

YENİ BİNYIL İÇİN YENİLENEBİLİR, TEMİZ HİDROJEN



Hidrojen, tüm yakıtlar içinde en temizini. Atmosfer’de yandığında, oksijenle birleşerek enerji açığa çıkarıyor. Bu

süreçte yan ürün olaraksa, karbondioksit gibi kirlilik yapıcı gazlar değil, yalnızca su açığa çıkıyor. Günümüzde,

yakıt hücreleri, melez otomobiller ve yenilenebilir hidrojen üretim teknolojilerinin birbirine yaklaşmasıyla hidrojenin değeri de arttı. Yakın bir zamana kadar bu bulmacanın eksik parçası, temiz ve yenilenebilir bir hidrojen kaynağıydı: “biyolojik hidrojen”. Bugün dünyanın çeşitli yerlerindeki laboratuvarlarda, araştırmacılar, tarımsal ürün atıklarındaki selülozu sindiren bakteriler ya da fotosentez yapan mikroorganizmalar yardımıyla, temiz hidrojen enerjisi üretimi üzerinde çalışıyorlar. Aslında, Güneş enerjisi kullanan mikroorganizmalar aracılığıyla suyu hidrojen ve oksijene ayırarak hidrojen elde etmek, araştırmacıların çeyrek asırdır gerçekleştirmeye çalıştığı bir düş.

Bu çalışmalar arasında en bilineni, California Üniversitesi’nden (Berkeley) Anastasios Melis’in, suyunun hidrojen üretiminde kullanıldığı “hid-

Biyolojik Hidrojen Üretimi ve Orta Doğu Teknik Üniversitesi’nde Yürütülen Çalışmalar

Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ), biyohidrojen üretimi konusunda araştırmaların yürütüldüğü sayılı kurumlardan biri. ODTÜ’deki Kimya Mühendisliği, Biyoloji, Biyoteknoloji ve Kimya bölümlerindeki kimi araştırmacılar tarafından oluşan “Biyohidrojen Araştırma Grubu”, 1990 yılından bu yana çalışmalarını sürdürüyor. Bu araştırmacılar arasında Ela Eroğlu, hidrojen enerjisiyle ilgili vizyonlarını, ülkemizdeki biyohidrojen çalışmalarını ve ODTÜ Biyohidrojen Araştırma Grubu’nun araştırmalarını Bilim ve Teknik için kaleme aldı:

Özellikle son yıllarda yaşanan hızlı nüfus artışı ve sanayileşmeye paralel olarak, Türkiye’de dahil olmak üzere pek çok ülkenin enerji ihtiyacında büyük bir artış gözleniyor. Güneş enerjisinin milyonlarca yıl boyunca depolanmasıyla oluşan fosil yakıtlar, halen uygulanan enerji dönüşüm sistemlerine bağlı olarak, oluşumundan çok daha kısa bir sürede tüketilmekte. Bu nedenle, tükenmekte olan fosil yakıtlarının yerini alabilecek temiz, yüksek ve-

rimli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının belirlenerek kullanılabilir duruma getirilmesi, uzun vadeli bir gereklilik olmaktan çıkarak acil bir ihtiyaç haline geldi. Önerilen çeşitli alternatifler arasında hidrojen, fosil yakıtlara dayalı teknolojinin ve yenilenebilir temiz enerji kaynaklarının uygulanmasını sağlayacak önemli bir kimyasal ve temiz bir enerji sistemi. Bunun yanı sıra tek yanma ürününün su olması, birim kütle başına yüksek enerji içermesi ve yakıt pilleri aracılığıyla doğrudan elektrik enerjisine çevrilmesi, hidrojeni geleceğin yakıtı haline getiriyor.

Günümüzde, endüstriyel boyuttaki hidrojen üretiminin tamamına yakını, hafif hidrokarbonların (örneğin, doğalgaz) parçalanmasıyla gerçekleştiriliyor. Hidrojenin yakıt olarak kullanılabilmesi içinse, ekonomik ve doğayla uyumlu bir üretim tekniği geliştirilmesi gerekiyor. Doğada bulunan anaerobik bakteriler, fotosentetik bakteriler ve alglerin (suynosunu) birçok türü, metabolizmaları-

nın gereği olarak hidrojen üretebiliyor. Bu üretim sürecinde kullanılan hammaddeler ve oluşan tüm ürün ve yan ürünler biyolojik çevrimin bir parçası olduğu için, üretim süreci doğaya zarar vermiyor. Fotosentetik bakteriler havasız ortamda ışığa maruz bırakıldığı zaman organik besinlerden hidrojen gazı üretebilir. Fotosentetik bakterilerin, çok çeşitli ortam koşullarında birçok değişik besin kaynağını kullanarak üreyebilmeleri, organik besinleri yüksek bir dönüşüm yüzdesiyle hidrojene dönüştürebilmeleri ve genetik müdahaleye uygun olmaları gibi bazı özellikleri, onları biyolojik hidrojen üretimi için uygun kılıyor. Fotosentetik bakterilerle hidrojen üretiminin ekonomik uygunluğunu arttırmak için, yüksek olan besin maliyetinin düşürülmesi ve hidrojen üretiminin hızının yükseltilmesi gerekiyor. Besin olarak atıksu kullanılmasıyla, hidrojen üretimine eşzamanlı olarak atıksu arıtımı, ekonomik değere sahip yan ürünlerin araştırılması, ve hidrojen üretim hızını etkileyen faktörlerin incelenme-

rojen tarlası” yöntemi. Bunun için, toprakta ve özellikle tatlısu havuzlarında sık rastlanan, *Chlamydomonas reinhardtii* adlı bir yeşil suyunu türü kullanılıyor.

1940’ların başında, ABD’deki Chicago Üniversitesi’nde çalışan Hans Gaffron adlı biliminsanı, bu suyunun zaman zaman oksijen üretiminden hidrojen üretimine geçtiğini gözlemiş, ancak bunun nedeninin bulamamıştı. Gerçekte bu, yeşil suyunun gücü zamanları atlatmak için başvurduğu bir strateji: böyle durumlarda, oksijen üretimiyle sonuçlanan normal fotosentezi durdurarak, hidrojen gazının üretildiği, alternatif bir yola başvuruyorlar. 1998 yılında, Melis, bunun, sülfüre bağlı olduğunu keşfetti. Suyosunları, büyümek için bu besine gereksinim duyarlar, ancak ortamda sülfür yoksa, sudaki oksijeni tüketmeye başlar, kısa sürede bu oksijeni de tüketirler ve son çarelerine başvururlar: İşte, Melis, sülfürden yoksun kaldıklarında, suyunun oksijen üretiminden hidrojen üretimine geçtiğini ve bundan da, “hidrojenaz” adlı bir enzimin sorumlu olduğunu gösterdi. Ancak, suyunları bu koşullarda yalnızca birkaç gün gibi kısa bir süreliğine hidrojen üretebiliyor. Daha sonra, normal fotosenteze geri dönmesi gerekiyor. Ayrıca, hidrojenaz, oksijenin varlığında etkinliğini gösteremiyor. Araştır-



Chlamydomonas reinhardtii (solda), biyolojide “model organizma” olarak da kullanılan bir suyunu türü. Araştırmacılar, bu suyunun genetik özelliklerinde yapılacak bazı değişiklikler sayesinde Güneş altında hidrojen üretebileceğini düşünüyorlar.



macılar, oksijene “dayanıklı”, hidrojen üretebilen mutant suyunları üzerinde de çalışıyorlar.

Araştırmalarda bugüne kadar gelinen noktada, araştırmacılar, yalnızca birkaç prototip oluşturabilmişler. Melis, ticari açıdan başarıyı yakalayabilmek için, hidrojen tarlalarının Güneş ışığından alınan enerjiyi % 10 verimlilikle hidrojene çevirmesi gerektiğini belirtiyor. Şu anda, araştırmacıların üzerinde çalıştığı suyunu kültürle elde edilen verimse % 0,1’den az. Suyosunlarının yüksek miktarda hidrojen üretmesini sağlayabilmek için, fotosentez süreçlerinin genetik olarak yeniden programlanması gerekiyor. Araştırmacılar, bunun için de birkaç farklı yaklaşım üzerinde çalışıyorlar.

Melis ve arkadaşlarının hedefi, genetik özelliklerinde yapılacak bazı de-

ğişiklikler sayesinde, suyunun güneş altında hidrojen üretmelerini sağlamak. Kurulacak “hidrojen tarlaları”ndan elde edilecek hidrojenin, otomobillerde ve öteki taşıtlarda kullanılabileceğini öngörüyorlar. Suyosunlarının hidrojen üretiminde kullanılması, iki adımdan oluşuyor. Önce, suyunları büyütülüyor; yani bitkiler fotosentez yapıyor, karbonhidrat ve öteki yakıtları depoluyorlar. Daha sonra, yeşil renkli bir sıvı görünümündeki suyunu kültürü, içinde sülfür bulunmayan, birer litrelik, ağzı kapalı cam şişelere aktarıyor. Kültürün şişedeki tüm oksijeni tüketmesine izin veriliyor. Yaklaşık 24 saat sonra, fotosentez ve normal solunum duruyor, şişelerin üst bölümünde, hidrojen baloncukları oluşuyor. Ortaya çıkan hidrojen, ince borular yardımıyla toplanıyor.

siyse, bu sorunların aşılmasına yönelik yapılan çalışmalardan bazıları.

Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Kimya Mühendisliği, Biyoloji, Biyoteknoloji ve Kimya bölümlerindeki araştırmacılar tarafından oluşturulan Biyohidrojen Araştırma Grubu, 1990 yılından bu yana biyolojik hidrojen üretimine yönelik çalışmalarını sürdürüyor. ODTÜ-Biyohidrojen Araştırma Grubu tarafından yürütülen çeşitli çalışmalarda şeker, süt ve zeytin fabrikası atıksuyu (karasu) gibi bazı endüstriyel ve tarımsal atıkların hidrojen üreten mikroorganizmalar tarafından karbon kaynağı olarak kullanılması incelendi. Özellikle, ilk defa karasuyun kullanılmasıyla gerçekleştirilmiş olan hidrojen üretim sonuçlarına göre, Türkiye gibi, tarımda zeytinliğin önemli bir yer teşkil ettiği ülkelerde, karasuyun hidrojen üretimi amacıyla değerlendirilmesinin ekonomik boyuta ek olarak, çevresel açıdan da pek çok fayda sağlayacağı görüldü. Bu çalışmaların yanı sıra, hidrojen üretimini etkileyen sıcaklık, pH ve ışık yoğunluğu gibi dış faktörlerin belirlenmesiyle, fotosentetik bakterilerin hidrojen üretim mekanizmasını belirlemeye yönelik araştırmalar da yürütüyoruz. Hidrojen üretim verimini arttırmaya yönelik bir diğer çalışma ise güneş ışığı altında, büyük ölçekli reaktörlerde hidrojen üre-

timi. Ayrıca, TÜBİTAK Gen Mühendisliği ve Biyoteknoloji Araştırma Grubu (GMBAE) ve Pennsylvania Üniversitesi’yle işbirliği içinde, mikroorganizmaların fotosentez verimini arttırmaya yönelik genetik çalışmalar yapılmakta. Bu araştırmalar, 2000-2005 yılları arasında Avrupa Birliği COST-841 Aksiyonu’na dahil olan 12 Avrupa ülkesi ile işbirliği halinde bulunularak gerçekleştirildi. 2005 yılının Temmuz ayında, İstanbul’da düzenlenen Uluslararası Hidrojen Enerjisi Kongresi’ne (IHEC-2005) paralel olarak biyohidrojen konferansı gerçekleştirildi ve bu konferansa, Anastosios Melis ve Paulette M. Vignais gibi biyohidrojen konusunda çok önemli katkıları olan bilimadamları davetli konuşmacı olarak katıldılar.

Hidrojen enerjisi, Avrupa Komisyonu Altıncı Çerçeve Programı’nın, “Sürdürülebilir Kalkınma ve Ekosistem-Sürdürülebilir Enerji Sistemleri” tematik alanında da önceliğe sahip. Bu program dahilinde, 2006 yılının Ocak ayında başlatılan ve beş yıl boyunca sürecek olan “HYVOLUTION” kısa adlı ve “Isıl işlem yapılmadan saf hidrojen gazı üretimi” başlıklı biyohidrojen projesi desteklenmeye başlandı. Bu projede, 10 Avrupa Birliği ülkesi, Türkiye ve Rusya yer alıyor. Türkiye’den ODTÜ Biyohidrojen Araştırma Grubu, fotosentetik bakterilerle hidrojen üretimi teknolojisinin geliştirilmesinde önemli bir rol üstleniyor. Belirtilen bu proje kapsamında, hızlı büyüyen enerji bitkilerinin tarım sahalarında üretiminin yanı sıra, biyokütle, ön işlemden geçirilerek bakteriyel besin kaynağı olarak hazırlanması, anaerobik (havasız) fermentasyon, ve ardından fotosentetik hidrojen üretim süreçlerine tabi tutularak hidrojen eldesi ve gazlaştırılması hedeflenmekte. Bu teknoloji gerçekleştirildiğinde, ülkemiz gibi, tarım bitkileri ve güneş alma kapasitesi yeterli miktarda olan ülkelerin enerji üretimi ve ülke ekonomilerine önemli katkısı bulunacağı bekleniyor.

Hidrojen üretim hızının artırılması, en verimli ve ekonomik besin kaynaklarının sağlanması, uygun depolama ve yakıt pili sistemlerinin geliştirilmesi gibi mevcut sorunların çözümü gerçekleştirildiği zaman, 21. yüzyılın en büyük devrimi olacağı düşünülen hidrojen enerji sistemi sayesinde, merkeze bağımlı enerji dağıtımından ortadan kaldırılarak enerjiye anında kavuşma olanağı sunulacaktır.

Ela Eroğlu
Araştırma Görevlisi, ODTÜ,
Kimya Mühendisliği Bölümü
eeroглу@metu.edu.tr

Hidrojen Üretim Süreçleri:	Nasıl Yapılıyor?	Neden Tercih Edilebilir?	Ne Gerekliyor?
Kömür gazlaştırması	Kömür, sıcak subuharına tutulduğunda, hidrojen ve başka gazlara ayrılıyor.	Bunun için gereken teknoloji geliştirilmiş durumda.	Bu süreçte öteki gazların yanı sıra ortaya çıkan karbondioksitin yalıtılması ve atmosfere karışmasının önüne geçecek bir yöntem geliştirilmesi gerekiyor.
Termo-kimyasal yöntem	Yüksek ısıda, çeşitli kimyasal tepkimelerle sudaki hidrojen ve oksijen birbirinden ayrıştırılabilir.	Bunun için gereken ısı, Güneş enerjisi kullanılarak sağlanabilir.	Bu işte kullanılabilecek onlarca farklı tepkime arasından en uygununun bulunması gerekiyor.
Foto-elektro-kimyasal yöntem	Tek bir elektrot, güneş enerjisini soğurmada ve suyu elektroliz yöntemiyle bileşenlerine ayırma da kullanılıyor.	Güneş hücrelerinden elde edilen güçle çalışan elektrolizden daha verimli.	Bu iş için en elverişli, korozyona uğramayacak malzemelerin bulunması gerekiyor.
Biyokütle Fermentasyonu	Bu yöntemde, selülozu sindiren hidrogen üreten bazı bakteriler kullanılıyor.	Artık tarım ürünlerinde yüksek miktarlarda selüloz bulunuyor.	Sürecin verimli duruma getirilebilmesi için, bu işte kullanılacak bakterilerin bazı genetik özelliklerinin değiştirilmesi gerekiyor.
Hidrojen Tartası	Kültür ortamında yetiştirilen suyunları, Güneş ışığında hidrojen üretiyor.	Kimilerince, çevre dostu enerji üretiminde kullanılacak en son nokta olarak görülüyor.	Suyusunların fotosentez süreçlerinin genetik değişikliklerle yeniden düzenlenmesi gerekiyor.

Araştırmacılar, bu yolla elde edilecek hidrojenin, ABD'deki benzin kullanımının yerine geçebilmesi için, hidrojen tarlalarının 25.000 kilometrekairelik bir alana yayılmasının yeterli olabileceğini hesaplamışlar. Bunun, bugün ABD'de soya fasulyesi üretimi

ayrılan alanın onda biri kadar olduğunu belirtiyorlar. Üstelik, bu hidrojen tarlaları için en uygun yerler, gelecekteki tarım ürünlerinin ekiminin yapılmadığı, çöller gibi kavurucu sıcaklığa sahip alanlar olacak. Melis ve onunla aynı vizyonu paylaşan araştırmacılar başarılı olursa, önümüzdeki 20-30 yıl içinde, bu bir düş olmaktan çıkabilir. Dünyanın çeşitli yerlerindeki başka araştırma grupları da, bazı mikroorganizmaların genetik özelliklerinde ya da bu mikroorganizmaların kültür ortamlarında yapılacak değişikliklerle, ekonomik açıdan sürdürülebilir, çevre dostu hidrojen üretimi üzerinde çalışıyorlar. Öte yandan, ABD Enerji Bakanlığı'nın da, bu yöntemin ticari değerini artırma konusunda büyük yatırımlar yaptığı biliniyor. Araştırmacılar, suyu ayırtmada biyolojik yöntemin, güneş pili ve rüzgâr enerjisi kullanma yöntemleri gibi, başlıbaşına bir seçenek olduğunu; yarışı hangisinin kazanacağını şimdilik belli olmadığını söylüyorlar.

Aslı Zülâl

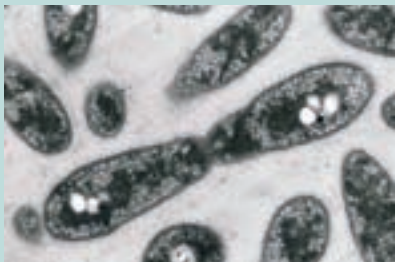
Kaynaklar
Kaiser, J. "Power From Pond Scum". Science, 3 Mart 2000.
Aldous, P. "Green Gold". New Scientist, 25 Şubat 2006.
<http://pmb.berkeley.edu/newPMB/faculty/melis/melis.shtml>

Hidrojen Üretiminde Biyolojik Sistemler

TÜBİTAK-Gen Mühendisliği ve Biyoteknoloji Araştırma Enstitüsü'nden Doç. Dr. Sevnur Mandacı, Dünyadaki ve kendi laboratuvarlarındaki hidrojen üretimi çalışmalarını Bilim ve Teknik için özetledi:

Günümüzde üretilen hidrojenin %90'ı fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Hidrojenin biyolojik yolla eldesi için C. reinhardtii, A. variabilis, Clostridium, Rhodospirillum rubrum gibi, genellikle tatlı ya da tuzlu sularda yaşayan yeşil alglerden, mavi-yeşil alglerden veya bakterilerden yararlanılıyor. Fotosentetik bakterilerin sunduğu avantajlar diğer organizmalarla karışmaları halinde kolayca belirlenemeleri, ayrıca hastalık yapıcı ya da zehirli olmamaları ve genetik çalışmalar için uygun canlılar olmaları. Hidrojenin biyolojik yolla elde edilmesi için gereken, ekonomik bir süreç haline getirilmesi. Bu yöntemle hidrojen üretiminde atıkların kullanılabilmesinin, yöntemi ekonomik yapması beklenmektedir.

Biyolojik yolla hidrojen üretiminde, üretime katılan enzimler ya da çevresel faktörler üretimi etkiliyor ve uygulamalı çalışmalar için verim henüz pek çok mikroorganizma için istenilen düzeyde değil. Üretimin artırılması, gelecekteki temel hedeflerden biri. Moleküler biyoloji ve gen



mühendisliği tekniklerinin gelişmesi, mikroorganizmaların da hidrojen üretme verimlerinin değişmesine olanak tanıyor. Bu nedenle artık hidrojen üretiminin artırılmasına yönelik de genetik çalışmalar yapılabiliyor. Moleküler hidrojen eldesinin en önemli hedeflerinden biri, genetik modifikasyonlarla ideal bir mikroorganizmanın elde edilmesi. Dünyada bir çok laboratuvar uygun genetik değişiklik için çaba sarf etmekte birlikte, literatürde sınırlı sayıda başarılı genetik çalışma görülüyor. Mikroorganizmalarla H₂ üretimi adına yapılması gereken genetik değişiklikler olarak; lignazların ve selülozların yüksek anlatımının sağlanması ve böylece daha fazla glikoz ile H₂ üretiminin başlatılması, metabolizmadaki hidrojen tüketen enzimlerin ortadan kaldırılması, H₂ üreten enzimlerin yüksek anlatımı ve onların oksijene dayanıklı formlarının elde edilmesi, hidrojen sentezi ile yarışan diğer indirgeyici metabolik yolların ortadan kaldırılması olarak sıralanabilir.

Ülkemizde başlatılan biyolojik yolla hidrojen üretimi konusundaki AR-GE çalışmalarına, TÜBİTAK-GMBAE'de -Moleküler Biyoenerjetik Laboratuvarı, mor sülfürsüz fotosentetik bakteri Rhodospirillum rubrum modelinde genetik çalışmalarla katıldı ve Rhodospirillum rubrum soyunda yapılan genetik müdahaleler ve hidrojen üretim ilişkisi TÜBİTAK- ODTÜ-ABD (Pennsylvania Üniversitesi) işbirliği ile incelendi. Genetik olarak değiştirilmiş mutant Rhodospirillum rubrum suşlarının hidrojen üretim

profilleri incelendiğinde elektron taşıyan sitokromlar ile hidrojen metabolizmasındaki etkileşim ve bu etkileşimde solunum enziminin ve hidrojen kullanan enzimlerin etkisizleştirilmesi sonucunda redoks sinyalinin hidrojen üretimini pozitif yönde etkileyerek çalıştığı ortaya kondu.

Biyolojik yolla hidrojen eldesi çevreyle barışık temiz teknolojinin tercih edildiği bir üretim şekli ve iyi bir alternatif enerji kaynağı üretim yöntemidir. Ucuz olarak biyolojik yolla moleküler hidrojen eldesi çalışmaları devam ediyor. Biyohidrojen üretiminin maliyetinin düşürülmesi gereğinden hareketle yapılabilecekler arasında; daha ucuz besi yerlerinin kullanılması (atıksu vb.), daha ucuz biyoreaktörlerin tasarlanması, daha kolay proses kontrolü, elde edilen hidrojenin saflığının artırılması, biyohidrojen üretiminin hızının ve veriminin artırılması, hidrojen üretimi koşullarının daha da iyileştirilmesi ve kullanılan mikroorganizmanın genetik olarak değiştirilmesi geliyor.

Dünyanın üzerinde çeşitli teknolojiler geliştirildiği bu konu, hidrojen enerjisinin bir hayal değil gerçek olduğunu kabul etmemizi ve bir an önce bizlerin de mevcut teknolojileri geliştirmemizi gerektiriyor.

Doç. Dr. Sevnur Mandacı
TÜBİTAK-Gen Mühendisliği ve Biyoteknoloji Araştırma Enstitüsü (GMBAE)
Moleküler Biyoenerjetik Laboratuvarı
sevnur@gmbae.tubitak.gov.tr