

## HİDROJEN ENERJİSİ KULLANIMINDA TEMEL KRİTERLER

Yrd. Doç. Dr. Zehra YUMURTACI-Yrd. Doç. Dr. Nur BEKİROĞLU\*  
Doç. Dr. Eyüp AKARYILDIZ\*\*

(\*) Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü - zyumur@yildiz.edu.tr

(\*\*) Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü - nbekir@yildiz.edu.tr

(\*\*\*) Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü - mmo@mmo.org.tr

### ÖZET

Fosil yakıtların yakın gelecekte tükenerek ol-  
ması ve tükenene kadar kullanımı sonucu ortaya  
çıkan atıklar yeryüzünde ciddi sorunlara yol aç-  
maktadır. Bunların başında küresel ısınma ve atık  
ların insan sağlığını direkt etkilemesi gelmekte-  
dir. Tüm bu şartlardan dolayı bilim çevreleri yeni  
bir enerji kaynağı bulmaya çalışmaktadırlar. Al-  
ternatif bir yakıt olarak hidrojen uzun sürelerden  
beri düşünülmektedir. Ancak elde edilmesindeki  
teknik ve mali zorluklar önemli bir engel teşkil  
ederek yaygınlaşmasını önlemiştir. Dünyada  
bol miktarda bulunan hidrojen serbest hal-  
de bulunmadığından dolayı eldesi için bir  
enerji ve maliyet söz konusudur. Ayrıca  
hafif bir element olan hidrojenin depolan-  
ması ve iletimi de tek-  
nik zorluklar ve ek maliyetler gerektirir.  
Bu çalışmada önce-  
likle hidrojen diğer enerji kaynakları ile  
karşılaştırılarak kul-  
lanım gerekliliği üze-  
rinde durulmuş ve hidrojen eldesi yön-  
temleri incelenmiş-  
tir. Daha sonra depo-  
lama ve taşıma tek-  
nikleri açıklanmıştır.

### 1. GİRİŞ

Günümüzde kullanılan enerji kaynaklarının  
hızla tükenmekte oluşu yanında mevcut enerji  
kaynaklarının kullanımı sonucu ortaya çıkan ha-  
va kirliliği sorunu da giderek önem kazanmakta-  
dır. Ayrıca dünya global sıcaklığının artması en  
önemli çevre sorunudur. Çevre kalitesinin ön pla-  
na geçtiği yeni dönemin çevre dostu yakıtı olarak  
hidrojen seçilmiştir. Bu durumun doğal sonucu  
olarak önümüzdeki yıllarda alternatif enerji kay-  
naklarından hidrojenin kullanımı zamanla artan  
oranda yaygınlaşacaktır.

Hidrojen enerjisi tüketiciye yakıt ve/veya elekt-  
rik biçiminde sunulan bir enerji kaynağıdır.  
İkincil enerji olan elektriğin çeşitli kul-  
lanım avantajlarının bulunmasına karşın,  
genel enerji tüketimi-  
nin % 60'ının ısı biç-  
minde kullanılıyor ol-  
ması nedeniyle tek-  
nolojinin yalnızca  
elektriğe bağlı olarak  
değil, yakıtı da ge-  
rektiren biçimde ge-  
lişmiş olduğu bilin-  
mektedir.

Birincil enerji kay-  
naklarının, fiziksel  
durum değişimi içe-  
ren biçimde dönüş-  
türülmesi ile elde olu-  
nan ikincil enerjilere,  
enerji taşıyıcısı de-  
nir. Elektrik 20. yüzyı-

#### Yrd. Doç. Dr. Zehra YUMURTACI

1986 yılında YTÜ Makina Mühendisliği Bölümünde li-  
sans öğrenimini tamamladıktan sonra, YTÜ Fen Bilimle-  
ri Enstitüsü Makina Mühendisliği Enerji Programında  
1988 yılında Yüksek Lisans ve 1995 yılında Doktora de-  
recelerini aldı. 1987 yılından itibaren görev yaptığı YTÜ  
Hidromekanik ve Hidrolik Makinalar Anabilim Dalında ha-  
len Yrd. Doç. Dr. olarak görevini sürdürmektedir. Küçük  
hidroelektrik santrallerin ülkemizde uygulanabilirliği, ye-  
nilenebilir enerji tesisleri, hidrojen enerjisi ve kullanımı,  
hidrolik makinalar, enerji üretim santralleri, kojenerasyon  
tesisleri konularında çalışmaları bulunmaktadır.

#### Yrd. Doç. Dr. Nur BEKİROĞLU

1988 yılında YTÜ Elektrik Mühendisliği Bölümünde li-  
sans öğrenimini tamamladıktan sonra, YTÜ Fen Bilimle-  
ri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Programında 1991 yı-  
lında Yüksek Lisans ve 1998 yılında doktora dereceleri-  
ni aldı. 1988 yılından itibaren görev yaptığı YTÜ Elektrik  
Makinaları Anabilim Dalında halen Yrd. Doç. Dr. olarak  
görevini sürdürmektedir. Elektrik makinaları ve modellen-  
mesi, senkron alternatörlerle elektrik üretimi konularında  
spesifik çalışmalar yapmaktadır.

#### Doç. Dr. Eyüp AKARYILDIZ

1976 yılında İDMM Makina Fakültesi, Isı Proses  
Dalından mezun oldu. 1978 yılında asistan olarak baş-  
ladığı Yıldız Teknik Üniversitesi Termodinamik ve Isı  
Tekniği Anabilim Dalında görevine halen Doç. Dr. olarak  
devam etmektedir. Mekanik Tesisat, Proses Tekniği,  
Enerji Ekonomisi konularında çalışmalar yapmaktadır.

Endüstri devrimi ile 1750 yılından bu yana, teknik yeniliklere dayalı olarak dünya genelinde ekonominin gelişmesi, peş peşe beş ayrı dalgalanma biçiminde sürmüştür:

1. 1750-1825 yılları arasındaki birinci dalgalanmanın başlıca enerji kaynağı kömürdür.
2. 1825-1860 yılları arasındaki ikinci dalgalanmada, ekonomiye ivme kazandıran elektrik olmuştur.
3. 1860-1910 yılları arasındaki üçüncü dalgalanmada elektrik etkisini sürdürmüş, ama yeni kaynak olarak petrol ortaya çıkmıştır.
4. 1910-1970 arasındaki dördüncü dalgalanmada ekonomiyi büyüten enerji kaynağı nükleer enerjidir.
5. 1970'lerde başlayan ve 21. yüzyılın neresinde biteceği henüz bilinmeyen yeni dalgalanmayı etkileyen enerji kaynağı da hidrojen [20].

Enerji ihtiyacı, ilk çağlarda çok sınırlı ve düşük hissedilmesine karşın, insanlığın gelişimi ne paralel olarak ön plana çıkmakta ve çok daha fazla önem kazanmaktadır. Enerji ihtiyacını karşılamak amacı ile insanlık tarihi kadar eski geçmişe sahip olan fosil yakıt kullanımı, sınırlı rezervleri ve çevreye verdiği ciddi zararlar sonucunda doğada her geçen gün yeni bir problem gündeme getirmektedir. Doğal çevre ve tüm canlı organizmanın varlığını tehdit eden bu problemlerin onarılması zor ve hatta kalıcı hasarlar oluşturmaktadır.

Yapılan tüm bilimsel araştırmalar doğal çevreye zarar vermeyecek, teknolojik gelişmeye paralel olarak tüm uygulama alanlarında maksimum enerji ihtiyacına cevap verecek, önceki enerji kaynaklarının ve çeşitli kirlenici etkilerin doğaya verdiği kalıcı zararları yok etmeye yardımcı olabilecek ideal bir enerji kaynağının en kısa zamanda tüm uygulama alanlarında kullanılması gerektiği sonucunda birleşmektedirler. İdeal enerji kaynağı arayışında aşağıdaki kriterler belirlenmiştir [17]:

- a- Kolayca ve güvenli olarak her yere taşınabilirliği,
- b- Taşınırken enerji kaybı hiç olmamalı veya çok az olmalı,

- e- Tükenmez olmalı, kendini yenileyebilmeli,
- f- Temiz olmalı,
- g- Birim kütle başına yüksek kalori değerine sahip olmalı,
- h- Değişik şekillerde, örneğin, doğrudan yarak veya kimyasal yolla kullanılabilirliği,
- i- Güvenli olmalı,
- j- Isı, elektrik veya mekanik enerjiye kolaylıkla dönüştürülebilirliği,
- k- Çevreye hiç zarar vermemeli,
- l- Dünyanın her yerinde ve her alanda hatta deniz ortasında bile elde edilebilirliği,
- m- Çok hafif olmalı,
- n- Çok yüksek verimle enerji üretebilirliği,
- o- Karbon içermemeli,
- p- Ekonomik olmalıdır.

Çevrenin doğallığının bozulmaması ve insan kısıtlanmadan gelişimini sürdürebilmesi için

- buna benzer birçok parametrenin bir arada bulunması gerekir. Bu özelliklerin çoğunu taşıyan güçlü enerji taşıyıcılarından biri hidrojen enerjisidir. Hidrojen enerjisinin ideal bir yakıt ve enerji taşıyıcısı olmasının yanısıra diğer avantajları kısaca şu şekilde özetlenebilir:
  - Üretilmesi kolaydır,
  - Taşıma sektörü için uygun bir yakıttır,
  - Elde edilen enerji diğer enerji formlarına kolayca dönüştürülebilir,
  - Yüksek verimle yararlanılır,
  - Çevreye zararsızdır.

## 2. HİDROJEN ENERJİSİ

Hidrojen enerjisi önümüzdeki yüzyılın en önemli enerji kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir. Bu enerji, sudan elde edilebilmekte ve yüksek verimlilikle, çevre üzerinde hiçbir olumsuz etki yaratmadan yararlı bir enerjiye dönüştürülebilmektedir [2]. Dünyanın enerji sorununu çözmek için kullanılacak hidrojen enerjisi ile milyarlarca yıl yetecek enerji devamlı olarak üretililecektir [22]. Elektriksel kaynaklı olmayan enerji kaynakları için talep artmaya devam ettikçe, fosil kaynaklardan fosil olmayan sentetik kaynaklara bir geçiş yapılması zorunlu olacaktır. Yeni

enerji kaynaklarının ideal enerji olma yolundaki eksikliklerini tamamlayacak ve bu kaynaklar ile tüketici arasında köprü görevi görecektir sistemler oluşturmak ve bu sistemlerde hidrojen enerjisini kullanmak olanaklıdır [11].

Hidrojenin bir enerji olarak avantajlarından en önemlisi toksik olmayan ve korozyona neden olmayan bir element oluşudur. Bu yüzden gerekli

Doğal Hidrojen :  $^1\text{H} : 99,985 / ^2\text{H} : 0,015$

Hidrojen elementini ilk olarak 16. yüzyılda İsveçli kimyacı Paracelsus, asitlerin bazı metaller üzerindeki etkisini araştırırken elde etmiştir. 1766'da İngiliz kimyacı Henry Cavendish ise hidrojenin öbür yanıcı gazlardan ayrı bir gaz olduğunu belirlemiş ve belirli miktardaki asitleri ve metalleri tepkimeye sokarak oluşan hidrojen miktarını

önlemler alındığında hidrojenin kullanılması tehlikesiz ve çok basittir. Kirliliğe neden olmayan hidrojen geri dönüşümünde su üreterek doğal çevreye girer [14]. Doğada bileşikler halinde bol miktarda bulunan hidrojen serbest olarak bulunmadığından doğal bir enerji kaynağı değildir. Bununla birlikte hidrojen birincil enerji kaynakları ile değişik hammaddelerden üretilmekte ve üretiminde dönüştürme işlemleri kullanılmaktadır [23].

Değişik yöntemlerle suyun hidrojene ve oksijene ayrıştırılması ile oluşturulan gazlar toplanır, depolanır ve çeşitli yöntemlerle kullanım alanlarına nakledilir. Açığa çıkan oksijen ise genelde kullanım alanına hidrojen ile birlikte nakledildiği gibi atmosfere de bırakılıp, hava kirliliğinin giderilmesi, kirlenmiş göllerin, nehirlerin ve şehir atıklarının temizlenmesi gibi doğa temizliğine yardımcı olur. Hidrojen, doğada en çok bulunan element olmasına rağmen hafifliği sebebi ile atmosfere yükselip kaldığından yeryüzünde diğer elementlerle bileşik halde bulunur. Doğadaki miktarı sonsuz olup yanması ile çok yüksek verim elde edilir ve sonuçta su buharı meydana gelir. Atık madde olarak hidrojenin yanmasından su buharı oluşması doğal çevreye zarar vermemesinin yanında, diğer enerji atıklarının verdiği zararların giderilmesine yardımcı olabilmekte ve teknolojinin birçok alanında hidrojen atıklarından etkin bir şekilde doğal geri dönüşümlü olarak yararlanılabilmektedir [2].

## 2.1 Hidrojenin Özellikleri

Atom Numarası	:1
Atom Kütle	:1.008
Erime Sıcaklığı	:-259,14 °C
Kaynama Sıcaklığı	:-252,87 °C
Yükseltgenme Derecesi	: +1
Özgül Kütle	: 0,071 g/cm <sup>3</sup>
İzotopları	: 1,2 ve 3

rını ve yoğunluğunu ölçmüştür. Hidrojenin yanmasıyla su oluşumu 1776'da gözlenmiş, hidrojen adı ise 1781'de Fransız kimyacı Antoine-Lavoisier tarafından önerilmiştir.

Doğadaki en basit atom yapısına sahip hidrojen, evrenin temel enerji kaynağıdır. Hidrojen çok hafif bir gaz olup, yoğunluğu havanın 1/14'ü, doğal gazın ise 1/9'u kadardır. Atmosfer basıncında -253 °C'ye soğutulduğunda sıvı hale gelen hidrojenin yoğunluğu ise benzinin 1/10'u kadar olacaktır. Hidrojen gazının ısı değeri, metre küp başına yaklaşık 12 Mega Joule olarak verilmiştir. Sıvı hidrojenin ısı değeri ise, metre küp başına 8400 Mega Joule veya kg başına 120 Mega Joule olarak belirlenmiştir.

Hidrojenin oksijenle yanması sonucunda yaklaşık 2600 °C'lik bir sıcaklık ortamı ortaya çıkar. Hidrojen moleküllerinin bir elektrik arkı ya da akkor bir tungsten teli yardımıyla ayrıştırılması sonucunda oluşan hidrojen atomlarının yeniden birleşmesiyle de 3400 °C'nin üzerinde sıcaklıklar elde edilebilir [1].

Hidrojenin yakıt olarak bazı özellikleri benzin, metan gibi yakıtlarla karşılaştırmalı olarak Tablo 2.1'de gösterilmiştir [18].

### 2.1.1 Hidrojenin Fiziksel Özellikleri

Hidrojen molekülü, birbirinden 0,75 Å uzaklıkta iki atomun birleşmesinden oluşur. Aradaki bağ, iki elektronun ortaklaşa kullanılmasından meydana gelir ve çok yüksek olan ayrışma enerjisi, molekülün çok kararlı olduğunu gösterir. Hidrojen renksiz ve kokusuz bir gazdır. Havaya göre yoğunluğu 0,07'dir ve bu bakımdan cisimlerin en hafifidir. Dolayısıyla gözenekli çeperlerden diğer gazlara göre daha hızlı geçer. Aynı şekilde kızgın derecedeki demir, platin ve iridyum gibi metallerden de sızar. Hidrojen helyumdan sonra sıvı

Özellik	Benzin	Metan	Hidrojen
Yoğunluk, kg/m <sup>3</sup>	4,40	0,65	0,084
Hava içindeki difüzyonu, cm <sup>2</sup> /s	0,05	0,16	0,61
Sabit basınçta özgül ısı, J/gK	1,20	2,22	14,89
Havada ateşleme sınırı, %hacim	1,0-7,65,3	15,0	4,0-75,0
Havada ateşleme enerjisi, mJ	0,24	0,29	0,02
Ateşleme sıcaklığı, °C	228-471	540	585
Havada alev sıcaklığı, °C	2197	1875	2045
Patlama enerjisi, g TNT kJ	0,25	0,19	0,17
Alev yayılması, %	34-42	25-33	17-25

azalma görülür. Oksijenle kızıl derecede ya da düşük sıcaklıkta bir katalizör eşliğinde birleşerek su verir. Mavi bir alevle yanar. Kükürtle 250 °C'de birleşir, azotla yüksek basınçta, bir katalizör eşliğinde birleşerek amonyak elde edilmesini sağlar.

Kurşun ve bakır gibi değerli metallerin oksitlenmesini indirir. Demir ve demire yakın metallerin oksitleriyle tersinir tepkimeler verir. Ayrıca karbon monoksidi de indirir, işlemin gerçekleştirdiği koşullara uygun olarak (sıcaklık, basınç, katalizör) değişik ürünler oluşturur.

Katalitik hidrojenlenme tepkimeleri arasında

laştırılması en zor olan gazdır. Dönüşüm sıcaklığı -240 °C olan hidrojen atmosfer basıncında -253 °C'de kaynar, -259 °C'ta katılaştır. Oldukça iyi bir ısı iletkenidir. Özellikle kendi hacminin bin kat fazlasını çözümlenebilen paladyum gibi kimi metaller tarafından kolayca soğutulur.

Olağan hidrojen, molekül yapıları bakımından birbirinden farklı ortohidrojen ile parahidrojen gibi iki izomerin karışımından oluşur. Ortohidrojen oda sıcaklığında gazın dörtte üçünü meydana getirir, parahidrojenin oranı ise sıcaklık düştükçe artar. Parahidrojen ayrıca ortohidrojene göre da ha uçucudur. Öte yandan kusursuz bir elektrik iletkeni olması, karışımdaki niceliğini belirlemesini sağlar.

### 2.1.2 Hidrojenin Kimyasal Özellikleri

Hidrojen etkinleştirilmiş biçimleri dışında soğukta pek etkili değildir. Sıcakta ya da katalizörler eşliğinde pek çok tepkimeye girer. Değerli bir element olması nedeniyle çok belirgin elektropozitif bir özellik taşır. Orta kuvvette bir indirgendir, alkali metal oksitler ( $Al_2O_3$ ) gibi çok kararlı bileşikler indirgeyemez. Bununla birlikte NiO, CuO, vb. pek çok metal oksidi indirger. Bu yolla katalizör olarak kullanılan çok ufaltılmış metaller elde edilir.

Hidrojen alkali ve toprak alkali metallerde olduğu gibi ametallerin çoğuyla da doğrudan birleşir. Halojenlerin dördüyle de tepkimeye girerek hidrasyon veriri. Fluordan iyoda doğru gittikçe hem tepkime hızında hem de açığa çıkan ısı miktarında

taşkömürünün ya da taşkömürü yağlarının hidrojene rojenlenmesinin yanı sıra doymamış organik bileşiklere hidrojenin bağlanması da sayılabilir. Özellikle hidrojen tepkimesinden sıvı yağların sertleştirilmesinde yararlanır.

### 2.2 Hidrojenin Kullanılması

1970'li yıllara girilirken hidrojen enerji taşıyıcısı olarak göz önüne alınmamakta ve hidrojen enerjisi kavramına enerji literatüründe pek rastlanmamaktaydı. 18-20 Mart 1974 tarihlerinde Amerika Florida Miami Üniversitesi Temiz Enerji Araştırma Enstitüsü'nde, Enstitü Direktörü Türk bilim adamı Prof.Dr. T. Nejat Veziroğlu'nun başkanlığında düzenlenen "Hidrojen Ekonomisi Miami Enerji Konferansı (THEME)", çağdaş boyutta hidrojen enerjisi kullanımı için bir başlangıç noktası olmuştur.

Hidrojen enerji sisteminin yanı sıra, birbirleri ile bağlantılı biçimde enerji ve çevre sorunlarının tartışıldığı bu uluslararası forumda, Uluslararası Hidrojen Enerjisi Birliği (IHEA) kurulması kararlaştırılmıştır. 1974'te az bilinen hidrojen enerjisi, hidrojen ekonomisi ve hidrojen enerji sistemi 1997'de iyi bilinen ve kabul olunan kavramlar haline gelmiştir. Artık ABD, Almanya, Kanada, Rusya gibi ülkelerin yanısıra Uluslararası Enerji Ajansı gibi kuruluşlar hidrojen araştırma ve geliştirme çalışmalarına bütçe ayırmaktadırlar. Birincisi 1974 yılında yine Miami'de yapılan "Dünya Hidrojen Enerjisi Konferanslarının (WHEC's)" onbirincisi 1996 yılında Almanya Stuttgart'ta yapılmıştır. Bugün dünyada hidrojenle ilgili onu aşkın sivil toplum kuruluşu vardır ve ona yakın periyodik

TESİSAT MÜHENDİSLİĞİ / Kasım-Aralık 2021

yayın yayınlanmaktadır.

Hidrojen enerjisi alanında çeşitli ülkelerin işbirliği sonucu uluslararası programlar başlatılmıştır. Avrupa Topluluğu ile Kanada'nın EURO-QUEBEC (hidro-hidrojen) projesi, Norveç ve Almanya'nın NHEG projesi, Almanya ve Suudi Arabistan'ın HY-SOLAR projesi, İskandinav Ülkeleri ile Yunanistan'ın işbirliği, Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) hidrojen enerjisi projeleri, Japonya'nın WE-NET programı, Birleşmiş Milletler UNIDO-ICHET hidrojen çalışmaları bunlara örnek gösterilebilir [4].

Endüstriyel olarak da kullanılan hidrojen temel olarak aşağıdaki katalitik hidrojenleme tepkimelerinde kullanılır:

1. Amonyak ( $NH_3$ ) birleşimi,
2. Metanol ( $CH_3OH$ ) birleşimi,
3. Bitkisel yağları doyurma,
4. Petrokimya da hidrojenle işleme

den doğrudan buhar üretimiyle buhar türbinlerinde, endüstriyel buhar ve ısıtma buharı sağlanmasında kullanılmaktadır. Hidrojenin hidridleşmeye dayalı kimyasal dönüşümü, hidrojen depolamanın dışında hidrojen arıtma, döteryum ayrıştırılması, sıkıştırma, pompalama, ısı pompaları, soğutma, iklimlendirme ve elektrik üretiminde uygulanır [4].

### 3. HİDROJENİN ELDESİ

Hidrojen bir doğal yakıt olmayıp, birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak değişik hammaddelere üretilen bir sentetik yakıttır. Hidrojen üretiminde tüm enerji kaynakları kullanılabilir. Kullanılan hammaddeler ise su, fosil yakıtlar ve biokütle materyalleridir.

Yakıt hidrojeninin sudan yenilenebilir enerjiyle üretilmesi temel ilkedir. Hidrojen üretim yönteminin başında fosil yakıtlardan hidroelektrik kav-

4. Rafineride desülfürizasyon işlemlerinde,
5. Rafineride desülfürizasyon işlemlerinde,
6. Düz cam üretiminde,
7. Işıl işlemlerde koruyucu ve reaktif atmosfer bileşeni olarak,
8. Enerji santral ekipmanlarının soğutulmasında,
9. Bitkisel yağların katılaştırılmasında,
10. Roket yakıt karışımlarında.

Sıvı hidrojen genellikle uzay araçlarının fırlatıcılarını itmede yakıt olarak kullanılır. Bu durumda çoğu kez sıvı oksijen gibi bir yakıtla tepkimeye sokularak aracın olağanüstü bir hıza (4500 m/sn'nin üzerinde) erişmesini sağlar. Nükleer ya da güneş kaynaklı elde edilen elektrikle suyun elektrolizi sonunda üretilen hidrojen, verimin artırılması ve fiyatların düşürülmesi durumunda geleceğin önemli bir enerji kaynağı olabilir.

Hidrojen alevli yanmaya olduğu kadar katalitik yanmaya, doğrudan buhar üretimine, kimyasal dönüşüme ve yakıt pilleri ile elektro-kimyasal dönüşüme uygun bir yakıttır. Fosil yakıtlarda alevli yanma dışında sıralanan özelliklerin bulunması hidrojenin üstünlüğüdür. Hidrojenin alevli yanması içten yanmalı motorlarda, dizel motorlarında, gaz türbinlerinde, jet motorlarında, roket motorlarında, ısıtma ve pişirmede uygulanabilirliğini sağlamaktadır. Katalitik yanmasının uygulandığı yerler pişirme, su ısıtma, hacim ısıtma ve absorpsiyonlu soğutucular için ısı sağlamadır. Hidrojen

minin başında fosil yakıtlardan, hidrojenlik kaynaklardan, jeotermal enerjiden, güneş ve rüzgar enerjilerinden yararlanmak gelir. Gelecek için en çok üzerinde durulan yöntem fotovoltaiik güneş üreticilerinden yararlanmaktır.

Hidrojen üretimi için kullanılan alışılmış teknolojiler doğal gazın katalitik buhar reformasyonu, ağır petrolün kısmi oksidasyonu (pox), kömürün gazifikasyonu, buhar-demir işlemi ve suyun elektrolizi biçiminde sıralanabilir. Yan ürün olarak hidrojenin elde edildiği alışılmış teknolojiler ise klor-alkaliden karşıt klor üretimi, kok fırınlarında kömürden kok üretimi ve kimyasal dehidrojenasyon işlemleridir. Bunların yanı sıra, amonyağın ve metanolün parçalanması ile hidrojen elde olunabilirse de, bu iki işlem hidrojen üretimi için temel değildir.

Bunun yanı sıra geliştirilmekte olan teknolojiler de mevcuttur. Bunlar, buharın yüksek sıcaklıkta elektrolizi, gazlaştırılmış kömürün elektrokondüktif membran işlemi, kömür gazifikasyonu ile bütünleştirilmiş yüksek sıcaklık elektrolizi (CG-HTE) olarak sıralanabilir. Ayrıca suyun termokimyasal parçalanması, plazma-güneş ve radyasyon işlemleri, güneş fotovoltaiik su elektrolizi diğer ileri yöntemlerdir.

Yakıt olarak kullanılacak hidrojenin üretimi için suyun direkt elektrolizi, termokimyasal üretim, fotobiyolojik üretim yöntemleri ağırlık kazanmıştır.

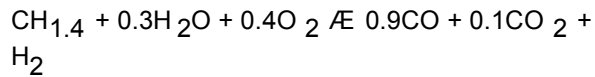
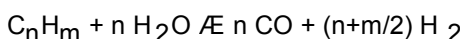
Hidrojen üretiminde güneş enerjisinden yararlanma istemiyle, elektrolizde kullanılacak elektrik enerjisinin fotovoltaiik panellerden üretilmesine yönelik olarak, güneş fotovoltaiik-hidrojen enerji sistemleri üzerinde önemle durulmaktadır.

### 3.1 Fosil Yakıtlardan Hidrojen Üretimi

Dünyada yakıt olarak kullanılan 500 Nm<sup>3</sup> hidrojenin tamamına yakın bir kısmı fosil yakıtlar kullanılarak üretilir. Ancak uzun vadede çevre sağlığı ve fosil yakıtların tükenerek olmasından dolayı daha temiz ve modern bir yöntem olan elektrik kullanılacaktır.

#### 3.1.1 Hafif Hidrokarbonların Buhar Reformasyonu

Bu yöntem günümüzde uygulanan yöntemler arasındadır. Buhar reformasyonu, metan, benzin gibi hafif hidrokarbonların su buharı ile endotermik, katalitik dönüşümüdür. Bu işlem genelde 850 °C sıcaklık ve 2.5 MPa basınç altında meydana gelir.



Günümüzde kullanılan bir yöntem olup, 100000 Nm<sup>3</sup>/h hidrojen kapasitede üretim tesisi kurulabilir.

#### 3.1.3 Kömürün Kısmi Oksidasyonu

Proses açısından ağır hidrokarbonla kısmi oksidasyon yöntemine benzer. Ancak kullanılacak kömürün toz haline getirilip pompalanması gerekir. Bu yöntem daha çok zengin kömür rezervlerine sahip ülkelerde kullanılır.

#### 3.1.4 Doğal Gazdan Elektrik İle Hidrojen Üretimi

Bu yöntem yaygın kullanımdan daha ziyade deneme aşamasında olan bir yöntemdir. Hidrokarbonlar önce, plazma-ark prosesi ile 1600 °C de hidrojen ve saf karbona ayrılırlar. Bu yöntem için birincil enerji kaynağı olarak doğal gaz veya fuel-oil kullanılır. Bunun dışında proses için soğutma suyu ve elektrik gereklidir. Bu konuda Norveç'te yapılan çalışmalarda 1000 Nm<sup>3</sup>/h doğal

şeklinde ifade edilir.

Çıkan karbonmonoksidin ekzotermik katalitik dönüşümünden saf hidrojen oluşur. İfadenin denklemi şöyledir:



Karışımdaki karbonmonoksit emme yoluyla temizlenir. Bu yöntemle hidrojen üretimi oldukça yaygındır. Bir buhar reformasyonu tesisinde saatte 100000 Nm<sup>3</sup> hidrojen üretimi yapılabilir. Bu yöntemde hafif hidrokarbon olarak en çok doğal gaz kullanılır.

### 3.1.2 Ağır Hidrokarbonların Kısmi Oksidasyonu

Ham petrolün rafinasyonu işlemi sırasında açığa çıkan atıklara ağır hidrokarbon denir. Ağır hidrokarbonların oksijen ve buhar yardımıyla ekzotermik veya ototermal dönüşümü ile hidrojen elde edilebilir. Oksijen ve su buharı miktarı dışarıdan bir enerji girişine gerek duyulmadan ototermal biçimde kontrol edilebilir. İşlem şu şekilde meydana gelir:

gazdan 2100 kWh elektrik kullanılarak 2000 Nm<sup>3</sup>/h hidrojen ve 500 kg/h saf karbon üretilmiştir. Proses sonucu yüksek sıcaklıkta buhar meydana gelir. Çıkan ürünlerin hepsi kullanım potansiyeline sahip olduğundan dolayı tesis tam verimle çalışır. Mobil uygulamalarda, yüksek enerji yoğunluğu ve depolama kolaylığı nedeniyle yakıt hücreleri için hidrojen temininde metanol ve motor reformasyonu ve kısmi oksidasyonu önem kazanmaktadır.

## 3.2 Elektrokimyasal Yolla Hidrojen Üretimi

Elektrokimya denince bu konuda aklımıza gelen ilk kavram elektrolizdir. Sudan hidrojen üretim yöntemleri arasında günümüzde en çok kullanılan ve en önemli yöntemdir. Ticari olarak 100 yılı yakın bir geçmişe sahip bu yöntemin gelecekte de kullanılmasına devam edilecektir.

### 3.2.1 Suyun Elektrolizi

Elektroliz, elektrik enerjisi kullanarak suyun hidrojen ve oksijen atomlarına parçalanması prosesidir. İki hidrojen atomu ve bir oksijen atomu

elektriksel çekim kuvveti ile bir araya gelerek su molekülünü oluştururlar. Sudan elektrik akımı geçirildiği zaman su molekülündeki kimyasal bağların parçalanması sonucu negatif yüklü OH<sup>-</sup> ile pozitif yüklü H<sup>+</sup> oluşur. Ayrışma, iki elektrotta gerçekleşen iki kısmi reaksiyondan oluşur.

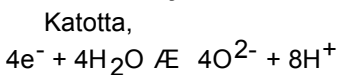
Elektrotlar iyon geçirebilen bir elektrolit ile ayrılmıştır. Hidrojen negatif elektrotta, oksijen ise pozitif elektrotta meydana gelir. Yük değişimi iyonların hareketi ile sağlanır. Üretilen gazları ayırmak için iki reaksiyon bölgesi iyot geçirmeyen bir diyafram ile ayrılmıştır. Suyun ayrılması için gerekli enerji elektrik ile karşılanır.

Saf suyun elektrik direnci oldukça yüksektir (100 ohm/cm). Bu direnç bir takım kimyasal yöntemlerin uygulanmasıyla düşürülebilir. Bunlar:

- 700 - 1000 °C sıcaklık ortamları,
- Alkalın ya da asit kökenli elektrolitlerin kullanımı gibi yöntemlerdir.

Asit ve tuz elektrot metalini aşındırıcı özelliğe sahiptir. Pratikte potasyum hidroksitle birlikte nikel-demir elektrotların kullanımı maliyet ve performans açısından en iyi sonucu vermektedir.

#### 3.2.1.1 Alkalın Elektrolit Kullanılması Durumunda Elektrotlarda Meydana Gelen Reaksiyonlar

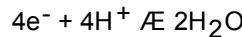


4 hidroksit iyonu, 4 elektron bırakarak bir oksijen molekülü ve iki su molekülü formuna geçer. 4 elektronun anoda girmesiyle çevrim tamamlanır. Burada anot reaksiyonları serbest elektronların üretildiği oksidasyon reaksiyonları, katot reaksiyonları ise serbest elektronların absorbe edildiği redüksiyon reaksiyonları şeklinde adlandırılır.

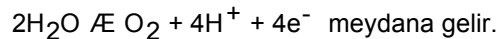
#### 3.2.1.2 Asit Elektrolit Kullanılması Durumunda Elektrotlarda Meydana Gelen Reaksiyonlar

Asit elektrolitlerde yük taşıyıcı hidrojen iyonu dur. Korozif etkilerinden dolayı tercih edilmez.

Katotta,



Anotta,

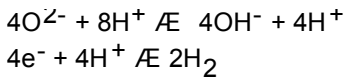


#### 3.2.1.3 Elektroliz İşleminin Ekipmanları

Elektroliz sistemi temel 5 elemandan meydana gelir:

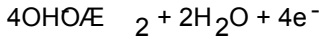
- Elektroliz kabı
- Elektrolit
- Anot
- Katot
- Ayırıcı

Sistemdeki elemanlar minimum maliyet ile



4 su molekülü, 8 pozitif yüklü hidrojen ve 4 negatif yüklü oksijen iyonuna ayrılırlar. Her bir oksijen iyonu bir hidrojen iyonu ile birleşerek 4 hidroksit iyonu oluşturur. 4 hidrojen iyonu ise kalır ve her biri 4 hidrojen atomunu oluşturmak için katotta 4 elektrona bağlanırlar. Hidrojen çift atomlu bir molekül olduğu için 4 hidrojen atomu 2 adet hidrojen molekülüne dönüşür. Elektrolit suyun iletkenliğini artırarak iyonların anoda doğru çekilmesine izin verir ve 4 negatif hidroksit iyonu da anoda gider.

Anotta,



maksimum verim alınacak şekilde yukarıda açıklanan malzemelerden seçilir.

### 3.2.1.4 Elektroliz İşleminin Verimi

Elektrolizin ısı verimi, hidrojenin ayrışması için verilen enerjinin bu iki gazın sudan elde edilmesi sırasında harcanması gereken enerjiye oranıdır.

$$\text{Isıl Verim} = H/Q$$

H: Suyun ayrışması için verilen enerji (1 bar, 25 °C'de 79.4 Wh/gr-mol hidrojen)

Q: Prosesin gerektirdiği toplam ısı enerjisi

Suyun elektrolizinin verimi yaklaşık olarak %30-35 civarındadır. Gerilim verimliliği ise suyu ayırmak için pilin sahip olması gereken minimum teorik gerilim ile gerçek gerilimini oranlar.

$$\text{Gerilim Verimi} = \text{Minimum gerilim (V)} / \text{Gerçek gerilim (V)}$$

1.9 V için (ticari elektroliz) pil verimi % 65 civarındadır. 1.7 V'da bazı gelişmiş piller (pahalı platinyum elektrotlu) % 73 verime çıkarlar.

$$\text{Pil Gerilimi} = E + I.R$$

E: Suyun çözülmeye başlaması için gerekli teorik gerilim (1.24 V/e<sup>-</sup>)

I: Pilden geçen akım

R : Elektrolitin iletkenliği ve diyaframın geçirgenliğine bağlı olarak ortam direnci

Katot ve anot bölümleri mikro delikli bir diyafram ile ayrılmıştır. Yaklaşık 0.2-0.5 Mpa çıkış basınçları ile bu yöntemin verimi % 65 civarına ulaştırılır. Tek bir sistemin kapasitesi 500 Nm<sup>3</sup> civarındadır. Artan elektrot yüzey alanı verimi düşürmektedir. Elektroliz ünitelerinin maliyetleri, büyük kapasiteli ünitelerde 250 \$/kW<sub>el</sub> birim fiyattan başlamaktadır. Çalışma verimleri küçük üniteler için % 50-60, büyük üniteler için %60-65 olmaktadır.

### 3.2.2 Yüksek Basıncılı Su Elektrolizi

Özel malzeme seçim ve uygulamalarıyla, yüksek basınçlı su elektroliz yöntemiyle 5 Mpa basınca kadar üretim mümkündür. Ancak sistemi aksatan bir konu, değişken akım kaynağı ile çalışmamasıdır. Günümüzde kullanılan küçük güçte cihazların maliyeti 5000 \$/kW civarındadır. Büyük güçlü cihazların ise birim maliyetinin 1100 \$/kW civarında olması beklenmektedir.

### 3.2.3 Yüksek Sıcaklıkta Su Elektrolizi

Bu yöntemin en önemli avantajı, suyun ayrıştırılması için gerekli enerjinin dışardan alınarak elektroliz için gerekli enerjinin sağlanmasıdır. Bu

## 4. HİDROJENİN SIVILAŞTIRILMASI

Hidrojenin sıvılaştırılması gaz hidrojenin kompresörlerde yüksek basınçta sıkıştırılması, sıkıştırılmış gazın sıvı nitrojen ile soğutulması ve türbinlerde genişletilmesiyle olur [8]. Sıvılaştırma işlemi, gazın sıvı hale gelene kadar soğutulması ile gerçekleştirilir ve istenilen soğutmayı sağlamak için kompresörlere, ısı değiştiricilere, türbin ve kısılma valfine ihtiyaç duyar. En basit sıvılaştırma prosesi Linde çevrimi veya Joule-Thompson genişleme çevrimidir. Bu proseste gaz atmosfer basıncına kadar sıkıştırıldıktan sonra bir ısı değiştiricide soğutulur ve sonra bir miktar sıvının elde edildiği (Joule-Thompson genişlemesinin meydana geldiği) kısılma valfine iletilir. Bu oluşan sıvı ortamdaki azot ve soğuk gaz ısı değiştirici yolu ile kompresöre geri yollanır. Ancak Linde çevriminde kullanılan azot gibi gazlar oda sıcaklığında bir genişleme sınırının üzerinde soğurlar. Hidrojen ise tam tersine bu sınırdan sonra ısınır. Bu yüzden hidrojenin dönüşüm sıcaklığının (-71°C) altında tutulması esastir. Bu sıcaklığa ulaşmak için modern hidrojen sıvılaştırma proseslerinde, hidrojen ilk kısılma valfine gelmeden sıcaklığının -195 °C civarında düşürülmesi hedeflenir. Bu da çevrim gazı olarak yine azotun kullanıldığı ön soğutmalı Linde çevrimi ile gerçekleştirilir.

Teoride ideal bir sıvılaştırma prosesinde izotermal kompresör ve izentropik türbin kullanılır. Pratikte ise türbin sadece gazın soğutulması amacıyla kullanılır, yoğuşurmada kullanılmaz. Çünkü aşırı sıvı formasyonu türbin kanatçıkları

elektroliz için gerekli enerjinin azaltılmasıdır. Bu amaçla güneş enerjisi veya santrallerdeki artık ısıların kullanılması düşünülmüştür. Ancak des tek bulamaması nedeniyle bu yöntem üzerine araştırmalar diğer yöntemlere kaydırılmıştır.

### 3.3 Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Günümüzde en çok kullanılan hidrojen üretim yöntemi hidrokarbonların özel olarak da doğal gazın reformasyonu yöntemidir. Gelecekte ise yeni lenebilir enerji kaynaklarının geliştirilip elektriğin maliyetinin düşürülmesiyle şu anda pahalı olan elektroliz yöntemi önem kazanacaktır.

na zarar verir [3].

## 5. HİDROJENİN DEPOLANMASI

Günümüzde hidrojen çok çeşitli şekillerde depolanabilmektedir. Tablo 5.1'de hidrojenin depolama yöntemleri ve bu yöntemlerin hidrojen kapasitesi, enerji kapasitesi ve uygulama alanları gösterilmektedir. Tablodaki veriler deneysel olarak hesaplanmış maksimum değerlerdir. Şu an için aktive edilmiş karbon, zeolitler ya da cam küreler için spesifik uygulama alanları ve pazar bulunmamaktadır. Bunun da temel nedeni pratik olmayan çalışma koşulları ve düşük hidrojen de

polama kapasiteleridir [12].

Hidrojenin depolama yöntemlerinden en önemlileri hidrojenin sıkıştırılmış gaz halde depolanması, sıvı halde depolanması ve metal hidritlerde depolanmasıdır. Bunların dışında hidrojenin yeraltında depolanması da sıkıştırılmış gaz halde depolamanın bir başka şeklidir. Her depolama yönteminin kendine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Örnek olarak hidrojenin sıvı halde depolanmasını ele alacak olursak, hidrojen sıvı halde diğer depolama yöntemlerine göre en yüksek depolama yoğunluğuna sahiptir, fakat bunun yanında izole edilmiş depolama konteynerleri ve enerji gerektiren bir sıvılaştırma prosesi gerektirmektedir [3].

### 5.1 Sıkıştırılmış Gaz Hidrojenin Depolanması

En basit ve şu an için en çok kullanılan yöntem olan hidrojenin sıkıştırılmış gaz halde depolanmasında gerekli olan tek ekipman bir kompresör ve basınç tankıdır [3]. Bu yöntem, yerüstündeki tüm hidrojen depolama yöntemleri arasında en düşük maliyetli, kısa dönem uygulamalarda en elverişli ve uygun olanıdır [6].

Sıkıştırılmış gaz haldeki hidrojenin depolanmasındaki ana problem, depolama basıncına bağlı olan düşük depolama yoğunluğudur. Yüksek depolama basınçları, yüksek yatırım ve işletme maliyetleri gerektirmektedir. Gaz hidrojenin basınçlı tanklarda küçük miktarlarda depolanması çok kolay ve düşük maliyetli olabilmektedir fakat depolanacak hidrojen miktarı arttıkça maliyetler de miktarla beraber artmaktadır. Dolayısıyla bu yöntem büyük miktarlarda hidrojen için ekono-

mik olmamaktadır [15].

### 5.2 Gaz Hidrojenin Yeraltında Depolanması

Hidrojenin yeraltında depolanması da sıkıştırılmış gaz halde depolamanın bir başka şeklidir. Hidrojenin yeraltında depolanması büyük miktarlardaki hidrojen için en düşük maliyetli depolama yöntemidir. Hidrojen yeraltında hem doğal, hem sonradan yapılan mağaralarda depolanabilmektedir. Yeraltındaki gaz depoları minimum yatırım maliyeti gerektirirler. Fakat bu yöntemin bir dezavantajı depolanan basınçlı hidrojenin hacimce %5 oranında kayıplara uğramasıdır. Yeraltında depolamada maliyet arttırıcı nedenlerden biri depolama sistemi boşaltım çevriminin sonundayken oluşan gazdır. Bu gazın atılması ek bir maliyet gerektirmektedir. Yeraltında basınçlı hidrojen gazının depolanması için üç formasyon vardır.

Bunlar[16]:

- Boşaltılmış petrol/gaz kuyuları,
- Çukur kaya mağaraları,
- Büyük tuz mağaraları.

Herhangi bir yeraltı depolama alanında bulunması gereken özellikler şunlardır:

- Yüzeyin altında (150-900 m) su geçiren yapıda gözenekli bir tabaka, genellikle kum ya da kum taşı,
- Yeterli kalınlıkta hava geçirmeyen kaya başlık,
- Özellikle kubbe biçimli uygun jeolojik yapı.

Hidrojen gazı yeraltı deposuna sokulmadan önce katmanlarda oyuklar oluşturulur ve yüzey çimento veya benzeri kimyasallar ile kaplanır. Daha sonra hidrojen kompresör ile oyuklardan içeri enjekte edilir.

Tablo 5.1 Hidrojen depolama yöntemleri

Depolama Malzemesi	Hidrojen Kapasitesi	Enerji Kapasitesi	Uygulama Alanları
--------------------	---------------------	-------------------	-------------------



Gaz Hidrojen	% 11.3	5.0 kW/kg	Taşıma, güç üretimi
Sıvı Hidrojen	% 25.9	13.8 kW/kg	Taşıma
Metal Hidrit	% 2-5.5	0.8-2.3 kW/kg	Taşınabilir, taşıma
Karbon	% 5.2	2.2 kW/kg	-
Zeolit	% 0.8	0.3 kW/kg	-
Cam Küre	% 6	2.5 kW/kg	-
Kimyasal	% 8.9- 15.1	3.8-7 kW/kg	Taşıma, güç üretimi

### 5.3 Hidrojenin Metal Hidritte Depolanması

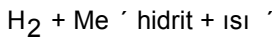
Hidrojenin metallerin içine emilme kapasitesi vardır ve bu şekilde metal hidritler oluşur. Hidrojenin bir metal tarafından emilme ve salıverilme işlemi birtakım parametrelere bağlıdır. Bu parametrelerin başlıcaları şunlardır[17]:

- Hidrojenin basıncı,
- Metalin sıcaklığı,
- Hidrojenin akış oranı [7]

Bu yöntem hidrojenin kimyasal olarak metal, metaloid elementler ve alaşımlara bağlanması şeklinde depolanması yöntemidir. Metal hidritler, kafes yapısına sahip metal atomlarıyla bu kafes yapısı içinde ara yerlerde tutulmuş hidrojen atomlarından oluşmaktadır. Metal ve hidrojen genellikle iki farklı form oluşturur. Bu formlardan biri hidrojen depolamaya müsait iken diğeri tam dolu formdur. Doldurma aşamasında hidrojen tam dolu yüzeyden geçerek depolamaya uygun yüzeyi oluşturacak şekilde yayılır. Boşaltma sürecinde ise hidrojen tam dolu formdan depolamaya uygun formu oluşturacak şekilde dışarı difüze olarak H moleküllerini oluşturur [3].

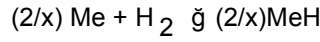
Metal hidrit depolama sistemleri hidrojenin depolanması için en güvenli sistemlerdir. Metal hidritlerde genellikle 3 ile 6 MPa arası basınç altında hidrojen depolanabilir. Uygun metal alaşımları kafeslerinde hidrojen atomlarının yerleşebileceği boş yerler sağlarlar [19]. Birçok metal alaşımı, metal hidrit oluştururken hidrojeni kimyasal dönüşümü mümkün olan ve çok güvenli bir şekilde depolayabilirler. Hidrojenin metallerle yaptığı kimyasal bağ ve reaksiyon ısı birleşimiyle hidritler sadece hidrojeni değil aynı zamanda ısıyı da depolarlar. Hidritlerin hem sabit hem de hareketli teknik uygulamalarda kullanılabilmesi de bu ısı-hidrojen birleşimi sayesinde olmaktadır [5].

boşaltma



besleme

Metal hidritler hidrojeni ayrışabilir bir kimyasal bileşik halinde depolarlar. Gaz hidrojenle reaksiyona girerek metal hidrit oluşturabilen birçok element, metal ve alaşım bulunmaktadır. Bu tip reaksiyonlar genellikle aşağıdaki gibi gösterilir:



- Eğer bu reaksiyon uygun sıcaklık ve basınçlarda kolayca ve tekrar geri dönüşümlü olarak gerçekleşebiliyorsa, MeH şarj olabilen metal hidrit ve Me hidrojen depolama metal ya da alaşımı olarak adlandırılır. Bu şekilde gaz hidrojenin metal hidritte katı bir bileşik halinde depolanmasıyla, istenilen ve ihtiyaç duyulan anda tekrar gaz hidrojen elde edilebilir. Bu özelliğinin yanısıra metal hidritlerin güvenliği ve özellikle sıvı hidrojene göre çok daha basit konteynerlerde saklanabilmeleri de diğer avantajlarıdır [13].

### 5.4 Sıvı Hidrojenin Depolanması

- Hidrojenin atmosfer basıncında sıvılaştırılması -253°C gibi nispeten düşük bir sıcaklıktır. Bu yüzden sıvılaştırma işlemi yaklaşık olarak hidrojenin tutuşma enerjisinin %30'una yakın bir enerji gerektirir. Bu enerji elektrik enerjisi formunda olmalıdır. Buharlaştırma kayıpları sıvı hidrojenin üretilme ve depolanmasındaki temel problemdir. Sıvılaştırma ünitesinden son kullanıma girene kadarki toplam kayıplar % 30-70 arasında olmaktadır. Sıvı hidrojenin depolandığı tank ne kadar büyük olursa kayıplar o kadar küçük bir yüzde olacaktır. Sıvı hidrojenin depolandığı tanklar iç ve dış duvarları arasında vakum izolasyonludur [19]. Günümüzde sıvı hidrojen hem büyük hem de küçük kapasitelerde depolanabilmektedir [15]. Fakat sıvı hidrojen doğal gazın depolandığı silindirik tanklarda depolanmamaktadır. Bunun nedeni de yüksek buharlaşma kayıplarıdır. Ancak büyük miktarlarda gaz için ve uzun süreli depolamalarda sıvı hidrojenin depolanması en ekonomik metoddur.

### 6. HİDROJENİN TAŞINMASI

- Hidrojen sıkıştırılmış gaz, sıvı ya da metal hidritlerle katı halde taşınabilir. En ucuz taşıma yöntemi, taşınacak hidrojenin miktarına ve taşıma yapılan yola bağlı olmaktadır. Hidrojenin taşınması için uygulanan ve burada incelenen metodlar, karayolu, demiryolu, deniz yolu ve boru hatları olacaktır.

Sıkıştırılmış gaz hidrojen yüksek basınçlı silindirler, tüp treylerler ve boru hatları kullanılarak taşınabilir. Hidrojen gaz halde taşınırken, tank kapasitelerini maksimize edebilmek için çok yüksek basınçlarla sıkıştırılmalıdır. 1.8 kg hidrojen kapasitesindeki yüksek basınçlı gaz silindirleri (40 MPa) taşıma ve iletim için çok pahalı olmaktadır [9]. Çelik silindirlerden oluşan tüp treylerler, silindir sayısına bağlı olarak 63-460 kg arası hidrojen taşıyabilirler ve çalışma basınçları 20-60 MPa'dır. Hidrojen Amerika, Kanada ve Avrupa'da boru hatlarıyla taşınmaktadır. Çalışma basınçları 1-3 MPa'dır. Dünyadaki en uzun hidrojen boru hattı kuzey Fransa ile Belçika arasında 400 km'lik Air Liquide firmasına ait boru hattıdır [3].

## 6.2 Sıvı Hidrojenin Taşınması

Sıvı hidrojen, özel çift duvarlı izoleli tanklarla, buharlaşmayı önleyebilecek şekilde taşınabilir. Isı transferini minimize edebilmek için sıvı hidrojen tankının dış yüzeyini soğutmak amacıyla bazı tankerlerde sıvı nitrojen ısı kalkanları kullanılır [13].

Tır tankları, 360-4300 kg sıvı hidrojen taşıyabilirken tren vagonlarıyla 2300-9100 kg mertebelere ulaşan çok daha büyük miktarlarda sıvı hidrojen taşınabilmektedir. Her iki taşıma tipinde de buharlaşma kayıpları günlük %0.3-0.6 arasında olmaktadır. Gemi tankerleri uzun mesafeli taşımalar için kullanılmaktadır. Gemilerde buharlaşma kayıpları günlük %0.2-0.4 arasındadır.

Bir başka şekilde boru hatlarıyla sıvı hidrojen, süper iletken tel içeren izole edilmiş hatlarda taşınabilir. Sıvı hidrojen süper iletken için soğutucu görevi görür ve geleneksel güç hatlarının yüksek akım kayıpları olmadan elektriğin uzun mesafelere taşınmasını sağlar.

Sıvı hidrojenin taşınmasında ana problem özel izolasyon ihtiyacı ve sıvı hidrojenin pompalama ve soğutma kayıplarıdır.

## 6.3 Metal Hidritlerin Taşınması

Hidrojen metal hidrit tarafından absorbe edildikten sonra, metal hidrit tır ya da trene yüklenebilir ve son kullanıcıya ulaştırılır ve boş hidrit kon-

teyneri ile değiştirilir ya da konvensiyonel tanker olarak kullanılır. Metal hidritlerin taşınmasında maliyeti en çok etkileyen baş faktör ilk yatırım maliyeti olarak metal hidrit ve konteynerin maliyetidir. Bir kez doldurulduktan sonra hidrit konteynerleri herhangi bir kargo gibi mesafe ve ağırlığa bağlı olarak maliyetle taşınırlar [3].

## 6.4 Hidrojenin Taşıma Şekillerinin Karşılaştırması

Hidrojenin taşınmasında seçimi etkileyecek ana faktörler uygulama, miktar ve üretim yerinden alıcıya olan mesafedir. Depolamada da bahsedildiği üzere, eğer hidrojen, uygulamada sıvı olarak gerekiyorsa sıvı halde uygulama alanına taşınmalıdır. Taşımada etkili olan faktörler ayrı ayrı incelenirse;

Miktar: Büyük miktarlardaki hidrojen için en ucuz taşıma yöntemi boru hatlarıyla taşımadır. Fakat okyanusların geçilmesi söz konusu olursa doğal olarak en ucuz yöntem sıvı hidrojenin tankerlerle taşınması olacaktır. Sıvı hidrojenin taşınması ikinci en ucuz iletim yöntemidir. Boru hattıyla taşınmanın çalıştırma maliyetleri çok düşüktür. Diğer tarafta sıvı hidrojenin taşıma maliyetleri yüksek fakat ilk yatırım maliyetleri hidrojen miktarı ve taşıma yapılacak mesafeye bağlı olarak daha düşüktür. Küçük miktarlardaki hidrojen için boru hattı karlı olmamaktadır. Çünkü boru hattına yapılacak ilk yatırım maliyeti çok yüksek olacaktır. Bu durumda en uygun yöntem sıkıştırılmış gaz halde taşımadır. Sıvı hidrojenle kıyaslandığında sıkıştırılmış gaz hidrojenin enerji tüketimi ve ilk yatırım maliyeti daha düşüktür. Her ne kadar aynı miktardaki hidrojen için daha fazla tüp treylere ihtiyaç duyulsa da ilk yatırım maliyeti çok daha aşağıda kalmaktadır. Bu ikisi arasında hangisinin ekonomik olarak tercih edileceği taşınacak mesafeye bağlı olacaktır. Uzun mesafeler için sıvılaştırmanın yüksek enerji maliyeti dengeyi bozacaktır. Mesafe kısa ve miktar çok küçük ise sıkıştırılmış gaz hidrojen en uygun seçim olacaktır. Ayrıca kısa mesafeler için aynı tüp treyleri bir gün içerisinde birden fazla defa kullanma söz konusu olabilmektedir. Metal hidrit taşıma maliyeti gaz ve sıvı hidrojenin

arasında kalmaktadır. İlk yatırım maliyeti çok yüksek olmasına karşın metal hidrit sıkıştırılmış gaz hidrojene kıyasla çok daha fazla miktarda hidrojen taşıma kapasitesine sahip olduğundan tercih edilebilir.

**Mesafe:** Daha önce de değinildiği üzere mesafe taşıma maliyetleri üzerinde çok etkilidir. Kısa mesafeler için boru hatları çok ekonomik olmaktadır. Boru hattının ilk yatırım maliyeti tanker ya da tırların tüplerinin maliyetine yakın olmaktadır ve ek olarak taşıma ve sıvılaştırma maliyeti de bulunmamaktadır. Mesafe arttıkça boru hattının ilk yatırım maliyeti hızlı bir şekilde artmaktadır ve ekonomiklik taşınacak miktara bağlı kalmaktadır.

Mesafe sıvı ve sıkıştırılmış gaz hidrojen arasında bir karar faktörü olabilmektedir. Uzun mesafelerde aynı miktardaki gaz hidrojeni taşımak için gereken tır miktarı sıvı hidrojene göre çok daha fazla olacaktır. Yani uzun mesafedeki gaz hidrojeni taşıma maliyeti, sıvılaştırma maliyetleri eklenmiş sıvı hidrojeni taşıma maliyetinden daha fazla olmaktadır [3].

**Güç Tedariği:** Hidrojenle ilgili özel bir durum, enerjinin uzun mesafe iletimidir. Hidrojeni üretip boru hatlarıyla ısı ya da elektrik enerji ihtiyacı olan yere taşımak düşük enerji kayıplarından dolayı çok daha ucuz olmaktadır [10].

Hidrojenin taşınmasındaki yöntemleri kısaca en uygun koşullara göre özetleyecek olursak;

Boru hattı, büyük miktarlar ve uzun mesafelerdeki güç iletimi için,

Sıvı hidrojen, uzun mesafelere taşımada,

Sıkıştırılmış gaz, küçük miktarlar ve kısa mesafelerdeki taşımalarda,

Metal hidrit, kısa mesafelerde taşımada kullanılması en uygun yöntemlerdir.

## 7. SONUÇ

Tüm uygulama alanlarında maksimum enerji ihtiyacına cevap verecek, önceki enerji kaynaklarının ve çeşitli kirlenici etkilerin doğaya verdiği katalizör zararları yok etmeye yardımcı olabilecek ideal bir enerji kaynağı olarak kabul edilen hidrojen enerjisi önümüzdeki yüzyılın en önemli enerji kaynağı adaylarından biridir. Bu enerji, elde edilebilme ve yüksek verimlilikle, çevre üzerinde hiçbir olumsuz etki yaratmadan yararlı bir

enerjiye dönüştürülebilmektedir. Dünyanın enerji sorununu çözmek için kullanılacak hidrojen enerjisi ile milyarlarca yıl yetecek enerjinin devamlı olarak üretilmesi mümkün olacaktır.

Hidrojen, doğal bir yakıt olmayıp, birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak değişik hammaddelerden üretilen sentetik bir yakıttır. Hidrojen içermesi bakımından en zengin maddeler sırasıyla su ( $H_2O$ ), fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğal gaz vb.) ve biokütledir. Bu ideal enerjiyi elde edip ondan yararlanabilmek için kullanılan yöntemler içerisinde en umut verici olan, yeryüzünde tükenmeyecek bir kaynak olan ve çevresel kirlenmeye neden olmayacak klasik bir yöntem olan sudan hidrojenin elde edilmesidir. Bu kadar basit ve avantajlı bir yöntem olan elektroliz yöntemindeki tek problem büyük oranda enerji maliyetine dayanan yüksek maliyettir. Hidrojen üretimi için en kolay bulunan ham madde olan suyun dünya üzerindeki toplam miktarının %99'u tuzlu ve kutup bölgelerinde buz halindedir. Bu kadar bol miktarda bulunan ve maliyeti çok düşük olan deniz suyunun elektrolizinde karşılaşılan problemler ve yüksek maliyetlerinden dolayı ilk önce deniz suyuna desalinasyon, arıtma işlemi uygulanarak elde edilecek tatlı sudan elektrolizle hidrojen üretimi yapılması uygun olacaktır.

Hidrojen sıkıştırılmış gaz, sıvı ya da metal hidritlerle katı halde iletilebilir. Hidrojen tüplere doldurularak karayolu, demiryolu, deniz yolu ve boru hatları ile iletilmektedir. Burada unutulması gereken nokta, en ucuz taşıma yönteminin, taşınacak hidrojenin miktarına ve taşıma yapılan yola bağlı olduğu ve hidrojenin son kullanıcının ihtiyacına cevap verecek formda taşınması gerektiğidir.

Sonuç olarak, şu an için üretiminden depolanması ve iletimine kadar çok yüksek maliyetler gerektiren bir enerji olan hidrojen enerjisinin özellikle küresel ısınmanın doğa ve canlılar üzerindeki olumsuz etkileri gözönüne alındığında, üzerinde yoğun çalışmalar yapılarak kısa zamanda enerji gerektiren uygulama alanlarında ekonomik kullanılma olanaklarının araştırılarak geliştirilmesi gereken bir enerji kaynağı olduğu görülmektedir.

## KAYNAKLAR

[1] Akkuş, E., (2001), "Hidrojen", <http://www.webkimya.com/hid.htm>, (05.02.2002)

[2] Altan, M., Yörükoğulları, E., (1997), "Hidrojen Zeolit Sisteminin Enerji Teknolojisindeki Ön-

Toronto, Canada, 3:1171-1185.

[14] Pottier, J. ve Bailleux, C., (1986), "Hydrogen : A Gas Of The Past, Present And Future 'A Drama In 3 Acts', Hydrogen Energy Progress VI :

- mi", Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Türkiye 7. Enerji Kongresi.
- [3] Amos, A.W., (1998), "Cost Of Storing And Transporting Hydrogen", National Renewable Energy Laboratory, Colorado.
- [4] Avcı, E., (1999), Hidrojenin Eldesi, Kullanımı ve Uygulama Alanları, Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Proje 2.
- [5] Buchner, H., (1984), "Hydrogen Use-Transportation Fuel", International Journal Of Hydrogen Energy, Pergamon Press, Great Britain, 9:501-514.
- [6] Carpetis, C., (1985), "Break-Even And Optimisation Conditions For Overall Energy Systems Wherein Hydrogen Facilities Are Used", Hydrogen Energy Progress V, Stuttgart, 233-247
- [7] Cicconardi, S.P., Jannelli, E. ve Spazzafumo, M., (1997), "Hydrogen Energy Storage:Reduce CO Emission In Europe Workshop, Netherlands And Oxygen Storage Subsystems", International Journal Of Hydrogen Energy, Elsevier Science Ltd, Great Britain, 22:897-902.
- [8] Donnelly, J.J., Escher, W.J., Greayer, W.J.D. ve Nichols, R.J., (1979), "Study Of Hydrogen – Powered Versus Battery- Powered Automobiles", Department Of Energy, Washington D.C., USA
- [9] Encyclopedy of Chemical Technology, (1991), "Hydrogen", 4th edition, Vol:13, New York, Wiley
- [10] Hart, D., (1997), "Hydrogen Power: The Commercial Future Of The Ultimate Fuel", London, UK., Financial Times Energy Publishing
- [11] Hoffman, K.C., (1973), "Economics Of Hydrogen Energy Systems", Brookhaven National Laboratory Upton, New York
- [12] Hottinen, T., (2001), "Technical review and Economic Aspects Of Hydrogen Storage Technologies", Helsinki University Of Technology, Department Of Engineering Physics and Mathematics, Master's Thesis, Espoo
- [13] Huston, E.L., (1984), "Liquid and Solid Storage Of Hydrogen", Proceedings Of The Fifth World Hydrogen Energy Conference, July 15-20, 197-216
- [15] Styrkovich, M.A. ve Malysenko, S.P., (1986), "Bulk Storage and Transmission Of Hydrogen", Hydrogen Energy Progress VI, Moscow, 765-786
- [16] Taylor, J.B., Alderson, J.E.A., Kalyanam, K.M., Lyle, A.B. ve Philips, L.A., (1986), "Technical and Economic Assesment Of Methods For The Storage Of Large Quantities Of Hydrogen", International Journal Of Hydrogen Energy, 11:5-22
- [17] Türe, İ.E., (1999), "Güneş Enerjisi ile Hidrojen Üretiminde Yeni Gelişmeler", Güneş Günü Sempozyumu, Kayseri, 25-27 Haziran, 160-165.
- [18] Ültanır, M.Ö., "Hidrojenin Yakıt Olarak Kullanımı ve Özellikleri", <http://www.tusiad.org/turkish/rapor/eneji>
- [19] Wurster, R. ve Zittel, W., 1994, "Hydrogen Energy", Proceedings Of Energy Technologies Tomorrow, April 11-12
- [20] [www.tusiad.org.tr,2001](http://www.tusiad.org.tr,2001)
- [21] "Hidrojen Gazı", (2001), <http://www.youthforhab.org.tr/tr/yayinlar/enerji/hidrojen/hidgazi.html>, (15.01.2001)
- [22] "Hidrojen Enerjisi", (2002), [http://www.tubitak.gov.tr/btpd/btspd/platform/enerji/bolum6\\_7.html](http://www.tubitak.gov.tr/btpd/btspd/platform/enerji/bolum6_7.html), (25.04.2002)
- [23] Hidrolik Enerji, Enerji Teknolojileri Çalışma Grubu, (2001), [www.tubitak.gov.tr/btpd/btspd/platform/enerji/bolum6\\_1.html](http://www.tubitak.gov.tr/btpd/btspd/platform/enerji/bolum6_1.html), 15.01/2002