

HİDROJEN ENERJİ SİSTEMİ

S. Kemal İder, Profesör
Makina Mühendisliği Bölümü, ODTÜ

Giriş:

Dünyanın enerji gereksiniminin büyük bölümünü karşılayan fosil kaynaklar hem gittikçe azalmakta hem de çok ciddi çevre ve hava kirliliğine sebep olmaktadır. Hidrojen, bir enerji taşıyıcısı olarak bu sorunların çözümü için bir potansiyel oluşturmaktadır. Bu sebeple son yıllarda hidrojen enerjisi üzerinde yoğun araştırma ve geliştirme faaliyeti sürdürülmektedir. Temiz ve yenilenebilir hidrojen enerjisinin dünyanın artan enerji gereksinimini karşılayacağı bir gelecek için gelişmiş ülkeler çok yoğun bir şekilde büyük ölçekli teknolojik araştırma ve geliştirme programları yürütmektedirler.

Hidrojen dünyada en çok bulunan elemanlardan biridir. Su, hidrojen ve oksijenden oluşur ve akarsu ve denizlerde çok miktarda bulunmaktadır. Hidrojen doğada saf halde bulunmaz. Ancak çeşitli yöntemlerle elde edilebilir. Bu sebeple yenilenebilir bir yakıttır. Bunun yanında yakıtlar içerisinde çevresel açıdan en temizidir. Birincil enerji kaynakları kullanarak hidrojen üretilip bunun gereksinim duyulan yerlere iletilerek çeşitli yöntemlerle enerjiye çevrilmesine hidrojen enerji sistemi denir.

Hidrojen yakıtının en önemli kullanım alanı ulaşım sektörü (otomobil, otobüs, uçak, tren ve diğer taşıtlar) olmaktadır. Hidrojen halen bir yakıt olarak uzay mekiği ve roketlerde kullanılmaktadır. Düşünülen diğer kullanım yerleri ise mobil uygulamalar (cep telefonu, bilgisayar, vs) ve yerleşik uygulamalar (yedek güç üniteleri, uzak mekanlarda güç gereksinimi, vs) dir.

Hidrojen enerji sistemi şu kısımlardan oluşur:

- Hidrojen üretimi
- Depolama ve iletim
- Enerji çevrimi

Hidrojen enerjisi konusunda son yıllarda meydana gelen gelişmeler, 2010 yılından itibaren hızlanan bir süreç içinde hidrojenin özellikle ulaşım sektöründe diğer yakıtların yerine geçeceği bir geleceği işaret etmektedir. Bu vizyonda hidrojenin çeşitli üretim yerlerinden kullanım yerlerine ulaşması için gereken dağıtım altyapısı ve hidrojen istasyonları da yer almaktadır.

Hidrojen Üretimi:

Hidrojen üretme teknolojileri şöyle sayılabilir:

1. Kömür, doğalgaz, benzin gibi fosil yakıtlardan termokimyasal yöntemlerle hidrojen elde edilmesi. Buharla reaksiyon yöntemi en çok kullanılan yöntemdir. Burada fosil yakıt bir nikel esaslı katalizör vasıtası ile buharla reaksiyona girer ve hidrojen açığa çıkar. Ayrıca biomas'dan prolez yöntemi ile elde edilen bio-yağ'dan da benzer şekilde buharla reaksiyon ile hidrojen elde edilir.
2. Suyun elektrolizi ile hidrojen elde edilmesi. Elektrik enerjisi kullanarak su hidrojen ve oksijene ayrılır.
3. Fotoelektrokimyasal yöntemle güneş enerjisinden hidrojen elde etme. Elektroliz yönteminin bir benzeridir. Elektrik akımı suya batırılmış güneş pillerinden elde edilir. Normal elektroliz yönteminden daha verimlidir.
4. Fotobiyolojik yöntemle yeşil yosunlardan doğal fotosentez faaliyetlerinden faydalanarak hidrojen elde etme.
5. Çeşitli hidrit bileşiklerinden kimyasal yöntemlerle hidrojen elde etme. Bunların en önemlisi sodyum borohidrit'tir.

Hidrojen halen en ucuz olarak fosil yakıtlardan buharla reaksiyon yöntemi ile elde edilmektedir. Ancak bu yöntem fosil kaynaklara olan bağımlılığı azaltmamakta ve aynı zamanda hava kirliliğine sebep olmaktadır. Diğer en çok kullanılan yöntem elektrolizle suyun ayrıştırılmasıdır. Elektroliz yönteminin ve diğer yöntemlerin verimlerinin artırılması ve üretim maliyetlerinin azaltılması için yoğun araştırmalar yapılmaktadır.

Hidrojenin Depolanması ve İletimi:

Hidrojen, gaz halinde, sıvı halinde veya bir kimyasal bileşik içinde depolanabilir. Daha çok gaz halinde saklanmaktadır. Fakat düşük yoğunluklu olduğundan çok yer kaplar. Bunun için basınçlı tanklarda ve tüplerde sıkıştırılmış olarak saklanır. Tank malzemeleri hafiflik ve güvenlik açılarından geliştirilmektedir.

Sıvı hidrojen daha az yer kaplar. Fakat hidrojenin sıvılaştırılması için çok yüksek enerji (sıvılaştırılan hidrojenin enerji değerinin 1/3'ü kadar) gerekir.

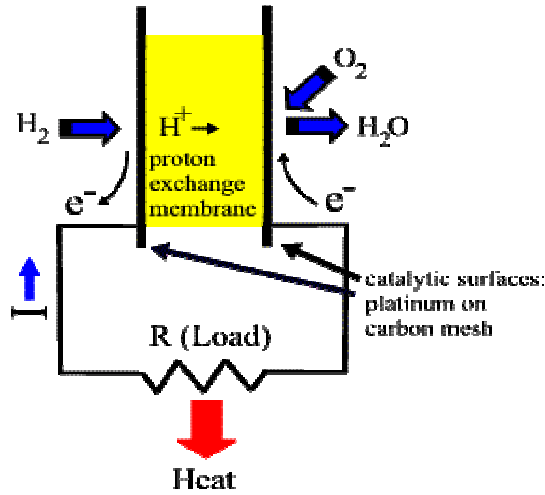
Katı şekilde hidrojen depolanması için metal hidritler kullanılmaktadır. Hidrojen gazı metal hidrit tarafından sünger gibi çekilerek gözenekleri içinde depolanır. Ancak metal hidritler çok ağırdır. On kat daha hafif malzeme olarak karbon nanoyapıları geliştirilmektedir.

Hidrojenden Enerji Elde Edilmesi:

Hidrojenden şu yöntemlerle enerji elde edilir:

- **Yakma:** Hidrojen benzin ve doğal gaz gibi yakılabilir. Benzin ve doğal gaza üstünlüğü emisyonlarının azlığıdır. Karbondioksit çıkmaz. Sadece benzin ve doğal gaza göre çok az miktarda NOx çıkar. Askeri ve endüstriyel amaçlar için hidrojen gaz türbinleri ve arabalar için içten yanmalı motorlar geliştirilmektedir.
- **Yakıt pili:** Yakıt pili elektrolizin tersidir. Hidrojen ve havadaki oksijen birleştirilerek elektrik akımı elde edilir. Özellikle otomobiller olmak üzere bütün uygulamalarda tercih edilen yöntemdir. Hidrojeni yakmaya göre daha verimlidir. Çevreye zararlı hiç emisyonu yoktur. Çeşitli yakıt pili tipleri vardır. Bunlar anod ve katod arasındaki elektrolit malzemeye göre farklılık gösterir. Şekilde son zamanlarda en çok kullanılan tip olan PEM (Proton exchange membrane) yakıt pili görülmektedir.

PEM Fuel Cell: Electrochemical generation of electricity from hydrogen and oxygen



Şekil 1. PEM Yakıt Pili

Hidrojen AR-GE Programları:

Hidrojen sisteminin gelişimi ile ilgili olarak gelişmiş ülkelerde kamu kuruluşlarının ve otomotiv şirketlerinin yoğun faaliyetleri vardır. Bu çalışmalar gittikçe daha çok kaynak ayrılarak artmaktadır.

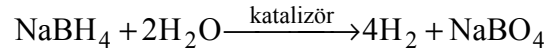
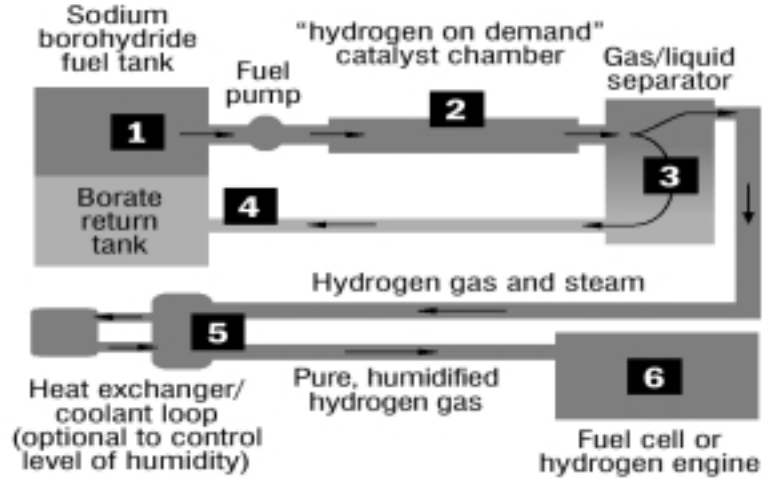
ABD, AB ülkeleri ve Japonya'da üretim yapan otomobil ve otobüs firmalarının hemen hemen tümü yakıt pilli prototip modellerini geliştirmektedirler. Ayrıca hidrojen yakıtlı içten yanmalı motorlu modeller de geliştirilmektedir. Bu prototipler araştırma amaçlı olup, oluşabilecek problemleri görmek ve gidermek içindir. Ayrıca Airbus ve NASA da hidrojen ile çalışacak gaz türbinli ve yakıt pilli yolcu uçağı geliştirmek için yoğun çalışmalar yapmaktadırlar. Almanya, Rusya ve ABD yeni denizaltılar için hidrojen yakıt pilli uygulamalarına geçmişlerdir.

Ford, Opel, Honda, Mazda, Nissan, Toyota ve Daimler-Crysler yakıt pilli ilk modellerini 2003'den başlayarak çıkaracaklardır. Yakıt pilli arabalardaki önemli bir sorun hidrojen deposudur. Hidrojen deposu hem büyük hem ağır olmaktadır. Ayrıca yüksek basınçlı olduğundan kaza sırasında tehlike arz etmektedir. (Honda 2003 ve Ford 2004 hidrojen depolu, Daimler-Crysler 2004 sıvı hidrojen depolu, Ford 2004 ve Toyota 2003 basınçlı hidrojen depolu olarak yapılmaktadır.)

Bir alternatif, depo yerine hidrojeni bir sünger gibi emen metal hidritler kullanılmasıdır (Toyota 2004). Hidrojen, yakıt pilinden çıkan artık ısı kullanılarak metal hidritin ısıtılması ile metal hidritten ayrılır. Ancak bunlar da ağırdır ve kapasiteleri az olmaktadır.

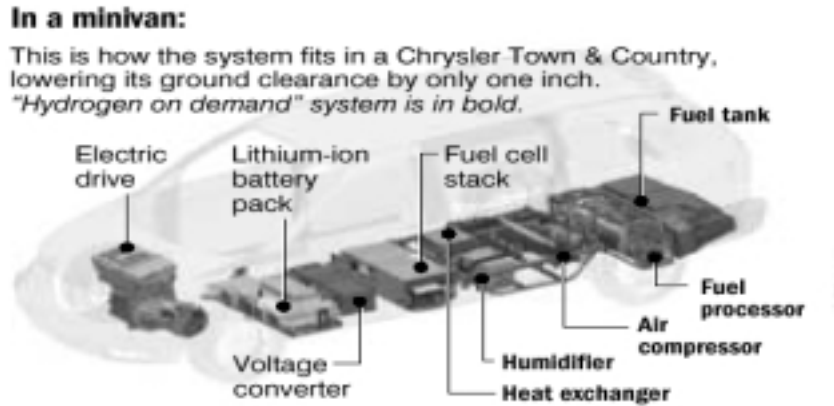
Bir diğer seçenek hidrojenin arabanın üzerinde elde edilmesidir. Bunun için benzin ve metanol gibi yakıtlardan buharla reaksiyon yöntemi ile hidrojen elde eden sistemler geliştirilmiştir (Honda 2003, Nissan 2003, Mazda 2005, Toyota 2004, Opel 2004). Ancak bu sistemler çok yer kaplamaktadır.

Hidrojenin arabanın üzerinde elde edilmesi için geliştirilen en uygun yöntemlerden biri ise sodyum borohidritin yakıt olarak kullanıldığı yöntemdir ve Daimler-Crysler'in bir modelinde geliştirilmektedir. Bor türevini yakıt olarak kullanan bu model özellikle ülkemiz açısından önemlidir. Çünkü dünyadaki en zengin bor kaynakları ülkemizdedir. Şekil 2'de görülen bu sistemde yakıt tankına konan 1/3 sodyum borohidrit ve 2/3 sudan oluşan solüsyon bir pompa vasıtası ile katalizör hücresine gönderilerek hidrojen gazı ayrılır. Yan ürün olarak çıkan sodyum borat ise bir tanka alınır. Bir ısı değiştiricisinde hidrojen gazının nemi ayarlanır. Nemlendirilmiş hidrojen ile yakıt pilinde elektrik üretilir.



Şekil 2. Sodyum borohidrit yakıtlı sistem

Daimler-Crysler'ın geliştirdiği minivan modelindeki yakıt sistemi yerleşimi Şekil 3'de görülmektedir. Bu araç, halihazırdaki arabalardaki kadar bir yakıt tankı ile 500 km lik bir menzile sahip olacaktır.



Şekil 3. Sodyum borohidritli minivan'ın yakıt sistemi yerleşimi

Hidrojen enerji sisteminin hem ulaşım hem de diğer uygulama alanlarında genel kabul görmesi için hidrojen üretim maliyeti ile yakıt pili maliyetinin daha da azalması ve zaman içinde bir hidrojen iletim altyapısının gelişmesi gerekmektedir. Hidrojen sisteminin dengeli bir şekilde gelişimi için batılı ülkeler çok büyük AR-GE kaynakları ayırmaktadırlar. ABD uzun zamandan beri yakıt pili gelişimini ve uygulamalarını teşvik etmektedir. 2000 yılında başlatılan SECA programı, Enerji bakanlığı, ulusal laboratuvarlar ve endüstri arasında yerleşik yakıt pili uygulamaları için oluşturulan bir ortak araştırma programıdır. 2002 yılında Enerji bakanlığı tarafından, ABD'deki otomotiv firmalarının da işbirliği ile, ulaşım sektöründeki hidrojen kullanımına yönelik 'Freedom Car' programı başlatılmıştır. Bu programda AR-GE faaliyetleri, ulusal laboratuvarlar, otomotiv firmaları, üniversiteler ve diğer araştırma kuruluşlarında yapılmaktadır. 1.7 milyar \$'lık 'Freedom Car' programının çoğu hidrojenle ilgili konuları (hidrojen depolama, yakıt pili ve yakıt pilli araba tahrik sistemleri) kapsamakta, ancak bunların yanında elektrikli ve hibrid arabalarla ve arabalar için hafif yapı malzemeleri geliştirilmesi gibi konuları da içermektedir. 2003 yılında ise hidrojen iletim altyapısı ile hidrojen depolama konularında araştırma çalışmalarını kapsamak üzere Hidrojen Yakıtı İnisyatifi adı altında 1.2 milyar \$'lık bir program başlamak üzeredir.

Japonya da çeşitli tiplerde yakıt pilleri geliştirilmesi konularında 1981 yılından beri 1 milyar \$'dan fazla AR-GE kaynağı ayırmıştır. Japonya'nın 2002 hidrojen AR-GE bütçesi 220 milyon \$, 2003 hidrojen AR-GE bütçesi ise 288 milyon \$'dır.

AB ülkeleri de hem kendi içlerinde hem de çerçeve programları olarak hidrojen konusundaki araştırmaları düzenli olarak desteklemektedirler. Bu destek son yıllarda daha da yoğunlaşmıştır. Hidrojen ve yakıt pili ile ilgili araştırmalar için ayrılan kaynaklar, 1999-2002 dönemini kapsıyan beşinci çerçeve programında 127 milyon Euro, 2003-2006 dönemini kapsıyan altıncı çerçeve programında ise 2.12 milyar Euro'dur.

Hidrojen ve Yakıt Pili Maliyetleri:

Kıyaslama amacıyla, hidrojen maliyeti olarak bir litre benzinin eşdeğeri kadar enerji veren hidrojenin maliyeti verilecektir. Baz olarak kullanılan benzinin maliyeti ise 0.3\$/lt (1.25\$/gallon) olarak alınmıştır.

Doğalgazdan buharla reaksiyon yöntemi ile elde edilen gaz haldeki hidrojenin maliyeti 0.53\$/lt.b.e. (litre benzin eşdeğeri)'dir. Ancak doğalgaz fiyatları stabil olmadığından, doğalgaz ithal bir kaynak olduğundan ve bu üretimde hava kirliliği yine söz konusu olduğundan, hidrojenin elektrolizle üretiminin fiyatları daha önemlidir.

Elektrolizle hidrojen üretiminde, kullanılan elektriğin fiyatı, maliyeti doğrudan etkilemektedir. Elektrik fiyatını 3 cent/kWs olarak kabul edersek bunun hidrojen maliyetine etkisi 0.42 lt.b.e.'dir. Elektroliz cihazının fiyatının 800 \$/kW olması durumunda bunun hidrojen maliyetine katkısı diğer işletme giderleri ile beraber 0.26 lt.b.e. olmaktadır. Hidrojenin genel olarak sıvı halde taşınıp depolanması uygun olmaktadır. Hidrojenin sıvı hale getirilmesi ise 0.1\$/lt.b.e. bir yük getirmektedir. Böylece elektrolizle üretilen sıvı hidrojenin maliyeti 0.78 \$/lt.b.e.'dir.

Eğer hidrojen, hidrojen yakıtlı içten yanmalı motorda kullanılacaksa, bu motor benzin motoruna göre daha verimlidir. Ayrıca hidrojen motoru organik asit ve karbon depozitleri üretmediğinden benzin motoruna kıyasla daha uzun ömürlüdür. Benzinin çevreye yaydığı kirliliğin maliyeti de hesaba katıldığında (ve hidrojen motorunun birim maliyetinin seri üretim durumunda benzin motoru ile aynı olacağı gözönüne alındığında) hidrojenin maliyeti benzin ile rekabet eder duruma gelmektedir.

Eğer hidrojen, yakıt pilinde elektrik üretimi için kullanılacaksa verimlilik daha da artmaktadır, çünkü içten yanmalı motorun %30 verimliliğine karşı yakıt pilinin verimliliği %60'dır. Ancak buna karşın yakıt pillerinin halihazırdaki maliyetleri çok yüksektir. Arabalar için üretilen 5000 saat ömürlü yakıt pillerinin yaklaşık maliyeti 300\$/kW'dır.

'Freedom Car' programında yürütülen AR-GE faaliyetlerinin sonucu olmak üzere hidrojen, yakıt pili ve hidrojen motorunun birim maliyetleri için belirli hedefler konmuştur. Hidrojenin maliyeti ile ilgili hedef, elektroliz cihazının daha verimli bir hale getirilmesi ve diğer hidrojen elde etme yöntemlerindeki gelişmelerle hidrojenin pazar fiyatının 2010 yılında 0.4\$/lt.b.e. olmasıdır. 'Freedom Car' programının, teknolojik gelişme ile beraber seri üretim sayesinde elde edilmesi hedeflenen yakıt pili maliyeti ise 2010 yılı için 45 \$/kW, 2015 yılı için ise 30\$/kW'dır. Ayrıca yakıt pilli arabalar için gereken elektrik tahrik düzenleri ve elektrik bataryasının 2010 yılı fiyat hedefi 32\$/kW'dır. Hidrojen motorlu modellerde ise hidrojen motoru ve hareket iletim sisteminin 2010 yılı hedef maliyeti 45\$/kW, 2015 yılı hedef maliyeti ise 30\$/kW'dır.

Türkiye'nin Yapması Gerekenler:

Ülkemiz hidrojen enerjisinden hangi zamanlarda ne şekilde faydalanacağını planlamalıdır. Eğer Türkiye hidrojen enerjisi konusundaki gelişmeleri uzaktan izlerse gelecekte büyük bedeller ödemek zorunda kalır. Yakıt pilleri ile ilgili olarak ve özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarını değerlendirmek üzere bu konulardaki teknolojik yenilikleri uygulamak ve geliştirmek için AR-GE çalışmaları yapılmalıdır. Avrupa Birliği Altıncı Çerçeve programı Türkiye için bir fırsattır, çünkü Türkiye'nin de katılmakta olduğu bu programda hidrojen ile ilgili çalışmalara çok yüksek bir kaynak ayrılmıştır. Bilindiği gibi AB Çerçeve programı

projelerinde amaçlardan biri AR-GE çalışmalarının Avrupa üzerinde yaygın bir şekilde yapılmasıdır. Herbir proje için çok sayıda ülkenin üniversite ve şirketlerinin katılımı aranmakta ve bilgi iletişimi ile ortak AR-GE çalışmaları özendirilmektedir. Ülkemizdeki enerji ile ilgili AR-GE kurumlarının ve otomobil üretici firmalarının bu projelere aktif olarak katılmaları sağlanmalıdır. Dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta olarak, oluşan bilgi birikiminin AR-GE çalışmalarının sürekliliğini sağlamak üzere kişilerde değil kurumlarda kalması sağlanmalıdır.

Hidrojen için gereken elektrik üretiminde birincil enerji kaynakları olarak özellikle ülkemizde bulunan ve yenilenebilir kaynaklara rağbet edilmelidir. Bunların başında, çok düşük maliyetle elektrik elde edilebildiği için hidroelektrik enerjisi gelmektedir. Halen %20'sinin kullanıldığı hidroelektrik potansiyelinin tümünün kullanılması gerekir. Ayrıca rüzgar enerjisi de önemli bir potansiyele sahiptir. Ancak rüzgardan elektrik üretimi düzensiz olduğu için belli bir miktardan sonra şebeke kullanımına uygun değildir. Hidrojen, saklanabilir bir enerji taşıyıcısı olduğu için rüzgarın bu potansiyelinin uygun olarak değerlendirilmesine fırsat vermektedir. Halen rüzgar santrallerinde elde edilen elektriğin maliyeti 3.6 cent/kWs'dir. Ancak 2010 yılında bu maliyetin 2.6 cent/kWs'a düşmesi beklenmektedir. Yine düzensiz elektrik enerjisi kaynaklarından olan güneş enerjisinden hidrojen elde edilmesi ise en önemli potansiyellerden birisini oluşturmaktadır.

Kaynaklar:

1. Calculating hydrogen production costs, EV World: The World of Electric, Hybrid & Fuel Cell Vehicles, 21 Mart 2003.
2. National Hydrogen Energy Roadmap, ABD Enerji Bakanlığı, Kasım 2002
3. FreedomCAR Partnership Plan, ABD Enerji Bakanlığı, 2 Eylül 2002.
4. Fuel Cell Report to Congress, Şubat 2003.
5. Wind Force 12, European Wind Energy Association (EWEA), 2002.