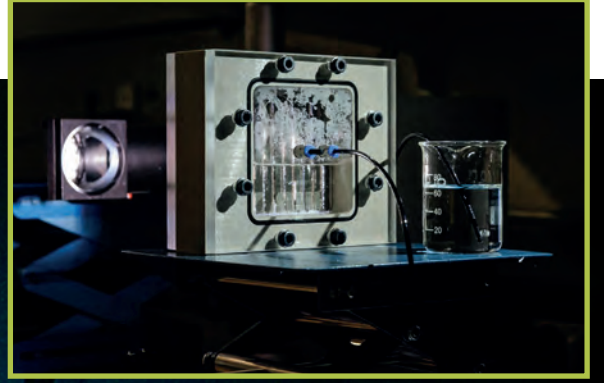
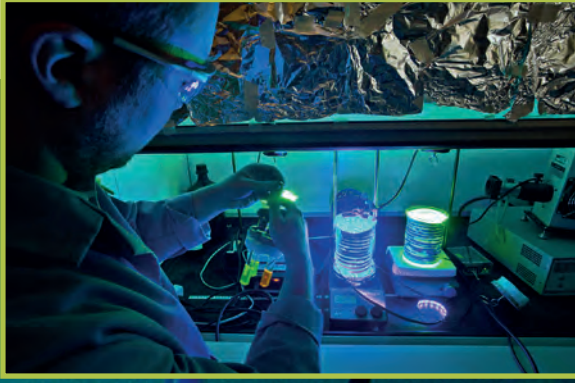


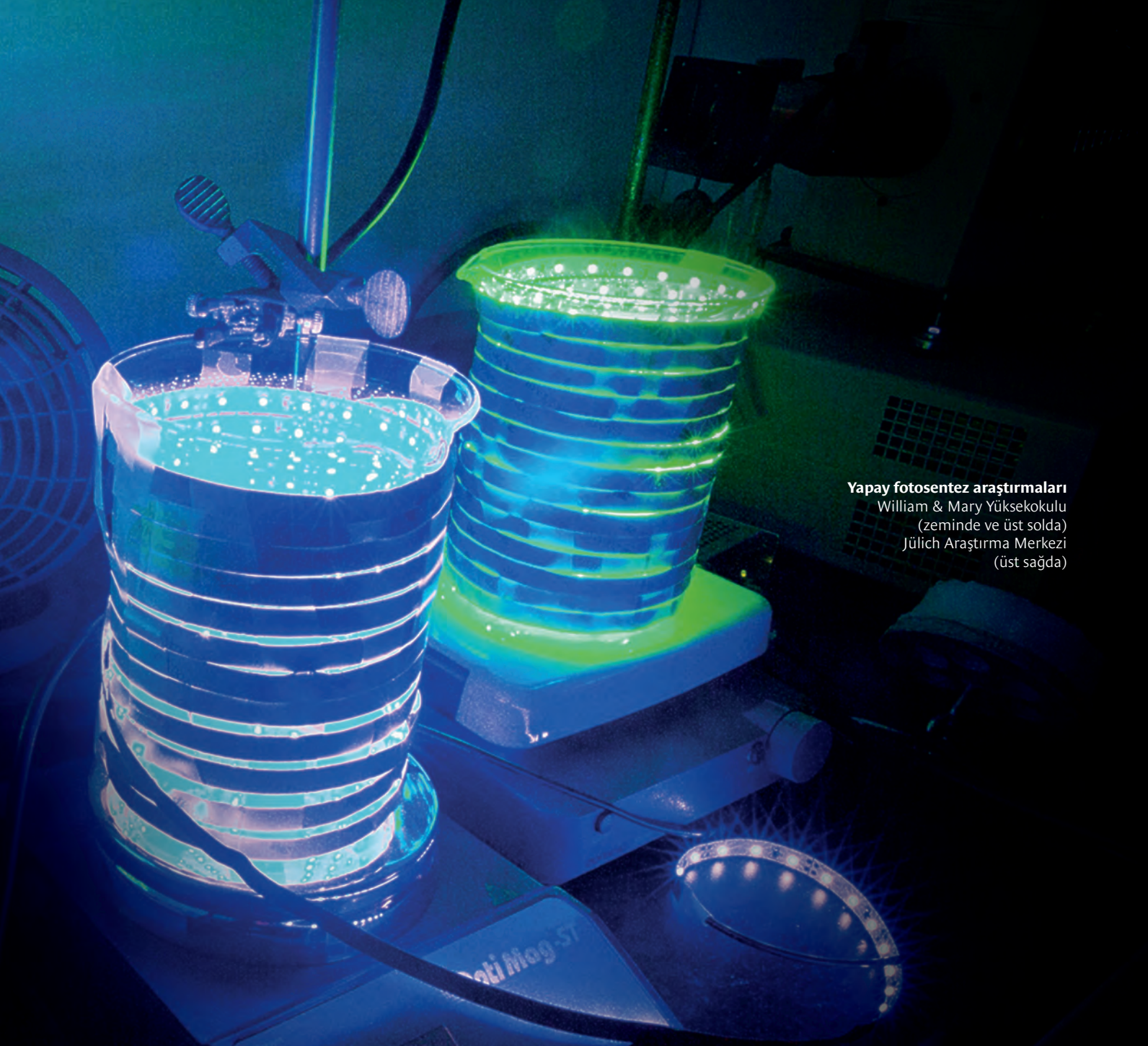
Fotosentezi Sadece Bitkiler mi Yapar?

Dr. Tuncay Baydemir [TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi

Bitkilerde ve bazı organizmalarda kusursuz şekilde gerçekleşen kendi yakıtını hazırlama ve bu işi çevreci bir şekilde gerçekleştirme yeteneğinden ilham alınması yeni bir araştırma sahasının doğmasını sağladı.



Yapay fotosentez araştırmaları
William & Mary Yüksekokulu
(zeminde ve üst solda)
Jlich Araştırma Merkezi
(st sağda)



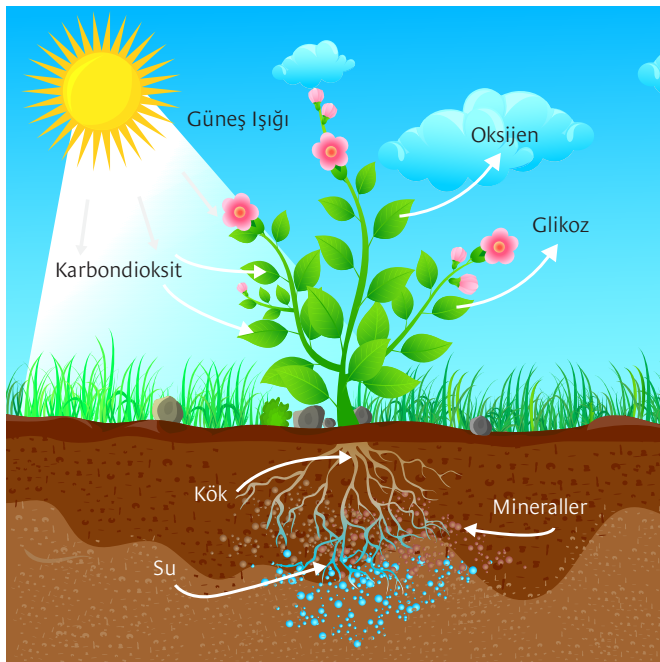
Bilim insanları uzun zamandır enerji elde etmek için etkili ve çevreci alternatifler arıyor. Bu amaçla yapılan araştırmalardan biri de sahip olduğumuz teknolojileri ışık hasadını çok başarılı bir şekilde gerçekleştiren canlıların doğal teknolojileriyle birleştirmek.

Yeşil bitkiler ve bazı organizmalar tarafından ışık enerjisinin kimyasal enerjiye dönüştürülmesi süreci olarak tanımlanan fotosentez, canlılar için gerekli olan enerjinin sağlandığı önemli bir süreçtir. Karbonhidrat moleküllerinde depolanan kimyasal enerji ihtiyaç duyulduğunda kullanılması için canlının çeşitli kısımlarına transfer edilir.

Yapraklar güneş ışığı ve karbondioksit kullanarak mükemmel bir işlem süreci ile kimyasal enerji elde edebiliyor. Bilim insanları da benzer süreçleri yapay olarak geliştirerek temiz enerji elde etmeye çalışıyor. Bu süreç aslında çok da kolay sayılmaz. Ancak bu zorlu süreç başarıyla gerçekleştirilebilirse hidrojen yakıtı ve sıvı hidrokarbon elde edilebiliyor.

Atmosferdeki oksijenin tamamına yakını fotosentez yapan organizmalar tarafından sağlanıyor. Her yıl fotosentez süreçleri sonucunda yaklaşık 176 milyar ton karbonhidrat üretiliyor. Doğada her an gerçekleşen bu süreçten ilham alınarak yapılan çalışmaların en önemlisi ve şimdiye kadar en çok ilerleme kaydedilene yapay yaprak ile ilgili araştırmalar.

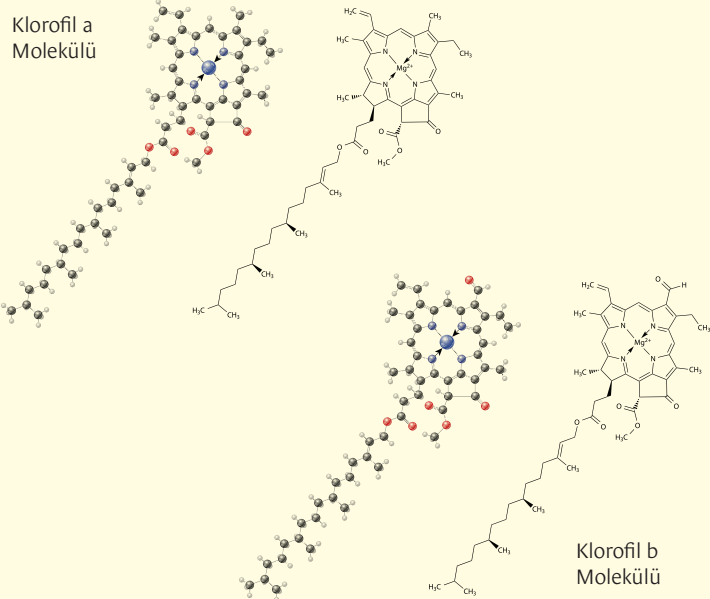
Bitkilerde gerçekleşen fotosentez sürecinin şematik gösterimi



Fotosentez, biyolojik sistemlerin Güneş'ten enerji almasını ve bu enerjiyi besin ve yakıt üretmek için kullanmasını sağlar. Bu süreçteki verimlilik oranı çoğu bitkide %1'den azdır. Doğada düşük oranlarda gerçekleşen bu dönüşüm, fotosentez sistemlerinin daha verimli hale gelecek şekilde geliştirilmesi için bilim insanlarını motive ediyor.

Fotosentez gerçekleşirken klorofil moleküllerine sahip canlılar bu moleküller sayesinde çeşitli dalga boylarındaki güneş ışığını soğurur. En yoğun mavi ışığı, daha düşük bir oranda da kırmızı ışığı soğurup elektromanyetik tayfin yeşil ve yeşil tonlarına karşılık gelen dalga boylarının neredeyse tümünü yansıttıkları için klorofil içeren canlılar yeşil görünür.

Karmaşık bir yapısı olan klorofil molekülü ve türleri (molekülün kimyasal grupları farklıdır ve a, b, c1, c2, d, f adı verilen türleri vardır) genel olarak uzun bir hidrokarbon kuyruktan ve merkezinde magnezyum iyonu bulunan hidrofilik (su seven) bir baş kısımdan oluşur. Baş ve kuyruk kısmı birbirlerine ester bağı ile bağlıdır.



Yapay Yaprak Sistemleri Sahnede

İtalyan kimyager Giamoco Ciamician 1912'de *Science*'ta yayınladığı makalede Güneş'in enerjisinin hasat edilmesiyle yakıt elde edilebileceğini vurgulamış. Günümüzdeki gelişmelerle güneş enerjisinden %15-%20 oranında verimlilikle elektrik enerjisi elde edebiliyoruz. Çoğu bitkide bu dönüşüm oranı %1 civarında olmakla birlikte bazı bitkilerdeki en yüksek oran %4,5. Bitkilerde ve fotosentez sistemlerinde öne çıkan nokta ise elde edilen enerjinin yüklü parçacıklar olarak değil de kimyasal bağlar olarak depolanması, yani yakıt üretilmesi. Yakıtlar da bataryalardan daha fazla enerji depolayabiliyor. Elektrik üretiminde güneş ışınlarının her zaman aynı şekilde panellere ulaşmaması, enerjiyi depolamak için pahalı ve ağır bataryaların kullanılması ve sürekli şarj döngüsünde bu bataryaların etkinliklerinin azalması mevcut sistemlerin eksi yönleri arasında.

Güneş enerjisini etkili bir şekilde kullanma çalışmalarını uzun zaman öncesine dayanıyor. Aslında güneş enerjisini etkili bir biçimde kimyasal enerjiye dönüştürebilen canlılardan ilham alınması çok da mantık dışı değil. Güneş enerjisi toplama teknolojilerimizi canlıların fotosentez gerçekleştirme yetenekleriyle birleştirmek iyi bir yol gibi görünüyor. Arizona Üniversitesi'nden profesör Thomas Moore'un belirttiği gibi "doğa kimya biliyor, insanlar da elektrik üretmeyi".

Yapay fotosentez çalışmalarının öncülerinden, Harvard Üniversitesi profesörü Daniel G. Nocera 2011'de ekibi ile birlikte hayli basit ve ucuz sayılabilecek bir yapay yaprak sistemi geliştirdi. Bu sistem güneş enerjisini kullanarak katalizör emdirilmiş silikon plakalar aracılığı ile suyu oksijene ve hidrojene ayrıştırıyordu. Oluşan bu gazlar baloncuklar olarak gözlenebiliyordu. Bu gibi sistemlerle elde edilen hidrojen gazı basınç tanklarında ve yakıt hücrelerinde kolayca depolanabilir.

Yapay yaprak sistemlerinin çalışması üç temel sistem üzerine kurulu. Birinci sistem güneş ışığını yakalama görevini yerine getiriyor. İkinci sistem etkili bir şekilde toplanan güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürüyor. Üçüncü sistem ise su moleküllerini oksijene ve hidrojene ayırmak için elde edilen elektrik yükünü kullanıyor.

Glasgow Üniversitesi'nden profesör Richard Cogdell, güneş enerjisini sıvı yakıt haline getirebilecek yapay bir

"yaprak" yaratmak için sentetik biyoloji yaklaşımı kullanmayı benimseyenlerden. Cogdell'e göre Güneş, enerjisini bize karşılık beklemeden sunar ancak bu enerjiyi kullanmanın bazı zorlukları vardır. Elektrik enerjisi elde etmek için güneş panelleri kullanılabilir ancak elde edilen enerji miktarı Güneş'in konumuna göre değişebilir, yeterince verimli olmayabilir ve elde edilen enerjiyi depolamak da zor olabilir. Yapılmaya çalışılan ise güneş enerjisini daha etkin bir şekilde yakalayıp ihtiyaç anında kullanmak için depolamak.

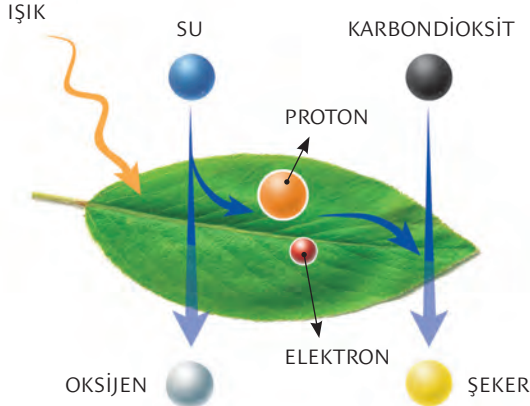
Örneğin Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü tarafından üretilen 1 cm² yüzey alanına sahip prototip, 40 saat süreyle %10 verimlilikle çalışıyor ve saniye başına 0,8 mikrolitre hidrojen üretiliyor (<https://www.youtube.com/watch?v=mul7rLCZbCO> bağlantısından prototipin çalışmasını izleyebilirsiniz). Kullanılan katalizörlerin kolay bulunabilen maddelerden olması da bu işlemi mantıklı kılıyor. Güneş enerjisinden elektrik üretimi oturmuş bir endüstri olarak kabul edilse de, enerjinin hidrojen olarak depolanması hem kullanım hem de depolama kolaylığı göz önünde bulundurulduğunda daha tercih edilebilir görünüyor. Kararlı bir kimyasal olarak depolanabilen hidrojen yakıtları bozulmaya dayanıklı, yüksek enerji yoğunluklu ve kolayca transfer edilebilir olmaları yüzünden daha fazla tercih ediliyor.

Yunanca *klorofil* "yeşil yaprak" anlamına gelir.

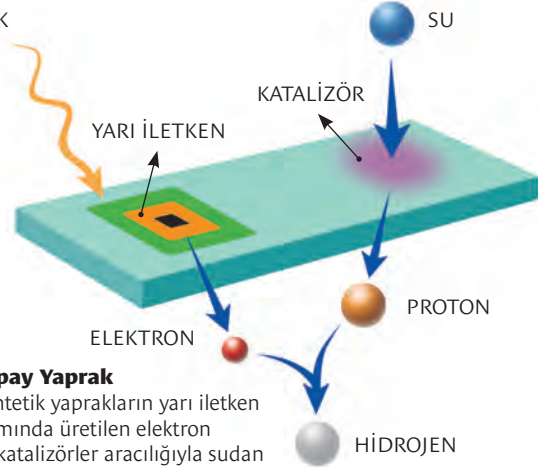


Doğal Yaprak

Güneş ışığı altında bitkiler su ve karbondioksit varken enzimler eşliğinde oksijen ve şeker üretir.



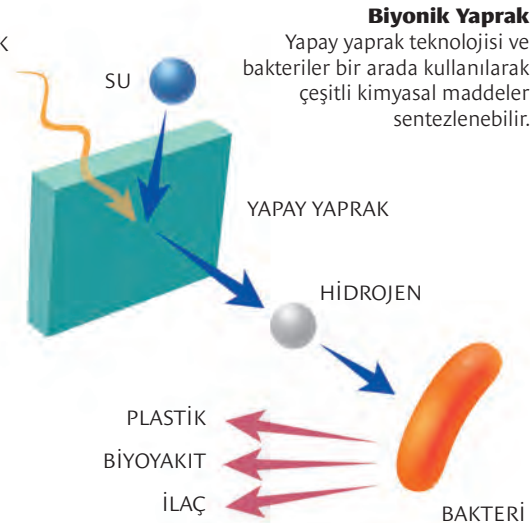
IŞIK



Yapay Yaprak

Sentetik yaprakların yarı iletken kısmında üretilen elektron ve katalizörler aracılığıyla sudan elde edilen proton, hidrojen oluşturmak için kullanılır.

IŞIK



Biyonik Yaprak

Yapay yaprak teknolojisi ve bakteriler bir arada kullanılarak çeşitli kimyasal maddeler sentezlenebilir.

Bir Adım Ötesi

Nocera'nın araştırmaları temiz enerji elde etmek için hayli ilgi çekici olmasına rağmen insanlığın beklediği enerji devrimi için yeterli değildi. Bunun başlıca sebebi ise hidrojen den elektrik üretiminin az bulunan metal katalizörler yoluyla gerçekleştirilebilmesi ve pahalı olmasıydı. Dünyanın karbon temelli yakıt kullanmaktan vazgeçmesi için bu çalışmalardan daha fazlasına ihtiyaç olduğu açık.

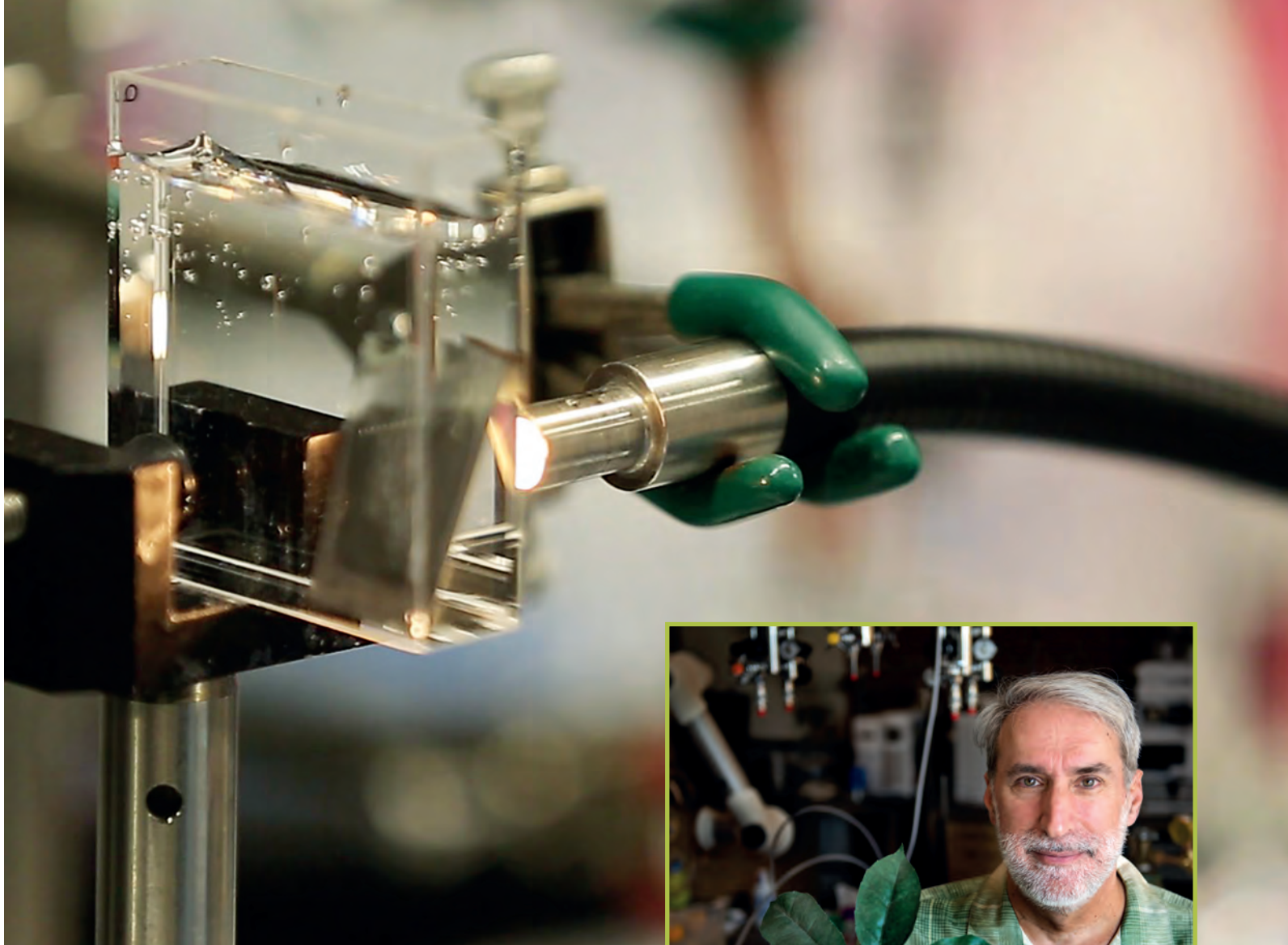
Bitkilerde ise bu sorun yok. Hasat edilen güneş enerjisi sindirilebilir yakıt olarak depolanıyor. Burada asıl üzerinde durulması gereken soru şu: Güneş enerjisi kullanarak elektrik üretebiliyoruz ancak etkili bir şekilde yakıt üretebilir miyiz?

Bitkilerdeki doğal süreçlerden ilhamla günümüz teknolojisini geliştirerek bu soruya olumlu yanıt vermek mümkün.

Nocera ve ekibi bu soruya yanıt arayan ilk araştırmacılar. Daha önceden geliştirdikleri yapay yaprak ile bir toprak bakterisi olan *Ralstonia eutropha*'yı birlikte kullandılar. Bu işbirliği sonucunda ilk aşamada üretilen hidrojen, karbondioksit eşliğinde bakteriyi beslemek için kullanıldı ve sonuçta bakteri hücreleri biyoyakıt salgıladı. Sistem kısa süre de olsa başarıyla çalıştı. Çünkü kullanılan katalizör aynı zamanda reaktif oksijen atomları da üretiyor ve bu da bakterinin biyokimyasal yapısını bozarak ölmesine sebep oluyordu.

Kaliforniya Üniversitesi, Berkeley'de profesör olan ve yapay fotosentez araştırmalarının öncülerinden sayılan Çinli araştırmacı Peidong Yang, elektrik yüklü silikon kabloları canlı organizmalar üzerinde kullanarak aslında yeni bir sürdürülebilir enerji kaynağının var olduğunu gösterdi. Araştırmasında, çok uygulanabilir görünmese de bazı organizmaların elektrik akımında haftalarca hayatta kalmayı başardığını gözlemledi. Böylece doğal bir kaynak olan güneş enerjisinin hepimiz için ucuz ve çevreci bir enerji kaynağı haline gelmesinin yolu da açılmış oldu.

İlerleyen süreçte, Nocera ve Harvard Üniversitesi'nden çalışma arkadaşı Pamela Silver karşılaştıkları problemi çözmek için seçtikleri ve geliştirdikleri bakteriyle uyumlu çalışan yeni bir katalizör kullandı. Ayrıca kullandıkları yapay yaprağı öncekinden daha ucuz ve daha verimli hale getirmeyi başardılar. Ekip bir katalizör çifti kullanarak



Dr. Daniel G. Nocera (sağda) ve ekibinin geliştirdiği yapay yaprak (üstte)

suyu oksijen ve hidrojene ayrıştırdı ve elde edilen hidrojeni karbondioksit eşliğinde bakterileri beslemek için kullandı. Nocera ve Silver'in çalışmasında %10 verimlilik elde edildi, diğer bir ifadeyle güneş enerjisinin onda birlik kısmı yakıt dönüşüm sürecinde kullanıldı. Bu oran doğal fotosentez süreçlerindeki değerlerin hayli üzerindedir.

Biyomühendislik süreçleri sayesinde geliştirilmiş bakteriler aracılığı ile farklı sıvı yakıtlar sentezlenebiliyor. Nocera ve arkadaşları yeni katalizör sistemleri ve genetiği değiştirilmiş bakteriler kullanarak yakıt olarak izobütanol ve izopentanol de elde etmeyi başardı.

Bu başarıların elde edildiği sırada Yang da çalışmalarına farklı bir yönde devam etti. Bakterileri hidrojen yerine saf elektronla beslemek istiyordu. Bazı bakteri türleri saf elektrik varlığında yaşayabilir. Örneğin *Geobacter* türleri elektronları alıp bazı kimyasal tepkimeleri gerçekleştirirken kullanır.



Yang ve ekibi, 2013'te başladıkları araştırmalarda bazı bakteri türlerinin ışık hasadı yapan silikon nano tellerin içinde çoğaltılabileceğini gösterdi. Daha sonra bu nano teller aracılığıyla bakterilere elektron transferi yapıldı. Bakteriler gösterdikleri mükemmel uyum sayesinde elektronları kullanarak karbondioksit, su ve sıvı yakıt (asetat) üretti.

Bir sonraki aşamada ise *Moorella thermoacetica* bakterisi (doğal süreçlerle asetat üretebilen bir bakteri) ve bazı kimyasallar kullanarak bakterilere ışığı soğurma yetisi kazandıran bir ceket oluşturduklarını bildiren Yang ve ekibi geliştirdikleri bu sistemin kendini yenileyen, güneş enerjili bir yakıt fabrikası olduğunu belirtti.

Sürdürülebilirlik ve Uygulanabilirlik

Düşünülmesi gereken ana konulardan en önemlisi ise sürdürülebilirlik. Şimdiye kadar yapılan araştırmalarda bakterilerin yaşam süreci haftalar ile ölçülebiliyordu. Bu da Yang ve ekibini bakterilerin biyokimyasını anlamaya yönlendirdi. Detayları anladıkça %2,5 olan verimlilik oranını da artırmayı hedefliyorlar.

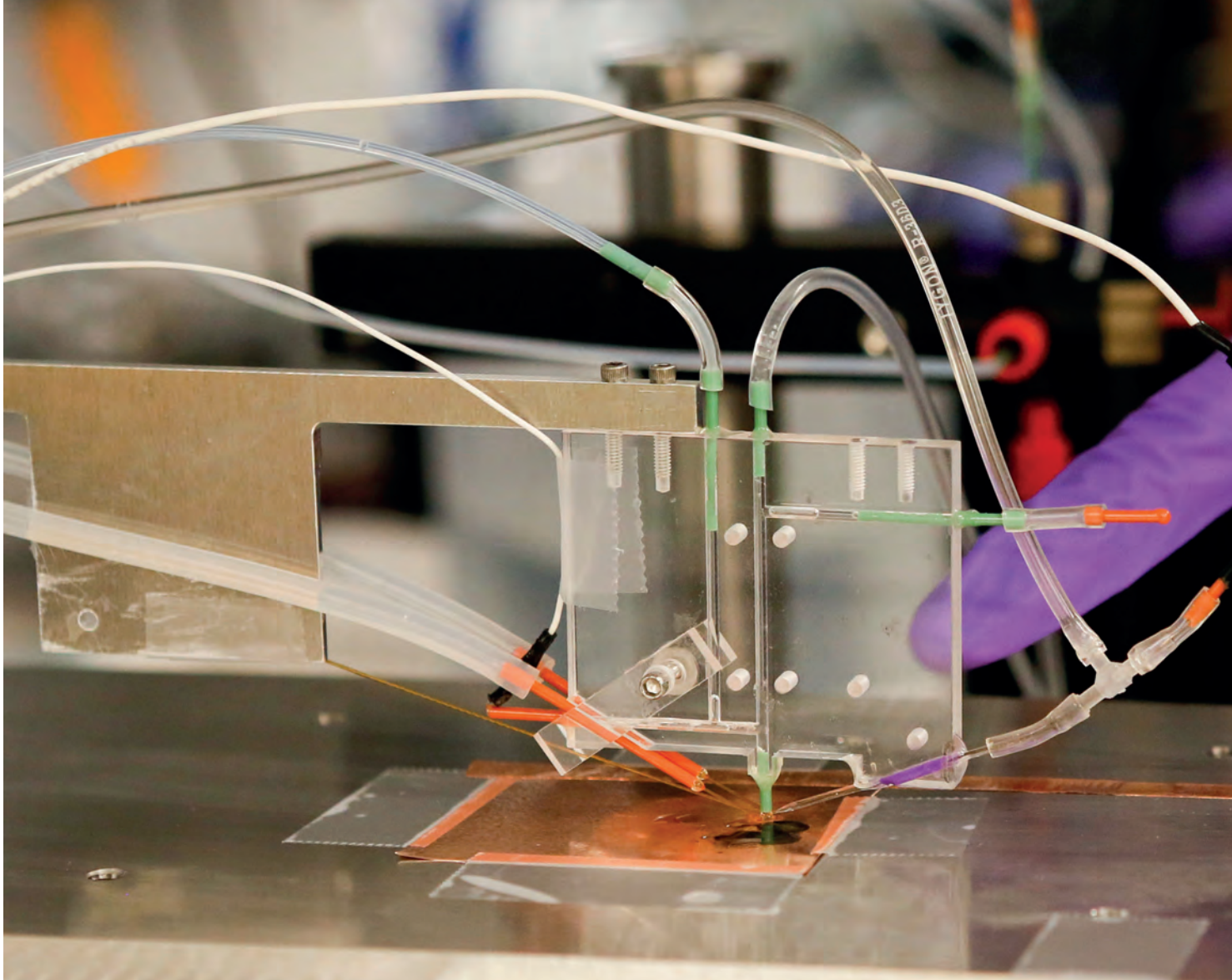
Diğer tarafta ise Nocera ve ekibi geliştirdikleri yapay yaprak sistem reaktörü prototipini Hindistan'da denemeyi planlıyor. Alınacak sonuçlara göre bazı sorulara cevap bulmayı umuyorlar.

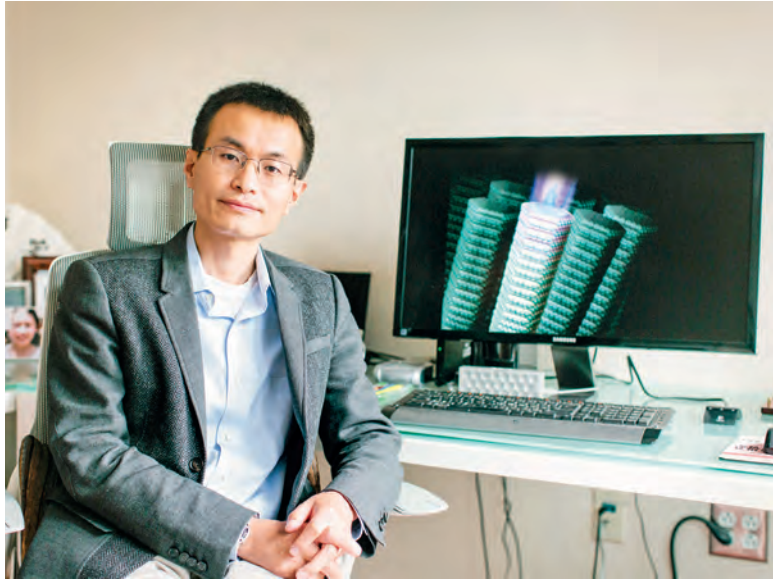
Başka Kazanımlar

Konu sadece enerji elde etmek ile sınırlı kalmıyor. Oluşturulan yapay yaprak sistemleri aslında enzimler ve biyolojik makineler içeren özel tasarımlar. Her biri farklı kimyasal dönüşümler gerçekleştirmek üzere tasarlanabilir. Burada amaç karmaşık kimyasal süreçleri basite indirmek.

Bunun bir örneği olarak amonyak üretimini gösterebiliriz. 2016'da tüm dünyada amonyak kullanımı 166 milyon ton civarındaydı. Amonyak üretim sürecinde karbondioksit salımı gerçekleşir. Colorado Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı'nda araştırmacı olan Paul King, amonyak sentezini güneş ışığı ve bakteri kullanarak gerçekleştirdi. Hatta bir sonraki adımda sistemi sadece enzimler aracılığı ile çalışacak şekilde geliştirdi.

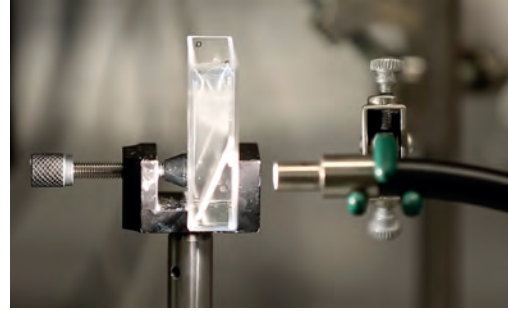
Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü'ndeki yapay fotosentez çalışmaları





Peidong Yang

Sürdürülebilir olan ve kendini yenileyen bu üretim bantlarıyla yakıt dışında plastik malzemeler ve ilaçlar da üretilebilir. Yang ve ekibi NASA tarafından desteklenen projelerinde astronotlar için uzayda gerekli olan yakıtı, oksijeni ve kimyasalları canlı organizmalar kullanarak sentezleyebilecek bir sistem üzerinde çalışmalarını sürdürüyor. Ayrıca farklı türdeki mini fabrikaları bir arada kullanarak çalışma programını kendi kendine ayarlayabilen sistemler üzerinde de çalışıyorlar.



Güneş enerjisinin etkin bir şekilde kullanılması için araştırmacılar yeni tasarımlar üzerinde çalışmaya devam ediyor. Çevreci, maliyeti düşük, sürdürülebilir ve verimli sistemler için daha fazla araştırma yapılması gerekiyor. Şimdiye kadar gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilen başarılı sonuçlar, enerji sorunumuza ve fosil yakıtlara bağımlılığımıza çevreci çözümler bulunması açısından ümit verici. Enerji dışındaki üretim çeşitliliğinin farklı kimyasal süreçler kullanılarak artırılmasına yönelik araştırmaların fazladan getirileri olacak gibi görünüyor. ■

Kaynaklar

Azvolinsky, A., "Make like a leaf", *New Scientist*, s. 28-31, 15 Nisan 2017.

Chong, L., Brendan, C. C., Ziesack, M., Silver, A. S., Nocera, D. G., "Water splitting-biosynthetic system with CO₂ reduction efficiencies exceeding photosynthesis", *Science*, Cilt 352, Sayı 6290, s. 1210-1213, Haziran 2016.

Sakimoto, K. K., Wong, A. B., Yang, P., "Self-photosensitization of nonphotosynthetic bacteria for solar to chemical production", *Science*, Cilt 351, Sayı 6268, s. 74-77, Haziran 2016.

<https://www.sciencedaily.com/releases/2012/02/120217145755.htm>

<http://sciencing.com/type-energy-produced-photosynthesis-5558184.html>

<http://spectrum.ieee.org/energywise/energy/renewables/artificial-leaf-is-ten-times-better-at-generating-hydrogen-from-sunlight>

<https://www.technologyreview.com/s/601641/a-big-leap-for-an-artificial-leaf/>

<https://phys.org/news/2017-05-explores-artificial-leaf-solar-fuel.html>

http://www.biosolarcells.nl/en/onderzoek/kunstatmige_bladeren/