



HİDROJEN EKONOMİSİ

Fosil yakıtlardan hidrojene geçiş yapmak kentlerdeki hava kirliliğini önemli ölçüde azaltacak, yabancı petrol kaynaklarına olan bağımlılığı ortadan kaldıracak ve gezegenimizi büyük bir iklim değişikliğiyle tehdit eden sera gazlarının birikmesini önleyecek.

Başta ABD, AB ve Japonya olmak üzere bu yararları göz önünde tutan birçok hükümet, hidrojen teknolojisinin geliştirilmesi ve piyasaya çıkarılmasına yönelik programlara milyarlarca dolar yatırmış bulunuyor. Otomobil üreticileri ve enerji şirketleri de yine milyarlarca dolar harcayarak hidrojenle çalışan otomobil filoları ve yakıt istasyonları geliştirip sergiliyorlar. Birçok siyaset plancısıysa petrolden hidrojene geçişi bizleri zorlayacak, ama kaçınılmaz bir kader olarak görüyor.

Sorun, bu kaderin gerçekleşmesinin hayli uzakta oluşu.

ABD Ulusal Bilimler Akademisi ve Amerikan Fizik Derneği tarafından kısa süre önce hazırlanan raporlarda araştırmacıların hidrojeni üretme ve depolama yöntemleri geliştirmede, üretilen hidrojeni elektrik enerjisine çevirmede, tüketicilere sunmada ve önemli güvenlik sorunlarını aşmada yıldırıcı güçlüklerle karşılaşacakları vurgulanıyor. ABD Enerji Bakanlığı ve ABD Fizik Derneği'nin hidrojen panellerinde çalışmış olan Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nden (MIT) fizikçi Mildred Dresselhaus, bu darboğazlardan herhangi birinin bile hidrojen ekonomisine kapsamlı bir geçişi engellemeye yeteceğini, bunların hepsini bir arada çözebilmeninse gerçek-

leştirilmesi zor bir hedef olduğunu söylüyor. Görülüyor ki, eğer hidrojen ekonomisine topyekun bir geçiş olarsa, bu pek yakında gerçekleşmeyecek. MIT fizikçilerinden olan Enerji Bakanlığı eski müsteşarı Ernest Moniz, "Bunun yaşamımıza ciddi bir biçimde girmesi çok, çok uzakta" diyor. "Hadi on yıllar diyelim, ama birkaç tane değil!"

Bazı uzmanlar da hükümetlerin, teknoloji henüz pazara sunulmaya hazır değilken araştırmaları pahalı teknoloji gösterilerine yöneltmekle, 1980'lerde sentetik yakıtlarda olduğu gibi bu alanda da bir düş kırıklığını körükleyecekleri endişesini dile getiriyorlar.

Ayakları üzerinde durabilecek bir hidrojen ekonomisinin kovalanması



gereken uzun dönemli bir hedef olması gerektiği konusunda herkes fikir birliği içinde. Nedenleri açık. Herşeyden önce, dünya petrol üretiminin önümüzdeki birkaç on yıl içinde tepe noktasına ulaşması ve stokların daha uzun süre yetecek olmasına karşın fiyatların giderek artması bekleniyor. Birkaç on yıl daha geçtiğinde doğal gazın da üretim tavanına erişmesi kaçınılmaz. Kömür, ziftli kum ve daha başka bir takım fosil yakıtlar bolluklarını bir yüzyıl daha sürdürecekler; ama bu kirli yakıtların ağır bir çevresel faturası var: Örneğin, elektrik üretimi için doğalgaz yerine kömür kullanımı, atmosfere iki kat daha fazla karbondioksit salımı demek. Bu kaynaklar aralara

itki sağlamak için kullanılacaksa, önce sıvıya ya da gaza dönüştürülmeleri gerekiyor. Bu da enerji harcamayı gerektirdiğinden, daha fazla maliyet demek. Üstelik, istediğimiz kadar fosil yakıt elimizin altında olsa da bunların tümünü kullanmak isteyeceğimiz kuşkuyla. Fosil yakıt kullanımı, atmosferdeki CO₂ derişimini milyonda 280 parçadan (ppm) 370 parçaya çıkarmış. Eğer önlem alınmazsa bu derişimin yüzyılın sonunda 550 ppm'i aşması bekleniyor.

New York Üniversitesi'nden fizikçi Martin Hoffert'e göre bu artışın sürmesi, dünyayı büyüklük bakımından son buzul çağına özdeş, ama etkileri bakımından tam tersi bir iklim felaketine sürükleyecek.



İlk bakışta hidrojen, en iyi alternatifmiş gibi duruyor. Yakıldığında ya da bir yakıt hücresi içinde oksitlendiğinde, sera gazları ya da herhangi başka bir kirlendirici ortaya çıkamıyor. Gram başına ortaya çıkardığı enerji, başka herhangi bir yakıtın çıkarabileceğinden daha fazla. Ve suyun bir bileşeni olarak hidrojen, gözün görebildiği her yerde var. Böyle olunca da geleceğin temiz yakıtı, çağdaş toplumun fosil yakıtlara karşı alternatifi gibi sıfatlandırılmaya şaşırmamak, kendisine bağlanan abartılmış umutları anlayışla karşılamak gerek. Yarattığı iyimserlik duygusu öylesine güçlü ki, General Motors şirketi 2020'lerin ortasında 1 milyon hidrojen itkili otomobil satmış ilk firma olacağını açıkladı. Bush yönetimi de hidrojen otomobillerini 2020 yılına kadar ticari üretime sokmayı amaçlayan ve 1,7 milyar dolar harcama öngören 5 yıllık bir girişim başlattı. Avrupa Birliği de yarışta geri kalmak niyetinde değil. 2004 martunda AB Komisyonu, hidrojen yakıt hücreleri geliştirilmesi için 10 yıl süreli, 2,8 euro çapında bir kamu-özel sektör ortaklığı projesinin ilk bölümünü başlattı. 2003 yılında da Japon hükümeti yakıt hücreleri araştırma-geliştirme bütçesini ikiye katlayarak 268 milyon dolara yükseltti. Ayrıca Kanada, Çin ve diğer bazı ülkeler de bu alanda kendi çabalarını başlatmış bulunuyorlar. Otomobil üreticilerine gelince, bunlar da hidrojen yakan motorlar geliştirmek için kesenin ağzını açıyorlar. Şimdiye kadar milyarlarca dolar harcayan şirket-



ler 70 kadar prototip otomobil ve kamyon, düzinelerle de otobüs üretti-ler. Bu arada enerji ve otomobil üreti-cileri, çeşitli ülkelerde 50-60 kadar hidrojen yakıt istasyonunu devreye soktular.

Tüm bu iyi niyetli çabalara karşın birçok araştırmacı ve enerji uzmanı, halen yürütülen hidrojen programları-nın, yeterli kapsamda bir hidrojen ekonomisi için gerekli düzeyin çok ge-risinde olduğuna işaret ediyorlar. Uzmanlara göre dünyanın enerji altyapı-sı son derece geniş olduğundan, hid-rojen teknolojisini fosil yakıtlarla rekabet edebilir duruma getirmek, orta-ya çok daha geniş fonlar sürülmedik-çe umutsuz bir girişim olarak kalmaya mahkum. Dresselhaus da, uzmanlarca hükümete sunulan raporların, hidro-jen ekonomisine “olanaksızdır” dam-gası vurmadığını kaydediyor, ancak tüm bu girişimlerin yalnızca bir baş-langıç sayılabileceğini vurguluyor.

Hidrojen ekonomisinin karşısına dikilen ekonomik ve politik güçlükle-rin listesi uzun. Yine de, en göze batı-cı engeller teknik olanlar. Listenin baş-ındaysa hidrojen üretebilmenin basit ve ucuz bir yolunu bulma zorunlulu-ğu yer alıyor. Sıkça belirtildiği gibi hidrojen, kömür ya da petrol gibi ken-di başına bir yakıt değil. Elektrik gibi o da, başka bir güç kaynağı kullanıla-

rak üretilmesi gereken bir enerji taşı-yıcısı. Hidrojen evrende en bol bulu-nan element. Oysa dünyada bulunan hidrojenin hemen hemen tümü, hidro-karbonlar ya da suda olduğu gibi mo-leküller içinde başka elementlere bağ-lanmış durumda. Hidrojen atomları-nın, dihidrojen gazı (H_2) oluşturmak için bu moleküllerden koparılması ge-rekıyor. H_2 , hidrojenin yakıt hücrele-rinde kullanılabilmesi için alması gere-ken biçim. Yakıt hücreleri daha sonra hidrojen ve oksijeni yeniden birleştiriyor ve bu süreç içinde elektrik üreti-yorlar. Ancak, bir yakıt bir kaynaktan, örneğin, petrolden, elektrik ya da hid-rojen gibi bir başkasına dönüştürüldü-ğünde bir enerji harcıyor ve dolayı-sıyla da parasal maliyeti oluyor.

Günümüzde hidrojen üretiminin en ucuz yolu, buhar ve katalizörler kulla-narak doğal gazı H_2 'ye ve CO_2 'ye ay-rıştırmak. Ancak, bu teknoloji onyı-lardır kullanılıyor olsa da günümüz buharlı dönüştürücülerinin verimi %85'i geçmiyor. Bu da doğal gaz için-deki enerjinin %15'inin, dönüşüm sıra-sında atık ısı olarak yitirilmesi anlamı-na geliyor. Sonuçta ABD Enerji Ba-kanlığı uzmanlarının hesaplarına göre bir galon (yaklaşık 4 litre) benzinin saldı-ğı enerjiye eşit enerji sağlayacak hidrojenin üretim maliyeti 5 dolar olu-yor. Kömürden, petrolden ya da su-

dan hidrojen elde etmek için kullanı-lan teknikler, daha da verimsiz. Gü-neş ya da rüzgar enerjisi gibi yenilene-bilir kaynaklarla, CO_2 üretmeden suyu ayrıştırmak da mümkün. Ancak bu teknolojiler daha da pahalı. Örneğin, güneş enerjisiyle elektrik üretmenin maliyeti, aynı miktar gücü bir kömür santraliyle üretmenin maliyetinin 10 katı. Shell Hydrogen firmasının yö-ne-ticisi Donald Huberts, “Hidrojen için-deki enerji, her zaman için onu üret-mek için kullanılan kaynaklardan da-ha pahalı olacaktır” diyor. “Hidrojen, ancak daha temiz hava, daha düşük sera gazları düzeyi vb. gibi avantajla-ryla rekabet gücü kazanabilir”.

Bu avantajların hidrojen enerjisi için şimdilik büyük bir talep sağlama-yacağı açık. Gerçi hidrojen yakıtının günümüzdeki maliyeti, üç yıl öncesine göre litre başına 25 cent daha ucuz. Ama Enerji Bakanlığı'nın tahminleri, 1 galon benzin eşdeğerinde hidrojen yakıtının fiyatı 2010 yılında 1,5 dola-ra, izleyen yıllarda bu fiyatın da altına düşmeden önce, tüketicilerin hidrojen yakıtlı otomobiller almak istemeyeceği merkezinde. Maliyetleri bu derece dü-şürebilmek içinse önemli teknolojik atılımlara gereksinim var.

Bu gereksinim de hidrojen üretimi için yaratıcı çözüm arayışlarını teşvik ediyor. ABD Enerji bakanlığı ile diğer

Hidrojen

Periyodik tablonun başında yer alan hidrojen en hafif element. Yalnızca bir proton ve bir elekt-rondan oluşuyor. Elektronun protona bağlanma enerjisi 13.6 eV kadar. Hidrojen buna karşın güç-lü bir elektropozitif karaktere sahip, yani elektro-nundan kurtulma eğiliminde. Örneğin oksijen gi-bi elektron almaya meraklı, elektronegatif bir ele-mentle bir araya geldiğinde tepkimeye giriyor ve atomu başına, yaklaşık 1,3 eV enerji açığa çıkı-yor. Hidrojen bu nedenle, kütleli enerji yoğun-luğu (142kJ/g) yüksek bir madde ve gramı başı-na sıvı hidrokarbonlardan (47kJ/g) bile daha fazla enerji içeriyor. Uzun uçuşlarında üst kademe roketlerin yakıtı olarak tercih edilmesi bu yüzden. Yanma ürünü olarak su buharı çıkarttığından, at-mosfere kirlenici veya sera gazları salmıyor.

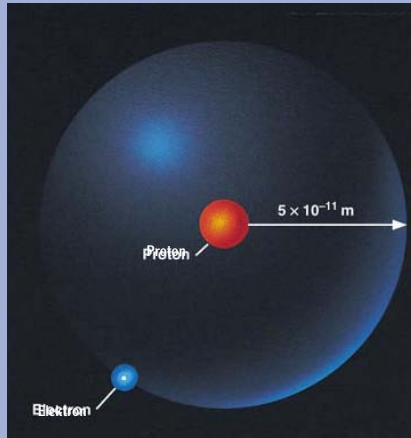
Öte yandan, doğada en bol bulunan element. Evrendeki görünür maddenin %90'dan fazlasını oluşturuyor. Tüm diğer elementler de zaten, hid-rojen çekirdeklerinin füzyonuyla oluşmuş. Yeryü-zündeysa, üçüncü en bol bulunan element. Suda ve organik maddenin tümünde var. Renksiz, ko-kusuz, tatsız ve zehirli olmayan bir madde. Saf haliyle, olağan koşullar altında iki atomlu bir gaz oluşturuyor. Bu gaz, havanın 14'te biri yoğunlu-

ğa sahip olduğundan, havada hızlı yükselip dağı-lıyor. Yani gazın kendisi kolayca yanıcı ve hatta yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle patlayıcı ol-makla beraber, sızıntı sonucu bir yerde birikip ka-za riskine yol açması mümkün değil. Buraya ka-dar iyi güzel: Hidrojen ideal bir yakıt gibi duruyor.

Ancak kullanımının her aşaması; eldesi, depo-lanması, taşınması ve yakılması ile ilgili aşılması gereken sorunları var...

Yakılması:

Hidrojenin nasıl yakılacağı konusunda da kri-

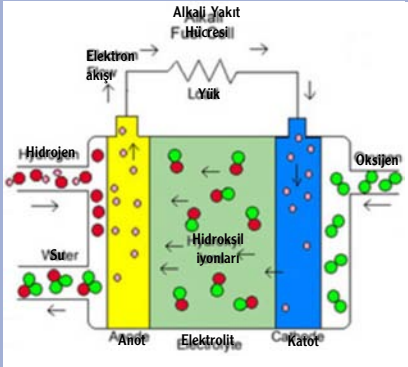


tik tercihler söz konusu. İçten patlarlı motorlar-da yakılması ve oksijenin hızlı verilmesi halinde, atık ürün olarak su buharının yanında, nitrik ok-sitler gibi karsinojen sera gazları da çıkıyor. Sa-dece su buharı çıkması isteniyorsa eğer, yanma odasına oksijenin yavaş verilmesi, yani havanın dikkatli pompalanması gerekiyor. Ama bu du-rumda da, olaydan enerji çekme hızı, yani güç azalıyor. Dolayısıyla, hem de %50-60'lara varan yüksek verim avantajından yararlanabilmek için, hidrojeni yakıt hücrelerinde yakmak en mantıklı-sı. Ama bu, ilgili teknolojinin ekonomik hale gel-mesini beklemeyi gerektiriyor.

Halbuki şimdiden, içten patlarlı motorları ufak bir bedel karşılığında hidrojen yakar hale getirip, bu yakıtın kullanımını başlatmak mümkün. Fakat halen, otomobil üreticileri yakıtı henüz ortada ol-mayan bir arabayı üretmek, enerji firmaları da kullanıcı olmayan bir yakıtı yatırım yapmak istemiyor. Bu kilitlemişliği kırmak için de hidroje-nin, hiç değilse fotovoltaikler ekonomik hale gelinceye kadar fosil yakıtlardan üretilip, hiç değilse yakıt hücreleri ekonomik hale gelinceye kadar iç-ten patlarlı motorlarda kullanılmak üzere, otomo-bil yakıtı olarak şimdiden piyasaya sürülmeye baş-lanmasını savunanlar var.

Prof. Dr. Vural Altın

YAKIT HÜCRELERİ

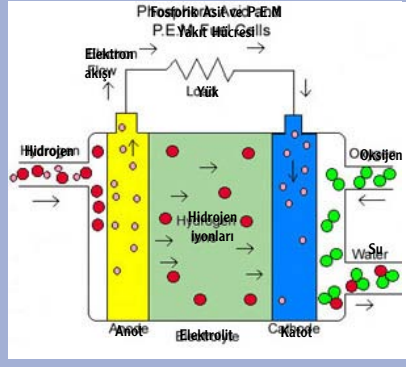


Yakıt hücrelerinin birçok çeşidi var. Hepsinin kullanım alanına göre taşıdığı avantaj ve dezavantajları bulunuyor. Katı oksit yakıt hücreleri, pahalı elektrotlar taşımadığı ve elektrolitin katı olması nedeniyle tercih ediliyor.

Bir yakıt hücresi, bir kimyasal tepkime ($2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + 2e^-$) sonucu elektrik üreten bir araç. Her yakıt hücresinin biri pozitif (katot) ve biri de negatif (anot) olmak üzere iki elektrodu bulunur. Elektrik üreten tepkimeler, elektrotlarda meydana gelir. Her yakıt hücresinde ayrıca, elektrik yüklü parçaları bir elektrottan diğere taşıyan bir elektrolit ve elektrotlarda tepkimeleri hızlandıran bir de katalizör bulunur. Hidrojen esas yakıttır; ancak yakıt hücrelerine oksijen de gerekir. Yakıt hücrelerinin çekiciliği, çok az kirlenici çıkarak elektrik üretmelerinde yatıyor. Elektrik üretiminde kullanılan hidrojen ve oksijen sonunda birleşerek tamamen zararsız bir yan ürün ortaya çıkartıyor: Su.

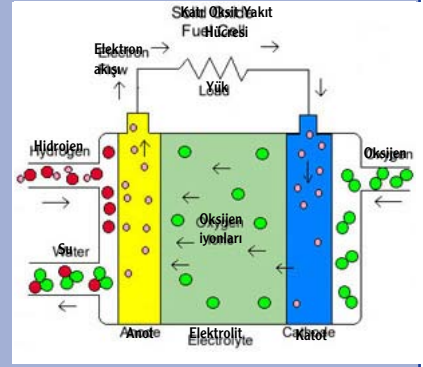
Tek bir yakıt hücresi çok küçük bir miktar doğrudan akımlı elektrik (DC) üretir. Dolayısıyla yakıt hücreleri demetler halinde bir araya getirilerek kullanılır.

Yakıt hücrelerinin amacı, bir elektrik motorunu çalıştırmak, bir elektrik ampülünü ya da bir kenti aydınlatmak gibisinden iş yapmak üzere hücre dışına yönlendirilecek bir elektrik akımı üretmektir. Akım daha sonra hücreye geri dönüp bir elektrik devresini tamamlar.



Farklı yakıt hücreleri, farklı biçimlerde çalışır; ama genelde hidrojen atomları hücreye anottan girer ve burada bir kimyasal tepkime elektronları atomlardan koparır. Hidrojen atomları şimdi iyonlaşmışlardır ve + elektrik yükü taşırlar. - elektrik yüklü elektronlar teller aracılığıyla işi yapacak olan akımı sağlarlar. Eğer değişken akım (AC) gerekirse, yakıt hücresinin DC çıktısı inverter (tersindirici) adlı bir aygıttan geçirilir.

Oksijen hücreye katottan girer ve bazı hücre tiplerinde (yukarıda gösterilen gibi) orada elekt-



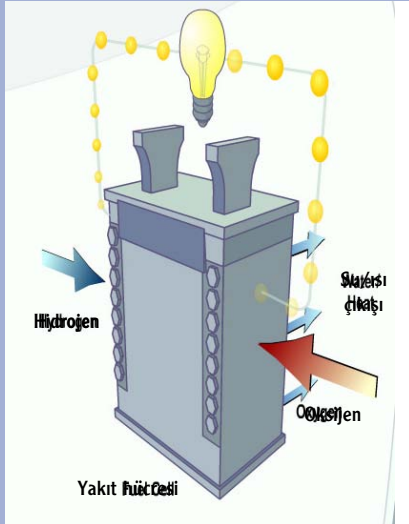
rik devresinden dönen elektronlarla ve elektrolit içinden geçerek anottan gelen hidrojen iyonlarıyla birleşir. Başka hücre tiplerindeyse oksijen elektronları toplayıp elektrolitten geçerek anota gider ve hidrojen iyonlarıyla orada birleşir.

Elektrolit önemli bir rol oynar. Anot ile katot arasında yalnızca uygun iyonların geçmesine izin vermek zorundadır. Çünkü serbest elektronlar ya da başka maddeler elektrolitten geçebilseydi, kimyasal tepkimeyi bozarlardı.

İster anotta ister katotta olsun, hidrojen ve oksijen birleştiklerinde su oluşturur ve su da hücreden dışarı süzülür.

Bir yakıt hücresi, kendisine hidrojen ve oksijen verildiği sürece elektrik üretir. Verimi de yüksek olur. Yakıt hücreleri elektriği yanma yerine kimyasal olarak ürettiklerinden sıradan bir güç santralini sınırlayan termodinamik yasalarına tabi değildir, dolayısıyla yakıt hücreleri yakıttan daha verimli bir biçimde enerji elde ederler. Bazı hücrelerden çıkan atık ısı da yeniden kullanılıp sistemin verimini daha da yükseltir.

Günümüzde çeşitli yakıt hücresi tipleri yapılmakta: Bunlar, alkali, erimiş karbonat, fosforik asit, proton değişim zarı (P.E.M) ve katı oksit tipleri olarak tanınıyor. Hepsinin farklı özellikleri, farklı avantaj ve dezavantajları var. Henüz hiçbirisi ucuz değil. Farklı tipler, farklı sıcaklıklarda çalışıyor ve verimleri de tiplerine göre %40-%80 arasında değişiyor.



parasal kurumlar, örneğin alglerden hidrojen elde edilmesi, güneş ışığı ve katalizörler aracılığıyla suyun doğrudan ayrıştırılması, hidrojenin tarımsal atıklar ve başka "biyokütle" türlerinden emilmesi için yürütülen araştırma çalışmalarına destek sağlıyorlar. Ancak bu konularda yıllardır sürdürülen çalışmalar henüz dişe dokunur bir sonuç vermiş değil.

Hüner, Üretmekte Değil, Elde Tutabilmekte

Araştırmacılar ucuz hidrojen üretebilmek için başlarını kaşıyadursunlar, daha çetrefil bir sorun yeterli miktarda

hidrojeni bir otomobile sığdırmak biçiminde ortaya çıkıyor. Hidrojen en hafif element olduğundan, öteki yakıtlara kıyasla belirli bir hacme ancak çok küçük miktarları sığıyor. Oda sıcaklığı ve basıncında hidrojen, aynı miktarda enerji üreten benzinden 3000 kat daha fazla yer istiyor. Bu da, Enerji Bakanlığı'nın belirlediği 500 km yol yapma ölçütünü tutturacak miktarda yakıtın bir hidrojen otomobilinin deposuna sığdırılabilmesi için, sıkıştırılmasını, sıvılaştırılmasını ya da herhangi başka bir ileri depolama tekniği geliştirilmesini gerektiriyor.

Ne var ki, bu çözümlerin hiçbirisi, bir otomobili bir depo yakıtla 500 ki-

lometre götürmeye yetmiyor. Günümüzde prototip olarak geliştirilmiş hidrojen otomobillerinin neredeyse tümü, sıkıştırılmış gaz kullanıyor. Yine de depolar bir hayli büyük. 700 atmosfer basınca dayanacak biçimde üretilen yakıt depoları, günümüz arabalarında aynı miktar yakıt alan depoların 8 katı hacimde. Yakıt hücreleriyse, benzinle çalışan içten patlamalı motorlara göre iki kat verimli. Ama bunlar bile aynı mesafede yol katedebilmek için normal arabalardakindenden dört kat daha büyük yakıt depoları istiyor.

Sıvı hidrojen çok daha az yer işgal ediyor, ama bu kez başka sorunlar ortaya çıkıyor. Hidrojen -253°C sıcak-



Geleceğe Köprü

General Motors'un hidrojen ekonomisi için hazırladığı hydroGen3 kendisini denemeye davet edilen gazetecileri ve bilim yazarlarını büyüledi. Araç, sıfırdan son hıza çıkarken, vites değiştirirken, sürücüler önce birşeyin farklı olduğunu hissettiler ama ne olduğunu tam olarak bulamadılar. Bu duyguyu yaratan özellik kendini bir süre sonra gösterdi. Arabada hiç ses yoktu. Dış görünümüyle sıradan arabalardan farksız olan hydroGen3'ün teknolojik bakımdan daha önemli özelliği ise atmosfere hiçbir kirli atık bırakmaması. Yüksek teknoloji içeren yakıt hücrelerinden süzülen hidrojenin tek atık ürünleri, havaya salınan bir parça ek sıcaklık ve içilebilir nitelikte saf su!

Araçların seri üretimi için biraz sabırlı olmanız gerekiyor. Uzmanlara göre, hidrojen ekonomisinin altyapısı hazır olana kadar on yıllarca beklemeniz lazım. Yok, ille de geleceğe şimdiden uzanıp serinin ilk numaralı otomobilini şimdi satın almak istiyorsanız, cüzdanınız biraz kalın olacak. Minivan tipindeki otomobili, eğer çok istiyorsanız ve hatırlıysanız size 1 milyon dolara bırakabilirler.

Spor arabaların motor homurtusuna, egzoz dumanına vurgun maço tipler korkmasın, kent

yollarının sessizliğe bürünmesine daha çok var. Uzmanlar, sessiz sedasız çalışan yakıt hücreleriyle çalışan otomobillerin yollarda boy göstermesine daha on yıllar olduğunu söylüyorlar. Ama o tatlı benzin kokusuna daha kısa sürede veda etmek gerekebilir. Çünkü içten patlamalı hidrojen otomobillerinin ilk örnekleri ortaya çıkmaya başladı bile. Eğer varsa egzoz kokusunu sevenlerin de daha değişik zevkler aramaya başlamaları gerekecek. Çünkü bu araçlar neredeyse hiç kirli atık üretmiyorlar.

Önde gelen otomobil üreticilerinin H2 ICE (Hidrojen -İçten Patlamalı Motor) otomobiller diye adlandırdıkları yeni araçların, aslında dolun istasyonlarının yaygınlaşmasını sağlayarak bir sonraki kuşak olan yakıt hücresel otomobillere yolu açacaklarını düşünener de var.

Düşünmeyenler de!.. Bazı uzmanlar, daha hantal, daha zayıf olan yakıt hücresinin, daha hafif, daha basit ve daha ucuz olan H2 ICE'leri hiçbir zaman yakalayamayacakları görüşünü savunuyorlar. Argonne Ulusal Laboratuvarı'nda (ABD) bu motorlar üzerinde çalışan makine mühendisi Stephen Ciatti "Eğer hidrojenli ICE'ler düşündüğümüz gibi çalışırlarsa, yakıt hücrelerini belki de hiç göremezsiniz" diyor.

BMW, Ford ve Mazda'nın H2 ICE araçlarını bir iki yıl içinde hükümetler ve taksi işletmeleri için üretmeye başlayacakları bildiriliyor. Ancak

lıkta, yani mutlak sıfır derecenin ancak biraz üzerinde sıvılaşıyor. Yakıtı bu dereceye kadar soğutmak için, hidrojen içindeki enerjinin %30'unu kullanmak gerekiyor. Üstelik hidrojeni kaynayıp gaz haline geçmemesi için yalıtılmış durumda tutmak gerektiğinden, bu seçimde de yakıt depoları yine sıradan yakıt tanklarından büyük olmak zorunda.

Hidrojen depolamak için bazı ileri teknoloji içeren malzemeler de dene-

hidrojene bir talep yaratabilmek için bu otomobil ve kamyonların kendilerine tüketici pazarında bir köşe tutmaları gerekiyor ki, bu da en azından şimdilik çok kolay bir iş değil. Otomobil üreticileri hidrojen motorlarının sorunsuz çalışmaları, sıradan otomobillerin gidebildiği mesafelere gidebilmeleri için araca yeterli miktarda hidrojen stoklamanın değişik yollarını deniyorlar. Tabii bu arabaların müşteriye çekici gelebilmesi için bir yakıt istasyonları ağına da kurulması gerekiyor.

İçten patlamalı motorlar, küçük bir dizi patlamanın düzenli biçimde koordinasyonu ile çalışıyorlar. Motor bloku içinde pistonlar, kendilerini sıkıca saran sisliindirler içinde bir aşağı bir yukarı gidip gelirler. Önce piston silindir içinde yukarı doğru yükselerek hava ve yakıttan oluşan karışımı sıkıştırır. Tepe noktasına yaklaştığında da buji, hava-yakıt buharını ateşler. Patlama pistonu aşağı doğru iterken piston kolu da krank milini döndürür ve bu hareket, sonunda tekerleklerle aktarılır. Sonra, atalet ve öteki pistonların yardımıyla piston tekrar yukarı çıkar ve patlamanın oluşturduğu atık gazları silindirin tepesindeki bir siboptan dışarı atar. Daha sonra da tekrar aşağıya inerken başka bir siboptan da yakıt-hava karışımını içeri çeker ve böylece bu dört vuruşlu döngü sürer gider.

İyi ayarlanmış bir benzin motoru, benzinle havayı, her yakıt molekülüyle her oksijen molekülünün patlamada kullanılmasını sağlayacak oranda karıştırır. Bu duruma motorun "stokiyometrik durumda çalışması" denir. Benzin yanı sıra atık ürünler olarak karbonmonoksit, karbondioksit ve hidrokarbonlar oluşur. Ve motor stokiyometrik durumda çalışırken patlama, karışımdaki havanın içindeki azotun bir kısmını yakacak kadar sıcak olur. Sonuçta azot oksitler (NO_x) ortaya çıkar ve bu da kentler üzerindeki duman bulutlarını zehirli hale getirir.

Hidrojen yanmasındaysa, neredeyse hiç kirli atık çıkmaz. En etkili sera gazı olan karbondioksit ya da başka karbon bileşimleri ortaya çıkmaz. Ve benzinin aksine hidrojen, hava-yakıt karışımının tüm oksijeni kullanacak ölçüde hidrojen içermediği durumda bile yanar. Buna motorun "perhiz" durumunda çalışması denir. Hidrojen-hava karışımını stokiyometrik oranın yaklaşık yarısına indirebilirsiniz ve böylece NO_x üretimini %90 oranında azaltabilirsiniz. Aynı şeyi



niyor. Örneğin, karbon nanotüpler, metal hidritler ve sodyum borohidrit gibi kimyasal tepkimelerle hidrojen üreten maddeler. Denenen her malzeme, umutlandırıcı sonuçlar vermiş. Ama şimdilik hepsinin yüksek sıcaklık ya da basınç gerektirmek, hidrojeni çok yavaş biçimde salmak ya da karmaşık ve zaman alıcı geri dönüşüm süreçleri gerektirmek gibi önemli kusurları var. Dolayısıyla, uzmanların çoğu karamsar. ABD Enerji Bakanlığı'nın Temel Enerji Bilimleri Danışma Komitesi'nce 2003 yılında yayımlanan bir rapora göre "Hidrojen ekonomisinin gelişmesini kolaylaştıracak hidrojen depolama malzemelerinin geliştirilmesi için yeni paradigmlar gerekiyor".

Amerikan Fizik Derneği'nin hidrojen enerjisi konulu raporunu hazırlayan komiteye başkanlık eden Columbia Üniversitesi profesörü Peter Eisenberg ise daha açık sözlü olmayı yeğli-

yor: "Depolama sorunu, hidrojen ekonomisini doğmadan öldürebilir".

Daha İyi Yakıt Hücreleri

Hidrojen ekonomisinin gündeme gelebilmesi için ciddi bir ilerleme göstermesi gereken alanlardan biri de yakıt hücreleri. Bunlar aslında 1800'lü yıllardan beri biliniyor. Yakıt hücreleri, uzay araçlarının güç gereksinmelerinin karşılanmasında başarıyla kulla-

benzin motoruyla yapmak isterseniz, motor ya hiç çalışmaz, ya da verimsiz çalışır.

Ancak hidrojen, tümüyle de sorunsuz bir yakıt değil. Kilogram başına benzinden daha fazla enerji içeriyor; ama aynı zamanda doğada en az yoğunluğa sahip olan gaz. Dolayısıyla motorun silindirleri içinde çok yer kaplıyor. Bu da güç verimini azaltıyor; çünkü karışıma yeterince oksijen giremiyor.

Aynı zamanda hidrojeni ateşlemek çok az enerji gerektirdiğinden, hidrojen-hava karışımı sıcak bir kaynağa, örneğin daha bujiye yaklaşıp ateş alıyor. Bu erken ateşleme de motorun "öksürmesine" hatta "geri tepmesine" neden olabiliyor.

Bu sorunu aşabilmek için BMW, Ford ve Mazda değişik yöntemler deniyorlar. Ford mühendisleri, "supercharger" denen mekanik bir pompayla silindirin kendi aldığı bir buçuk katı kadar ilave hava ve uygun oranda yakıt sokarak her patlamanın enerjisini yükseltiyorlar. Hidrojen-hava oranını çok zayıf, stokiyometrik ölçünün %40 düzeyinde tutarak da ön ateşlemeyi ve geri tepmeyi önüyorlar.

Hidrojen motorlu bir Ford Focus, atmosfer basıncının 350 katına dayanıklı deposuyla yenden yakıt almadan 240 kilometre yol gidebiliyor. Ve bir elektrikli hibrid sistem ve 700 atmosfer basınca dayanıklı deposuyla yeni konsept otomobili Ford Model U, bir depoyla bu mesafenin iki katına gidebiliyor.

Mazda'nın H2 ICE prototipi de yine gaz halinde hidrojen yakıyor, ama bir Wankel motoruyla çalışıyor. Bu, bir silindir içinde dönen iki üçgen rotordan oluşuyor. Hidrojenin silindirdeki havayı boşaltarak kendine yer açma eğilimiyle



başedebilmek için Mazda mühendisleri, ancak yanma odası havayla dolduktan ve emme sibopları kapandıktan sonra hidrojeni içeri pompalıyorlar. Bu doğrudan enjeksiyon yöntemi, güç çıkısını artırıyor ve oksijenle hidrojen ateşlemenin hemen öncesinde bir araya getirildiğinden geri tepme ya da geri çalışma önlenmiş oluyor. Mazda'nın hidrojen motoru, aynı zamanda benzinle de çalışabiliyor.

BMW'nin H2 ICE modeli ise maksimum güç gerektiğinde hidrojeni bolca kullanıp stoikometri durumunda, diğer zamanlarda ise "perhiz" durumunda çalışıyor. BMW sıvı hidrojenle çalışıyor ve şirket yine sıvı hidrojenle çalışan bir motosiklet geliştirmiş. -253°C'de "kaynayıp" gaz haline geçen sıvı hidrojen, iyice yalıtılmış bir depo içinde tutuluyor ve aracın menzilinı büyük ölçüde ar-

tırıyor. İlerideki modellerde soğuk gazın, yanma odasındaki karışımı daha yoğun hale getirerek verimi artırması tasarlanıyor. Soğuk hidrojen gazı ayrıca motor parçalarını da soğutarak geri çalışma ve erken ateşleme gibi sorunları da ortadan kaldırılabılır. BMW'nin H2 ICE modeli de aynı zamanda benzin kullanabiliyor.

Uzmanlar, H2 ICE otomobillerin beş yıl içinde üretim hattına konabileceğini söylüyorlar.

Ancak, H2 ICE üreticileri satışlar için "mace- ra ruhlu öncülere" güvenseler de, California'nın "Governator" valisi Arnold Schwarzenegger, hidrojen ekonomisinin yakıt darboğazını aşma çabalarına yardım için eyaletin karayollarında 2010 yılınma kadar 200 hidrojen istasyonu kurduğunu vaatmiş olsa bile, hidrojen ekonomisi, kadelerini yakıt hücrelerine bağlamış görünüyor.

Yakıt hücrelerinin avantajı, tümüyle sessiz ve gerçekten sıfır kirleticili bir ulaşım olanağı sağlamaları, hidrojen itekli araçları da çok daha uzun mesafelere taşıyabilme potansiyeli. Uzmanlar, tasarımlarda ve ön modellerde gerekli iyileştirmelerin yapılmasıyla, ilginin bu teknoloji üzerinde odaklanmasının kaçınılmaz olduğunu söylüyorlar. Nedeni açık: Benzin motorları, yakıtlarındaki enerjinin ancak %25'inden yararlanabiliyorlar. Enerjinin geri kalanı ısı olarak atılıyor. H2 ICE otomobillerinin, hibrid elektrik sisteminin desteğiyle bile varabildikleri enerji verimi noktası ancak yarı çizgisine yaklaşabiliyor. Gerekli iyileştirmelerin yapılması halinde yakıt hücrelerinin sağlayacağı verim, bir kilo hidrojenin sağlayacağı verimin %75'i kadar.





nılmış bulunuyor. Ancak yüksek maliyetleri ve öteki bazı dezavantajları, bunların otomobillere güç sağlamak gibi günlük kullanım kazanmalarını engelledi. İçten patlamalı motorlar, ürettikleri gücün her kilovatı için 30 dolara maloluyorlar. Kıymetli madenlerden katalizörlerle dolu olan yakıt hücrelerinin maliyetiye bunun 100 katı.

Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla ilgili teknolojilerin gelişim seyrine bakıldığında, kısa dönemde yakıt hücrelerinin ticari bir maliyete inmesi konusunda iyimserliğe yer kalmıyor. Gerek rüzgar, gerekse de güneş enerjisi alanında fiyatların onda bire inmesi için 20 yıl geçmesi gerekmiş. Bu durumda bile bu yenilenebilir enerji kaynakları, ABD'nin toplam enerji tüketiminin %1'ini bile karşılamıyor.

Yakıt hücrelerinin pratik hale gelebilmesi için teknolojiye yeni açılımlar gerekli. Başta gelen gereksinimlerden biri, yakıt hücrelerini sıradan otomobillerin sürüş sırasında alışık oldukları şoklara dayanıklı kılacak ve kolayca parlayan hidrojeni kontrol altında tutacak kadar güvenli yapacak tasarım ve malzemeler. Bunlar da hidrojen otomobillerinin mühendisliğini daha pahalı hale getirirken müşteriler için çekiciliğini de azaltıyor.

Araba İyi de, Yakıt Ne Olacak?

Kendi iç sorunlarını aştıklarında, hidrojen itekli otomobilleri dışarıda bir sorun bekleyecek: Yakıtlarını yenilemek için gereken altyapı. Eğer hidrojen büyük tesislerde üretilecekse, tüketicilere ulaşacağı noktalara kadar ya

tankerlerle ya da boru hatlarıyla taşınması gerekecek. Hidrojenin düşük yoğunluğu nedeniyle bir tanker dolusu benzinin enerji içeriğine eşdeğer hidrojeniyse ancak 21 tanker taşıyabilir. Eğer tanker de hidrojenle çalışıyorsa, 500 kilometre yol alması için taşıdığı yükün %40'ını kendisi kullanmak zorunda.

Peki hidrojen gaz değil de sıvı olarak taşınmaz mı? Uzmanlar bu çözümün pratikliğine, ticari ölçekli günümüz soğutucularının çok fazla enerji tükettikleri gerekçesiyle itiraz ediyorlar.

Ya uzun mesafeli taşımayı boru hatlarıyla yapmak? Bu da kompresörler gerektiriyor ve bu kompresörlerin her 150 kilometrelik pompalama için borudan geçen hidrojenin %1,4'ünü kullanmaları gerekiyor. Bunun da anlamı, örneğin Kuzey Afrika'dan boru hattına basılan gazın ancak %60-70'inin Avrupa'ya ulaşabileceği.

Hidrojeni taşımak için ödemek zorunda olduğumuz bu enerji vergisinden kurtulmak için, hidrojenin mevcut elektrik şebekesinden ya da doğalgazdan yararlanılarak dolmuş istasyonlarında ya da evlerde üretilmesi de ucuz bir çözüm değil. Yapılan hesaplara göre günde 100-2000 arasında otomobile servis veren bir yakıt istasyonu, elekt-

roliz yoluyla hidrojen üretebilmek için 5-81 megawatt elektriğe gereksinim duyacak!.. Bunun da anlamı, hidrojenin merkezi tesislerde değil de yakıt istasyonlarında üretilmesi seçimi, toplam elektrik üretim kapasitesinin üç katına çıkarılmasını zorunlu hale getireceği ve tabii en azından görünür gelecekte, gereksinim duyulan fazladan elektrik, yine fosil yakıt kullanılarak elde edilecek.

Hangi seçenek benimsenirse benimsensin, talebi karşılamak muazzam bir hidrojen dağıtım altyapısının kurulmasını gerektirecek. Bugün ABD'de yılda 9 milyon ton hidrojen üretiliyor. 20-30 milyon otomobile itki sağlamaya yetecek bu hidrojen, benzin rafinasyonunda ve kimya fabrikalarında kullanılıyor. Ama bu miktar, tam kapasiteli bir taşımacılık sektörüne gereken miktarın yanında solda sıfır kalıyor. Bir hidrojen ekonomisinin ortaya çıkıp ayakta kalabilmesi için, otomobil üreticileri hidrojen arabalarını büyük miktarlarda piyasaya sürmeye başladığında mevcut benzin istasyonlarının %30-50'sinin hidrojen servisine geçmiş olması gerekli. Bir araştırma sonucuna göre ABD'deki toplam otomobil sayısının %40'ına servis verecek bir altyapı için gereken miktar, 500 milyar dolar ya da daha fazlası.

Raşit Gürdilek

Kaynaklar

Cho, A. "Fire and ICE: Rewinding Up for H₂", Science, 13 Ağustos 2004

Service, R. F., "The Hydrogen Backlash" Science, 13 Ağustos 2004

Garrison, E., "Solid Oxide Fuel Cells"

<http://www.iit.edu/~smart/garrear/fuelcells.htm>

