

# Makale

## HİDROJENİN GÜNÜMÜZDEKİ DURUMU\*

*Doç. Dr. Z. Sema BAYKARA Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği*

*Amerikan Akademisinden sonra Boğaziçi Üniversitesi'nde Kimya Mühendisliğinde lisans (1975) ve Salford Üniversitesinden Yüksek Lisans (1977) derecelerini aldı. Von Karman Akışkanlar Dinamiği Enstitüsünde ölçüm teknikleri üzerine ihtisas yaptı (1976). TUBİTAK Marmara Araştırma Enstitüsü Uygulamalı Fizik Bölümü'nde araştırmacı olarak çalıştı (1978-81). Doktora çalışmasını Montreal Üniversitesi Makina Mühendisliği bölümünde Herotermik Anabilim dalında yaptı. TÜBİTAK Marmara Araştırma Enstitüsü Makina ve Enerji bölümünde araştırma uzmanı olarak çalıştı (1986-1991). Halen YTU Kimya Mühendisliği bölümünde doçent olarak görevlidir. Akışkanlar Mekaniği ve Isıl Bilimler alanlarında hesaplamalı ve uygulamalı çalışmalar yapmış, suyun güneş enerjisi ile termoliğini ilk olarak gerçekleştiren ekipte yer almış, bu prosesi NATO desteğiyle geliştirerek verimini arttırmayı başarmıştır.*

Uluslararası çevrelerden yüksek sayıda atıf almış muhtelif eserleri mevcuttur.

### ÖZET

Hidrojen günümüzde hammadde olarak ağırlığını korumakla birlikte üretim, yakma ve depolama teknolojilerindeki gelişmeler sonucu bir enerji taşıyıcı ve yakıt olarak da önem kazanmaktadır.

En gelişmiş ülkelerin yanı sıra birçok ülkelerde hidrojen ekonomisi doğrultusunda ulusal plan ve programlar hazırlanmakta, ilgili teknolojilerin geliştirilmesi ve uyarlanması için geniş kapsamlı ve yoğun araştırmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmada hidrojen kısaca ele alınmakta ve özellikle enerji alanındaki durumu gözden geçirilmektedir.

### GİRİŞ

Zaman içinde sıvı ve gaz yakıtların arzında meydana gelecek açıkların kömürden elde edilecek sentetik yakıtlarla kapatılması ve nihai olarak bu kaynakların nükleer (fizyon ve füzyon) enerji ve yenilenebilir enerjiyle (su gücü, güneş, rüzgâr) üretilen elektrikle ikamesi öngörülmektedir. Oysa, kurulu düzendeki uygulamaların çoğu elektrikle değil yakıtla çalışmaktadır. Bu kapsamda, sudan elde edilebilen ve çevreyi en az kirleten bir yakıt olarak hidrojen ağırlık kazanmıştır.

Hammadde olarak hidrojen, petrol arıtımı ve sentetik yakıt üretiminde, kimya (amonyak, metanol vb.) metal (indirgeme ve kaynak işlemleri), gıda (yağların hidrojenasyonu) cam, ilaç ve elektronik endüstrilerin-dc kullanılmaktadır.

Hidrojen, birincil kaynaklardan (Tablo 1) gene birincil kaynaklarla üretilir (Şekil 1).

### HİDROJEN ÜRETİMİ

Hidrojen, geleneksel olarak hidrokarbonlardan ve sudan üretilmektedir(1). Hidrokarbonların tükenebilir oluşu ileride hidrojenin daha ziyade sudan üretilmesini ve üretim teknolojilerinin bu yönde geliştirilmesini gerektirmektedir. Nitekim, son zamanlarda çalışmalar bu yönde yoğunlaşmaktadır. Üretim yöntemleri, yaygın bir şekilde kullanılmakta olan ticari yöntemler ve diğer yöntemler olmak üzere iki grupta toplanabilir (Tablo 2a).

Enerji krizinden bu yana, ileriye dönük olarak hidrojenin yeryüzünde ve uzayda yenilenebilir enerjiyle üretilmesine yönelik tasarım, malzeme ve uygulama çalışmaları geniş ölçekte ve muhtelif aşamalarda sürmektedir. Gelişmiş ülkeler aralarında işbirliği yaparak bir sektöre uzanan çok geniş kapsamlı ve uzun vadeli ortak projeler yapmaktadırlar(3).

Güneş enerjisinin hidrojen üretiminde kullanılması, çeşitli optik düzeneklerle yoğunlaştırılan yüksek sıcaklıktaki güneş radyasyonu ile doğrudan veya dolaylı olarak hidrokarbon kökenli maddelerden (özellikle kömür) ve sudan veya fotovoltaik düzeneklerle üretilen elektrik ve elektrolizle sudan hidrojen elde edilmesiyle gerçekleşir(4). Bu teknolojilerle üretilen hidrojen şimdilik ticari yöntemlerle kömürden üretilen hidrojene kıyasla yaklaşık 3-15 kat, ticari elektrolizle sudan üretilen hidrojene kıyasla da 1-4 kat maliyet taşımaktadır (Tablo 2b). Zaman içinde kömür rezervlerinin azalması ve güneş teknolojilerinde görülen gelişmeler ve ucuzlama bu maliyetleri ister istemez düşürecektir.

**bakınız: 25**

**Tablo 1: Birincil Kaynaklar ve Hidrojen Talebi**

<u><i>Birincil Kaynaklar:</i></u> Petrol Doğal Gaz (NG) Sıvılaştırılmış Petrol Gazı (LPG) Kömür Yenilenebilir Kaynaklar (su gücü, güneş, rüzgar vb.) Nükleer Yakıtlar
<u><i>Hidrojen</i></u> Hammadde Olarak Talep: Petrol Arıtımı Kimyasal Endüstri (amonyak, metanol, yağ vb.) Sentetik Yakıt Üretimi Metalurji Enerji Kaynağı Olarak Talep: Ulaşım Sektörü (uzay, hava, kara, deniz) Merkezi Enerji Santralleri (elektrik, ısı)

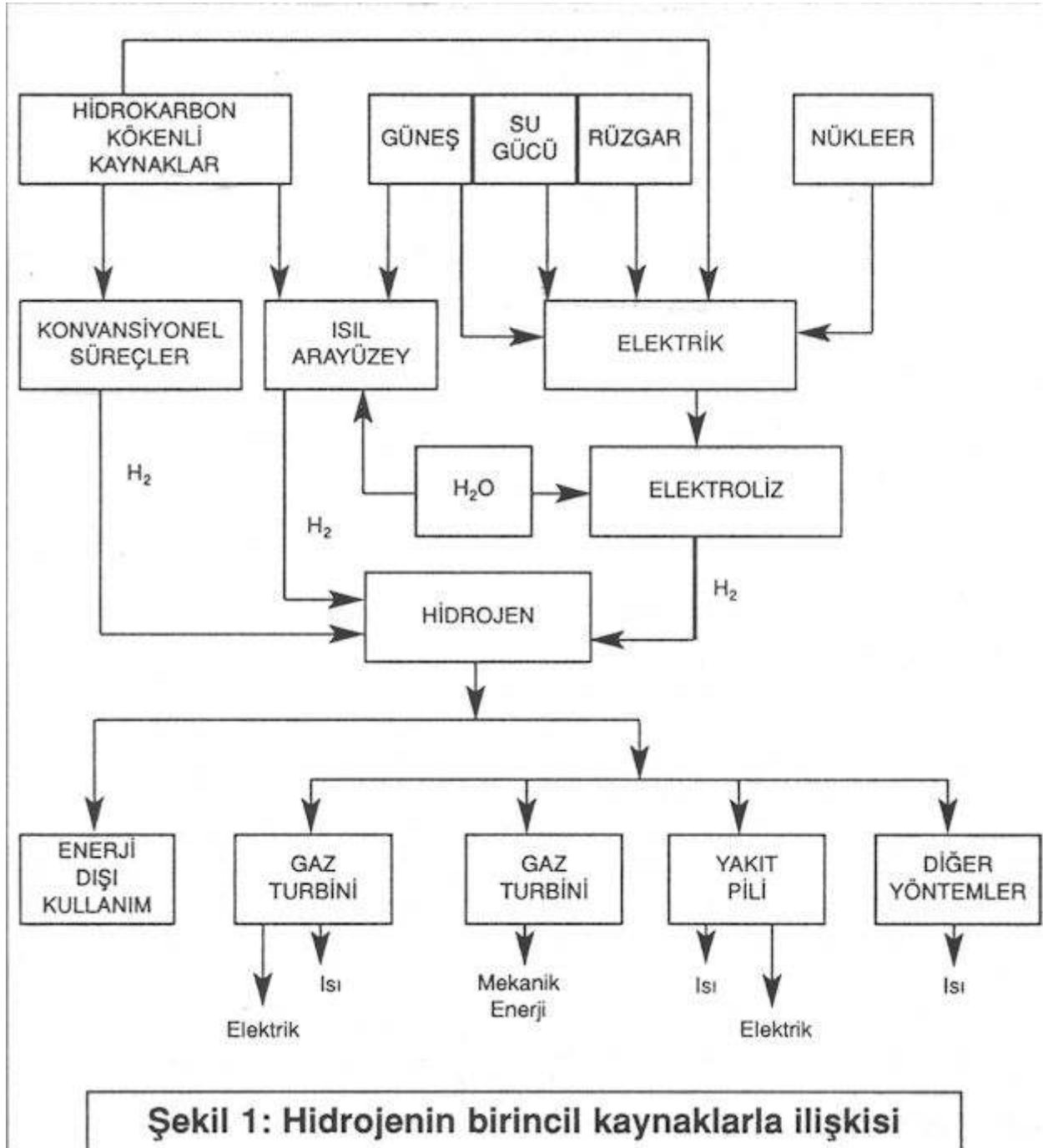
**Tablo 2(a): Hidrojen Üretim Yöntemleri**

<u><i>Ticari Yöntemler</i></u> Hidrokarbonların Buharla Katalitik Bozunumu Hidrokarbonların Basınç Altında Kısmi Oksitlenmesi Kömürün Gazlaştırılması Suyun Elektrolizi
<u><i>Diğer Yöntemler</i></u> Hidrokarbon Kaynaklı Yöntemler: Şehir gazı üretimi Hidrokarbonların buhar ve oksijenle oksitlenmesi Hidrokarbonların ve doğalgazın ısı dekompozisyonu Metanın içten patlamalı motorlarda oksitlenmesi Suyun Kimyasal Dekompozisyonu: Suyun Termolizi Termokimyasal Çevrimler H <sub>2</sub> S Dekompozisyonu

**HİDROJENİN DEPOLANMASI**

Hidrojen basınç altında gaz olarak veya 20K sıcaklıkta sıvı olarak büyük hacimlerde depolanabilir. Sıvılaştırarak depolamanın maliyeti diğerinin on katı civarındadır. Depolama tesisi türü, hidrojen kullanım talebinin gereksinimlerine (sağlık derecesi, miktar vs.) göre seçilebilir. Depolama maliyeti tesisin büyüklüğü ve karmaşıklık düzeyiyle orantılıdır. Endüstriyel hammadde olarak üretilen hidrojenin büyük bir kısmı üretim tesisleri yakınında tüketilmektedir. Dolayısıyla, bu bölgelerde hidrojen düşük basınçlı gaz depolarında, yüksek basınçlı çelik tanklarda ve düşük sıcaklık tekniğinin uygulandığı depolarda biriktirilir. Sıvı hidrojen, hacmi 1000 m<sup>3</sup> veya daha fazla olan özel yalıtımlı geniş tanklar içinde büyük ölçekte depolanabilir.

**bakınız: 26**



Hidrojen aynı zamanda metal hidrürler(5) karbon tüpler ve cam mikrokürecikler içinde(6) ve karbona emdirilerek(7) depolanabilir.

Hidrojen bir enerji taşıyıcı olarak kullanıldığında doğacak büyük ölçekte depolama gereksinimi yeraltında gözenekli rezervuarlar (su rezervleri gibi) ve mağaralar (tuz rezervleri gibi) içinde karşılanabilir (Tablo 3b).

**Tablo 2(b): Güneş enerjisinin kullanıldığı muhtelif proseslerle üretilen hidrojen maliyeti<sup>(4)</sup>.**

İncelenen Proses Türleri	Maliyet (maliyet) <sub>j</sub>	Maliyet (maliyet) <sub>k</sub>
a) Suyun Güneşle <sup>1</sup> Elektrolizi	1.1	4.4
b) Suyun Güneşle <sup>2</sup> Elektrolizi	3.9	15.2
c) Suyun Güneşle <sup>3</sup> Elektrolizi	2.6	10.1
d) Suyun Güneşle <sup>4</sup> Termolizi	3.3	12.5
e) Suyun Melez Termoliz ve Elektrolizi (a+d)	2.2	8.6
f) Kömürün Güneşle <sup>5</sup> Gazlaştırılması <sup>6</sup>	0.8	2.9
g) Kömürün Melez Gazlaştırılması (f+6)	0.7	2.6
h) Güneşle <sup>5</sup> Termokimyasal Çevrim <sup>7</sup>	1.9	7.3
i) Güneşle <sup>5</sup> Melez Termokimyasal Çevrim <sup>8</sup>	1.6	6.2
j) Ticari Elektroliz	1.0	3.8
k) Ticari Kömür Gazlaştırma <sup>6</sup>	0.3	1.0
<p>1: Güneş proses ısıyla (parabolik odaklayıcı) elektrik üretimi            2: Güneş pilleri ile elektrik üretimi            3: Güneş proses ısıyla (güneş kulesi) elektrik üretimi            4: Güneş proses ısı (parabolik odaklayıcı) üretimi            5: Güneş proses ısı (güneş kulesi) üretimi            6: Koppers-Totzek kömür gazlaştırma yöntemi            7: GA Termokimyasal çevrimi            8: Mark 11 Termokimyasal çevrimi</p>		
<p>Kabuller: %15 sabit giderler            \$10/ton kömür fiyatı</p>		

Depolamayla ilgili standartlar literatürde mevcuttur(8).

Depolama teknikleri kısaca gözden geçirilecek olursa her amaca uygun tek ve ekonomik bir yöntem bulunmadığı görülmektedir.

Hidrojenin gaz fazında depolanması endüstriyel uygulamalar için olduğu kadar sıradan bir yakıt olarak kullanımı için de uygundur. Burada gerekli olan basınçlı depolar içinde hidrojen depolama maliyeti(\$/m<sup>3</sup>) gazı yeraltındaki doğal mağaralarda depolama maliyeti 30 katı kadardır. Bazı kaynaklarda(9) bildirilen mali verilere göre bu fark 50 kata varmaktadır. Yeraltı depolanması yüksek saflıkta hidrojen için uygun olmayabilir.

Hidrojenin mevcut yöntemlerle sıvılaştırılması ısı değeri %30'una eşdeğer bir enerji gerektirmektedir. Ayrıca depolama, iletim ve kullanım sırasında meydana gelen "buharlaşma kaçakları" mevcut yanma enerjisinin %40 kadarının kaybına yol açmaktadır. Buharlaşan hidrojenin yeniden sıvı faza döndürülmesi için çalışmalar yapılmaktadır\*10).

Metal hidrürler (Tablo 4), enerji yoğunluğu (wh/kg), maliyet, malzemeler, depolama kinetiği ve döngünün ömrü açılarından incelenmektedir. Düşük sıcaklıkta çalışan hidrürler 273 K altındaki sıcaklıklarda 100 km/m<sup>2</sup> değerindeki hidrojen denge basıncına ulaşırlar, örneğin FeTi alaşımları (253K) bu tür hidrürler oluştururlar, yüksek sıcaklıkta çalışan hidrürler ise bu basınca 473 K'i aşan sıcaklıklarda ulaşırlar (Mg<sub>2</sub>Ni hidrürleri [523K]gibi). Düşük sıcaklık hidrürlerinin dekompozisyonu çevre ısıyla gerçekleşebilir.

Cam mikrokürecikler içinde hidrojen depolama imkânları araştırılmaktadır. Cam 670K dolaylarında hidrojene karşı geçirgenleşmektedir. Kapital yatırım, enerji girdisi ve güvenlik açısından çekici gözükse de bu teknolojiyle (6) 50 kg/m<sup>3</sup> dolayında hidrojen yoğunluğuna erişmek mümkündür.

**Tablo 3(a): Hidrojen İçin Depolama Seçenekleri**

<p><u>Yerüstünde Depolama</u></p> <p>Basıncılı Gaz ve Düşük Sıcaklıkta Sıvı (Özel Tanklar içinde)</p> <p>Boru Hatları</p> <p>Metal Hidrürler</p> <p>Karbon Tüpler, Cam Mikrokürecikler</p>
<p><u>Yeraltında Depolama</u></p> <p>Gözenekli Rezervuarlar (su, doğalgaz, petrol yatakları)</p> <p>Mağaralar (tuz yatakları, eski madenler vb).</p>

**Tablo 3(b): Bazı hidrojen depolama sistemleri için enerji gereksinimi(6) ve maliyet verileri**

Depolama Yöntemi	Enerji Gereksinimi		Maliyet (kW.saatt/kg)
	(MJ/kg)	(GJ/m <sup>3</sup> )	
Sıvı Hidrojen (20K)	120	8	33.33
Gaz Hidrojen (15000 kN/m <sup>2</sup> )	1.5	2	0.42
Hidrürler (ortalama)	2.0	3	0.55
Mikrokürecikler (50 kgH <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	5.3	3.5	1.47

bakınız: 29.

**Tablo 4: Metal-hidrür depolama için bazı seçenekler<sup>(5)</sup>.**

Metal Hidrür	Oluşum Isısı (kJ/mol)	g(Hidrojen) g(Metal) (%)	Diğer Gaz Etkileri (Su Buharı, O <sub>2</sub> )	Genel Soğurma Hızı
LaNi <sub>5</sub>	-30 155	1.52	Az	Hızlı
LaCuNi <sub>4</sub>	-31 400	1.35	Az	Hızlı
La <sub>0.7</sub> Ce <sub>0.3</sub> Ni <sub>5</sub>	-29 307	1.60	Az	Hızlı
SmCO <sub>5</sub>	-27 214	0.67	Az	Hızlı
Vanadyum	-40 193	5.9	Fazla	Hızlı
Niyobyum	-29 307	2.1	Fazla	
Nagnezyum	-74 525	7.6	Fazla	Yavaş
FeTi	-23 027	1.8	Fazla	Hızlı
Mg <sub>0.93</sub> Ni <sub>0.07</sub>	-71 175	5.7	Fazla	Hızlı

Hidrojenin basınç altında (~20x10<sup>6</sup> N/m<sup>2</sup>) ve çevre sıcaklığı altındaki sıcaklıklarda karbon toz ve tanelerine emdirilerek depolanması da gündemdedir\*7).

Bazı hidrojen depolama sistemleri için en iyi ve maliyet verileri Tablo 3(b)de verilmektedir.

### **HİDROJENİN İLETİMİ**

Hidrojen gazı, 1600 kN/m<sup>2</sup> basınç altında, hacmi 7.5 m<sup>3</sup>'e varan çelik gaz silindirler içinde veya 700-5100 m<sup>3</sup> hacimdeki yüksek basınçlı gaz tankerleriyle ticari olarak taşınmaktadır. Gaz hidrojenin büyük ölçekteki sevkiyatı için 5000 kN/m<sup>2</sup> basınçta çalıştırılan mevcut doğal gaz hatlarının kullanılması da mümkündür(11).

Sıvı hidrojen iletimi, içinde sıcaklığın 20K düzeyinde tutulduğu 36 ve 107 m<sup>3</sup> kapasitede ve düşük sıcaklık teknolojisi normlarına göre yalıtılmış özel tanker vagonlarla demir yolu ile gerçekleştirilmektedir(12). İletim için standartlar mevcuttur(13). Deniz yoluyla büyük ölçekte sıvı hidrojen iletimi üzerinde de çalışmalar yapılmaktadır\*(1).

Karmaşık teknoloji gereksinimine rağmen hidrojenin sıvı fazda iletiminin en ekonomik taşıma yöntemi olduğuna inanılmaktadır(10).

### **GÜVENLİK AÇISINDAN HİDROJEN**

Hidrojen zehirli bir gaz değildir. Kullanımındaki tehlike oksijen ve havayla karıştığında ileri derecede tutuşabilir olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, renksiz ve kokusuz oluşu ve çok soluk bir alevle yanması dolayısıyla varlığı kolayca fark edilemez. Hidrojenin ve diğer bazı yakıtların güvenlikle ilgili özellikleri Tablo 5'te verilmektedir.

Hidrojen-hava karışımlarının patlama ve tutuşma sınırları benzin ve metan ve hava karışımlarına nazaran çok daha geniştir. Hidrojenin moleküler ağırlığı, yoğunluğu (havanın 1/14 misli, metanın 2/3 misli) ve viskozitesi çok düşüktür. En küçük molekül olması nedeniyle depo ve boru malzemeleri içine rahatlıkla sızarak metalleri kırılmalara sebep olur; kolaylıkla kaçak yapılabilir.

Büyük ölçekte hidrojenin kullanıldığı açık hava amonyak tesislerinde yangın olayları seyrek olup genellikle talimatlara yeterince uyulmamasından kaynaklanmaktadır.

**bakınız: 30.**

Tablo 5(a): Hidrojen ve bazı yakıtların güvenlikle ilgili özellikleri<sup>(16)</sup>.

Özellik	Hidrojen	Metan	Metanol	Benzin	Jet Yakıtı (JP-Y)
Kaynama sıcaklığı (K)	20.3	112	338	—	—
Buharlaştırma Isısı (MJ/kg)	0.45	0.51	1.1	—	—
Özgül ağırlık (kaynama)	1.03	1.38	—	—	—
Özgül ağırlık	0.07	0.55	—	—	—
Difüzyon katsayısı (cm <sup>2</sup> /s)	0.63	0.2	—	0.08	—
Havayla tutuşma sınırı (%hacim)	4.1-74	5.3-15	6.0-37	1.5-7.6	0.8-5.6
Havayla patlama sınırı (%hacim)	18-59	6.3-14	—	—	—
Ateşleme sıcaklığı (K)	850	807	700	530	522
Ateşleme enerjisi (MJ)	20	300	—	250	—
Alev sıcaklığı (K)	2400	2190	—	—	—
Alev hızı (m/s)	2.75	0.37	0.41	<0.3	—
Söndürme mesafesi (cm)	0.06	0.23	—	>0.25	—
Alev yayınlılığı	0.10	1.00	—	—	—
Yanma ısısı (MJ/kg)	120	50	20	44	43
Yanma ısısı (GJ/m <sup>3</sup> )	8.5	21	16	31	34

**bakınız: 31.**

Tablo 5(b): Sıvı durumdaki hidrojen ve doğalgazın bazı özellikleri<sup>(11)</sup>

Özellik	Sıvı Hidrojen	Sıvı Doğalgaz
Ergime noktası (K)	13.95	90.75
Kaynama noktası (K)	20.45	111.85
Kritik sıcaklık (K)	33.15	190.35
Kritik basınç (kN/m <sup>2</sup> )	13.1	46.4
Sıvı özgül ağırlığı	0.70	0.47
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	71.0	42.4
Viskozite (Ns/m <sup>2</sup> )	18.2 x 10 <sup>-6</sup>	140x10 <sup>-5</sup>



Petrokimya endüstrisinde yangınların yarısından fazlası belli ekipman elemanlarından (contalar, boruflaşları, vana aksamı, eşanjörler, atık ısı kazanları gibi) gaz sızması sonucu çıkmaktadır. Sıvı hidrojen uzun süredir roket yakıtı olarak kullanıldığından güvenlikle ilgili deneyim ve bilgi birikimi oluşmuştur.

Sıvı hidrojenin depolama sıcaklığı çok düşüktür [Tablo 5(b)]. İyi yalıtılmamış katlarda sıvı hidrojenle temas eden hava sıvılaşır ve hidrojene karışarak yangın tehlikesi oluşturur.

Sıvı hidrojen döküldüğünde çevresindeki hava atmosferle denge halinde sıvılaşır, yaklaşık %50 oranında hidrojen-oksijen karışımı oluşur ve bir yangına veya patlamaya neden olabilir.

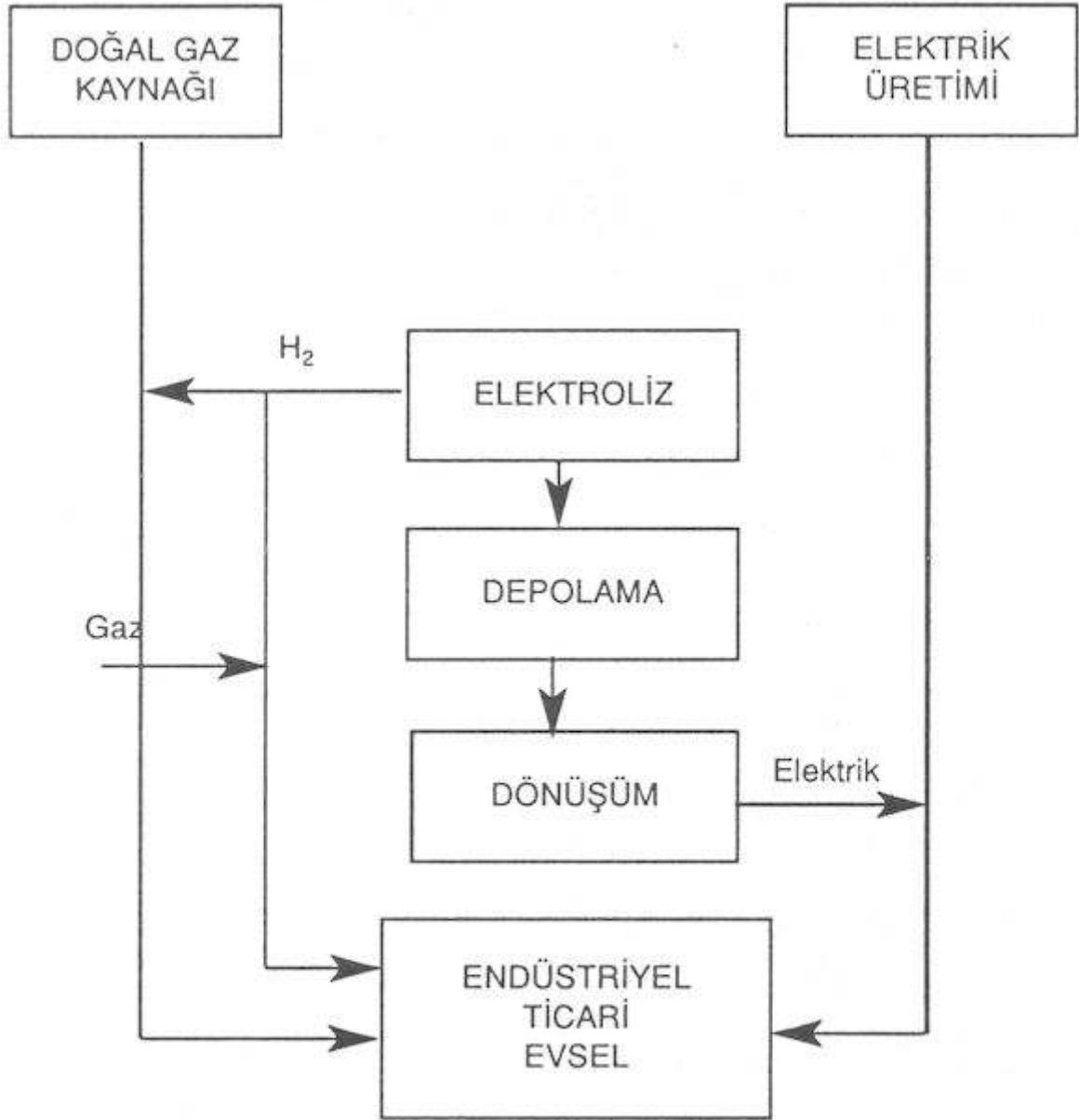
Viskozitesi çok düşük olduğundan hidrojen defolu tanklardan yüksek hızla sızabilir. Bu yüzden sıvı hidrojen, çift cidarı arasındaki hava boşaltılıp yerine perlit doldurularak yalıtılmış Devar tipi sağlam kaplarda depolanır. Uzun süre depolanan hidrojen "buharlaşma kayıpları" ile eksilebilir.

**bakınız: 32.**

**Tablo 6: Tank tipi elektroliz hücrelerinin bazı özellikleri<sup>(17)</sup>**

Teknoloji	Voltaj (V)	Verim (%)	Akım Yoğunluğu (mA/cm <sup>2</sup> )	Basınç (10 <sup>5</sup> N/m <sup>2</sup> )
Electrolyser Corp.				
1978-Öncesi	2.04	71	135	1.03
1983-Sonrası	1.8	83	190	1.03
General Electric				
1985-Sonrası	1.7	88	1080	30-60

**bakınız: 33.**



**Şekil 2: Hidrojenin mevcut gaz ve elektrik şebekesine entegrasyonu.**

Buharlaşma kayıpları, isveren "orfo-para" dönüşüm reaksiyonu, tanka ısı aktarımı ve çalkalanma dolayısıyla veya tanktan hidrojen boşaltma sırasında oluşabilir(10).

Hacmi 103 m3 mertebesindeki hareketsiz depolardan günde %0.03-0.05, hacmi 10M0 m3 düzeyindeki demiryolu ve karayolu tanklarından günde %0.3-0.5 ve hacmi 1 m3 dolayında olan hareket halindeki depolardan günde %1-2 buharlaşma kaybı olduğu saptanmıştır(15).

bakınız: 34.

**Tablo 7: Yakıt pilleri<sup>(18)</sup>**

Yakıt Pili Tipi	Elektrolit Malzeme	Çalışma Sıcaklığı (K)
Alkalin	Potasyum hidroksit	320-360
Proton değişim membranı	Polimerik	320-400
Fosforik asit	Ortofosforik asit	460-480
Erimiş karbonat	Lityum/potasyum karbonat karışımı	900-920
Katı oksit	Stabilize zirkonyum oksit	1170-1270
Biyolojik	Sodyum klorür	Çevre sıcaklığı
Doğrudan metanol	Sülfürik asit veya polimer	320-390

bakınız: 35.

**Tablo 8: Ulaşım sektöründe yakıt ikame olasılıkları.**

Alt Sektörler	Kullanılan Yakıt	İkame Potansiyeli
Demiryolları	Dizel	Elektrik, sıvı H <sub>2</sub>
Karayolları otomobil Ağır taşıtlar	Benzin Dizel	Sentetik Yakıtlar, H <sub>2</sub> Elektrik, Sıvı H <sub>2</sub> , Hidrürler
Havayolları	Jet Yakıtı	Sentetik Yakıtlar, Sıvı H <sub>2</sub>
Denizyolları	Dizel	Sentetik Yakıtlar, Sıvı H <sub>2</sub> , Hidrürler

bakınız: 36.

**Tablo 9 : Bazı yakıtların depolamaya ilişkin özellikleri<sup>(20)</sup>.**

Yakıt	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Enerji içeriği		kg(Yakıt) ng(Depo+Yakıt)
		(kJ/kg)	(kJ/m <sup>3</sup> )	
Benzin	70	44.38	311.70	0.92
Metan Gazı	114	50.00	56.85	-
Sıvı Propan	510	44.4	236.00	0.80
Metanol	797	20.10	160.20	0.92
Etanol	795	26.86	213.70	0.92
Sıvı Hidrojen	71	120.9	85.90	0.40
Hidrojen Gazı	1.07	12.9	12.92	-
Hidrür (Mg <sub>2</sub> Ni)	1760	10.10	179.00	0.05
Sıvı Amonyak	771	18.60	143.50	0.29

## ENERJİ SEKTÖRÜNDE HİDROJEN

Hidrojenin doğal gaz dağıtım şebekesinde enerji taşıyıcı; merkezi güç ve proses ısı üretimi ve mekan ısıtmada ve muhtelif taşıtlarda yakıt olarak kullanımı gündemdedir. Ayrıca, konvansiyonel ve nükleer elektrik santrallerindeki atıl kapasite suyun elektrolizi (Tablo 6) ile hidrojene dönüştürülerek depolanıp, gerektiğinde gaz şebekesine veya tekrar elektriğe dönüştürülerek elektrik şebekesine verilebilir (Şekil 2).

## Enerji Taşıyıcı Olarak Hidrojen

Hidrojenin doğal gaz hatlarına, karışımın enerji içeriğini belli bir düzeyin altına düşürmeyecek bir yüzde ile (%10 gibi), katılması veya hidrojen için benzer bir dağıtım şebekesi düşünmesi uygun görülmektedir. Basınç düzeyi 5170 kN/m<sup>2</sup> olan mevcut doğal gaz hatlarının enerji kapasitesi değişmeksizin sırf hidrojen iletiminde kullanılabilmesi için kompresörde 3-8 kat gaz işlenmesi ve kompresör gücünün 5.5 kat artması gerekmektedir(11).

**bakınız: 37.**

Tablo 10: Sentetik yakıtların ulaşımda kullanım verimi<sup>(21)</sup>

Sentetik Yakıt	Kaynak	Üretimden Yakmaya Kadar Net Verim (%)
Benzin	Kömür	12
Metan	Kömür	12
Metanol	Kömür	10
Hidrojen (Metal Hidrür)	Kömür	12
Sıvı Hidrojen	Kömür	12
Sıvı Hidrojen	Su Nükleer Elektrik	5

bakınız: 38.

**Tablo 11: Hidrojen Yakıtlı Taşıtlardan Bazı Örnekler<sup>(22)</sup>**

Taşıt	Firma, Ülke	Depolama Sistemi	Yakma Sistemi
Araba	BMW Almanya	Sıvı H <sub>2</sub> (T-20K, P-500 kN/m <sup>2</sup> )	
Araba	ABD	Gaz H <sub>2</sub> Akü	Yakıt Pili Elektrik Motoru
Minibüs	ENEA, VM İtalya	Gaz H <sub>2</sub> , Benzin	H <sub>2</sub> ve benzin ile çalışabilen motor
Kamyonet	UNICAMP Brazilya	Metal Hidrür (FeTi, MgNi)	Kombi VW Motor
Otobüs	Daimler-Benz Almanya	Gaz H <sub>2</sub> (p- 300.000 kN/m <sup>2</sup> )	Dizel-kaynaklı motor
Otobüs	Kanada	Sıvı H <sub>2</sub> (T-20K, alçak P) Akü	Yakıt Pili Elektrik Motoru
Tekne (2)	Ansaldo İtalya	Sıvı H <sub>2</sub> Akü	Yakıt Pili Elektrik Motoru
Uçak (19)	Almanya Rusya	Sıvı H <sub>2</sub>	Sıvı H <sub>2</sub> Beslemeli Uçak Motoru

Dağıtım şebekesinde meydana gelebilecek hidrojen kaçağı hacmi doğal gaz kaçağının üç misli kadar olmakla birlikte kaçaktan kaynaklanan enerjiyi kaybı her iki gaz için hemen hemen eşit miktardadır. Kullanılmakta olan eski boru hatlarında yaklaşık 1760-7000 mVkm dolayında doğal gaz kaçağı olduğu tahmin edilmektedir. Plastik borulardaki kaçaklar daha düşük düzeydedir.

### Isı Üretiminde Hidrojen

Hidrojen, yan ürün olarak üretildiği endüstriyel tesislerde ve "hava gazı" ismiyle bilinen gaz karışımı olarak zaten uzun süredir mevcut yakma teknolojileriyle proses ısı üretiminde kullanılmaktadır. Bu amaçla kullanılmak üzere muhtelif kapasitelerde yakıt pilleri geliştirilmiş bulunmaktadır (Tablo 7)

Mekan ısıtma amacıyla sözü geçen teknolojilerin yanı sıra hidrojenin metal tarafından soğurulması sırasında çevreye ısı veren metal hidrürlerin(5) kullanıldığı çevrimler de uygulanabilir.

Gaz şebekesinden uzak olan bölgelerde küçük çaptaki (<10 MWe) hidroelektrik kapasite elektrolizle hidrojene dönüştürülerek gerektiğinde kullanılmak üzere depolanabilir.

## ULAŞIMDA HİDROJEN

Yanma sonucu çoğu yakıtlarda ortaya çıkan karbon oksitleri, kükürt dioksit, partiküller ve koku hidrojeninde yoktur. Oluşan NOx miktarı daha azdır. Buna karşın düşük yoğunluğu nedeniyle taşıtlarda diğer yakıtlardan daha geniş hacim kaplar. Yanma ürünü olan su buharının yol açabileceği sera etkisi yeryüzünde yalnızca 3-4 gün içinde kaybolur. Bu süre CO2 için 10000 kat daha uzundur.

Ulaşımında yakıt ikame olasılıkları Tablo 8'de, muhtelif yakıtların depolamaya ilişkin bazı özellikleri Tablo 9'da verilmektedir.

## Uzay ve Havacılık

Yüzyılımızda daha ziyade roket yakıtı olarak kullanılmakta olan hidrojen çeşitli motor tasarımları ile uyumlu oluşu dolayısıyla ocaklarda da kullanılmaya başlanmıştır<sup>9</sup>). Yakıtın uçaklarda sıvı olarak taşınması uygun görülmektedir. Hidrojenin enerji içeriği hidrokarbon yakıtlara nazaran 2.8 kat fazla olduğundan taşınan yakıt azalmaktadır. Böylelikle jet yakıtlı bir uçağa kıyasla, kalkış ağırlığı %25 eksilmekte ve yük taşıma mesafesi %30-35 artmakta; kalkış daha gürültüsüz gerçekleşmektedir. Hidrojen zayıf karışımla yandığından az NOx oluşmakta, yanma ürünü olarak çıkan su buharı yüksek uçuş irtifalarında sera etkisine neden olmakla birlikte stratosferde kalma süresi 6 ay ile 1 yıl arasında değişmektedir. Hidrokarbon kökenli uçak yakıtlarının yanma ürünü CO2100 yıldan fazla kalarak sera etkisini her irtifada sürdürebilmektedir.

## Demiryolları

Çoğu ülkelerdeki dizel-elektrik sistemli demiryolu teknolojisi hidrojen ikamesi için çok uygundur. Hidrojenin motora sıvı fazında ve alçak basınçta verilmesi öngörülmektedir. Dönüştürülmüş dizel lokomotifinin yakacağı hidrojen vakum yalıtımlı ayrı bir tanker vagon içinde 20 K sıcaklıkta sıvı fazda depo-lanır(20). Böyle bir trenin hidrojen taşıma kapasitesinin her 1000 mil için yaklaşık 6.4 TJ olduğu kabul edilerek dolum tesisleri planlanabilir.

## Karayolu Taşıtları

Hidrojen yakıtlı alternatif sistemlerin mevcut sistemlere kıyasla taşıt ağırlığını artırmaması ve motor gücünü düşürmemesi hedeflenmektedir. Karayolu taşıtlarında hidrojen kullanımı motor, yakıt depolama ve yakıt aktarım sistemi tasarımlarında değişiklikler gerektirmektedir.

Yakıt depolama sisteminden örnek verilecek olursa dizel otomobillerde dizel yakıtının kendi ağırlığı tüm depolama sistemi ağırlığının %91'ini oluştururken, metal hidrür depolama sistemi içindeki hidrojenin ağırlık oranı %5 kadardır. Buna karşın hidrojenin ısı değeri benzinin 2.67 katı, metanolün 5.7 katıdır (Tablo 5 ve Tablo 9). Bu yakıtları karşılaştırırken üretim aşamasından motorda yakmaya kadar (yakma dahil) geçen tüm sürecin net verimini (Tablo 10) göz önüne almak yararlı olacaktır. Bazı uygulama örnekleri Tablo II'de özetlenmektedir.

## SONUÇ

Şekil rdeki şemanın benzerleri 1970'lerde yapılırken başlıklar belli olmakla birlikte, konvansiyonel teknolojiler haricindeki enerji arayüzey ve enerji dönüşüm teknolojilerinin büyük bir kısmı laboratuvar düzeyinde ve hatta tasarım düzeyinde bile mevcut değildiler; malzemeler çok kısıtlıydı.

Günümüzde tüm teknolojiler bellidir, üretildikleri komponent ve malzemeler ticari olarak mevcuttur ve büyük bir hızla gelişmekte ve ucuzlamaktadırlar.

Bundan sonraki çalışmaların daha ziyade, verim artırma açısından, tasarım ve malzeme alanlarına ve uzaydaki uygulamalara yönelik olarak gelişmesi beklenmektedir.

Gerektiğinde hidrojen ekonomisine geçiş, altyapısı hazır durumdaki ülkeler, yani enerji kaynağı ne olursa olsun, dağıtımı elektrik ve gaz şebekeleriyle yapanlar için çok daha kolay olacaktır.

Türkiye'de hidrojen endüstride hammadde olarak kullanılmaktadır.

İleride Türkiye'nin bu konuda geri kalmaması, hidrojenden bir enerji taşıyıcı ve yakıt olarak layıkıyla yararlanabilmesi için:

- Elektrik ve gaz şebekelerinin geliştirilmesi,
- Muhtelif sektörlerde yenilenen teknolojinin hidrojen uyumlu olarak seçilmesi,
- Ulaşımında hidrojenin yakıt olarak kullanımı için altyapı hazırlanması (pilot projeler, demonstrasyon taşıtları)

gibi),

- Küçük çaptaki su gücü (<10 MW) veya rüzgâr enerjisinden bölgesel olarak üretilen elektriğin elektrolizle hidrojene dönüştürülerek depolanması ve şevki,
- Linyitlerin gazlaştırılarak sentez gazı veya hidrojen olarak sevkiyatı,
- Hidrojen uyumlu malzeme, komponent teknoloji geliştirilmesi için mevzuat değişikliği ve teşviklerin getirilmesi,
- Hidrojenin büyük ölçekte üretim, depolama iletim ve kullanımıyla ilgili standartların çıkartılıp gerekli eğitimin her düzeyde verilmesi için programlar oluşturulması gibi bazı hususlar hemen akla gelmektedir.

## KAYNAKLAR

- 1- Cox, K.E. ve Williamson Jr.t K.D. (E±), "Hydrogen", CRCPress Inc., Florida, 1979.
- 2- Drolet, B. vça, "The Euro-Quebec Hydro Hydrogen Pilot Project (EÇHPP) Demonstration Phas: Int. 1 Hydrogen Energy, 21 (4), 305, 1996.
- 3- Winter, C. J. ve Fuchs, M., "HYSOLAR and So-lar-wassastoff-Bayern"\ Int. J. Hydrogen Energy, 16(11), 723, 1991.
- 4- Baykara, S.Z. ve Bilgen E., "Solar Hydrog Production from Water and Coal an Engineering and Economic Assessment", 14th WEC, 17-22 Eylül, 1989, Montreal, Canada.
- 5- "Survey of Hydrogen Production Methods and Utilization", Institute of Gas Technology, USA, 1975
- 6- Duret, B. ve Saudin, A., "Microspheres fm Ok Board Hydrogen Storage", Int. 1 Hydrogen Ener£ 19(9), 757, 1994.
- 7- Hynek, S. vça, "Hydrogen Storage t -':-:Soption", Int. J. Hydrogen Energy, 22(6), 601, 1997
- 8- Hodge, M T. vça, National Bureau of Stardurs (US) Mise. Publ. M191, 1948.
- 9- Penner, S.S., ve Icerman, L., "Non Nwlear Energy Technologies", Addison Wesley, 1975.
10. Sherif, S. vga, "Ligmal Hydrogen: Potential, Pnoblems and a Reseach Program", Int. J. Hydrogen Energy, 22(7), 683, 1997.
- 11- Gregory D.P, "A Hydrogen Energy System", Institute of Gas Technology, USA, 1972.
- 12-Anonim Chemnical Engineer, 68(18), 66, 1961.
- 13- "O cupational Safety and Health Act o 1970, PL 91-596 ((12-29-70) in U.S. Statues at Large", 91st Congress, Secaol session, Vol 84, US Government Printing Office, Washington, B.C., Pant 2, PP. 1590-1620, 1971.
- 14- Anonim Engineering Advancement Association of Japon, "Development of liqid Hydrogen Tanker", NEDOWE-NET-9452, 1995.
- 15- Balthasar, W. ve Rijnsoever, J.M., "Hydrogen is Safe", CECSynposium Hydrogen as an Energy Vector, 12 Şubat, 1980, Brussels.
- 16- Dickson, E.M., "The Hydrogen Economy", Stanford Research Inst., Merlo Park, California, Şubat 1976.
- 17- Le Roy, R.L. ve Stuart, A.K., "Present and Future hosts of Hydrogen Production by Unipolar Water Electrolysis", Proceedings, Vol. 78-4, P. 117, The Elektrochemical Society Inc., Princetion, 1978.
18. Cameron, D.S., "World Development of Fuel Cells" Int. J. Hydrogen Energy, 15(9), 669, 1990.
- 19- Pohl, HW. vga, "Hydrogen in Future Aviation", Int. J. Hydrogen Energy, 22(10/11), 1061, 1997
- 20-Anonim, "Canadian Talway Energy Conservation and Alternate Fuels", Canadian Institute of Guiden Oround Transport, Queens University, Kinston, RaporNo. 78-13.
- 21- Pangborn, J. vga, "Alternative Fuels for Alternative Transportation - A Feasibility Study", US Environmental Protection Agency, 1974.
- 22- 10. Dünya Hidrojen Enerjisi Konferansi Bildiri Kitabı, Cilt3,1994.