

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KÜÇÜK HİDROELEKTRİK SANTRALLER
YARDIMIYLA DENİZ SUYUNDAN ELEKTROLİZ
YÖNTEMİYLE HİDROJEN ELDESİ, ELDE EDİLEN
HİDROJENİN DEPOLANMASI VE İLETİMİ İLE İLGİLİ
MALİYET ANALİZLERİ**


**Y.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**


Makina Mühendisi, İnci Çağla GÜL

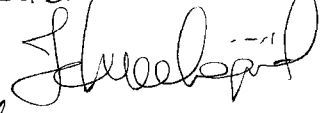
128627

Makina Mühendisliği Enerji Makinaları Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Doç. Dr. Recep ÖZTÜRK


Prof. Dr. Eser BOLAT


Y. Doç. Dr. Zehra YUMURTACI


Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Zehra Yumurtacı (Y.T.Ü)

İSTANBUL, 2002

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTIMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xii
ABSTRACT.....	xiii
1 GİRİŞ.....	1
2 HİDROJEN ENERJİSİ.....	4
2.1 Hidrojenin Özellikleri.....	5
2.1.1 Hidrojenin Fiziksel Özellikleri.....	6
2.1.2 Hidrojenin Kimyasal Özellikleri	7
2.2 Hidrojenin Kullanılması	8
3 HİDROJENİN ELDESİ.....	11
3.1 Hidrojenin Eldesinde Kullanılan Yöntemler	11
3.2 Elektroliz Yöntemiyle Hidrojenin Eldesi.....	13
3.2.1 Konvansiyonel Su Elektrolizi	15
3.2.2 Yüksek Basınçta Su Elektrolizi.....	15
3.3 Tuzlu Su Elektrolizi	16
4 TUZLU SUYU ARITMA YÖNTEMLERİ	18
4.1 Ticari Olarak Fazla Kullanılmayan Fakat Literatürde Yer Alan Bazı Arıtma Yöntemleri.....	18
4.1.1 İyon Değişimi.....	18
4.1.2 Elektrodializ.....	18
4.1.3 Buhar Kompresyonlu Damıtma.....	19
4.1.4 Güneş Buharlaştırması.....	20
4.1.5 Güneş Havuzu.....	21
4.2 Ticari Olarak En Çok Kullanılan Üç Sistem.....	21
4.2.1 Çok Kademeli Ani Damıtma (MSF).....	21

4.2.2	Çok Etkili Damıtma (MED).....	22
4.2.3	Ters Ozmoz.....	23
5	KÜÇÜK HİDROELEKTRİK SANTRALLER	26
5.1	K.H.E.S.'in Tanımı	26
5.2	K.HE.S.'in Teknik Özellikleri	27
5.3	K.H.E.S.'in Diğer Enerji Kaynakları İle Karşılaştırılması.....	28
5.3.1	K.HE.S.'in Avantajları	28
5.3.1	K.HE.S.'in Dezavantajları	29
6	KÜÇÜK HİDROLİK GÜÇ SANTRALLER YARDIMIYLA DENİZ SUYUNDAN HİDROJEN ÜRETİMİ MALİYET ANALİZİ.....	31
6.1	Küçük Hidroelektrik Santralin Maliyet Hesapları.....	32
6.2	Desalinasyon Sisteminin Maliyetlerinin Hesaplanması	38
6.3	Elektroliz Sisteminin Maliyetlerinin Hesaplanması	41
7	HİDROJENİN DEPOLANMASI	46
7.1	Hidrojenin Depolanma Yöntemleri	46
7.2	Sıkıştırılmış Gaz Hidrojenin Depolanması	48
7.2.1	Sıkıştırılmış Gaz Hidrojenin Depolanma Maliyetleri.....	48
7.3	Gaz Hidrojenin Yeraltında Depolanması.....	55
7.3.1	Gaz Hidrojenin Yeraltında Depolanma Maliyetleri	56
7.4	Hidrojenin Metal Hidritte Depolanması.....	60
7.4.1	Hidrojenin Metal Hidritte Depolanma Maliyetleri.....	61
7.5	Sıvı Hidrojenin Depolanması.....	66
7.5.1	Hidrojenin Sıvılaştırılması	66
7.5.2	Sıvı Hidrojenin Depolanması.....	67
7.5.3	Sıvı Hidrojenin Depolanma Maliyetleri.....	68
7.6	Hidrojenin Depolanma Şekillerine Göre Depolanma Maliyetleri	75
8	HİDROJENİN TAŞINMASI	77
8.1	Sıkıştırılmış Gaz Hidrojenin Taşınması	77
8.1.1	Sıkıştırılmış Gaz Hidrojenin Karayoluyla Taşınması.....	77
8.1.2	Sıkıştırılmış Gaz Hidrojenin Demiryoluyla Taşınması	86
8.2	Sıvı Hidrojenin Taşınması	93
8.2.1	Sıvı Hidrojenin Karayoluyla Taşınması	93
8.2.2	Sıvı Hidrojenin Demiryoluyla Taşınması.....	102
8.2.3	Sıvı Hidrojenin Denizyoluyla Taşınması.....	108
8.3	Metal Hidritlerin Taşınması	116
8.3.1	Metal Hidritlerin Karayoluyla Taşınması	116

8.3.2	Metal Hidritlerin Demiryoluyla Taşınması.....	125
8.4	Hidrojenin Boru Hatlarıyla Taşınması	132
8.5	Taşıma Maliyetleri	139
8.6	Hidrojenin Taşıma Şekillerinin Karşılaştırması.....	141
9	SONUÇ	143
	KAYNAKLAR	146
	ÖZGEÇMİŞ	150



SİMGE LİSTESİ

n	Santral ömrü
i	Faiz oranı
m	Yük faktörü
No	Baz alınan güç
C_{so}	Baz alınan birim tesis bedeli
N_e	Santral gücü
I_d	Kuruluş maliyeti
C_{rf}	Geri kazanma faktörü
C_k	Yıllık kuruluş maliyeti
G_k	Birim yatırım maliyeti
G_m	Birim işletme ve bakım maliyeti
G_t	Toplam birim enerji maliyeti
P	Yatırım maliyeti
A	Amortisman
E_m	Enerji maliyeti
F	Hidrojen miktarı
F_t	Yıllık hidrojen üretimi
t	Depolama süresi
P	Çalışma basıncı
K_e	Kompresörün harcadığı enerji miktarı
K_p	Kompresör basıncı
K_m	Kompresör maliyeti
K_g	Kompresör gücü
K_s	Kompresör soğutma
T_m	Tank maliyeti
T_p	Tank basıncı
T_g	Tank kapasitesi
E	Enerji
D	Depolama kapasitesi
S_{su}	Soğutma suyu birim maliyeti
C_k	Kompresör kapital maliyeti
C_t	Tank kapital maliyeti
$C_{toplank}$	Toplam tank kapital maliyeti
C_{vk}	Toplam tank yıllık maliyeti
C_{bk}	Toplam tank birim maliyeti
α	Kompresör faktörü
β	Kompresör basınç faktörü
δ	Tank faktörü
χ	Tank basınç faktörü
Y_m	Yeraltı depolama kapital maliyeti
C_m	Mağara kapital maliyeti
$C_{toplamm}$	Toplam mağara kapital maliyeti

C_{v_m}	Toplam mağara yıllık maliyeti
C_{b_m}	Toplam mağara birim maliyeti
H_h	Metal hidrit ısısı
H_s	Metal hidrit soğutma suyu
H_m	Metal hidrit maliyeti
B	Buhar maliyeti
C_h	Metal hidrit kapital maliyeti
L_p	Sıvılaştırma için harcanan güç
L_{su}	Sıvılaştırmada kullanılan soğutma suyu
BT	Kaynama oranı
L_m	Sıvılaştırıcı maliyeti
L_s	Sıvılaştırıcı kapasitesi
D_m	Tank maliyeti
ω	Sıvılaştırma faktörü
C_t	Sıvılaştırıcı kapital maliyeti
C_D	Tank kapital maliyeti
ξ	Tank faktörü
D_s	Tank kapasitesi
$C_{toplaml}$	Toplam sıvılaştırıcı kapital maliyeti
C_{y_s}	Toplam sıvılaştırıcı yıllık maliyeti
C_{b_s}	Toplam sıvılaştırıcı birim maliyeti
D	Taşıma yapılan mesafe
M	Taşıma yapılan toplam mesafe
T	Yıllık yolculuk adedi
T_{1k}	Tır gaz hidrojen kapasitesi
Y_s	Yolculuk süresi
H_t	Ortalama tır hızı
S_s	Sürüş süresi
S_{yb}	Yükleme / boşaltma süresi
S_t	Toplam süre
T_{1s}	Tır yükleme / boşaltma süresi
T_{1a}	Tır günlük çalışma süresi
T_{1n}	Gerekli tır adedi
$S_{sü}$	Tır sürücüsünün çalışma zamanı
$Sü_a$	Tır sürücüsünün günlük çalışma süresi
$Sü_n$	Gerekli sürücü adedi
$Sü_{ii}$	Sürücü saat ücreti
$Sü_m$	Sürücü maliyeti
Y_a	Yakıt kullanımı
$C_{toplaml}$	Toplam kapital Maliyeti

$T_{1_{tm}}$	Tır gaz hidrojen tankı maliyeti
$T_{1_{um}}$	Tır alt taşıyıcı maliyeti
$T_{1_{cm}}$	Tır sürücü kabini maliyeti
n_a	Tır/treyler ömrü
n_b	Traktör ömrü
μ	1 lt. motorin fiyatı
Tr_a	Tren günlük çalışma süresi
Tr_n	Gerekli tren/vagon adedi
S_{tr}	Tren çalışma süresi
N_{tm}	Yıllık nakliye maliyeti
N_t	Tren yolculuk maliyeti
Tr_{tm}	Tren gaz hidrojen tankı maliyeti
Tr_{um}	Tren alt taşıyıcı maliyeti
$T_{1_{sk}}$	Tır sıvı hidrojen kapasitesi
BO	Buharlaştırma oranı
H_{tr}	Ortalama tren hızı
Tr_s	Tren yükleme / boşaltma süresi
Tr_a	Tren günlük çalışma süresi
N_t	Tren yolculuk maliyeti
Tg_{sk}	Gemi tankı sıvı hidrojen kapasitesi
Tg_s	Gemi tankı yükleme / boşaltma süresi
Tg_a	Gemi günlük çalışma süresi
$T_{1_{mk}}$	Tırın metal hidrit kapasitesi
Tr_k	Tren metal hidrit kapasitesi
Tr_{tm}	Tren metal hidrit tankı maliyeti
Tr_k	Tren metal hidrit kapasitesi
Tr_{um}	Tren alt taşıyıcı maliyeti
a	Alan
π	3,14
r	Boru çapı
A_f	Akım
Re	Reynold's sayısı
Vi	Viskozite
Po	Pürüzsüzlük oranı
Pg	Giriş basıncı
f	Sürtünme katsayısı
T_e	Giriş sıcaklığı

KISALTMA LİSTESİ

HES	Hidroelektrik santral
KHES	Küçük hidroelektrik santral
TO	Ters Ozmoz
TÇK	Toplam çözünen katı
OTEC	Okyanus termal enerji dönüşümü
THEME	Hidrojen Ekonomisi Miami Enerji Konferansı
IHEA	Uluslararası Hidrojen Enerjisi Birliği
WHEC	Dünya Hidrojen Enerjisi Konferansı
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
UNIDO	Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Programı



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 4.1	Buhar kompresyonlu damıtma prosesinin şematik görünüşü	19
Şekil 4.2	Güneş buharlaştırması prosesinin şematik şekli	20
Şekil 4.3	Ozmoz çalışma prensibi	24
Şekil 4.4	Ters ozmos prosesinin şematize edilmesi.....	24
Şekil 6.1	Santral güçlerine göre \$/kWh cinsinden değişen yatırım maliyetleri	36
Şekil 6.2	Santral güçlerine göre \$/kWh cinsinden değişen toplam birim enerji maliyetleri	37
Şekil 7.1	Hidrojenin depolama şekillerine göre birim depolama maliyetlerinin kıyaslanması.....	76
Şekil 8.2	Sıvı hidrojenin farklı taşıma yöntemlerine göre hesaplanan taşıma maliyetleri	115
Şekil 8.3	Metal hidritlerin farklı taşıma yöntemlerine göre hesaplanan taşıma maliyetleri	131
Şekil 8.4	Hidrojenin farklı formlarda ve farklı yöntemlerle taşınması için hesaplanan taşıma maliyetleri.	140



ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 6.1 KHES'in maliyet hesapları için kabul edilen değerler.....	32
Çizelge 6.2 KHES'in santral güçlerine göre birim maliyetleri	35
Çizelge 6.3 Kapital ve işletme maliyetleri ile suyun birim maliyetlerinin bulunması	40
Çizelge 6.4 Kapital ve işletme maliyetleri ile tatlısu için elektroliz birim maliyetleri.....	44
Çizelge 6.5 Deniz suyundan elektrolizle hidrojen eldesi için gerekli birim maliyetler.....	45
Çizelge 7.1 Hidrojen depolama yöntemleri	46
Çizelge 7.2 Sıkıştırılmış gaz hidrojenin maliyet hesapları için kabul edilen değerler.....	48
Çizelge 7.3 Gaz hidrojenin yeraltında depolanma maliyet hesapları için kabul edilen değerler	56
Çizelge 7.4 Hidrojenin metal hidritte depolanma maliyet hesapları için kabul edilen değerler.....	61
Çizelge 7.5 Sıvı hidrojenin depolanma maliyet hesapları için kabul edilen değerler.....	68
Çizelge 7.6 Hidrojenin depolanma şekillerine göre depolama maliyetleri.....	75
Çizelge 8.1 Hidrojenin farklı formlarda ve farklı yöntemlerle taşınması için hesaplanan taşıma maliyetleri	139



ÖNSÖZ

Günümüzde enerji ihtiyacının karşılanmasında kullanılan fosil yakıtların rezervlerinin sınırlı hale gelmesi ve çevreye ciddi zararlar vermeleri nedeniyle başlayan yeni enerji arayışları sonucunda belirlenen gözde aday, hidrojen enerjisidir. Doğal bir yakıt olmayan hidrojen, değişik hammaddelerden üretilebilmektedir ve bunların içinde en bol miktarda ve kolay bulunanı deniz suyudur. Hidrojen enerjisinin üretiminde geliştirilen yöntemlerden, bir çok avantajı bulunan ve uygulaması en kolay olan suyun elektroliz edilmesi yöntemidir. Özellikle etrafı denizlerle çevrili ülkemizde bu şekilde üretilmesi çok kolay olan bu enerji kaynağı gelecekte ülkemiz için en gözde enerji adayıdır.

Bu çalışmada, çok bol bir kaynak olan deniz suyundan hidrojen üretiminde birtakım sakıncalarından dolayı tuzlu suyun gelişmiş desalinasyon yöntemleri ile tatlı su haline getirilmesi ve elektroliz işleminin yüksek miktarlardaki enerji ihtiyacının en düşük maliyetle karşılanabilmesi için küçük hidroelektrik santrallerde üretilecek enerjinin kullanılması düşünülerek bu işlemlerin maliyet analizleri yapılarak hidrojenin üretim maliyetleri hesaplanmıştır. Bu durumda üretilecek hidrojenin birim maliyetleri hesaplanarak bu hidrojenin depolanıp iletiminin sağlanması için alternatif yöntemlerin ülkemizde uygulanabilecek olanlarının maliyet analizleri yapılmıştır.

Gelecekte çok yönlü kullanılmaya başlanacak hidrojen enerjisi için ülkemizde kurulacak sistemlerde faydalı olabileceğine inandığım bu çalışmanın hazırlanması esnasında yardımlarını esirgemeyen ve çalışmayı yöneten sayın hocam Yard. Doç. Dr. Zehra Yumurtacı'ya en içten teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

ÖZET

Enerji ihtiyacı ilk çağlarda çok sınırlı hissedilmesine karşın, insanlığın gelişimine 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 kullanımının, sınırlı rezervleri ve çevreye verdiği ciddi zararlar nedeniyle, yeni bir ideal enerji arayışı başlamış ve hidrojen enerjisi sayısız avantajları ile geleceğin enerjisi olmaya aday olmuştur.

Bu araştırmada hidrojen enerjisinin, yeryüzünde en bol bulunan kaynaklardan olan deniz suyundan çok basit ve zararsız bir yöntem olan elektrolizle üretilmesi ve daha sonra çeşitli şekillerde depolanması ve iletimi ile ilgili maliyetler incelenmiştir. Deniz suyu ilk olarak ters ozmoz yöntemiyle arıtılarak tatlı su haline getirilmiş ve daha sonra elektrolizle hidrojen elde edilmiştir. Bu işlemler esnasındaki yüksek enerji ihtiyacından dolayı yüksek olan maliyetleri bir miktar azaltabilmek için enerjinin küçük hidroelektrik santralden karşılanması düşünülmüş ve bu santralin kuruluş ve birim enerji maliyetleri hesaplanmıştır. Araştırmada ayrıca hidrojenin farklı formlarda depolanması ve iletimi ile ilgili yöntemler incelenerek maliyet analizleri yapılmıştır.

Toplam 0,2747 \$/kWh birim maliyetle üretilen hidrojen için en düşük maliyetli depolama yöntemi 0,116 \$/kg birim maliyetli metal hidritte depolamadır. Hidrojenin iletim maliyetleri taşınacak hidrojenin miktarına ve taşımanın yapıldığı yola bağlı olarak değişmektedir. Ancak aynı miktardaki hidrojen için en düşük maliyetli taşıma şekli 0,067 \$/kg maliyetli sıvı haldeki hidrojenin demiryoluyla taşınmasıdır.

Anahtar Kelimeler : Hidrojen enerjisinin eldesi, depolanması ve iletimi, Elektroliz, Deniz suyunun arıtılması, Küçük hidroelektrik santraller.

ABSTRACT

However the need for energy was at very low levels at ancient ages, together with the evolution of the humankind, it has increased. Due to the harms of the fossil fuels to the environment and the limited reserves, a new search for ideal energy has commenced and because of its many advantages hydrogen has been chosen as the main candidate.

This research works on the production of hydrogen from an unlimited source, sea water via electrolysis, and its storage and transportation it with the related cost calculations. Sea water is first desalted by reverse osmosis and then electrolysis is applied. During these processes energy has been provided from a small hydroelectric power plant in order to reduce the costs. Cost calculations of the small hydroelectric plant with the calculations of storing and transporting hydrogen has been performed.

For the hydrogen produced at a rate of 0,2747 \$/kWh, the minimum storage cost is 0,116 \$/kg for storage in metal hydrides. However the transportation costs varies with the quantity and the distance, the transportation media with the minimum cost is liquid hydrogen by rail way at a rate of 0,067 \$/kg.

Keywords : Production, storage and transportation of hydrogen, Electrolysis, Saline water conversion, Small hydraulic power plants

1 GİRİŞ

Enerji son tüketiciye yakıt ve/veya elektrik biçiminde sunulmaktadır. İkincil enerji olan elektriğin çeşitli kullanım avantajlarının bulunmasına karşın, teknoloji yalnızca elektriğe bağlı olarak değil, yakıtı da gerektiren biçimde gelişmiştir. Bunun nedeni, genel enerji tüketiminin % 60'ının ısı biçiminde gerçekleşmesidir.

Birincil enerji kaynaklarının, fiziksel durum değişimi içeren biçimde dönüştürülmesi ile elde olunan ikincil enerjilere, enerji taşıyıcısı denir. Elektrik 20. yüzyıla damgasını vuran bir enerji taşıyıcısıdır. Hidrojen ise 21. yüzyıla damgasını vuracak bir diğer enerji taşıyıcısıdır.

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

1750-1825 yılları arasındaki birinci dalgalanmanın başlıca enerji kaynağı kömürdür.

1825-1860 yılları arasındaki ikinci dalgalanmada, ekonomiye ivme kazandıran elektrik olmuştur.

1860-1910 yılları arasındaki üçüncü dalgalanmada elektrik etkisini sürdürmüş, ama yeni kaynak olarak petrol ortaya çıkmıştır.

1910-1970 arasındaki dördüncü dalgalanmada ekonomiyi büyüten enerji kaynağı nükleer enerjidir.

Şimdi 1970'lerde başlayan 21. yüzyılın neresinde biteceği henüz bilinmeyen yeni bir dalgalanma içindeyiz. Bu yeni dalgalanmayı etkileyen enerji kaynağı hidrojenidir. [1]

Enerji ihtiyacı ilk çağlarda çok sınırlı ve düşük hissedilmesine karşın, insanlığın gelişimine 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 getirdiği saptanmaktadır. Doğal çevre ve tüm canlı organizmanın varlığını tehdit eden bu problemler onarılması zor ve hatta kalıcı hasarlar oluşturmaktadır.

Yapılan tüm bilimsel araştırmalar; doğal çevreye zarar vermeyecek, teknolojik gelişmeye paralel olarak, mutfak fırından uzay araçlarına kadar, tüm uygulama alanlarında maksimum

enerji ihtiyacına cevap verecek, önceki enerji kaynaklarının ve çeşitli kirletici 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 bir takım kıstaslar belirlenmiştir. Bunlar ;

- a- Teknoloji ve bilimin bugünkü noktaya getirdiği insanlık, yüksek standartta yaşayabilecek uygun enerjiyi bulabilmek için, yaşadığı ortamın doğallığını düşünmemekte, tahrip edilmesine göz yumabilmektedir. Bu aşamada ideal enerji arayışındaki en önemli kıstas çevreye zarar vermemesi olmalıdır.
- b- Bu düşünceye paralel yapılan temiz enerji başlığı altında yenilebilir enerji kaynakları üzerine yoğunlaşarak yapılan çalışmalarda kullanılan bazı doğal kaynaklar, ileri teknoloji ürünleri ve uygulamalarında yetersiz kalması, enerji arayışına yeni bir boyut getirmiştir. Bu nedenle ideal yakıt mutfakta kahve pişirmekten, uzaya mekik fırlatmaya kadar gelişen teknolojinin uygulama alanlarında etkin bir şekilde kullanılabilmelidir.
- c- Doğada, uygulamanın ve ihtiyacın niteliğine göre, bol miktarda, her koşulda bulunabilmeli ve sürekli bir geri dönüşüme ve tükenmez bir kaynağa sahip olmalıdır.
- d- Şu anda kullanılan fosil enerji kaynaklarının yerine çok uygun ve ucuz bir sistem ile uygulanabilmelidir.
- e- Taşıma, depolama, kullanma gibi aşamalarında problem çıkarmamalı ve bulunduğu ortama zarar vermemelidir.
- f- Uygulanacak sistem ile üretildiği ünite arasında, uygulamanın niteliğine göre, özelliğini kaybetmeden kolayca nakledilip, gerekli sürede, uygulama aşamasına kadar saklanabilmeli veya değişik sistemler ile uygulama ortamında üretilebilmelidir.

Çevrenin doğallığının bozulmaması ve insanlığın kısıtlanmadan gelişimini sürdürebilmesi için buna benzer birçok parametrenin bir arada bulunması gerekir. Bu özelliklerin çoğunu taşıyan en güçlü enerji taşıyıcılarından biri olarak – hidrojen enerjisi – görülmektedir (Yörükoğulları ve Altan,1997).

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

Günümüzde özellikle çevre kirliliğinden dolayı fosil yakıtların yerine kullanılacak yeni bir enerji formu arayışında yukarıda açıklanan avantajlarından dolayı en gözde aday hidrojen enerjisidir (Cheng, Yang ve Liu, 2000).

2. HİDROJEN ENERJİSİ

Hidrojen enerjisi önümüzdeki yüzyılın en önemli enerji kaynağı 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 enerjiyi devamlı olarak üretebilecektir. [3]

Temiz ve yenilenebilir nitelikteki doğal kaynaklar, belli sınırlar içinde kendi kendini yenileyebilen veya tüketilmesi mümkün olmayan doğal kaynaklar olan yenilenebilir enerji kaynakları, çeşitli problemleri beraberinde getirmektedir (Günerhan,1998).

Güneş, rüzgar, okyanus termik enerjisi gibi bazı enerji kaynakları miktar olarak sonsuz olmalarına rağmen fosil yakıtların birçok özelliğine sahip değildirler. Örneğin güneş enerjisinden gündüz ve bulutsuz havalarda yararlanabileceğimiz gibi şiddeti günün her saatinde ve mevsime göre değişir. Bazı kaynaklar sürekli olarak bulunabilmektedirler. En iyi okyanus termik enerji alanlarının ekvator bölgelerinde yenilenebilir doğal kaynak, taşıtlarda verimli bir yakıt olarak kullanılamaz. Çoğu yenilenebilir enerji kaynağı ise doğal çevre ile uyumsuz çalışır. Örneğin jeotermal suların kimyasal maddeleri yüzeye çıkarması, nükleer enerjinin canlı tüm organizmaları tehdit etmesi gibi.[4] Fakat elektriksel kaynaklı olmayan enerji kaynakları için talep artmaya devam ettikçe, fosil kaynaklardan fosil olmayan sentetik kaynaklara bir geçiş yapılması zorunlu olacaktır (Hoffman,1973).

Yeni enerji kaynaklarının ideal enerji olma yolundaki eksikliklerini tamamlayacak ve bu kaynaklar ile tüketici arasında köprü görevi görecektir sistemler oluşturmak ve bu sistemlerde hidrojen gazını kullanmak mümkündür.

Hidrojenin bir enerji vektörü olarak avantajlarından en önemlisi toksik olmayan ve korozyona neden olmayan bir element oluşudur. Bu yüzden normal önlemler alındığında hidrojenin kullanılması tehlikesiz ve çok basittir. Kirliliğe neden olmayan hidrojen geri dönüşümünde su üreterek doğal çevreye girer (Pottier ve Bailleux,1986).

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. [4]

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 temizlenmesi 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 yapmış halde rastlanır. Doğadaki miktarı sonsuz olup tükenmez, 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 (Yörükoğulları ve Altan,1997).

2.1 Hidrojenin Özellikleri

Atom Numarası	:1
Atom Kütle	:1.008
Erime Sıcaklığı	: -259,14° C
Kaynama Sıcaklığı	: -252,87° C
Elektron Biçimlenmesi	:1s ¹
Yükseltgenme Derecesi	: +1
Özgül Kütle	: 0,071 g/cm ³
İzotopları	:1,2 ve 3
Doğal Hidrojen	: ¹ H :99,985 / ² H :0,015

En basit kimyasal element olan hidrojen, renksiz, kokusuz, tatsız ve yanıcı bir gazdır. Saydam bir yapıya sahip olan hidrojen doğadaki en hafif kimyasal elementtir. [5]

Hidrojen elementini ilk olarak 16. yüzyılda İsviçreli kimyacı Paracelsus, asitlerin bazı metallere üzerindeki etkisini araştırırken elde etti. 1766' da İngiliz kimyacı Henry Cavendish ise hidrojenin öbür yanıcı gazlardan ayrı bir gaz olduğunu belirledi ve belirli miktardaki asitleri ve metallere tepkimeye sokarak oluşan hidrojen miktarını ve yoğunluğunu ölçtü. Hidrojenin yanmasıyla su oluşumu 1776' da gözlemlendi. Hidrojen adı ise 1781'de Fransız kimyacı Antoine-Laurent Lavoisier tarafından önerildi.

Hidrojen oksijenle yanması sonucunda yaklaşık 2.600°C'lik bir sıcaklık ortaya çıkar ; hidrojen moleküllerinin bir elektrik arkı ya da akkor bir tungsten teli yardımıyla ayrıştırılması sonucunda oluşan hidrojen atomlarının yeniden birleşmesiyle de 3,400°C' nin üzerinde sıcaklıklar elde edilebilir (Akkuş, 2001).

2.1.1 Hidrojenin Fiziksel Özellikleri

Hidrojen molekülü, birbirinden 0,75 Å uzaklıktaki 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 gazların tümünden daha hızlı geçer. Aynı şekilde kıvılcıkdaki demir, platin ve iridyum gibi metallere de sızar. Hidrojen helyumdan sonra sıvılaştırılması en zor olan gazdır. Dönüşüm sıcaklığı -240°C olan hidrojen atmosfer basıncında -253°C kaynar,-259°C' ta katılaştır. Oldukça iyi bir ısı ve iletkenidir. Özellikle kendi hacminin bin kat fazlasını çözümlenebilen paladyum gibi kimi metallere tarafından kolayca soğutulur.

Olağan hidrojen, molekül yapıları bakımından birbirinden farklı Ort hidrojen ile parahidrojen gibi iki izomerini karışımından oluşur. Ort hidrojen oda sıcaklığında gazın dörtte üçünü meydana getirir; para hidrojenin oranı ise sıcaklık düştükçe artar. Parahidrojen ayrıca ort hidrojene göre daha uçucudur. Öte yandan kusursuz bir elektrik iletkeni olması, karışımındaki niceliğini belirlemesini sağlar.

Hidrojen atomu $1s^1$ şeklindeki elektron biçimlenmesiyle hemen her zaman ortak değerlikli bağlar oluşturur. Ancak pozitif ya da negatif iyon durumunda da iyonlaşabilir. Hidrojen biçimindeki iyonlaşma potansiyeli çok yüksektir. Pozitif yükün yeğin bir elektrik alanı oluşturması nedeniyle H^+ iyonu, kutuplanabilir madde yanında tek başına bulunmaz. Nitekim

hidrojen iyonu suda H_3O^{+} 'ya amonyakta ise NH_4^+ 'e dönüşür. H^+ protonu çözücü molekülüne bir elektron çiftiyle bağlanır. H^+ iyonu, elektron ilgisi çok yüksek olan maddeler eşliğinde meydana geldiği gibi ayrıca HA asitlerinin suda H^+ ve A^- biçiminde ayrışmasıyla da oluşabilir.

Hidrojenin elektron ilgisi zayıftır. H^- iyonu, elektrik boşalmalı tüplerde, düşük bir hidrojen basıncının etkisiyle elde edilir. Ayrıca alkali metaller gibi çok elektro pozitif maddelerle verdiği tepkimeler sırasın da oluşur (Akkuş, 2001).

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 gibi 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 hidrasitleri verir, fluordan iyoda doğru gittikçe hem tepkime hızında hem de açığa çıkan ısı miktarında azalma görülür. Oksijenle kızıl derecede yada düşük sıcaklıkta bir katalizör eşliğinde birleşerek su verir. Mavi bir alevle yanar, oksijenle karışımı oksihidrojen hamlacında kullanılır. Kükürtle $250^{\circ}C$ 'de birleşir, Azotla yüksek basınçta, bir katalizör eşliğinde birleşerek amonyak elde edilmesini sağlar.

Hidrojen özellikle oksijene ve kloro karşı büyük ilgi gösterir ve bu maddeleri bileşiklerinden kükürt, azot, arsenik oksitlerden ametali açığa çıkarır. Kurşun ve bakır gibi değerli metallerin oksitlerini indirger. Demir ve demire yakın metallerin oksitleriyle tersinir tepkimeler verir. Hidrojen ayrıca karbonmonooksidi de indirger; işlemin gerçekleştirildiği koşullara uygun olarak (sıcaklık, basınç, katalizör) değişik ürünler oluşturur.

Katalitik hidrojenlenme tepkimeleri arasında taşkömürü yağlarının yada taşkömürünün doğrudan kendisinin hidrojenlenmesinin (sentetik yakıt üretiminde Bergius yöntemi) yanı sıra doymamış organik bileşiklere hidrojenin bağlanması da sayılabilir. Özellikle hidrojen tepkimesinden sıvı yağların sertleştirilmesinde yararlanır. Elektrik arkına hidrojen üflendiğinde olağanüstü indirgen bir gazelde edilir; buna Langmuir'in atomsal hidrojeni denir. Atomal hidrojen tüm oksitleri indirger ve soğukta ametallerin çoğuyla birleşir (Akkuş, 2001).

2.2 Hidrojenin Kullanılması

1970'li yıllara girilirken hidrojen enerji taşıyıcısı olarak göz önüne alınmıyor, hidrojen enerjisi kavramına enerji literatüründe pek rastlanmıyordu. 18-20 Mart 1974 tarihlerinde Amerika Florida Maimi 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 kavramlardır. 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, geçtiğimiz 1996 yılında Almanya Stuttgart'ta yapılmıştır. Bugün dünyada hidrojenle ilgili onu aşkın sivil toplum kuruluşu vardır ve ona yakın priyodik 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 (Avcı, 1999).

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

1. Haber yöntemiyle amonyak (NH_3) bileşimi
2. Metanol (CH_3OH) bileşimi
3. Bitkisel yağları doyurma
4. Alkenleri okso yöntemiyle aldehit ve alkollere hidroformilleme
5. Petrokimyada hidrojenle işleme
6. Rafineride desülfirizasyon ve hidrokraking işlemlerinde
7. Düz cam üretiminde
8. Işıl işlemlerde koruyucu ve reaktif atmosfer bileşeni olarak
9. Enerji santral ekipmanlarının soğutulmasında
10. Bitkisel yağların katılaştırılmasında
11. 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 yada güneş kökenli elektrikle suyun elektrolizi sonunda üretilen hidrojen verimin artırılması ve fiyatların düşürülmesi durumunda geleceğin önemli bir enerji kaynağı olabilir.

Hidrojenleşme; biyolojik yükseltgenmelerin olağan biçimidir. Bir dezhidrojenazın etkisi altında organik bir bileşiğin hidrojen açığa çıkarmasıyla gerçekleşir. Organik kimyada çok sık karşılaşılan hidrojen bağı (alkol maddeleri) biyokimyada da (proteinlerin yapısında) önemli bir rol oynar.

D-H parçalanma mekanizması, sıvı evrenin buhar evresine oranla döteryumca zenginleşmesine yol açar. Nitekim doğada, suyun çevriminde karşılaştırma standardı olarak benimsenen okyanus suyunun buharlaşması, buhar evresinde, hafif H izotopunun derişimini kolaylaştırır ve bu buharın yumuşması da meteorik suları oluşturur. Buharlaşmanın yeğ in olduğu kuşaklarda tuz bakımından çok yüklü olan sular, döteryumca çok zenginleşir. Döteryum ile oksijenin 0^{18} izotopu arasında meteorik suları belirleyen bir bağıntı vardır; bu yüzden söz konusu izotop jeotermal suların kökenini saptamada kullanılır.

Alifatik yada halkalı doymuş hidrokarbonlara uygulanan hidrojen gidermeyle, arıtmada ve petrokimyada çok büyük önemi olan olefinler ve aromatik hidrokarbonlar elde edilebilir.

Böylece hidrojeni giderilmiş ve halkalaştırılmış parafinler, üretilen benzine yüksek bir oktan indisi kazandıran benzenik hidrokarbonlar verir. Etanın buharla krakinginde ısı hidrojen gidermeyle etilen üretilir. Kimi katalizörler stirolen elde etmek için etilbenzenin ve butadien elde etmek için de butanın (yada nbutenler) hidrojenini gidermeyi sağlar ; bu ürünler kauçuk biresiminin temel maddesini oluşturur.

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 bulunmayışı hidrojenin üstünlüğüdür. Hidrojenin alevli yanması içten yanmalı motorlarda, dizel motorlarında, gaz türbinlerinde, jet motorlarında, roket motorlarında, ısıtma ve pişirmede uygulanabilmektedir. Katalitik yanmasının uygulandığı yerler pişirme, su ısıtma, hacim ısıtma ve absorpsiyonlu soğutucular için ısı sağlamadır. Hidrojenden doğrudan buhar üretimi 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 (Avcı, 1999).

3. HİDROJENİN ELDESİ

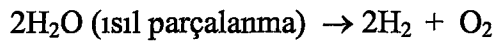
Hidrojen doğal bir yakıt olmayıp, birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak değişik hammaddelerden üretilen sentetik bir yakıttır. Üretiminde birincil bir enerji kaynağı yer aldığından, hidrojen yakıtına enerji taşıyıcısı da denmektedir. Hidrojen üretiminde kullanılan birincil enerji kaynakları alışlagelmiş fosil yakıtlar olabileceği gibi, hidrolik enerji ve nükleer enerji olabilmektedir. Yenilenebilir temiz enerji kaynaklarından güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi, deniz enerjileri bu amaçla kullanılabilir. Hidrojen üretiminde kullanılabilen hammaddeler ise su fosil yakıtlar ve biyokütledir. Bugün dünyada yakıt dışı teknolojik gereksinimlerle yılda 500-600 milyar m³ hidrojen fosil yakıtlardan üretilmektedir. Ancak hidrojen çağına ait hidrojen yakıtının temelde yenilenebilir enerjilerle sudan üretilmesi ana ilkedir.

Bu bölümde, kısaca hidrojen eldesinde kullanılan yöntemlerden kısaca anlatılacak ve çalışmada uygulanacak olan elektrolizle hidrojen eldesi yöntemini detaylı olarak incelenecektir.

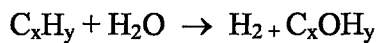
3.1 Hidrojen Eldesinde Kullanılan Yöntemler

Elektroliz için elektrik gereksinimi fosil yakıtlardan, hidroelektrik güçten, nükleer enerjiden, jeotermal güçten, güneş, rüzgar ve deniz dalga enerjilerinden elde olunabilir.

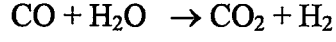
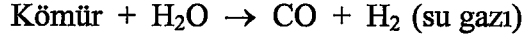
Hidrojen suyun ısı parçalanması (termal kreaking) ile de üretilmektedir.



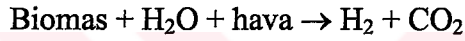
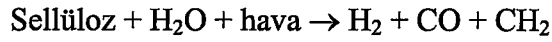
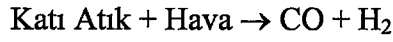
Hidrojen doğalgazın ve gaz hidrokarbonların buhar reformasyonu ile üretilmektedir:



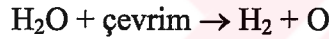
Kömür gazifikasyon teknolojisi ile hidrojen üretilebilmektedir. Gazifikasyon işlemi kolaylıkla kükürtün elemine edilmesine olanak tanıdığından çekici bulunmaktadır:



Katı atıkların ve kanalizasyon metaryalleri de hidrojen için hammadde olup, gazifikasyon işlemine bağlı olarak sentez gazının hava veya oksijenle reformasyonu hidrojen vermektedir:



Termokimyasal çevrimlerle sudan hidrojen üretilebilir:



Fotokimyasal çevrimlerle sudan hidrojen üretilebilir:



Hidrojen üretimi için diğer yöntemler de şöyle sıralanabilir:

Suyun ısıyla ayrıştırılması (decomposition) :

- Biyolojik ve biokimyasal hidrojen üretimi
- Fotoelektrokimyasal hidrojen üretimi
- Denizlerde direkt güneş enerjisi çevrimi ile hidrojen üretimi
- Uzay güneş güç istasyonlarının enerjisiyle hidrojen üretimi

Alışılmış yöntemler ana amacı hidrojen üretimi olan ve yan ürün olarak hidrojen veren yöntemler diye ikiye ayrılır. Hidrojen üretimi için kullanılan alışılmış yöntemler; doğalgazın katalitik buhar reformasyonu, ağır petrolün kısmi oksidasyonu, kömürün gazifikasyonu,

buhar-demir işlemleri ve suyun elektrolizi biçiminde sıralanabilir. Yan ürün olarak hidrojenin elde edildiği alışılmış işlemler ise klor-alkaliden karşıt klor üretimi, kok fırınlarında kömürden kok üretimi ve kimyasal dehidrojenasyon işlemleridir. Bunların yanısıra amonyak ve metanolün parçalanması ile hidrojen elde edilebilirse de bu iki işlem hidrojen üretimi için kullanılmamaktadır.

Hidrojen yukarıda belirtilen alışılmış yöntemlerin yanı sıra yeni geliştirilmiş yöntemlerle de üretilmektedir.

Geliştirilmiş yöntemler; buharın yüksek sıcaklıkta elektrolizi, gazlaştırılmış kömürün elektrokondüktif membran işlemi, kömür gazifikasyonu ile birleştirilmiş yüksek sıcaklık elektrolizi, doğalgazın ısıl krakingi, kömürün hydrocarb ısıl dönüşümü olarak tanımlanabilir. Ayrıca suyun termokimyasal parçalanması, plazma-güneş ve radyasyon işlemleri (plazma-ark işlemi-fotolitik lazer işlemi-yüksek enerjili radyasyon işlemi), güneş fotovoltaiik su elektrolizi diğer ileri yöntemlerdir. Bunların dışında biyolojik üretim yöntemleride olup, mikroalgler ve Cyanobacteria'lar gibi canlılarla, biyofotoreaktörlerden fotobiyolojik yöntemlerle hidrojen elde edilebilmektedir (Avcı, 1999).

3.2 Elektroliz Yöntemiyle Hidrojen Eldesi

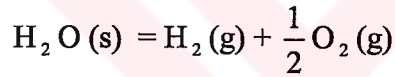
Hidrojen içermesi bakımından en zengin maddeler sırasıyla su (H_2O), fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğal gaz ... vb.) ve biyomastır. Bu ideal enerjiyi elde edip ondan yararlanabilmek için kullanılan yöntemler içersinde en umut verici olan, yeryüzünde tükenmeyecek bir kaynak olan ve çevresel kirlenmeye neden olmayacak olan sudan hidrojenin elde edilmesidir. Diğer kaynakların rezervleri sınırlıdır ve üretim esnasında çevre kirliliğine yol açmaktadırlar.[6]

Suyun elektroliziyle hidrojen elde edilmesi klasik bir yöntemdir. Su oda sıcaklığında durağan olduğundan suyun elektrolizi kayda değer bir enerji gerektirir. Bu yüzden elektroliz maliyeti büyük oranda enerji maliyetine dayanmaktadır (Lin, Moore ve Walker, 1984).

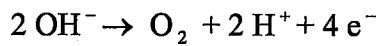
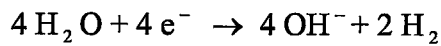
Suyun elektrolizi esnasında üretilen hidrojenin hacimce 1,5 katı oranında yada ağırlığının 0,8'i oksijen üretilmektedir. Özellikle çelik endüstrisi, hastanelerde ve medical amaçlarla oksijene çok ihtiyaç duyulmaktadır. Yan ürün olarak çok saf bir şekilde oksijen elde edilebilmesi de elektroliz yönteminin avantajları arasında sayılabilir (Veziroğlu, 1984). Bugün hidrojen üretiminde en önemli endüstriyel proseslerden biri olan suyun elektrolizi gelecekte çok daha önemli olacaktır (Veziroğlu ve Momirlan, 2002).

Günümüzde hidrojen üretiminde yararlanılan en pratik yöntemlerden biri olan sudan hidrojen elde edilmesinde, elektroliz yöntemiyle suyun iki ana bileşeni olan oksijen ve hidrojene ayrışması sağlanır. [7]

Sıvı fazdaki su, gaz fazındaki oksijen ve hidrojene aşağıdaki basit kimyasal denklemle ayrılır (Ohta, Funk, Porter ve Tilak, 1985) :



Suyun elektrolizi hidrojen ve oksijen gazlarının üretiminde çok basit bir yol izlenir. Elektrolizerlerin çalıştırılması kolaydır ve çok az bir bakım gerektirirler. Bütün bunlara karşılık elektrolizle çok saf ürünler elde edilir (Scott, 1995).



Bir elektrolit çözeltisine iki metalik iletken daldırılır ve bunlar birkaç voltluk bir doğru akım kaynağına bağlanırsa çözeltiden bir elektrik alımı geçer. Bu arada çözelti içinde iyonlarla akım taşınır ve her iki elektrotta bazı kimyasal değişimler olur. Bu olaya elektroliz adı verilir. Kısaca elektroliz, elektrik enerjisi kullanarak kimyasal değişim yaratmaktır (Johnton, 2000).

Elektroliz sırasında bir elektrotta çözelti ayrışarak katı, sıvı veya gaz bir madde çözeltiye geçebilir. Çözeltiden akımın geçmesi ve elektrotlarda ayrışmanın olması için değişik elektrolitler için değişik olan minimum bir potansiyel farkının uygulanması gereklidir. Bu minimum gerilim ayrışma gerilimidir. Elektrotlarda dönüşen madde miktarı Faraday Kanunlarına göre çözeltiden geçen elektrik miktarı ile orantılıdır.

Elektrolizin olduğu, iki elektrot ve bir ila iki çözültiden ibaret hücreye elektroliz hücresi denilmektedir.

Suyun elektrolizle dekompozizasyonu iki elektrodta meydana gelen iki reaksiyonla olur. Elektrodlar iyon içeren elektrolitlere ayrılmışlardır. Hidrojen negatif elektrodta yani katodda üretilirken, oksijen pozitif elektrodta yani anodta üretilir. Gerekli enerji akımının değişimi iyonlar üzerinden olur. Üretilen gazların birbiriyle karışmasını önlemek için bir ayrıncı kullanılır (diaphragm). Suyu ayrıştırmak için elektrik enerjisinden faydalanılır. Aşağıda özellikle hidrojen üretimi için kullanılan elektroliz yöntemleri anlatılacaktır. Bu yöntemlerden halen kullanılan düşük basınçta elektroliz ve geliştirme aşamasında bulunan yüksek basınç ve yüksek sıcaklık prosesleridir.

Suyun elektroliziyle, sudaki H₂ ve O₂ yüksek saflıkta elde edilebilirler. Faraday kanunlarına göre, her bir amper saatte 0.037 gr H₂ ve 0.298 gr O₂ serbestleştirilir. Ağırlık olarak yukarıda verilen miktarlar 0 °C ve 760 mmHg da 0.4176 l ve 0.2088 l' ye karşılık gelir. Buna göre buharlaşma kaybını ihmal edersek 1 m³ H₂ için 8 litre su gereklidir. Saf su, elektroliz olayında kullanılmaz. Çünkü iletkenliği çok azdır. Bu nedenle oksit veya bazla seyreltilir .

3.2.1 Konvansiyonel Su Elektrolizi

Konvansiyonel alkalın elektrolizi sıvı alkalın elektroliti ile yapılır. Anot ve katod alanları mikro gözenekli bir diyaframla gazların karışmasını engelleyecek şekilde ayrılmıştır. Almanya şu anda, eskiden kullanılan asbest diyafram yerine yeni materyaller kullanılmaktadır. Hidrojenin düşük ısınma değeriyle de bağlantılı olarak bu prosesler 0.2-0.2 Mpa çıkış basıncıyla yüksek verimlere ulaşır (%65).

3.2.2 Yüksek Basınçta Su Elektrolizi

Özel materyal seçimi ve optimizasyonu, yüksek basınçta elektroliz 5 Mpa basınca varan hidrojen üretimine imkan verir. Geliştirme aşamasındaki proseslerde uygun kapasite optimizasyonu ve elektrolizerin düzensiz bir kaynağa bağlanması aranmaktadır.

3.3 Tuzlu Su Elektrolizi

Hidrojen üretimi için en kolay bulunan ham madde olan suyun dünya üzerindeki toplam miktarının %99'u tuzludur ve kutup bölgelerindeki buz halindedir (Abdel-Aal,1975). Suyun elektroliziyle hidrojen üretiminde deniz suyu gibi bir elektrolit kullanmak maliyetleri düşürebilmek için de önemlidir (Abdel-Monem, 1984). Bu kadar bol miktarda bulunan ve maliyeti çok düşük olan hidrojen kaynağının, deniz suyunun elektrolizinde bir takım problemlerle karşılaşmaktadır. Tuzlu suyun elektrolizi işlemi konvansiyonel alkali hücrelerle yapılmaktadır ve özel elektroliz sistemlerinin kurulması gerekmektedir çünkü düşük akım yoğunluklarında klor oluşumu ve tuz kalıntılarının oluşturduğu tortular önlenememektedir (Abdel-Aal,1986).

Deniz suyu elektrolizindeki en önemli katodik reaksiyon hidrojen oluşumudur. Hidrojen oluşumu yüksek coulombic verimle olduğu halde, lokal pH değişimine neden olmaktadır. Bu da daha yüksek hücre voltajıyla sonuçlanır ve tortu oluşumuna neden olur. Elektroliz esnasında katot yüzeyi daha temel hale gelir ve hidrojen oluşumu için termodinamik voltaj aşağıdaki denkleme göre daha katodik hale gelir:

Anot reaksiyonu ile, çözeltinin pH' ı katoda yakın olur ve elektroliz esnasında elektrodun çalıştığı voltaj, akış oranı, sıcaklık ve current yoğunluğa bağlı olur. Efektif katot pH' ı , pH 11 ile 14 arasında değişir.

Reaksiyon katot yüzeyinde tortu oluşumuyla sonuçlanır. Bu da deniz suyunun elektrolizi esnasında meydana gelen en önemli problemdir. Magnezyum hidroksit kimyasal çökmesi pH>9' da meydana gelir ve spesifik olarak 10.7- 11.0 arasında olur. Magnezyum hidroksit katot iç yüzeylerinde daha yüksek pH derecesine neden olur ve elektrot aralıklarını tıkar. Bu tip tortular tamamen atılamazlar fakat deniz suyu türbülansı, doğru akım yoğunluğu seçimi ve katot yüzeyi ile önemli derecede azaltılabilirler.

Tuzlu suyun elektrolizinde üzerinde durulması gereken en önemli faktörler şunlardır:

- a) pH' ın etkisi
- b) Elektrolit konsantrasyonunun etkisi
- c) Akım yoğunluğunun etkisi

- a) pH değerindeki artışı Cl_2 oluşumuna , OH^- iyonlarının serbest kalmasına ve $Mg(OH)_2$ gibi alkali tuzların oluşumuna bağlanabilir.
- b) Elektrolit konsantrasyonunun eritemeyen çökeltilerin oluşumunda önemli bir etkisi vardır. Mg ökeltisinin kütlesi , çözelti içindeki toplam çözünen katı (TK) ile lineer olarak artmaktadır.
- c) Artan akım yoğunluğu çökelti oluşumunda azalan trende neden olur. Bunun sebebi de artan akım yoğunluğu ile daha fazla hidrojen üretilmesidir (Abdel-Aal ve Hussein, 1987).

Hidrojenin deniz suyunun direk elektrolizi ile üretilebilmesi için halledilmesi gereken birçok problem bulunmaktadır. Bu problemlerin başında da oksijen oluşum reaksiyonunda anoddaki işlemlerin seçiciliği gelmektedir. Ayrıca klor özeltlerinde oksit anodların korozif durumu da göz önünde bulundurulması gereken problemlerdendir (Kondrikov, 1990).

Hidrojen üretimi amacıyla tuzlu suyun elektrolizi işleminin özellikleri kısaca aşağıda görölmektedir:

- Tuzlu su elektrolizinde hidrojen %99 verimle üretilebilir.
- Tuzlu suyun toplam çözünen katılarının hidrojen üretimi oranı üzerinde direk etkisi vardır. Yüksek tuzluluk oranında su elektroliz edildiğinde aynı voltaj altında elektroliz edilenlere kıyasla çok daha yüksek oranda hidrojen üretilir.
- Bu hücrede üretilen klor, akım yoğunluğu ve elektrik miktarının fonksiyonudur. Klor %75-80 verimle deniz suyundan elde edilir. Bu tuzlu su elektroliziyle kıyaslandığında oldukça yüksektir. 1000 °C için % 42 mertebesindeki düşük verimlerle oluşan düşük konsantrasyonlar, klorid iyonlarının anoda kütle transferi sonucudur.
- Anodda klor oluşumu oksijenin yerini doldurur. Bu kütle transferi ve kinetiğin, klorin oluşumunu anot üretim reaksiyonunda nasıl dominant yaptığını gösterir.
- En önemli korozyon yapıcı tortulardan olan $Mg(OH)_2$ miktarı yoğunluk ve elektrik miktarına göre değişir (Abdel-Aal, Hussein, 1975).

Yukarıda açıklanan mahzurlarından ve yüksek maliyetlerinden dolayı bu çalışmada deniz suyundan hidrojen üretimi için ilk önce deniz suyuna desalinasyon, arıtma işlemleri uygulanacak ve elde edilecek tatlı sudan elektrolizle hidrojen üretimi yapılacaktır.

4. TUZLU SUYU ARITMA YÖNTEMLERİ

Çalışmada hidrojen eldesi için hammadde olarak denizsuyu kullanılacaktır fakat önceki bölümde de açıklandığı üzere deniz suyu elektroliz işleminde tatlı suya oranla daha zahmetli ve maliyetli bir prosestir. Bu yüzden ilk önce deniz suyu artırılarak tatlı su haline getirilecektir. Bu bölümde tuzlu suyu arıtma yöntemleri genel olarak tanıtılacaktır. Öncelikle çok kullanılmayan ama literatürde yer alan yöntemler, daha sonra da ticari olarak en çok kullanılan üç yöntem anlatılacak ve bunlardan çalışmada kullanılacak olan ters ozmoz sistemi detaylı olarak incelenecektir.

4.1 Ticari Olarak Fazla Kullanılmayan Fakat Literatürde Yer Alan Bazı Arıtma Yöntemleri

4.1.1 İyon Değişimi

Düşük tuzlulukta bir son ürün elde etmek için efektif bir metoddur. Fakat işletme maliyetleri reçineyi oluşturacak asit ve alkali miktarı ile paralel seyrettiğinden iyon değişimi arıtma yöntemlerinden biri seçileceğinde başta yer almayacaktır. Ayrıca ön artıma için de genellikle iyon değişiminden önce ters ozmoz ve elektrodializ gelmektedir (Stevenson, 1997).

4.1.2 Elektrodializ

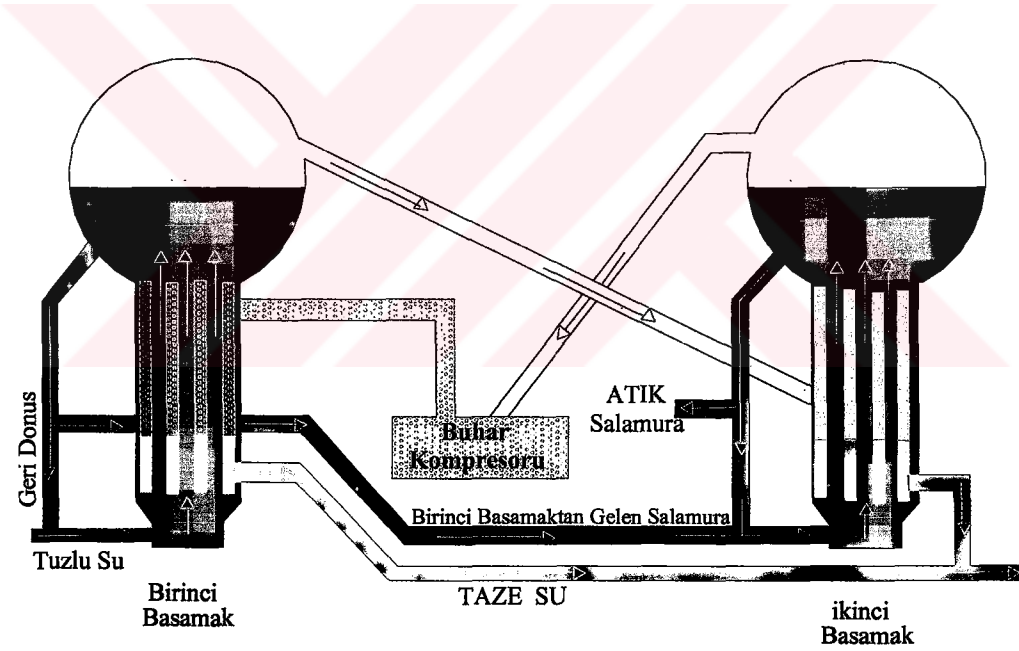
Bu proses tuzların membranlarda elektrik alanının etkisi altında geçişine dayanır. Sonuç olarak çözülmüş tuzlar sudan çekilir. Proses çekilen tuz miktarı oranında elektrik kullanır (Faraday kanununu izleyerek), fakat voltaj geometri kadar elektrolitin* iletkenliğine de bağlıdır. Proses düşük tuzluluk oranlarında ve yüksek saflıkta ürün istenmediğinde daha ekonomiktir. Bir üst limit söylemek gerekirse 1500-2000 mg/l gibi bir değer verilebilir. Bu konuda çok sınırlı sayıda üretici vardır (Stevenson, 1997).

* Elektrolit = Elektrikle unsurlarına ayrılabilen madde.

4.1.3 Buhar Kompresyonlu Damıtma

Buhar kompresyonlu damıtma şekil 4.1’de şematize edilmiştir. Çalışma prensibini özetlersek; buhar sıkıştırıldıkça hacmi küçülürken sıcaklığı ve basıncı artar. Birinci basamağın özel odasında oluşan buhar, ikinci basamağın kanallarından pompalanan deniz suyuna ısı sağlar. Buhar ısını salamuraya verdikçe yoğunlaşarak dibe çöker ve ürün olarak su da bu şekilde alınır.

İki basamaklı ünite şeması bu yaklaşımın temel mantığını göstermektedir. Görüldüğü üzere bu prosesin diğer damıtma proseslerinden farklılığının temel farkı ısının sisteme sokuluş tarzıdır; örneğin burada mekanik iş kompresyon ısısına çevrilmektedir. Burada enerjinin büyük kısmı kompresörü çalıştıran motor tarafından çekilmektedir (Bakish, 1973).

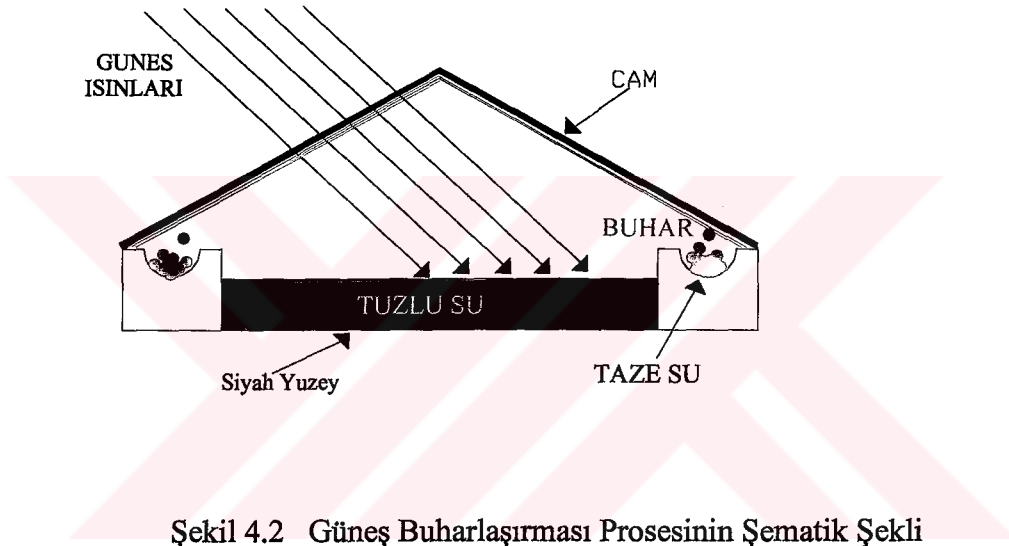


Şekil 4.1 Buhar Kompresyonlu Damıtma Prosesinin Şematik Görünüşü.

Kaynak : Robert Bakish, Desalination – Challenge and Oppurtunity, London : 1973, Noyes Data Corporation, s.8.

4.1.4 Güneş Buharlaştırması

Bu proses de buhar sıkıştırma prosesi gibi damıtma tabanlı bir prosedir. Proses suyun serbest yüzeylerde kaynama noktasının altında buharlaşmasına dayanır. Buradaki buharlaşma hızı, suyun sıcaklığına ve suyun üzerindeki boşluğun bağıl nemine bağlıdır*. Proses genellikle bir güneş paneli içinde gerçekleştirilir. Şematik olarak şekil 4.2 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Güneş Buharlaştırması Prosesinin Şematik Şekli

Kaynak : Robert Bakish, Desalination – Challenge and Opportunity, London : 1973, Noyes Data Corporation, s.9.

4.1.5 Güneş Havuzu

Güneş havuzu yeni sayılabilecek bir sistemdir. Amaç burada elde edilen ısıyı yine başka bir arıtma sisteminde kullanarak taze su elde etmektir. Çoklu ve ani damıtma (Multiple Distillation and Flashing – MDF**) ile birlikte kullanımı için fizibilite çalışmaları yapılmaktadır.

* Bağıl Nem : Belli bir sıcaklıkta tam doyma haliyle kıyaslandığında atmosferin nemlilik miktarı.

** MDF, çok kademeli ani damıtma (MSF) ile çok etkili damıtma'nın (MED) karışımı bir prostedir.

Sistem orta derecede devamlı ısı sağlayabilmektedir. Üç katmandan oluşuyor. Yüzey tabaka atmosferik ısıda ve düşük tuz içeriyor. Alt tabaka çok sıcak (80 °C) ve tuzlu (TDS = 200 g/l). Güneş enerjisi bu tabakada ısı şeklinde tutuluyor. Orta tabakada ise tuz içeriği yukarıdan aşağı doğru artıyor, böylece bir tuzluluk – yoğunluk sınırı oluşturuyor (Özistek, 2002).

4.2 Ticari Olarak En Çok Kullanılan Üç Sistem

Bu bölümde ticari olarak kullanılan ve dünyada kurulu deniz suyu arıtma tesislerinin çok büyük bir bölümünde kullanılan 3 sistemi ve özellikle tezin uygulama bölümünde kullanılan ters ozmoz sistemini açıklayacağız.

4.2.1 Çok Kademeli Ani Damıtma (MSF)

Çok kademeli ani damıtma (Multi Stage Flash Distillation – MSF) 1957’de Profesör R.S. Silver tarafından keşfedilmiştir. MSF ispatlanmış bir prosestir. Bu sistem pazarda büyük bir oranı teşkil eder. Kullanımının getirdiği avantajlar ve esnek sistemler için avantaj sağlaması bu sistemi ön plana çıkarmaktadır.

Desalinasyon projelerinin %67’sinin MSF sistemli olduğunu söyleyebiliriz. Bunun sebebi olarak sistemin basitliği, edinilen tecrübeler sonucunda tesis ömrünün uzaması ve teknolojideki gelişmelerle birlikte maliyetlerin düşmesi söylenebilir. MSF, her ne kadar çift maksatlı santrallarda kullanıldığında enerji ihtiyacında %50’ye varan düşüşler görülse de enerji yoğun bir işlemdir (Hamed vd., 2001).

MSF desalinasyon sistemi hem termal, hem de pompalarını çalıştıracak mekanik enerjiye ihtiyaç duyar. Termal enerji genellikle düşük basınçlı buhar halinde salamura ısıtıcısına, yani ısı giriş bölümüne (HIS) gönderilir.

Sistemin çalışması şu şekilde olmaktadır: Yoğuşmada kullanılan deniz suyunun kalan miktarı maksada uygun haldedir. Bundan sonra kalan su taş oluşumunu azaltmak için kimyasal işlemlerden ve içindeki erimiş gazların alınması için de gazsızlaştırma işlemlerinden

geçirilir. Bu şekilde hazırlanmış deniz suyu tesis çıkışından alınan bir miktar konsantre deniz suyu ile karıştırılır. Devirdaim suyu adı verilen bu karışım ısı alış bölgesindeki kaplarda bulunan borulara pompalanır. Daha öncede anlatıldığı gibi buhar bu boruların dış yüzeylerinde yoğuşur. Yoğuşma ısısı boru yüzeylerinden içeride akan devirdaim suyuna iletilir. Bu ısı ile suyun sıcaklığı yükselir ve bir ısı ekonomisi sağlanmış olur. Bu borularda akan devirdaim suyu sonuçta salamura ısıtıcısına gelir. Burada ısıtılan su birinci basamağın alt kısmına gönderilir. Burada buharlaşma başlar. Suyun bir kısmı buharlaşır ve devirdaim suyu bir miktar soğur. Devirdaim suyu ve kolektörlerde toplanan temiz su basamaktan basamağa geçerek ilerlerler. Her basamak bir öncekine göre daha düşük basınçta olduğu için her basamakta bir miktar buharlaşma olur. En son basamağa gelen temiz su ve salamura tesisten dışarı pompalanır (Özistek, 2002).

MSF damıtıcıları 110-120 °C civarında üst salamura sıcaklığında (birinci basamak girişindeki sıcaklık) 2 mg/l civarında salamuraya karıştırılan yüksek-sıcaklık, polimer-katkılı çökelti kontrol kimyasalı kullanılarak çalıştırılabilirler.

4.2.2 Çok Etkili Damıtma (MED)

MSF prosesinin başlıca alternatiflerinden biri MED prosesidir. Her etkide oluşan buhar sıradaki etkideki ısı transfer yüzeyinin yoğuşma kısmına akar (daha düşük sıcaklık). Yoğuşmanın gizli ısısı yüzeyde akan besi-suyunun bir kısmını buharlaştırmak için tüp duvardan transfer olur. MSF ve MED arasındaki ana farklılık buharlaşma ve ısı transferi metodudur. Bir MED tesisinde, buharlaşma ısı transfer yüzeyi ile temastaki bir deniz suyu filmindedir; MSF tesisinde ise deniz suyunun tüpler içinde sadece konvektif ısınması söz konusudur ve buharlaşma da her basamakta ani buharlaşmaya uğrayan bir salamura akışından kaynaklanır.

MED prosesinde, ince film kaynama ve yoğuşma şartlarına bağlı olarak yüksek ısı transfer oranları elde edilebilir. Aynı zamanda buharlaşma her etkide uniform bir sıcaklıkta meydana gelir. Bunun sonucu olarak, her ne kadar tesis MSF ile kıyaslandığında küçük bir sıcaklık aralığında işletilmesi gereksede, gerekli ısı transfer yüzeyi MSF prosesine yakındır (Wade, 2001).

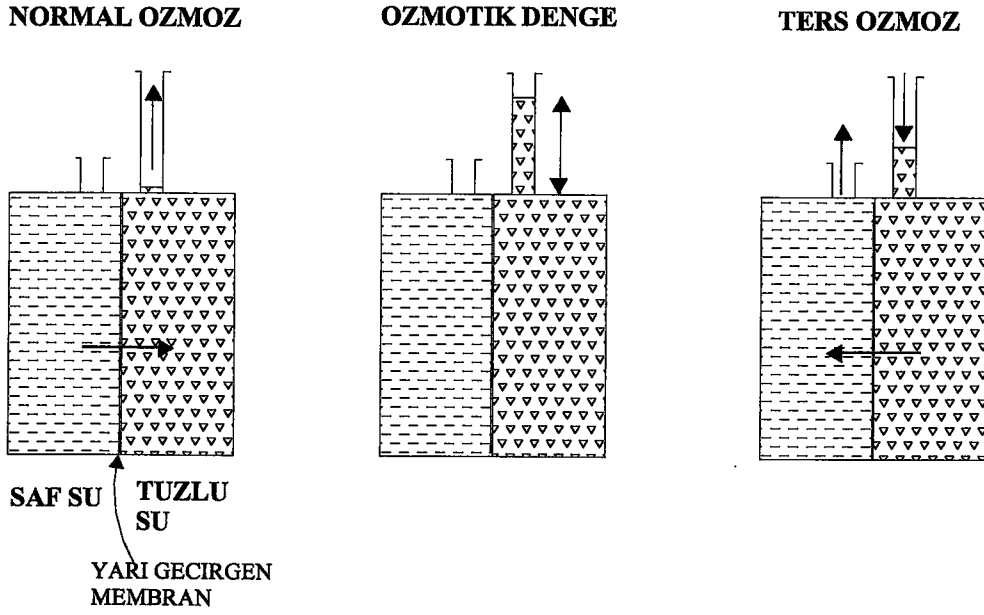
Polimer katkılı çökelti kontrolü kullanan MED tesisleri genellikle düşük – sıcaklıkta işletilmek için yapılırlar (Çökelti oluşumunu önlemek için birinci etkideki buharlaşma sıcaklığı 65 °C civarı). Süngerimsi-top temizliği yapılamadığından MSF prosesine göre daha sık asit temizliği yapılmalıdır. Bir MED tesisinde performans oranı yaklaşık olarak toplam etki sayısı eksi birdir denebilir. yani 8 performans oranlı bir tesis için 9 etki gerekmektedir ki, MSF ile kıyaslandığında yatırım maliyeti daha düşük olacaktır. Performans oranını ayrıca termal buhar sıkıştırması kullanılarak arttırmak mümkündür (Wade, 2001).

Şu an 16.000 m³/d (3,5 mgd) kapasiteli MED tesisleri mevcuttur. Özellikle düşük yatırım maliyetleri nedeniyle MED prosesi MSF prosesi ile yarışabilir duruma gelmiştir. Fakat yinede MED prosesi MSF prosesinin ulaştığı büyük kapasiteli tesislere ulaşmamıştır.

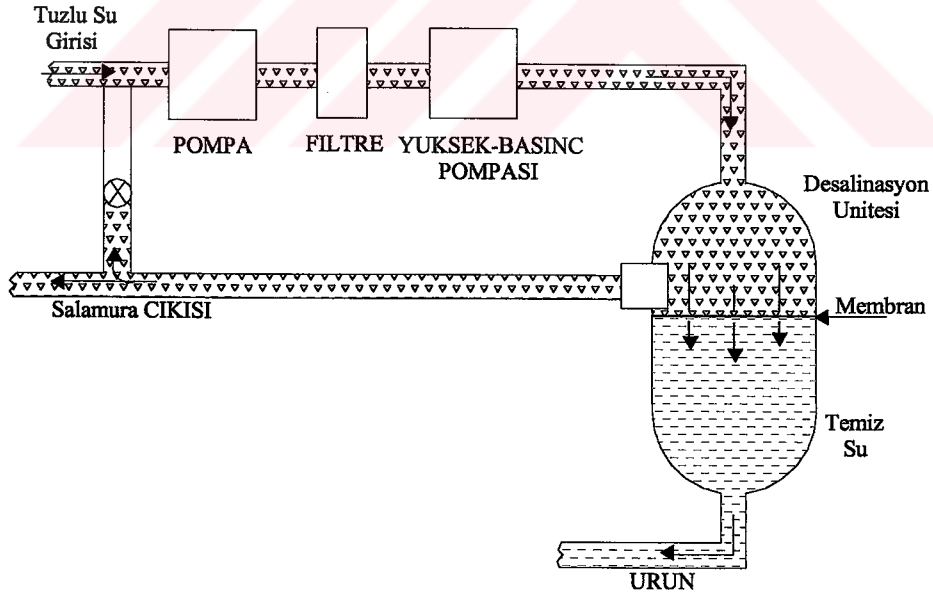
4.2.3 Ters Ozmoz

Ters ozmoz desalinasyon prosesi son yıllarda özellikle Suudi Arabistan ve diğer körfez ülkelerinde başarıyla uygulanmaktadır. Örnek olarak Al Fajira tesisinde 7,5 kWh/m³ enerji kullanım değeriyle, ki bu bir MSF tesisinde kullanılan eşdeğer enerjinin üçte biri kadardır, bir ters ozmoz prosesi ile taze su üretilmektedir (Özistek, 2002).

Ters ozmoz membranlı bir procestir. Sade suyun ve tuz solüsyonunun yarı geçirgen bir membranın farklı taraflarındaki davranışını tanımlayan ozmoz felsefesine dayanır. Burada saf su membrandan nüfuz ederek tuz solüsyonunu seyreltir. Su basınç altındaymış gibi davranır, bu da ozmotik basınç olarak adlandırılır. Ozmotik basınç, tuz konsantrasyonundaki ve solüsyonun sıcaklığındaki farklılıkların fonksiyonudur. Tuz solüsyonuna basınç uygulayarak proses tersine çevrilebilir. Şekil 4.4'de anlatılan prensip, şekil 4.5'de ise ters ozmoz prosesi şematize edilmiştir (Bakish, 1973).



Şekil 4.4 : Ozmoz çalışma prensibi



Şekil 4.5 Ters ozmos prosesinin şematize edilmesi.

Kaynak : Robert Bakish, Desalination – Challenge and Opportunity, London : 1973, Noyes Data Corporation, s.9.

TO prosesi, deniz suyunun basıncı altında (70 kg/cm^2) suyun bir miktarını (%30 – 40 kadar) tuzsuz bir şekilde (Taze su) geçiren diğer kalan (%60 – 70) daha yüksek tuz konsantrasyonlu kısmını (Salamura) bloklayan özel membranlara dayanmaktadır. Bu methodda kullanılan tek enerji formu elektriktir. Elektrik bilimum ekipmanı ve turbo pompaları çalıştırmakta kullanılır. Bu teknolojiadaki yüksek enerji verimliliği salamuranın basıncının tekrar kazanılmasıyla elde edilir (Özistek, 2002).

Dünyada halen MSF sistemi ağırlıklı olarak kullanılmakla beraber özellikle malzeme teknolojisindeki gelişmeler RO prosesini MSF için ciddi bir rakip haline getirmiştir. RO prosesinin MSF'ye göre sahip olduğu bazı avantajları sıralarsak (Özistek, 2002) ;

- Daha az enerji kullanır ve sadece sistemdeki pompaları çalıştıran elektrik motorlarının çektiği mekanik enerji formunda.
- Membran materyali gitgide gelişmektedir.
- Bir güç tesisi ile bağlamaya yada ilişkilendirmeye gerek yok. Sadece tepe noktaya ulaşmayan elektrik talebi periyotlarında da kullanılabilir.
- Basit start / stop operasyonuna sahiptir.
- Modüller halinde taşınır ve işletilir. Böylece acil yada bakım durumlarında tüm tesisi kapatmaya gerek yok.
- Düşük tuzluluktaki ($\approx 600 \text{ ppm}$) RO ürünü, çok düşük tuzluluktaki ($\approx 25 \text{ ppm}$) MSF ürünü ile karıştırılarak tolere edilebilir.

5. KÜÇÜK HİDROELEKTRİK SANTRALLER

Çalışmada kullanılacak olan elektroliz ve desalinasyon sistemleri büyük miktarlarda enerji gerektirdiğinden, maliyetleri bir miktar azaltabilmek için gerekli olan enerji kurulacak bir küçük hidroelektrik santralden sağlanacaktır. Bu bölümde çalışmada kullanılacak olan küçük HES hakkında bilgi vericek ve sonraki bölümlerde de bu tip bir santral için enerji üretim maliyetleri hesaplanacaktır.

5.1 Küçük Hidroelektrik Santrallerin Tanımı

Toplam kurulu gücü 10.000 kW'tan küçük bir veya daha fazla türbin jeneratörünün birini veya bir grubunu kullanarak küçük miktarlarda elektrik üretimi yapan tesisler küçük hidroelektrik santraller olarak tanımlanır. Bu santrallerin pek çok kriterlere göre sınıflandırılması mümkündür. Ancak en çok kullanılan ve Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Programı (UNIDO) tarafından kabul edilen sınıflandırma, toplam kurulu güçlerine göre şu şekilde yapılmaktadır:

- Mikro Hidroelektrik Santraller : Toplam kurulu gücü 100 kW'a kadar olan santraller
- Mini Hidroelektrik Santraller : Toplam kurulu gücü 101-1000 kW arası olan santraller
- Küçük Hidroelektrik Santraller : Toplam kurulu gücü 10001-10000 kW arasında olan santraller (Yumurtacı, 1994)

Küçük hidroelektrik santraller yeryüzünde bilinen en eski elektrik üreten tesislerdir. Elektrik enerjisinin bilinmediği dönemlerde dahi su gücünden tasarlanan küçük çaplı tesislerde su gücü mekanik enerjiye dönüştürülerek çeşitli işlerde kullanılmakta idi.

Elektrik enerjisi üreten büyük ölçekli santrallerin kurulması ve bir şebeke yöntemi ile elektrik enerjisinin en uzak bölgelere taşınmasının sağlanması ile küçük hidroelektrik santraller ekonomik olmadıkları gerekçesi ile önemlerini kaybetmişlerdir. Ancak küçük hidroelektrik

santraller elektrik üretiminin yanısıra yerel başka ihtiyaçlara da (sulama, içme ve kullanma suyu gibi) cevap vermektedirler (Türkiye Çevre Sorunları Vakfı, 1983).

Büyük güçlü hidroelektrik santral uygulamaları, literatürde klasik yenilenebilir enerji üretimleri arasında yer alırken, küçük hidroelektrik santraller yoluyla üretilen yeni ve yenilenebilir enerjiler kapsamına sokulmaktadır. [4]

5.2 Küçük H.E.S.' in Teknik Özellikleri

Küçük hidroelektrik santrallerin teknik yapıları oldukça basittir. Bu tür santrallerin hemen hepsinin ortak bölümleri kapak, kapaksız bağlama, su alma ağzı, çökeltme havuzu, izale sistemi, gerekli olduğu yerlerde biriktirme havuzu, cebri boru, denge bacası, ızgaralar, kapaklar, vanalar, hız regülatörü, türbin tahliye kanalı, jeneratör grubu, şalt hücreleri, güç transformatörü ve santral binasıdır.

Hidroelektrik santrallerin teknik yapıları son yıllarda oldukça gelişme göstermiş, küçük hidroelektrik santraller enterkonnekte sistem ile bağlantılı olarak çalışır hale gelmiş, sistemin ihtiyacı olduğu durumlarda doğrudan devreye girebilmesi sağlanmıştır. Diğer gelişme ise, küçük düşümlü suların kullanılarak "boru ve soğan tipi hidroelektrik santraller" in geliştirilmiş olmasıdır.

Küçük hidroelektrik santrallerin maliyeti genellikle düşü ile ters orantılıdır. Belli bir elektrik gücü elde etmek için türbinden birim zamanda geçmesi gereken suyun hacmi, düşü azaldıkça çoğalmakta, büyük debilerde daha büyük, dolayısıyla daha pahalı türbinlere ihtiyaç duyulmaktadır. Nehir üstü santrallerde belirli düşümlün altında klasik "kaplan türbinleri" ekonomik olmakta, bu yönden "tam aksenal türbin" denilebilecek boru türbinleri, küçük düşümleri değerlendirebilme imkanı vermektedir. Bu tip santrallerde tesis maliyeti önemli ölçüde düşmekte ve aynı santral hacmiyle çok daha fazla enerji üretimi sağlanabilmektedir.

Genel olarak, hidroelektrik santrallerin kurulması ayrıntılı mühendislik çalışmalarını ve her santral yerine farklı donanım projelerini getirmektedir. Türbinler, jeneratörler ve diğer teçhizat, santrallerin kurulması sırasında tek tek monte edilmekle beraber, son zamanlarda küçük

HES' lere olan ilginin artması üzerine yabancı firmalar standart tip üniteler yapmaya yönelmişlerdir. Bu santrallarda tipleşmenin sağlanabilmesi mühendislik hizmetlerini azaltarak maliyetleri düşürmektedir. 100 kW gücünün altındaki küçük HES' lerde tipleşmeye gidilmesi daha kolay olmakta, 100 kW 'ın üzerindeki tipleşme giderek zorlaşmakta, 1000 KW' ın üzerindeki santrallarda ise tipleşme imkansız hale gelmektedir. Bu santralların inşaatlarında da bir ölçüde standartlaşmaya gidilemesi mümkün olabilmekte, böylelikle maliyetler daha da azaltılabilmektedir. Tipleşmeye gitmenin maliyetleri düşürmenin yanı sıra, verim düşüklüğüne yol açması gibi sakıncaları da vardır. Tipleştirilen bu santrallara "paket santrallar" denilmekte ve daha ucuza maledilebilmektedir (Türkiye Çevre Sorunları Vakfı, 1983).

5.3 Küçük H.E.S.' in Diğer Enerji Kaynakları İle Karşılaştırılması

Hidroelektrik santrallar, termik ve nükleer santrallara göre teknik yönden daha güvenli ve işletmecilik açısından daha esneklerdir. Diğer yeni ve temiz enerji kaynakları ile birlikte son yıllarda güncel hale gelen küçük HES' ler, yeniden enerji programlarına alınmaktadırlar.

5.3.1 Küçük H.E.S.' in Avantajları

Teknik olarak ele alındığında bu santralların ilk yatırım masraflarında yabancı para ihtiyacının az olması ve elektrik donanımlarının tamamına yakınının yurt içinde yapılabilmesi, yakıt masraflarının olmayışı, işletme masraflarının düşük, bakım ve onarımının kolay olmaları gibi üstünlükleri vardır. Ayrıca yerli imalat sektörüne daha büyük santralların yapımı için bilgi birikimini sağlamaktadır. Standard tiplerin gelişmesi ile mühendislik hizmetlerin gelişmesi ile mühendislik hizmetleri azaltmakta ve maliyetler düşmektedir.

Küçük hidroelektrik santralların, kuruluş yeri önem taşımaktadır. Bu santrallar, enterkonnekte sistemin ulaşmadığı veya ulaşmasının ekonomik olmadığı kırsal yöreleri elektrığe kavuşturarak buraların sosyo-ekonomik kalkınmalarına ve endüstriyel gelişmelerine büyük fayda sağlamaktadır. Yakıt taşınmasının zor olduğu bölgelerde bağımsız olarak elektrik enerjisi üretebilme imkanına sahip olunabildiği gibi, bunların enterkonnekte sistemle çalışabilmeleri de mümkündür. Elektrik üretiminin yanı sıra aynı tesislerden sulama, içme ve kullanma suyu da sağlanabilmektedir.

Tesislerin hizmet ömürleri uzun,işletme ve yapım maliyetleri düşüktür. Hemen hiçbir çevre sorunu yaratmamakta, aksine çevreyi, sağladıkları enerji ve suyun yardımı ile güzelleştirebilmektedirler. Diğer fosil enerji kaynaklarının tükenebiliğine rağmen hidroelektrik kaynaklar tükenmez olmaları ile de ayrı bir üstünlük taşımaktadırlar.

- Büyük projelerin gerçekleşme zamanı uzundur. Küçük projelerin ise oldukça kısadır. Büyük santraldan uzak bölgeye elektrik enerjisinin iletimi uzun bir süre, daha fazla maliyet, ayrıca iletilinceye kadar hatlarda olan kayıp dolayısıyla enerji kaybına yol açar. Eğer bölgelerde küçük su kaynağı mevcut ise çok daha kısa zamanda hidroelektrik enerji hizmete açılabilir. Zaman kaybından dolayı boşa akan enerji hesap edilirse küçük santralların genelde aleyhine olan ekonomiklik faktörü tamamen tersine dönebilir.

- Planları yapılmış büyük projeler uzun süre finansman bulunamaması yüzünden bekler. Küçük santralin nispeten küçük olan yatırımı için kredi bulmak kolaydır.

- Küçük hidroelektrik santralların elektro-mekanik aksamı, yerli malzeme, yerli mühendislik hizmeti ve yerli imalatla gerçekleştirilebilir. Ülkemizdeki endüstride zaten bu aşamaya gelmiştir.

- Özellikle mikro, mini ve küçük hidroelektrik gruplarda standartizasyona gitmek mümkündür. Bunun ise mühendislik hizmetlerinden yapılan ekonomi ve ayrıca seri ve hızlı üretim imkanları nedeniyle maliyetleri düşüreceği aşikardır.

- Küçük santrallarda verim ikinci planda kalmaktadır. Tesis güvenilir enerjiye göre boyutlandırılır.

- Küçük grupların enterkonnekte şebekeye bağlanmaları halinde esas frekans kontrolü büyük barajlı santrallar tarafından yapılır. Bu takdirde küçük santrallarda asenkron generatör kullanmak mümkündür ve bu maliyeti azaltır (Türkiye Çevre Sorunları Vakfı, 1996).

5.3.2 Küçük H.E.S.' in Dezavantajları

Küçük hidroelektrik santrallerin yukarıda belirtilen faydalarının yanında, planlama ve kullanma safhalarında gözönünde bulundurulması gereken bazı konular bulunmaktadır.

Bu santralların kapasitelerinin az olmasından dolayı, aynı miktar enerji üretebilmek için birçok küçük hidroelektrik tesisin kurulması ve bununla ilgili olarak büyük santrallardan daha

fazla olarak araştırma, etüt-proje ve inşa masrafı gerekli olmaktadır. Bu tür santrallarda bu harcamaların azaltılabilmesi için tipleşmeye gidildiğinde de verim azalmaktadır. Diğer santrallara göre kurulu güç basma düşen maliyetleri de daha yüksektir.

Ayrıca, bu tür santrallar için yer seçimi önemlidir. Sistemden azami yararlanabilmek için enerji talep noktalarının hidrolik kaynaklara yakın olması gerekmektedir. Üretimin devamını sağlayabilmek için sistemin teknolojisi, buna bağlı olarak bakım, onarım ve işletme politikaları büyük önem taşımaktadır. Hava şartları ve mevsim farklılıkları da üretimde bir miktar dalgalanmaya yol açmaktadır. Ayrıca yöredeki suların kullanılma amaçları ve onlara ait öncelikli kullanım hakları da planlamanın yapılmasından önce gözönüne alınması gereken noktalar arasındadır (Türkiye Çevre Sorunları Vakfı, 1996).



6 KÜÇÜK HES YARDIMIYLA DENİZ SUYUNDAN ELEKTROLİZLE HİDROJEN ÜRETİMİ MALİYET ANALİZİ

Elektroliz yöntemi kullanılarak üretilen hidrojenin maliyet analizi yapılırken ilk önce kullanılacak elektrik enerjisinin elde edileceği küçük hidroelektrik santralin maliyetleri hesaplanacaktır.

Önceki bölümlerde açıklanan mahzurlarından dolayı elektroliz direk olarak deniz suyuna uygulanmayacaktır. Elektroliz işleminden önce kurulacak desalinasyon tesisinde kullanılacak deniz suyu arıtılarak tatlı su haline getirilecektir.

Deniz suyunun arıtılması yani desalinasyon işlemi için kullanılacak yöntem Ters Ozmoz yöntemidir. Bu yöntemin seçilmesindeki neden bu yöntemle su arıtmada sadece elektrik enerjisi yeterli olmakta diğer yöntemlerdeki gibi ısı enerjisine gerek olmamaktadır. Bizde hidrolik santralde sadece elektrik enerjisi üretebildiğimizden en düşük maliyetli sistem olarak Ters Ozmoz seçilmiştir. Araştırmada ikinci olarak maliyetleri hesaplanacak olan sistem desalinasyon sistemidir.

Suyun arıtılması işleminden sonra kurulacak olan elektroliz sisteminde hidrojenin elde edilmesi için gerekli maliyetler hesaplanacaktır.

Aşağıdaki şemada yapılacak işlemler ve maliyetleri kısaca gösterilmektedir.

M₁

M₂

M₃

K.HES (Elektrik Enerjisi) → DESALİNASYON (Tatlı Su) → ELEKTROLİZ (H₂) → GAZ HİDROJEN

Yukarıda M harfi ile gösterilen üç maliyetlerin toplamı bize küçük hidroelektrik santral yardımıyla deniz suyundan elektrolizle hidrojen elde etmek için gerekli maliyeti verecektir.

6.1 Küçük Hidroelektrik Santralin Maliyet Hesapları

Küçük hidroelektrik santralde üretilecek enerjinin birim maliyetinin hesaplanabilmesi için yapılacak maliyet hesaplarında aşağıdaki çizelgedeki değerler kabul edilecektir.

Çizelge 6.1 Küçük HES'in maliyet hesapları için kabul edilen değerler

Faiz Oranı	i	8%
Santral Ömrü	n	25 yıl
Yük Faktörü	m	30%
Baz Alınan Güç	No	300 kWh
Baz Alınan Birim Tesis Bedeli	Cso	3000 \$ / kW
İşletme ve Bakım Maliyeti	Cm	50 \$ / kWh yıl

Kaynak: Yumurtacı, Z.S., (1994), Küçük Hidroelektrik Santraller Yardımıyla Türkiye'nin Hidroenerji Potansiyelinin Değerlendirilmesinin Araştırılması, Y.T.Ü., Makina Fakültesi Doktora Tezi

Birim Tesis Bedeli (Cs)

Birim tesis bedeli, baz alınan birim tesis bedelinin, baz alınan gücün santral gücüne oranının 0,3 katı ile çarpımıyla bulunur.

$$Cs = Cso \left(\frac{No}{Ne} \right)^{0,3} \quad (6.1)$$

$$Cs = 3000 \left(\frac{300}{Ne} \right)^{0,3} \quad (\$/kW)$$

Kuruluş Maliyeti (Id)

Kuruluş maliyeti birim tesis bedeli ile santral gücünün çarpımıyla bulunur.

$$Id = Cs \times Ne \quad (\$/yıl) \quad (6.2)$$

Geri Kazanma Faktörü (Crf)

Geri kazanma faktörü faiz oranından aşağıdaki formülle hesaplanır. Burada faiz oranı 0,8 olarak alınmıştır.

$$Crf = \left[\frac{(1+i)^n \cdot 1}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (6.3)$$

$$Crf = \left[\frac{(1+i)^n \cdot 1}{(1+i)^n - 1} \right] = \frac{(1+0,08)^{25} \cdot 1}{(1+0,08)^{25} - 1} = 0,0936$$

Toplam Kazanma Faktörü (Crft)

Toplam kazanma faktörü, (6.3) numaralı formülde hesaplanan geri kazanma faktörüne sigorta ve diğer giderlerin eklenmesi ile hesaplanır.

$$Crft = Crf + \text{Sigorta} , \text{ v.s.} \quad (6.5)$$

$$Crft = 0,0936 + 0,03 = 0,1236 \text{ (\$/yıl)}$$

Toplam Yıllık Kuruluş Maliyeti (Ck)

Toplam yıllık kuruluş maliyeti (6.2) numaralı denklemle hesaplanan kuruluş maliyeti ile (6.5)'de hesaplanan toplam kazanma faktörünün çarpılması ile bulunur.

$$Ck = Id \times Crft \quad (6.6)$$

$$Ck = 0,1236 \cdot Id \text{ (\$/yıl)}$$

Enerji – E

Yıllık enerji, santral gücü ile yük faktörünün 360 gün ve 24 saatlik çalışma bazında çarpılması ile hesaplanır.

Burada yük faktörü 0,30 olarak kabul edilmiştir.

$$E = 24 \times 360 \times Ne \times m \quad (6.7)$$

$$E = 8760 \times 0,30 \times Ne = 2628 \cdot Ne \text{ (kWh/yıl)}$$

Birim Yatırım Maliyeti (Gk)

Birim yatırım maliyetinin hesaplanabilmesi için (6.6)'da hesaplanan toplam yıllık kuruluş maliyeti (6.7) ile hesaplanan enerjiye bölünmelidir.

$$Gk = \frac{Ck}{E} \quad (6.8)$$

Birim İşletme ve Bakım Maliyeti (Gm)

Birim işletme ve bakım maliyetlerinin hesaplanması için 50\$/kwhyıl olarak kabul edilen yıllık işletme ve bakım maliyetinin santral gücü ile çarpılarak, (6.7)' de hesaplanan enerjiye bölünmesi gerekir.

$$Gm = \frac{CmxNe}{E} \quad (\$/\text{kWh yıl}) \quad (6.9)$$

Toplam Birim Enerji Maliyeti (Gt)

Toplam birim enerji maliyeti, birim yatırım maliyeti ile birim işletme ve bakım maliyetlerinin toplamına eşittir.

$$Gt = Gk + Gm \quad (6.9)$$

Amorti Süresi (As)

Amorti süresi, kuruluş maliyetinin, elektriğin birim fiyatından, (6.9) ile hesaplanan toplam birim enerji maliyetinin çıkartılması ile elde edilen farkın (6.7) ile hesaplanan enerji ile çarpılması ile bulunan değere bölünmesi ile hesaplanır.

$$As = \frac{Id}{T} \quad (6.10)$$

$$T = F \times E \quad (6.11)$$

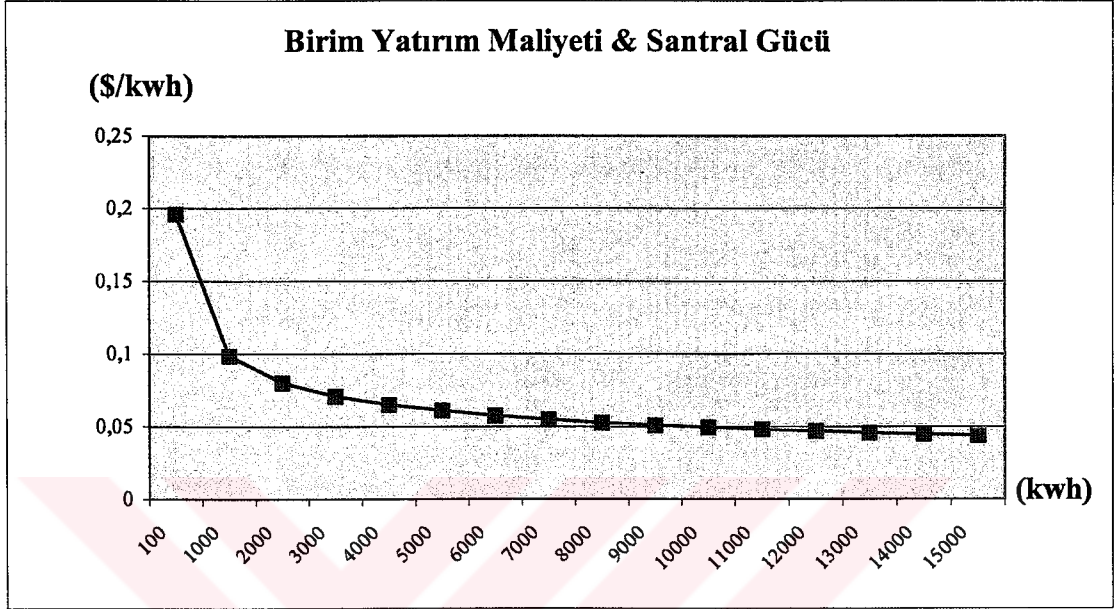
$$F = EBF - Gt \quad (6.12)$$

Farklı güçlerdeki küçük hidroelektrik santraller için yapına hesaplar sonucu bulunan birim maliyetler aşağıdaki çizelgede dataylı olarak verilmiştir.

Çizelge 6.2 Küçük HES'in santral güçlerine göre birim maliyetleri

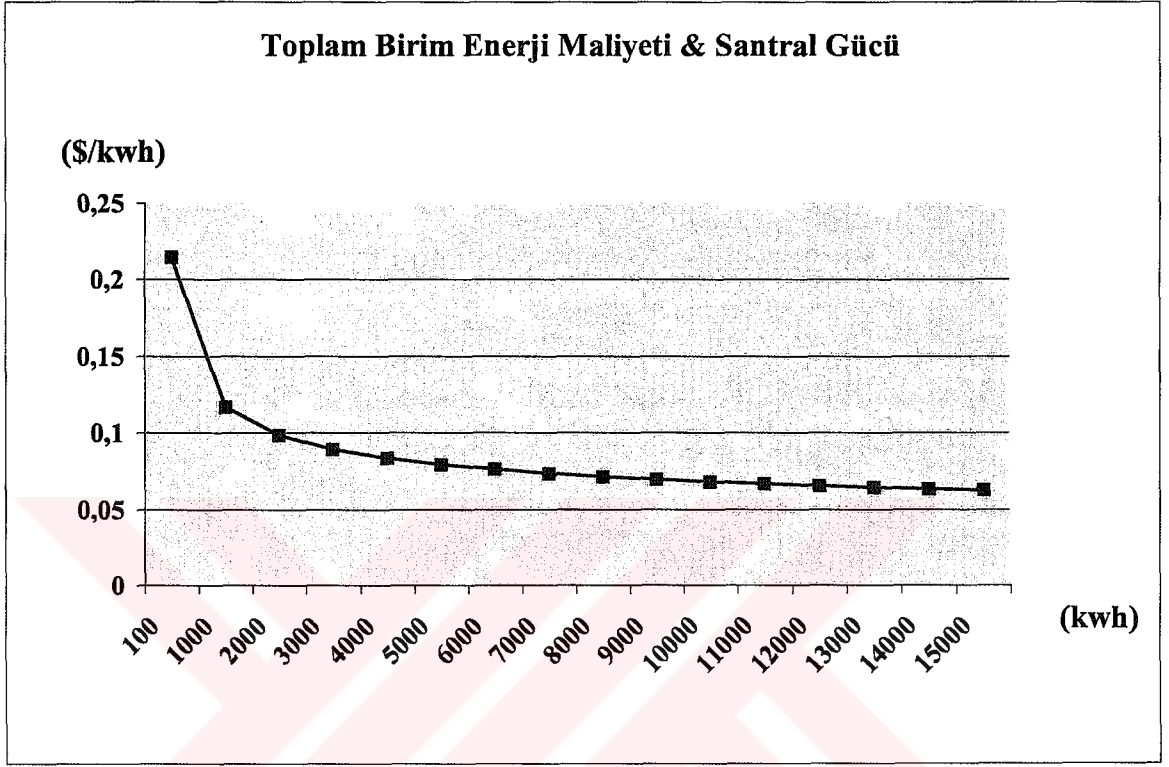
Santral Gücü (kWh) Ne	Birim Tesis Bedeli (\$/kW) Cs	Kuruluş Maliyeti (\$/yıl) Id	Toplam Yıllık Kuruluş Maliyeti (\$/yıl) Ck	Enerji (kWh/yıl)	Enerji (kWh/gün)	Birim Yatırım Maliyeti (\$/kWh) Gk	Birim İşletme & Bakım Maliyeti (\$/kWh) Gm	Toplam Birim Enerji Maliyeti (\$/kWh) Gt
100	4171,116	417111,6	51554,99	262800	720	0,19617	0,01902	0,21519
1000	2090,535	2090535	258390,12	2628000	7200	0,09832	0,01902	0,11734
2000	1698,042	3396084	419755,98	5256000	14400	0,07986	0,01902	0,09888
3000	1503,561	4510683	557520,41	7884000	21600	0,07071	0,01902	0,08973
4000	1379,239	5516956	681895,76	10512000	28800	0,06486	0,01902	0,08388
5000	1289,931	6449655	797177,35	13140000	36000	0,06066	0,01902	0,07968
6000	1221,271	7327626	905694,57	15768000	43200	0,05743	0,01902	0,07645
7000	1166,079	8162553	1008891,55	18396000	50400	0,05484	0,01902	0,07386
8000	1120,29	8962320	1107742,75	21024000	57600	0,05268	0,01902	0,0717
9000	1081,396	9732564	1202944,91	23652000	64800	0,05086	0,01902	0,06988
10000	1047,749	10477490	1295017,76	26280000	72000	0,04927	0,01902	0,06829
11000	1018,215	11200365	1384365,11	28908000	79200	0,04788	0,01902	0,0669
12000	991,98	11903760	1471304,73	31536000	86400	0,04665	0,01902	0,06567
13000	968,444	12589772	1556095,82	34164000	93600	0,04554	0,01902	0,06456
14000	947,151	13260114	1638950,09	36792000	100800	0,04456	0,01902	0,06358
15000	927,748	13916220	1720044,792	39420000	108000	0,04363	0,01902	0,06265

Yapılan hesaplar sonucu bulunan santral güçlerine göre (\$/kwh) cinsinden değişen yatırım maliyetlerinin değişimini gösteren şekil aşağıdaki gibidir.



Şekil 6.1 Santral güçlerine göre (\$/kwh) cinsinden değişen yatırım maliyetlerini gösteren şekil

Yapılan hesaplar sonucu bulunan santral güçlerine göre (\$/kwh) cinsinden değişen toplam birim enerji maliyetlerinin değişimini gösteren şekil aşağıdaki gibidir.



Şekil 6.2 Santral güçlerine göre (\$/kwh) cinsinden değişen toplam birim enerji maliyetlerini gösteren şekil

6.2 Desalinasyon Sisteminin Maliyetlerinin Hesaplanması

Bu sistem için maliyet hesaplaması amortisman metoduna göre yapılacaktır. Amortisman metodunu kısaca şu şekilde açıklayabiliriz:

Bir tesisin kuruluşunda yapılan toplam yatırım masraflarının, kredi alınmışsa kredinin faizi de dahil olmak üzere belirli bir sürede geri ödenmesi amacıyla toplam yatırım değerinin önceden belirlenmiş bir kısmının, sermaye maliyeti olarak her yıl işletme gelirlerinden ayrılması ve vergi dışı bırakılması işlemine “Amortisman” adı verilir. Yıllık gelirden ayrılacak amortisman payının belirlenmesinde bir çok yöntem vardır. Fakat esas konumuzu teşkil eden enerji maliyeti hesabında sabit yıllık amortisman metodunu kullanacağız (Aybers ve Şahin, 1995).

$$A = P \left[\frac{(1+i)^n \times i}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (6.13)$$

A = Yıllık Amortisman

P = Yatırım Maliyeti

i = Faiz Oranı

n = Yatırımın ömrü

Yukarıdaki formüle göre hesaplanan yıllık amortisman miktarını üretilen ürün miktarına bölerek birim başına düşen amortisman payını (tesis maliyeti) bulmak mümkündür. Bu rakama diğer giderler de eklenerek birim maliyet hesabı kolaylıkla yapılabilir.

Çalışmada kullanacağımız desalinasyon tesisi için, 25 sene ömür ve 0.08 faiz oranı olarak amortismanı yıllara göre dağıtırsak;

$P = 4,844 \times 10^6$ \$ (Yatırım Maliyeti)

$i = 0,08$ (Faiz Oranı)

$n = 25$ yıl (Ömür)

$$A = 4,844 \times 10^6 \left[\frac{(1 + 0,08)^{25} \times 0,08}{(1 + 0,08)^{25} - 1} \right] = 453,40 \times 10^3 \$$$

Yıllara göre amortisman, (6.13) numaralı denklemde gösterdiği şekilde hesaplanarak $453,40 \times 10^3 \$$ olarak bulunmuştur.

Tesis Maliyeti (Tm)

Tesis Maliyeti kapital maliyetinin suyun metre-küp fiyatına yansıtılması ile aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\text{Kapital Yüklenimi} = \frac{A}{Y_{su}} \quad (6.14)$$

A : Amortisman

Y_{su}: Yıllık su üretimi

Yıllık su üretiminin hesaplanması için günlük üretilen su miktarı ile yük faktörü 365 gün ile çarpılır.

$$\text{Günlük su üretimi} = 21447 \text{ m}^3$$

$$\text{Yük Faktörü} = 0,9$$

$$Y_{su} = 21447 \times 365 \times 0,9 = 7045339,5 \text{ m}^3$$

Yıllık su üretimi $7045339,5 \text{ m}^3$ olarak hesaplandıktan sonra kapital yüklenimi bu değer kullanılarak (6.14) numaralı denklemle bulunur.

$$\text{Kapital yüklenimi} = \frac{453,40 \times 10^3}{7045339,5} = 0,064 \$ / \text{m}^3$$

Enerji Maliyeti:

$21447 \text{ m}^3 / \text{gün}$ kapasiteli RO tesisinde 1 m^3 su üretmek için gereken enerji $4,2 \text{ kWh}$ ve 10 MW 'lık küçük HES de 1 kWh enerjinin üretim maliyeti $0,06829 (\$/\text{kWh})$ ise ,

Enerji maliyeti (**Em**) = **6151,4 \$**

Birim Enerji Maliyeti = **0,2868 \$ / m³**

Çizelge 6.3 Kapital ve İşletme Maliyetleri ile Suyun Birim Maliyetlerinin Bulunması

Desalinasyon tesisi kapasitesi	21447 m ³ /gün
Yük Faktörü	90%
Enerji Maliyeti	6151,4 \$
Faiz Oranı	8%
Tesis Ömrü	25 yıl
Kapital Maliyeti	4,844 x 10 ⁶ \$
Güç Kullanımı	4,2 kWh/m ³
\$ / m³ Olarak Birim Maliyetler	
Kapital Yüklenimi	0,064
Enerji (Elektrik) *	0,2868
İşletme ve Bakım	0,126
Yedekler , v.s.	0,033
Kimyasallar	0,047
Membran	0,11
TOPLAM	0,717 \$ / m³

* Enerji maliyeti maliyet kalemleri içerisinde küçük HES'in maliyetleri ile birlikte hesaplandığından burada toplam maliyetler arasına alınmamıştır.

TO tesisinde 1 m³ su üretmek için gereken maliyet = **0,717 (\$ / m³)**

Toplam maliyetlerin hesaplanması sırasında diğer maliyetlerde beraber hesap yapılırken daha rahat hesap yapabilmek için (\$ / m³) cinsinden bulduğumuz bu maliyeti, 1 m³ su üretmek için gereken enerji miktarına bölerek, (\$/ kWh)' e dönüştürebiliriz.

$$0,717 (\$/m^3) / 4,2 (kwh/m^3) = 0,170 (\$/kWh)$$

TO tesisinde 1 m³ su üretmek için gereken maliyet = **0,170 (\$/kWh)**



6.3 Elektroliz Sisteminin Maliyetlerinin Hesaplanması

Elektroliz sistemi için maliyetler bir önceki bölümde açıklanan amortisman metoduna göre hesaplanacaktır.

5 MW kapasiteli Elektroliz Tesisinin toplam yatırım maliyetleri ;

Arazi, bina ve inşaat maliyeti = $1,68 \times 10^6$ \$

Elektroliz tesisi içerisindeki tüm cihaz ve ekipmanların temini ve kurulması için gereken maliyet = $1,3778 \times 10^6$ \$

İlk yatırım maliyeti (%2 santral maliyeti) = $0,0336 \times 10^6$ \$

Faiz, paranın değer kaybı ve diğer maliyetler = $0,427 \times 10^6$ \$

Toplam yatırım maliyeti (P_1) = $3,518 \times 10^6$ \$ (Taylor, Alderson, Kalyanam, Lyle ve Phillips, 1986)

5 MW gücündeki bir elektroliz tesisi için toplam yatırım maliyeti olarak belirlenen bu değer in sağlamasını yapmak amacıyla diğer kaynaklardan bulunan üç değer in ortalaması toplam yatırım maliyeti olarak kabul edilmiştir.

$$P_2 = \frac{71,79 \times 10^6}{20} = 3,595 \times 10^6 \text{ $ (Wendt, 1990)}$$

$$P_3 = \frac{256,82 \times 10^6}{20} = 3,210 \times 10^6 \text{ $ (Hoffman, Fischer, Wendt, 1989)}$$

$$P = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3} \tag{6.15}$$

$$P = \frac{3,518 \times 10^6 + 3,595 \times 10^6 + 3,210 \times 10^6}{3} = 3,441 \times 10^6 \text{ $}$$

Toplam yatırım maliyeti $P = 3,441 \times 10^6$ \$ olarak kabul edilmiştir.

Yıllara göre amortisman (A) ;

Yıllara göre amortisman bir önceki bölümde kullanılan (6.13) numaralı formülle hesaplanabilir.

$$A = P \times \left[\frac{(1+i)^n \times i}{(1+i)^n - 1} \right]$$

$$P = 3,441 \times 10^6 \text{ \$ (Yatırım Maliyeti)}$$

$$i = 0,08 \quad (\text{Faiz Oranı})$$

$$n = 25 \text{ yıl} \quad (\text{Ömür})$$

$$A = 3,441 \times 10^6 \left[\frac{(1+0,08)^{25} \times 0,08}{(1+0,08)^{25} - 1} \right] = 322077,6 \text{ \$/yıl}$$

Tesis Maliyeti (Tm)

Tesis Maliyeti bir önceki bölümde kullanılan (6.14) numaralı formülle aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\text{Kapital Yüklenimi} = \frac{A}{Yh} \quad (6.14)$$

A : Amortisman

Yh: Yıllık hidrojen üretimi

Yıllık su üretiminin hesaplanması için günlük üretilen hidrojen miktarı ile yük faktörü 365 gün ile çarpılır.

$$\text{Günlük su üretimi} = 2,383 \times 10^3 \text{ kg/gün}$$

$$\text{Yük Faktörü} = 0,9863$$

$$Yh = 2383 \text{ kg} \times 365 \times 0,9863 = 857878,8 \text{ kg/yıl}$$

Yıllık hidrojen üretimi 857878,8 kg/yıl olarak hesaplandıktan sonra kapital yüklenimi bu değer kullanılarak (6.14) numaralı denklemle bulunur.

$$\text{Kapital yüklenimi} = \frac{322077,6}{857878,8} = 0,375 \text{ \$ / kgH}_2$$

Birim İşletme ve Bakım Maliyeti :

Birim işletme ve bakım maliyeti, toplam işletme ve bakım maliyetinin yıllık toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$\text{İşletme ve Bakım Maliyetleri (toplam)} = 1,23 \times 10^6 \text{ \$}$$

$$\text{Birim İşletme ve Bakım Maliyetleri} = 1,43 \text{ \$/kg}$$

Enerji Maliyeti (Em) :

Elektroliz santralinin toplam güç kullanımı 5 MW= 5000 kW olarak kabul edilmiştir. Santralin yılda 365 gün ve günde 24 saat çalıştığı kabul edilerek yıllık güç kullanımı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\text{Yıllık güç kullanımı} = 5000 \times 365 \times 24 = 43800000 \text{ kWh}$$

Elektroliz santralinde, önceki bölümde maliyet analizi yapılan 10 WM gücündeki küçük HES’de üretilen enerji kullanılacağından, enerji maliyeti 0,06829 \$/kWh olarak alınmıştır. Bu değer ile yıllık güç kullanımının çarpımı ile toplam enerji maliyeti ve bu değerın yıllık üretilen hidrojen miktarına bölünmesi ile de birim enerji maliyeti aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\text{Toplam enerji maliyeti} = \text{Yıllık güç kullanımı} \times 0,06829 = 2991102 \text{ \$/yıl}$$

$$\text{Birim enerji maliyeti} = \frac{\text{Yıllık Toplam Enerji Maliyeti}}{\text{Yıllık Üretilen Hidrojen Miktarı}} = \frac{2991102}{857878,8} = 3,48 \text{ \$/kg}$$

Çizelge 6.4 Kapital ve İşletme Maliyetleri ile Tatlısu İçin Elektroliz Birim Maliyetleri

Elektroliz tesisi kapasitesi	5 MW
Yük Faktörü	0,9863
Enerji Maliyeti	0,06829 \$/kWh
Faiz Oranı	8%
Tesis Ömrü	25 yıl
Kapital Maliyeti	$3,441 \times 10^6$ \$
Güç Kullanımı	5 MWh
Günlük Hidrojen Üretimi	$2,383 \times 10^3$ kg/gün
\$ / kg Olarak Birim Maliyetler	
Kapital Yüklenimi	0,375
Enerji (Elektrik)	3,48 \$/kg
İşletme ve Bakım	1,43 \$/kg
Soğutma suyu	(25,174 ton/gün) 0,000006 \$/kg
Besleme Suyu	(496 ton/gün) 0,0000023 \$/kg
Kimyasallar, vs.	0,00011\$/kg
TOPLAM	5,373 \$ / kg

Toplam maliyetlerin hesaplanması sırasında diğer maliyetlerde beraber hesap yapılırken daha rahat hesap yapabilmek için (\$ / kg) cinsinden bulduğumuz bu maliyeti, 1 kg hidrojen üretmek için gereken enerji miktarı ile çarparak (\$/kWh)' e dönüştürebiliriz.

$$5,373 (\$/\text{kg}) \times 0,0195 (\text{kg}/\text{kwh}) = \mathbf{0,1047 (\$/\text{kWh})}$$

Elektroliz tesisinde deniz suyu kullanılarak, 1 kg hidrojen üretmek için gereken maliyet 0,1047 (\$/kWh) olarak bulunur.

Hammadde olarak deniz suyunu ve küçük hidroelektrik santralde üretilen enerjiyi kullanarak hidrojen üretilmesi için hesaplanan maliyetleri toplarsak;

Çizelge 6.5 : Deniz Suyundan Elektrolizle Hidrojen Eldesi İçin Gerekli Birim Maliyetler

Uygulanan İşlem	\$/kWh Cinsinden Birim Maliyet
TO tesisinde tatlı su üretilmesi	0,170
Elektroliz tesisinde hidrojen üretilmesi	0,1047
Toplam	0,2747

Yukarıdaki tabloda küçük HES'in maliyetleri gösterilmemektedir çünkü bu maliyetler uygulanan işlemler içinde hesaplara dahil edilmiştir.

Tablodan da görüldüğü üzere deniz suyunun elektrolizi ile hidrojen üretilmesi için yapılan hesaplamalara göre gerekli minimum maliyet **0,2747 \$/kWh**'tir.

Burada gaz hidrojen elde edilmektedir. Sıvı hidrojenin üretilmesi için gerekli işlemler ve maliyet hesapları depolama ve iletim hesaplarının yapılacağı sonraki bölümlerde yer almaktadır.

7. HİDROJENİN DEPOLANMASI

Bu bölümde hidrojenin depolanması ve depolama yöntemleri incelenecek ve günümüzde en çok kullanılan yöntemler hakkında detaylı bilgi verilerek bu yöntemlerin maliyet hesapları yapılacaktır.

7.1 Hidrojenin Depolama Yöntemleri

Günümüzde hidrojen çok çeşitli şekillerde depolanabilmektedir. Aşağıdaki tabloda 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 yada cam küreler için spesifik uygulama alanları ve pazar bulunmamaktadır ki bunun da temel nedeni pratik olmayan çalışma koşulları ve düşük hidrojen depolama kapasiteleridir (Hottinen, 2001).

Çizelge 7.1 Hidrojen depolama yöntemleri

Depolama Yöntemi	Hidrojen Kapasitesi	Enerji Kapasitesi	Uygulama Alanları
Gaz Hidrojen	% 11.3	5.0 kw/kg	Taşıma, güç üretimi
Sıvı Hidrojen	% 25.9	13.8kw/kg	Taşıma
Metal Hidrit	% 2-5.5	0.8-2.3 kw/kg	Taşınabilir, taşıma
Carbon	% 5.2	2.2kw/kg	-
Zeolit	% 0.8	0.3 kw/kg	-
Cam Küre	6%	2.5kw/kg	-
Kimyasal	% 8.9- 15.1	3.8-7 kw/kg	Taşıma, güç üretimi

Kaynak : 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

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 şekli oldu halde bu araştırmada ayrıca üzerinde durulmuştur. 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 sahip olmaktadır fakat bunun yanında izole edilmiş depolama konteynerleri ve enerji gerektiren bir sıvılaştırma prosesi gerektirmektedir (Amos, 1998).

Bu çalışmada hidrojen depolama yöntemlerinden dört tanesini ele alınıp maliyet analizleri yapılmıştır. Maliyet hesaplamaları yapılan hidrojen depolama yöntemleri sırasıyla aşağıdaki gibidir:

- 1- Gaz hidrojenin basınç altında depolanması
- 2- Gaz hidrojenin yeraltında depolanması
- 3- Hidrojenin metal hidritlerde depolanması
- 4- Sıvı hidrojenin depolanması

7.2 Sıkıştırılmış Gaz Hidrojenin Depolanması

Hidrojenin sıkıştırılmış gaz halde depolanması şu an için en çok kullanılan yöntemdir. (Hottinen,2001) Sıkıştırılmış gaz halde hidrojenin depolanması en basit depolama yöntemidir ve gerekli olan tek ekipman bir kompresör ve basınç tankıdır (Amos, 1998). Bu yöntem yerüstündeki tüm hidrojen depolama yöntemleri arasında en düşük maliyetli ve kısa dönem uygulamalarda en elverişli ve uygun olanıdır (Carpetis, 1985). Özellikle düşük ağırlıktaki kompozit konteynerleri gelecek vaad eden yöntemlerdendir (Hottinen, 2001).

Sıkıştırılmış gaz haldeki hidrojenin depolanmasındaki ana problem depolama basıncına bağlı olan düşük depolama yoğunluğudur. Yüksek depolama basınçları yüksek yatırım ve işletme maliyetleri gerektirmektedir (Amos, 1998).

Gaz hidrojenin basınçlı tanklarda küçük miktarlarda depolanması çok kolay ve düşük maliyetli olabilmektedir fakat depolanacak hidrojen miktarı arttıkça maliyetlerde miktarla beraber artmaktadır ve bu yöntem büyük miktarlarda hidrojen için ekonomik olmamaktadır (Styrikovich ve Malysenko, 1986).

7.2.1 Sıkıştırılmış Gaz Hidrojenin Depolanma Maliyetleri

Çizelge 7.2 Sıkıştırılmış gaz hidrojenin maliyet hesapları için kabul edilen değerler

Hidrojen	F	100 kg/h
Depolama Süresi	T	1 gün
Çalışma Basıncı	P	$20 \cdot 10^6$ Pa
Kompresörün Harcadığı Enerji Miktarı	K_e	2,2 kWh/kg (20 Mpa)
Kompresör Basıncı	K_p	20 Mpa
Kompresör Maliyeti	K_m	1000 \$/kW
Kompresör Gücü	K_g	4000 kW
Tank Maliyeti	T_m	1323 \$/kg
Tank Kapasitesi	T_g	227 kg
Kompresör Soğutma	K_s	50 lt/h

Kaynak: Amos,A. W.,(1998),”Cost Of Storing And Transporting Hydrogen”, National Renewable Energy Laboratory,Colorado

Depolama kapasitesi (D)

Depolama kapasitesi olarak günlük depolanacak hidrojen kapasitesi hesaplanacaktır. Saatte 100 kg hidrojen depoladığı kabul edilen sistemde depolama kapasitesi, günlük 24 saat çalışıldığı düşünülerek aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$D = F \times t \quad (7.1)$$

$$D = 100 \text{ kg/h} \times 24 \text{ h} = 2400 \text{ kg}$$

Yıllık Üretim (F_y)

Yıllık hidrojen üretimi yıllık çalışma süresi 360 gün olarak alınarak hesaplanmıştır.

$$F_y = F \times 360 \times 24 \quad (7.2)$$

$$F_y = 100 \times 24 \times 360$$

$$F_y = 864000 \text{ kg/yıl}$$

Enerji (E)

Harcanan enerji miktarı, aşağıdaki formül (7.3) ile kompresörün harcadığı güce göre hesaplanabilir.

Kompresörün çalışma basıncı olarak 20 Mpa kabul edilmiştir.

$$E = F \times K_e \times \left(\frac{\ln\left(\frac{P}{0,1 \times 10^6 \text{ Pa}}\right)}{\ln\left(\frac{20 \times 10^6 \text{ Pa}}{0,1 \times 10^6 \text{ Pa}}\right)} \right) \quad (7.3)$$

$$P = 20 \text{ Mpa} = 20 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$E = 100 \text{ kg/h} \times 2,2 \text{ kWh/kg} \times \left(\frac{\ln\left(\frac{20 \times 10^6}{0,1 \times 10^6}\right)}{\ln\left(\frac{20 \times 10^6}{0,1 \times 10^6}\right)} \right)$$

$$E = 220 \text{ kW}$$

Soğutma Suyu (S_{su})

Harcanan soğutma suyu miktarı, kompresörün saatte harcadığı su miktarı olarak 50 lt. alınarak saatteki hidrojen miktarı ve kompresör çalışma basıncına bağlı olarak aşağıdaki formülle (7.4) hesaplanır.

$$S_{su} = F \times K_s \times \frac{\ln\left(\frac{P}{0,1 \times 10^6 Pa}\right)}{\ln\left(\frac{20 \times 10^6 Pa}{0,1 \times 10^6 Pa}\right)} \quad (7.4)$$

$$P = 20 \text{ MPa} = 20 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$S_{su} = 100 \text{ kg/h} \times 50 \text{ lt/kg} \times \frac{\ln\left(\frac{20 \times 10^6}{0,1 \times 10^6}\right)}{\ln\left(\frac{20 \times 10^6}{0,1 \times 10^6}\right)}$$

$$S_{su} = 5000 \text{ lt/h}$$

Kompresör Kapital Maliyeti (C_k)

Kompresör kapital maliyetinin hesaplanması için kullanılacak kompresör faktörü ve kompresör basınç faktörü aşağıdaki gibi kabul edilmiştir.

α : Kompresör faktörü (0,80)

β : Kompresör basınç faktörü (0,18)

$$C_k = (K_m \times K_g) \times \left(\frac{E}{K_g}\right)^\alpha \times \left(\frac{P}{K_p}\right)^\beta \quad (7.5)$$

$$C_k = (1000 \text{ \$/kW} \times 4000 \text{ kW}) \times \left(\frac{220 \text{ kW}}{4000 \text{ kW}}\right)^{0,80} \times \left(\frac{20 \cdot 10^6 \text{ Pa}}{20 \cdot 10^6 \text{ Pa}}\right)^{0,18}$$

$$C_k = 4000000 \times 0,0982 \times 1$$

$$C_k = 392800 \text{ \$}$$

Tank Kapital Maliyeti (C_t)

Tank kapital maliyetinin hesaplanması için kullanılacak tank faktörü ve tank basınç faktörü aşağıdaki gibi kabul edilmiştir.

δ : Tank faktörü (0,75)

χ : Tank basınç faktörü (0,44)

$$C_t = (T_m \times T_g) \times \left(\frac{Sx \frac{T_p}{P}}{T_g} \right)^\delta \times \left(\frac{P}{T_p} \right)^\chi \quad (7.6)$$

$$C_t = (1323 \$/\text{kg} \times 227 \text{ kg}) \times \left(\frac{2400x \frac{20x10^6}{20x10^6}}{227} \right)^{0,75} \times \left(\frac{20x10^6}{20x10^6} \right)^{0,44}$$

$$C_t = 300321 \times 5,863 \times 1$$

$$C_t = 1760782 \$$$

Toplam Kapital Maliyeti (C_{toplam k})

Toplam kapital maliyeti (7.5) ve (7.6) formülleri ile hesaplanan kompresör kapital maliyeti ve tank kapital maliyetinin toplanması ile bulunur.

$$C_{toplam k} = C_k + C_t \quad (7.7)$$

$$C_{toplam k} = 392800 + 1760782$$

$$C_{toplam k} = 2153582 \$$$

Amortisman (A_k)

Amortismanın hesaplanması için bulunan toplam kapital maliyeti kabul edilen tesis ömrüne bölünecektir.

n : Tesisin ömrü olarak 22 yıl kabul edilmiştir.

$$A_k = \frac{C_{toplam}}{n} \quad (7.8)$$

$$A_k = \frac{2153582}{22} = 97890 \$$$

Enerji Maliyeti (E_k)

Şebekeden çekilecek elektrik enerjisinin fiyatı 0,08 \$/kW olarak kabul edilmiştir (Özistek,B.,2002). Enerji maliyeti bu değer (7.3) ile hesaplanan enerji miktarı ile çarpılmasıyla hesaplanır.

$$E_k = E \times 0,08$$

$$E_k = 220 \times 0,08$$

$$E_k = 17,6 \$$$

Yıllık Enerji Maliyeti ($E_{k,y}$)

Tesisin yılda 360 gün ve günde 24 saat çalışacağı kabul edilerek yıllık enerji maliyeti hesaplanır.

$$E_{k,y} = E_k \times 24 \times 360$$

$$E_{k,y} = 17,6 \times 24 \times 360$$

$$E_{k,y} = 152064 \$$$

Soğutma Maliyeti (S_k)

Soğutma suyu birim fiyatı 0,02 \$/Mlitre olarak alınmıştır (Amos, W.,1998). Soğutma maliyeti (7.4) ile hesaplanan soğutma suyu miktarının bu değerle çarpılmasıyla hesaplanır.

$$S_k = S_{su} \times 0,00000002$$

$$S_k = 5000 \text{ lt/h} \times 0,00000002 \$/\text{lt}$$

$$S_k = 0,0001 \$/\text{h}$$

Yıllık Soğutma Maliyeti (S_{k_v})

Tesisin yılda 360 gün ve günde 24 saat çalışacağı kabul edilerek yıllık soğutma maliyeti hesaplanır.

$$S_{k_v} = S_k \times 24 \times 360$$

$$S_{k_v} = 0,0001 \times 24 \times 360$$

$$S_{k_v} = 0,864 \$$$

Toplam Yıllık Maliyet (C_k)

Toplam yıllık maliyetin bulunması için yıllık amaortisman, yıllık enerji maliyeti ve yıllık soğutma maliyeti toplanır.

$$\text{Toplam Yıllık Maliyet} = A_k + E_k + S_k \quad (7.9)$$

$$C_k = 97890 + 152064 + 0,864$$

$$C_k = 249954,8 \$$$

Toplam Birim Maliyet (C_{b_k})

Toplam birim maliyetin hesaplanabilmesi için ilk önce maliyet kalemleri içerisindeki kapital maliyeti, enerji maliyeti ve soğutma maliyetinin birim değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Şimdi sırasıyla bu birim maliyetleri hesaplayalım:

Birim kapital maliyeti : A_{b_k}

Birim kapital maliyeti daha önceden hesaplanan toplam kapital maliyetinin yıllık depolanan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$A_{b_k} = \frac{A_k}{F_t} \quad (7.10)$$

$$A_{b_k} = \frac{97890}{864000} = 0,113 \$/\text{kg}$$

Birim enerji maliyeti : E_{bk}

Birim enerji maliyeti daha önceden hesaplanan toplam enerji maliyetinin yıllık depolanan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$E_{bk} = \frac{E_k}{F} \quad (7.11)$$

$$E_{bk} = \frac{17,6}{100} = 0,176 \text{ \$/kg}$$

Birim soğutma maliyeti : S_{bk}

Birim soğutma maliyeti daha önceden hesaplanan toplam soğutma maliyetinin yıllık depolanan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$S_{bk} = \frac{S_k}{F} \quad (7.12)$$

$$S_{bk} = \frac{0,0001}{100} = 0,000001 \text{ \$/kg}$$

Toplam Birim Maliyet (C_{bk})

Hesaplanan birim maliyetlerin toplamı bize toplam birim maliyeti verecektir.

$$C_{bk} = A_{bk} + E_{bk} + S_{bk} \text{ (\$/kg)} \quad (7.13)$$

$$C_{bk} = 0,113 + 0,176 + 0,000001$$

$$C_{bk} = 0,29 \text{ \$/kg}$$

Hidrojenin yüksek basınç altında depolanması için gerekli toplam birim maliyet yapılan hesaplamalar sonucu 0,29 \\$/kg olarak bulunmuştur.

7.3 Gaz Hidrojenin Yeraltında Depolanması

Hidrojenin yeraltında depolanması da sıkıştırılmış gaz halde depolamanın bir başka şeklidir (Amos W., 1998). Hidrojenin yeraltında depolanması büyük miktarlardaki hidrojen için en düşük maliyetli depolama yöntemidir (Styrikovich ve Malysenko,1986). Doğal gaz 1916 yılından beri yeraltında depolanmaktadır ve aynı deneyim hidrojen uygulamaları için kullanılabilir (Taylor, Alderson, Kalyanam, Lyle ve Phillips, 1986). Doğal gazın yeraltında depolanması çok genel bir uygulamadır ve hidrojenden çok daha hızlı difüze olan helyum gazının da yeraltında depolanması başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir (Hart,1997). Hidrojen yeraltında hem doğal hem sonradan yapılan mağaralarda depolanabilmektedir. Yeraltındaki gaz rezervuarları minimum yatırım maliyeti gerektirirler fakat bu yöntemin bir dezavantajı depolanan basınçlı hidrojenin hacimce yüzde 5 oranında kayıplara uğramasıdır (Styrikovich ve Malysenko, 1986).

Yeraltında depolamada maliyet artırıcı nedenlerden biridepolama sistemi boşaltım çevriminin sonundayken oluşan gazdır. Bu gazın atılması için brine kullanılır ve ek bir maliyette bu brin çözeltilsinin depolanması ve pompalanması için meydana gelmektedir.

Yeraltında basınçlı hidrojen gazının depolanması için üç formasyon vardır. Bunlar:

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

Herhangi bir yeraltı depolama alanında bulunması gereken özellikler şunlardır:

- Yüzetin altında (150-900 m.) su geçiren yapıda gözenekli bir tabaka, genellikle kum yada kumtaşı
- Yeterli kalınlıkta hava geçirmeyen kaya başlık
- Uygun jeolojik yapı (özellikle kubbe biçimli yapı) (Taylor vd, 1986)

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 (Amos,1998).

7.3.1 Gaz Hidrojenin Yeraltında Depolama Maliyetleri

Çizelge 7.3 Gaz hidrojenin yeraltında depolanma maliyet hesapları için kabul edilen değerler

Hidrojen	F	100 kg/h
Depolama Süresi	T	1 gün
Çalışma Basıncı	P	$20 \cdot 10^6$ Pa
Kompresörün Harcadığı Enerji Miktarı	K_e	2,2 kWh/kg (20 Mpa)
Kompresör Basıncı	K_p	20 MPa
Kompresör Maliyeti	K_m	1000 \$/kW
Kompresör Gücü	K_g	4000 kW
Yeraltı Depolama Kapital Maliyeti	Y_m	9 \$/kg
Tank Basıncı	T_p	20 Mpa
Kompresör Soğutma	K_s	50 lt/h

Kaynak: Amos,A.W.,(1998),”Cost Of Storing And Transporting Hydrogen”, National Renewable Energy Laboratory,Colorado

Mağara Kapital Maliyeti (M_k)

Hidrojenin depolanacağı yer olan mağaranın kapital maliyetinin hesaplanması için aşağıdaki formül kullanılacak ve formüldeki hidrojen miktarı ve basınç değerleri için bir önceki sistemde hesaplanmış olan değerler kullanılacaktır

$$C_m = \left[Y_m x \left(Dx \frac{T_p}{P} \right) \right] \quad (7.14)$$

Y_m : Yer altı depolama kapital maliyeti 9 \$/kg olarak alınmıştır (Amos,1998).

$$C_m = \left[9\$/kgx \left(2400kgx \frac{20x10^6 Pa}{20x10^6 Pa} \right) \right] = 21600 \$$$

Toplam Kapital Maliyeti :

Toplam kapital maliyeti (7.5) ve (7.14) formülleri ile hesaplanan kompresör kapital maliyeti ve mağara kapital maliyetinin toplanması ile bulunur.

$$C_{toplam_m} = C_k + C_m \quad (7.15)$$

$$C_k = 392800 \$ \text{ daha önceden hesaplanmıştı.}$$

$$C_{toplam_m} = 392800 + 21600$$

$$C_{toplam_m} = 414400 \$$$

Amortisman (A_m)

Amortismanın hesaplanması için bulunan toplam kapital maliyeti kabul edilen tesis ömrüne bölünecektir.

n : Tesisin ömrü olarak 22 yıl kabul edilmiştir.

$$A_m = \frac{C_{toplam_m}}{n} = \frac{414400}{22} = 18836 \$$$

Enerji Maliyeti (E_m)

Şebekeden çekilecek elektrik enerjisinin fiyatı 0,08 \$/kW olarak kabul edilmiştir (Özistek, 2002). Enerji maliyeti bu değer (7.3) ile hesaplanan enerji miktarı ile çarpılmasıyla hesaplanır.

$$E_m = E \times 0,08$$

$$E_m = 220 \times 0,08$$

$$E_m = 17,6 \$$$

Yıllık Enerji Maliyeti (E_{m_y})

Tesisin yılda 360 gün ve günde 24 saat çalışacağı kabul edilerek yıllık enerji maliyeti hesaplanır.

$$E_{m_y} = E_k \times 24 \times 360$$

$$E_{m_y} = 17,6 \times 24 \times 360$$

$$E_{m_y} = 152064 \$$$

Yıllık Soğutma Maliyeti (S_y)

Soğutma suyu birim fiyatı 0,02 \$/Mlitre olarak alınmıştır (Amos, W.,1998). Soğutma maliyeti (7.4) ile hesaplanan soğutma suyu miktarının bu değerle çarpılmasıyla hesaplanır.

$$S_y = S_{su} \times 0,00000002$$

$$S_y = 5000 \text{ lt/h} \times 0,00000002 \text{ \$/lt}$$

$$S_y = 0,0001 \text{ \$/h}$$

Yıllık Soğutma Maliyeti (S_{k,y})

Tesisin yılda 360 gün ve günde 24 saat çalışacağı kabul edilerek yıllık soğutma maliyeti hesaplanır.

$$S_{m,y} = S_k \times 24 \times 360$$

$$S_{m,y} = 0,0001 \times 24 \times 360$$

$$S_{m,y} = 0,864 \text{ \$}$$

Toplam Yıllık Maliyet (C_k)

Toplam yıllık maliyetin bulunması için yıllık amaortisman, yıllık enerji maliyeti ve yıllık soğutma maliyeti toplanır.

$$\text{Toplam Yıllık Maliyet} = A_m + E_m + S_m \quad (7.16)$$

$$C_k = 18836 + 152064 + 0,864$$

$$C_k = 170900 \text{ \$}$$

Toplam Birim Maliyet (C_{b,k})

Toplam birim maliyetin hesaplanabilmesi için ilk önce maliyet kalemleri içerisindeki kapital maliyeti, enerji maliyeti ve soğutma maliyetinin birim değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Şimdi sırasıyla bu birim maliyetleri hesaplayalım:

Birim Kapital Maliyeti : A_{bm}

Birim kapital maliyeti daha önceden hesaplanan toplam kapital maliyetinin yıllık depolanan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$A_{bm} = \frac{A_m}{F_t} \quad (7.17)$$

$$A_{bm} = \frac{18864}{864000} = 0,0218 \text{ \$/kg}$$

Birim Enerji Maliyeti : E_{bm}

Birim enerji maliyeti daha önceden hesaplanan toplam enerji maliyetinin yıllık depolanan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$E_{bm} = \frac{E_m}{F} \quad (7.18)$$

$$E_{bm} = \frac{17,6}{100} = 0,176 \text{ \$/kg}$$

Birim Soğutma Maliyeti : S_{bk}

Birim soğutma maliyeti daha önceden hesaplanan toplam soğutma maliyetinin yıllık depolanan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$S_{bm} = \frac{S_m}{F} \quad (7.19)$$

$$S_{bm} = \frac{0,0001}{100} = 0,000001 \text{ \$/kg}$$

Toplam Birim Maliyet (C_{bk})

Hesaplanan birim maliyetlerin toplamı bize toplam birim maliyeti verecektir.

$$\text{Toplam Birim Maliyet} = A_{bm} + E_{bm} + S_{bm} \text{ (\$/kg)} \quad (7.20)$$

$$C_{bk} = 0,0218 + 0,176 + 0,000001$$

$$C_{bk} = 0,197 \text{ \$/kg}$$

7.4 Hidrojenin Metal Hidritte Depolanması

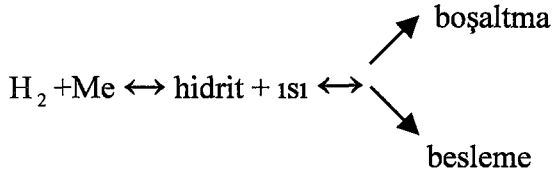
Hidrojenin metallerin içine absorbe olma kapasitesi vardır ve bu şekilde metal hidritler oluşur. Bu egzotermik bir prosestir ve hidrojenin metal hidritten çıkışı yani işlemin tam tersi de endotermik bir reaksiyon oluşturmaktadır. Hidrojenin bir metal tarafından emilme ve salıverilme işlemi birtakım parametrelere bağlıdır. Bu parametrelerin başlıcaları şunlardır:

- Hidrojenin basıncı
- Metalin sıcaklığı
- Hidrojenin akış oranı (Cicconardi, 1997)

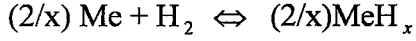
Bu yöntem hidrojenin kimyasal olarak metal, metaloid elementler ve alaşımlara bağlanması şeklinde depolanması yöntemidir. Metal hidritler, kafes yapısına sahip metal atomlarıyla bu kafes yapısı içinde ara yerlerde tutulmuş hidrojen atomlarından oluşmaktadır. Hidrojenin tutulduğu yerler bir boşluk veya kafest bir çizgi hatası olabilir. Çizgi hatası olması durumunda bir dizi hidrojen atomu bu çizgiyi dolduracak şekilde yapıya geçer. Metal ve hidrojen genellikle iki farklı form oluşturur. Bu formlardan biri hidrojen depolamaya müsait iken diğeri tam dolu formdadır. Doldurma aşamasında hidrojen tam dolu yüzeyden geçerek depolamaya müsait yüzeyi oluşturacak şekilde yayılır. Boşaltma sürecinde ise hidrojen tam dolu formdan depolamaya müsait formu oluşturacak şekilde dışarı difüze olarak H_2 moleküllerini oluşturur (Amos,1998).

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 (Wurster ve Zittel,1994). Bir çok metal alaşımı metal hidrit oluştururken hidrojeni kimyasal dönüşümü mümkün olan ve çok güvenli bir şekilde depolayabilirler. Hidrojenin metallerle yaptığı kimyasal bağ ve reaksiyon ısısı birleşimiyle hidritler sadece hidrojen değil aynı zamanda ısıyı da depolarlar. Ve hidritlerin hem sabit hem de hareketli teknik uygulamalarda kullanılabilmesi de bu ısı-hidrojen birleşimi sayesinde olmaktadır (Buchner, 1984).



Metal hidritler hidrojeni ayrışabilir bir kimyasal bileşik halinde depolarlar. Gaz hidrojenle reaksiyona girerek metal hidrit oluşturabilen bir çok 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_x şarjolabilen metal hidrit ve Me hidrojen depolama metal yada alaşımı olarak adlandırılır. Bu şekilde gaz hidrojenin metal hidritte katı bir bileşik halinde depolanmasıyla istenen ve ihtiyaç olan anda tekrar gaz hidrojen olarak elde edilebilir. Bu özelliğinin yanısıra metal hidritlerin güvenliği ve özellikle sıvı hidrojene göre çok daha basit konteynerlerde saklanabilmeleri de diğer avantajlarıdır (Huston, 1985).

7.4.1 Hidrojenin Metal Hidritte Depolanma Maliyetleri

Çizelge 7.4 Hidrojenin metal hidritte depolanma maliyet hesapları için kabul edilen değerler

Hidrojen (F)	F	100 kg/h
Depolama Süresi (t)	t	1 gün
Metal Hidrit Isısı	H_h	23260 kJ/kg
Metal Hidrit Soğutma Suyu	H_s	209 lt/kg
Metal Hidritin Maliyeti	H_m	2205 \$/kg
Buhar Maliyeti	B	3,79 \$/Gj

Kaynak: Amos,A.W.,(1998),”Cost Of Storing And Transporting Hydrogen”, National Renewable Energy Laboratory,Colorado

Enerji (E) :

Harcanan enerji miktarı, aşağıdaki formül (7.21) ile depolanan hidrojen miktarı ile metal hidrit ısısının çarpımına eşittir.

H_h : Hidrit ısısı 23260 kJ/kg olarak alınmıştır

$$E = F \times H_h \quad (7.21)$$

$$E = 100 \text{ kg/h} \times 23260 \text{ kJ/kg}$$

$$E = 2326000 \text{ kJ/h}$$

Soğutma (S_{s_h}) :

Harcanan soğutma suyu miktarı, hidritin harcadığı su miktarı olarak 209 lt/kg alınarak saatteki hidrojen miktarı ile çarpımıyla aşağıdaki formülle (7.22) hesaplanır.

$$S_{s_h} = F \times H_s \quad (7.22)$$

$$S_{s_h} = 100 \text{ kg/h} \times 209 \text{ lt/kg}$$

$$S_{s_h} = 20900 \text{ lt/h}$$

Hidrit Kapital Maliyeti (C_h) :

Hidrit kapital maliyetinin hesaplanması için kullanılacak metal hidrit maliyeti olarak 2205 \$/kg alınmıştır.

Hidrit kapital maliyeti bu değer ile depolanan hidrojen miktarının çarpımına eşittir.

$$C_h = D \times H_m \quad (7.23)$$

$$C_h = 2400 \text{ kg} \times 2205 \text{ \$/kg}$$

$$C_h = 5292000 \text{ \$}$$

Toplam kapital maliyet = C_{toplam}

Toplam kapital maliyeti (7.23) ile hesaplanan hidrit kapital maliyetine eşittir.

$$C_{toplam \ h} = C_h = 5292000 \text{ \$}$$

Amortisman (A_h)

Amortismanın hesaplanması için bulunan toplam kapital maliyeti kabul edilen tesis ömrüne bölünecektir.

n : Tesisin ömrü olarak 22 yıl kabul edilmiştir.

$$A_h = \frac{C_{toplam_h}}{n} \quad (7.24)$$

$$A_h = \frac{5292000}{22} = 240545,5 \text{ \$}$$

Enerji Maliyeti (E_h)

Enerji maliyeti enerji miktarı ile buhar maliyetinin çarpımına eşittir.

$$E_h = E \times B \quad (7.25)$$

B: Buhar maliyeti 3,79 \$/Gj olarak alınmıştır.

$$E_h = 2326000 \text{ kJ/h} \times 3,79 \text{ \$/Gj}$$

$$E_h = 8,81 \text{ \$/h}$$

Yıllık Enerji Maliyeti (E_{h_y})

Tesisin yılda 360 gün ve günde 24 saat çalışacağı kabul edilerek yıllık enerji maliyeti hesaplanır.

$$E_{h_y} = E_h \times 24 \times 360 \quad (7.26)$$

$$E_{h_y} = 8,81 \times 24 \times 360$$

$$E_{h_y} = 76118,4 \text{ \$}$$

Soğutma Maliyeti (S_h)

Soğutma suyu birim fiyatı 0,02 \$/Mlitre olarak alınmıştır. (Amos, W.,1998) Soğutma maliyeti (7.22) ile hesaplanan soğutma suyu miktarının bu değerle çarpılmasıyla hesaplanır.

$$S_h = S_{s_h} \times 0,00000002 \text{ \$/lt} \quad (7.27)$$

$$S_h = 20900 \text{ lt/h} \times 0,00000002 \text{ \$/lt}$$

$$S_h = 0,000418 \text{ \$/lt}$$

Yıllık Soğutma Maliyeti (S_{hy})

Tesisin yılda 360 gün ve günde 24 saat çalışacağı kabul edilerek yıllık soğutma maliyeti hesaplanır.

$$S_{hy} = S_h \times 24 \times 360 \quad (7.28)$$

$$S_{hy} = 0,000418 \times 24 \times 360$$

$$S_{hy} = 3,61 \text{ \$}$$

Toplam Yıllık Maliyet (C_k)

Toplam yıllık maliyetin bulunması için yıllık amaortisman, yıllık enerji maliyeti ve yıllık soğutma maliyeti toplanır.

$$\text{Toplam Yıllık Maliyet} = A_h + E_{hy} + S_{hy} \quad (7.29)$$

$$C_k = 240545,5 + 76118,4 + 3,61$$

$$C_k = 316667,5 \text{ \$}$$

Toplam Birim Maliyet (C_{bk})

Toplam birim maliyetin hesaplanabilmesi için ilk önce maliyet kalemleri içerisindeki kapital maliyeti, enerji maliyeti ve soğutma maliyetinin birim değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Şimdi sırasıyla bu birim maliyetleri hesaplayalım:

Birim Kapital Maliyeti : A_{bh}

Birim kapital maliyeti daha önceden hesaplanan toplam kapital maliyetinin yıllık depolanan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$A_{bh} = \frac{A_h}{F_t} \quad (7.30)$$

$$A_{bh} = \frac{240545,5}{864000} = 0,28 \text{ \$/kg}$$

Birim Enerji Maliyeti : E_{bh}

Birim enerji maliyeti daha önceden hesaplanan toplam enerji maliyetinin yıllık depolanan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$E_{bh} = \frac{E_h}{F} \quad (7.31)$$

$$E_{bh} = \frac{8,81}{100} = 0,088 \text{ \$/kg}$$

Birim Soğutma Maliyeti : S_{bh}

Birim soğutma maliyeti daha önceden hesaplanan toplam soğutma maliyetinin yıllık depolanan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$S_{bh} = \frac{S_h}{F_t} \quad (7.32)$$

$$S_{bh} = \frac{0,000418}{100} = 0,00000418 \text{ \$/kg}$$

Toplam Birim Maliyet (C_{bk})

Hesaplanan birim maliyetlerin toplamı bize toplam birim maliyeti verecektir.

$$C_{bk} = A_{bh} + E_{bh} + S_{bh} \text{ (\$/kg)} \quad (7.33)$$

$$C_{bk} = 0,028 + 0,088 + 0,00000418$$

$$C_{bk} = 0,116 \text{ \$/kg}$$

Hidrojenin metal hidritte depolanması için gerekli toplam birim maliyet yapılan hesaplamalar sonucu 0,116 \\$/kg olarak bulunmuştur.

7.5 Sıvı Hidrojenin Depolanması

Bu bölümde sıvı hidrojenin depolanması işleminden önce gaz hidrojenin sıvılaştırılması işleminden bahsedilecektir. Daha sonra sıvı hidrojenin depolanması anlatılarak bu işlem için gereken maliyetler hesaplanacaktır.

7.5.1 Hidrojenin Sıvılaştırılması

Hidrojenin sıvılaştırılması gaz hidrojenin kompresörlerde yüksek basınçta sıkıştırılması, sıkıştırılmış gazın sıvı nitrojen ile soğutulması ve türbinlerde genişletilmesiyle olur. (Donnelly, 1979) Hidrojen sıvılaştırılma esnasında hidrojen orto formdan para forma geçer. Oda sıcaklığında normal hidrojen % 75 orto-hidrojen* ve % 25 para-hidrojen** karışımıdır ve sıvılaştırıldığı zaman depolama esnasında orto hidrojen egzotermik olarak yavaş yavaş dönüşür ve bu da kaynama kayıplarına neden olur (Mathis, 1976).

Sıvılaştırma işlemi, gazın sıvı hale gelene kadar soğutulması ile gerçekleştirilir. Sıvılaştırma prosesi; istenilen soğutmayı sağlamak için kompresörlere, ısı değiştiricilere, türbin ve kısma valfine ihtiyaç duyar. En basit sıvılaştırma prosesi Linde çevrimi veya Joule-Thompson genişleme çevrimidir. Bu proseste gaz atmosfer basıncına kadar sıkıştırılır, sonra bir ısı değiştiricide soğutulur ve sonra bir miktar sıvının elde edildiği (Joule-Thompson genişlemesinin meydana geldiği) kısma valfine iletilir. Bu oluşan sıvı ortamdan alınır 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 inversiyon sıcaklığının (202 °K) altında tutulması esastır. Bu sıcaklığa ulaşmak için modern hidrojen sıvılaştırma proseslerinde, hidrojen ilk genişleme valfine gelmeden sıcaklığının 78 °K civarına düşürülmesi hedeflenir. Buda çevrim gazı olarak yine azotun kullanıldığı ön soğutmalı Linde çevrimi ile gerçekleştirilir.

* nükleer ağları paralel hidrojen

** nükleer ağları paralel olmayan hidrojen

İdeal sıvılaştırma prosesinde teorik olarak genişleme işi enerji tasarrufu açısından tersinir olmalıdır. 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 kanatçıklarına zarar verir (Amos, 1998).

7.5.2 Sıvı Hidrojenin Depolanması

Hidrojenin sıvılaştırma sıcaklığı 20 °K 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. Buharlaşma 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 yüzdede olacaktır (Steinmetz, 1985).

Sıvı hidrojenin depolandığı tanklar iç ve dış duvarları arasında vakum izolasyonludur (Wurster ve Zittel, 1994). Günümüzde sıvı hidrojen hem büyük hem de küçük kapasitelerde depolanabilmektedir (Styrikovich, 1986). Fakat sıvı hidrojen doğal gazın depolandığı silindirik tanklarda depolanamamaktadır. Bunun nedeni de yüksek buharlaşma kayıplarıdır.

Kısaca büyük miktarlarda gaz için ve uzun süreli depolamalarda sıvı hidrojenin depolanması en karlı metoddur (Amos, 1998).

7.5.3 Sıvı Hidrojenin Depolanma Maliyetleri

Çizelge 7.5 Sıvı hidrojenin depolanma maliyet hesapları için kabul edilen değerler

Hidrojen üretim miktarı	F	100 kg/h
Depolama Süresi	t	1 gün
Sıvılaştırma için harcanan güç	L_p	9,9 kWh/kg
Sıvılaştırmada kullanılan soğutma suyu	L_{su}	626 lt/kg
Kaynama Oranı	BT	1%
Sıvılaştırıcı Maliyeti	L_m	44093 \$/kg
Sıvılaştırıcı Kapasitesi	L_s	2205 kg/h
Tank Maliyeti	D_m	441 \$/ kg/h
Tank Kapasitesi	D_s	220 kg/h

Kaynak: Amos,A.W.,(1998),”Cost Of Storing And Transporting Hydrogen”, National Renewable Energy Laboratory,Colorado

Kaynama Kaybı (F_B)

Sıvı hidrojenin depolanma hesapları yapılırken ilk önce kaynamadan dolayı oluşacak hidrojen kaybının miktarı hesaplanacaktır. Kaynama kaybının hesaplanması için saatte depolanan hidrojen miktarı (7.34)’deki formüldeki değerle çarpılarak hesap yapılır.

$$F_B = F \times \left[1 + \left(1 - e^{-BT} \right) \right] \quad (7.34)$$

BT : Kaynama oranı olarak günlük %1 alınmıştır (Amos, 1998)

$$F_B = 100 \text{ kg/h} \times \left[1 + \left(1 - e^{0,01} \right) \right]$$

$$F_B = 100 \times 0,99$$

$$F_B = 99 \text{ kg/h}$$

Depolama Miktarı (D) :

Depolama miktarı kaynama kaybı ile hesaplanan toplam hidrojen miktarının depolama süresiolan 1 gün için kabul edilen 24 saat ile çarpımıyla hesaplanır.

$$D = F_B \times t \quad (7.35)$$

$t = 1$ (depolama süresi 1 gün için hesaplar yapılmaktadır)

$$D = 99 \text{ kg/h} \times 24$$

$$D = 2376 \text{ kg}$$

Yıllık Hidrojen Üretimi (F_l) :

Yıllık hidrojen üretimi yıllık çalışma süresi 360 gün olarak alınarak hesaplanmıştır.

$$F_l = F \times 360 \times 24 \quad (7.36)$$

$$F_l = 100 \text{ kg/h} \times 360 \times 24$$

$$F_l = 864000 \text{ kg/yıl}$$

Enerji (E_l) :

Harcanan enerji miktarı, aşağıdaki formül (7.37) ile sıvılaştırma için harcanan güce göre hesaplanabilir.

$$E_l = F_B \times L_p \quad (7.37)$$

L_p : Sıvılaştırma için harcanan güç 9,9 kWh/kg olarak alınmıştır (Amos, 1998)

$$E_l = 99 \times 9,9$$

$$E_l = 980,1 \text{ kW}$$

Soğutma (S_l)

Harcanan soğutma suyu miktarı, sıvılaştırma için harcanan su miktarı olarak 626 lt/kg alınarak saatteki hidrojen miktarına bağlı olarak aşağıdaki formülle (7.38) hesaplanır.

$$S_l = F_B \times L_{su} \quad (7.38)$$

L_{su} : Sıvılaştırma için kullanılan soğutma suyu miktarı olarak 626 lt/kg alınmıştır (Amos, 1998)

$$S_l = 99 \times 626$$

$$S_l = 61974 \text{ lt}$$

Sıvılaştırıcı Kapital Maliyeti (C_L)

Sıvılaştırıcı kapital maliyetinin hesaplanabilmesi için kabul edilen değerler aşağıda görülmektedir.

L_m : Sıvılaştırıcı maliyeti olarak 44093 \$/ kg/h

L_s : Sıvılaştırıcı kapasitesi olarak 2205 kg/h

ω : Sıvılaştırma faktörü (0,65)

Yapılan kabullerden sonra sıvılaştırıcı kapital maliyeti aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$C_L = (L_m \times L_s) \times \left(\frac{F_B}{L_s} \right)^\omega \quad (7.39)$$

$$C_L = (44093 \times 2205) \times \left(\frac{99}{2205} \right)^{0,65}$$

$$C_L = 97225065 \times 0,133$$

$$C_L = 12930933,6 \$$$

Tank Kapital Maliyeti (C_D)

Tank kapital maliyetinin hesaplanması için kullanılacak tank faktörü ve tank basınç faktörü aşağıdaki gibi kabul edilmiştir.

ξ : Tank faktörü (0,70)

D_m : Tank maliyeti olarak 441 \$ / kg/h

D_s : Tank kapasitesi olarak 220 kg/h

$$C_D = (D_m \times D_s) \times \left(\frac{D}{D_s} \right)^\xi \quad (7.40)$$

$$C_D = (441 \$/\text{kg/h} \times 220 \text{ kg/h}) \times \left(\frac{2376}{220} \right)^{0,70}$$

$$C_D = 97020 \times 5,29$$

$$C_D = 513235,8 \$$$

Toplam Kapital Maliyeti ($C_{toplaml_L}$)

Toplam kapital maliyeti (7.39) ve (7.40) formülleri ile hesaplanan sıvılaştırıcı kapital maliyeti ve tank kapital maliyetinin toplanması ile bulunur.

$$\begin{aligned} C_{toplaml_L} &= C_L + C_D & (7.41) \\ C_{toplaml_L} &= 12930933,6 + 513235,8 \\ C_{toplaml_L} &= 13444169,4 \$ \end{aligned}$$

Amortisman (A_L)

Amortismanın hesaplanması için bulunan toplam kapital maliyeti kabul edilen tesis ömrüne bölünecektir.

n : Tesisin ömrü olarak 22 yıl kabul edilmiştir.

$$A_L = \frac{C_{toplaml_L}}{n} = \frac{13444169,4}{22} = 611098,6 \$$$

Enerji Maliyeti (E_L)

Şebekeden çekilecek elektrik enerjisinin fiyatı 0,08 \$/kW olarak kabul edilmiştir (Özistek,B.,2002). Enerji maliyeti bu değer (7.3) ile hesaplanan enerji miktarı ile çarpılmasıyla hesaplanır.

$$E_L = E_I \times 0,08 \quad (7.42)$$

$$E_L = 980,1 \text{ kW} \times 0,08$$

$$E_L = 78,408 \text{ KWh}$$

Yıllık Enerji Maliyeti (E_{L_y})

Tesisin yılda 360 gün ve günde 24 saat çalışacağı kabul edilerek yıllık enerji maliyeti hesaplanır.

$$E_{L_y} = E_L \times 24 \times 360 \quad (7.43)$$

$$E_{L_y} = 78,408 \times 24 \times 360$$

$$E_{L_y} = 677445 \$$$

Soğutma Maliyeti (S_L)

Soğutma suyu birim fiyatı 0,02 \$/Mlitre olarak alınmıştır (Amos, W.,1998). Soğutma maliyeti (7.38) ile hesaplanan soğutma suyu miktarının bu değerle çarpılmasıyla hesaplanır.

$$S_L = S_l \times 0,00000002\$/lt \quad (7.44)$$

$$S_L = 61974 \times 0,00000002\$/lt$$

$$S_L = 0,00123 \$/lt$$

Yıllık Soğutma Maliyeti (S_{L_y})

Tesisin yılda 360 gün ve günde 24 saat çalışacağı kabul edilerek yıllık soğutma maliyeti hesaplanır.

$$S_{L_y} = S_L \times 24 \times 360 \quad (7.45)$$

$$S_{L_y} = 0,00123 \times 24 \times 360$$

$$S_{L_y} = 10,63 \$$$

Toplam Yıllık Maliyet (C_k)

Toplam yıllık maliyetin bulunması için yıllık amaortisman, yıllık enerji maliyeti ve yıllık soğutma maliyeti toplanır.

$$\text{Toplam Yıllık Maliyet} = A_L + E_{L_y} + S_{L_y} \quad (7.46)$$

$$C_k = 611098,6 + 677445 + 10,63$$

$$C_k = 1288554,2 \$$$

Toplam Birim Maliyet (C_{b_k})

Toplam birim maliyetin hesaplanabilmesi için ilk önce maliyet kalemleri içerisindeki kapital maliyeti, enerji maliyeti ve soğutma maliyetinin birim değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Şimdi sırasıyla bu birim maliyetleri hesaplayalım:

Birim Kapital Maliyeti : A_{bk}

Birim kapital maliyeti daha önceden hesaplanan toplam kapital maliyetinin yıllık depolanan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$A_{b_l} = \frac{A_L}{F_t} \quad (7.47)$$

$$A_{b_l} = \frac{611098,6}{864000} = 0,707 \text{ \$/kg}$$

Birim Enerji Maliyeti : E_{bk}

Birim enerji maliyeti daha önceden hesaplanan toplam enerji maliyetinin yıllık depolanan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$E_{b_l} = \frac{E_L}{F} \quad (7.48)$$

$$E_{b_l} = \frac{78,408}{100} = 0,78 \text{ \$/kg}$$

Birim Soğutma Maliyeti : S_{bk}

Birim soğutma maliyeti daha önceden hesaplanan toplam soğutma maliyetinin yıllık depolanan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$S_{b_l} = \frac{S_L}{F_t} = \text{\$/kg}$$

$$S_{b_l} = \frac{S_L}{F} \quad (7.48)$$

$$S_{b_l} = \frac{0,00123}{100} = 0,0000123 \text{ \$/kg}$$

Toplam Birim Maliyet (C_{bk})

Hesaplanan birim maliyetlerin toplamı bize toplam birim maliyeti verecektir.

$$C_{bk} = A_{bL} + E_{bL} + S_{bL} \text{ (\$/kg)} \quad (7.49)$$

$$C_{bk} = 0,707 + 0,78 + 0,0000123$$

$$C_{bk} = 1,48 \text{ \$/kg}$$

Sıvı hidrojenin depolanması için gerekli toplam birim maliyet yapılan hesaplamalar sonucu 1,48 \$/kg olarak bulunmuştur.



7.6 Hidrojenin Depolama Şekillerine Göre Depolama Maliyetleri

Bu bölümde yapılan hesaplara göre ele alınan dört ayrı hidrojen depolama yöntemini için bulunan sonuçlar aşağıda çizelge 7.6'da detaylı olarak verilmektedir.

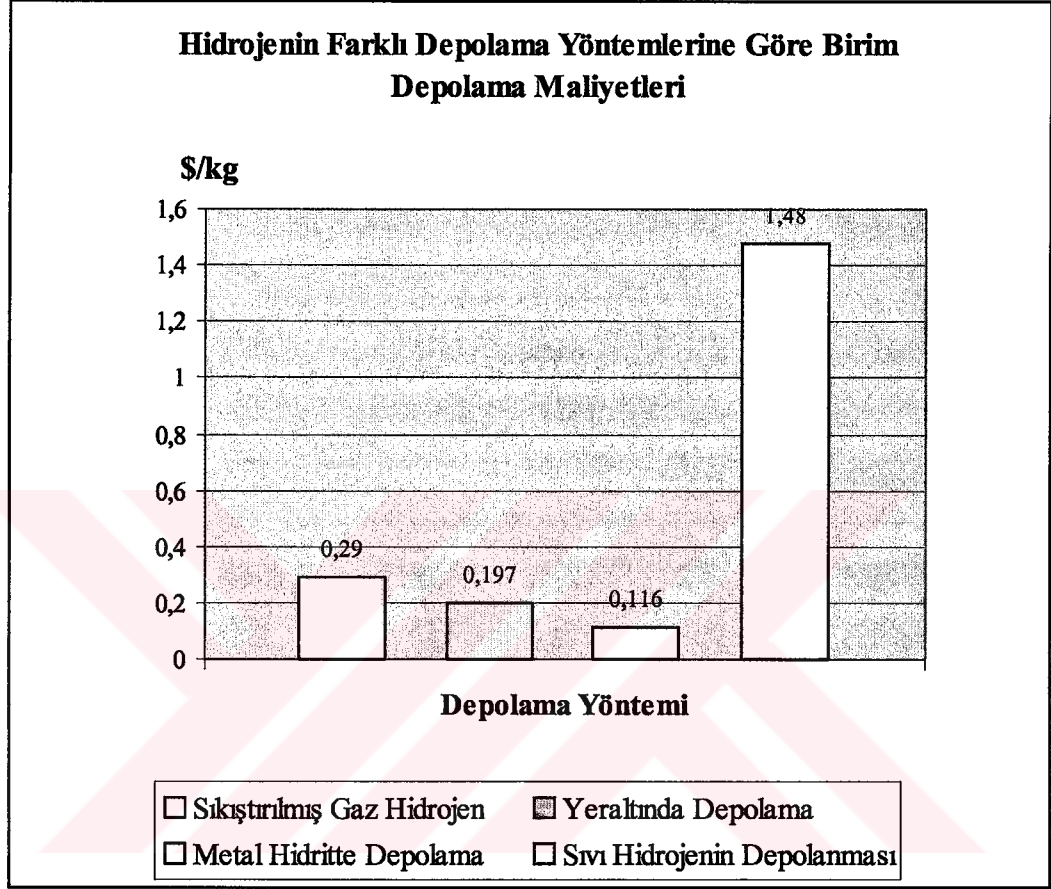
Çizelgeden de görülebileceği üzere aynı miktardaki hidrojen için en düşük depolama birim maliyeti 0,29 \$/kg olan hidrojenin metal hidritlerde katı halde depolanmasıdır. En yüksek maliyetli depolama yöntemi ise 1,48 \$/kg birim maliyetli hidrojenin sıvı halde depolanmasıdır. Gaz hidrojenin yüksek basınç altında silindirlerde yada yer altında depolanmasında oldukça düşük maliyetli olmaktadır. Özellikle yer altında depolama çok düşük miktarlarda kapital maliyeti gerektirmektedir ve aynı oranda amortismanı da oldukça düşüktür.

Bu çizelgeye göre farklı depolama yöntemlerine göre hesaplanan depolama maliyetlerinin kıyılanması takip eden grafik 7.1'de görülmektedir.

Çizelge 7.6 Hidrojenin Depolama Şekillerine Göre Depolama Maliyetleri

	Yıllık Depolama Kapasitesi (kg/yıl)	Toplam Kapital Maliyeti (\$)	Amortisman (\$)	Yıllık Enerji Maliyeti (\$)	Yıllık Soğutma Maliyeti (\$)	Toplam Yıllık Maliyet (\$)	Toplam Birim Maliyet (\$/kg)
Sıkıştırılmış Gaz Hidrojen	864000	2153582	97890	152064	0,864	249954,8	0,29
Yeraltında Depolama	864000	414400	18836	152064	0,864	170900	0,197
Metal Hidritte Depolama	864000	5292000	240545,5	76118,4	3,61	316667,5	0,116
Sıvı Hidrojenin Depolanması	864000	13444169	611098,6	677445	10,63	1288554	1,48

Bu bölümde yapılan hesaplara göre ele alınan dört ayrı hidrojen depolama yöntemini için bulunan ve çizelge 7.6'da detaylı olarak verilmiş olan birim depolama maliyetleri ile ilgili grafik aşağıda görülmektedir.



Şekil 7.1 Hidrojenin depolama şekillerine göre birim depolama maliyetlerinin kıyaslanması

8. HİDROJENİN TAŞINMASI

Hidrojen sıkıştırılmış gaz, sıvı yada metal hidritlerle katı halde taşınabilir. En ucuz taşıma yöntemi, taşınacak hidrojenin miktarına ve taşıma yapılan yola bağlı olmaktadır (Amos,1998). Hidrojenin taşınması için uygulanan ve burada incelenen metodlar, karayolu, demiryolu, denizyolu ve boru hatları olacaktır.

8.1 Sıkıştırılmış Gaz Hidrojenin Taşınması

Sıkıştırılmış gaz hidrojen yüksek basınçlı silindirler, tüp treylerler ve boru hatları kullanılarak taşınabilir. Hidrojen gaz halde taşınırken, tank kapasitelerini maksimize edebilmek için çok yüksek basınçlara sıkıştırılmalıdır (Amos,1998). 1.8 kg hidrojen kapasitesindeki yüksek basınçlı gaz silindirleri (40 mPa) taşıma ve iletim için çok pahalı olmaktadır (Encyclopedia Of Chemical Technology,1991). Çelik silindirlerden oluşan tüp treylerler, silindir sayısına bağlı olmak üzere 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 arasındaki 400 km.'lik Air Liquide firmasına ait boru hattıdır (Amos,1998).

8.1.1 Sıkıştırılmış Gaz Hidrojenin Kara Yoluyla Taşınması

Gaz hidrojenin iletim hesapları yapılırken hidrojen miktarı olarak 100kg/h alınacaktır.

Hidrojen miktarı (F) : 100 kg/h

Toplam yıllık hidrojen miktarı (F_y) :

Yıllık toplam taşınacak hidrojen miktarının hesaplanması için yılda 360 gün ve günde 24 saatlik çalışma süresi alınmıştır.

$$F_y = F \times 24 \times 360 \quad (8.1)$$

$$F_y = 100 \times 24 \times 360$$

$$F_y = 864000 \text{ kg/yıl}$$

Taşınan Mesafe :

Hidrojenin taşınacağı mesafe tek ve çift yöllü olarak ele alınıp hesaplar çift yöllü taşımaya, yani gidiş-dönüş yoluna göre yapılacaktır.

- Tek Yöllü Taşıma

Taşınan uzaklık (D_1) :

$$D_1 = 100 \text{ km}$$

- Çift Yöllü Taşıma

Taşınan uzaklık (D_2) :

$$D_2 = D_1 \times 2 \quad (8.2)$$

$$D_2 = 100 \times 2$$

$$D_2 = 200 \text{ km.}$$

Yıllık Yolculuk Adedi (T):

Yıllık yolculuk adedi, yıllık taşınacak toplam hidrojen miktarının tırın gaz hidrojen kapasitesine bölünmesiyle hesaplanır.

$$T = \left(\frac{F_t}{T_{1k}} \right) \quad (8.3)$$

T_{1k} : Tırın gaz hidrojen kapasitesi 181 kg

$$T = \frac{864000}{181}$$

$$T = 4773,5$$

Taşıma Yapılan Toplam Yol (M) :

Taşıma yapılan toplam yolun hesaplanması için, (8.3)'de hesaplanan yıllık yolculuk adedi, (8.2)'de hesaplanan çift yöllü mesafe ile çarpılır.

$$M = T \times D_2 \quad (8.4)$$

$$M = 4773,5 \times 200 \text{ km}$$

$$M = 954700 \text{ km}$$

Yolculuk Süresi (Y_s) :

Yolculuk süresi çift yönlü hesaplanan taşıma mesafesinin ortalama tır hızına bölünmesi ile hesaplanır. Burada ortalama tır hızı (H_t) olarak 80 km/h alınmıştır.

$$Y_s = \frac{D_2}{H_t} \quad (8.5)$$

$$Y_s = \frac{200}{80}$$

$$Y_s = 2,5 \text{ h}$$

Sürüş Süresi (S_s) :

Sürüş süresi, yolculuk süresi ile yolculuk adedinin çarpımına eşittir.

$$S_s = T \times Y_s \quad (8.6)$$

$$S_s = 4773,5 \times 2,5 \text{ h}$$

$$S_s = 11933,75 \text{ h.}$$

Yükleme/ Boşaltma Süresi (S_{yb}) :

Toplam yükleme boşaltma süresi, tırn seyahat başına yükleme/boşaltma süresi 2 saat alınarak, yolculuk adedi ile çarpımıyla hesaplanabilir.

$$S_{yb} = T \times T_{1_s} \quad (8.7)$$

$$T_{1_s} = \text{Tır yükleme boşaltma süresi}$$

$$S_{yb} = 4773,5 \times 2$$

$$S_{yb} = 9547 \text{ h}$$

Toplam Süre (S_t) :

Toplam yıllık seyahat süresi, yıllık sürüş süresi ile yıllık yükleme/boşaltma süresinin toplamına eşittir.

$$S_t = S_s + S_{yb} \quad (8.8)$$

$$S_t = 11933,75 + 9547$$

$$S_t = 21480,75 \text{ h}$$

Tır Çalışma Süresi (S_n) :

Tırın günlük çalışma süresi 24 saat olarak kabul edilerek, yılda 360 gün çalışması sonucu toplam tır çalışma süresi hesaplanmıştır.

$$S_n = T1_a \times 360 \quad (8.9)$$

$T1_a$: Tırın günlük çalışma süresi 24 saat olarak alınmıştır.

$$S_n = 24 \text{ h} \times 360$$

$$S_n = 8640 \text{ h.}$$

Gerekli Tır Adedi ($T1_n$) :

Toplam seyahat süresidir çalışma süresine bölünerek toplam kaç adet tıra ihtiyaç olduğu hesaplanmıştır.

$$T1_n = \frac{S_t}{S_n} \quad (8.10)$$

$$T1_n = \frac{21480,75}{8640}$$

$$T1_n = 2,5 \text{ adet}$$

$T1_n = 3$ adet olarak hesaplara katılacaktır.

Tır Sürücüsünün Çalışma Zamanı ($S_{sü}$) :

Tır sürücüsünün çalışma zamanı, tır sürücüsünün günde 12 saat çalıştığı kabul edilerek yıllık 360 günlük bir çalışma süresine göre hesaplanmıştır.

$$S_{sü} = Sü_a \times 360 \quad (8.11)$$

$Sü_a$: Tır sürücüsünün günlük çalışacağı süre olarak 12 saat alınmıştır.

$$S_{sü} = 12 \text{ h} \times 360$$

$$S_{sü} = 4320 \text{ h}$$

Gerekli Sürücü Adedi (Sü_n) :

Bir tır sürücüsünün yılda 4320 saat çalışacağı hesaplandıktan sonra gerekli sürücü adedi yıllık toplam yolculuk süresinin bu süreye bölünmesi ile hesaplanır.

$$Sü_n = \frac{S_t}{S_{sü}} \quad (8.12)$$

$$Sü_n = \frac{21480,75}{4320}$$

$$Sü_n = 4,97 \text{ adet}$$

4,97 adet olarak hesaplanan sürücü adedi 5'e yuvarlanarak hesaplara katılacaktır.

Yakıt Kullanımı (Y_a) :

Yıllık yakıt kullanımı taşıma yapılan toplam yolun, toplam mil hesabına göre uzaklığa bölünmesi ile litre olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Y_a = \frac{M}{T_{1_{mi}}} \quad (8.13)$$

T_{1_{mi}} : 6 mpg mil hesabıyla uzaklık

$$1 \text{ mil} = 1,609 \text{ km}$$

$$T_{1_{mi}} = 6 \times 1,609$$

$$T_{1_{mi}} = 9,654 \text{ km/g}$$

$$Y_a = \frac{954700}{9,654}$$

$$Y_a = 98891,6 \text{ gal.}$$

$$1 \text{ gal} = 4,545 \text{ lt.}$$

$$Y_a = 98891,6 \times 4,545$$

$$Y_a = 449462,3 \text{ lt.}$$

Toplam Kapital Maliyet ($C_{toplama}$) :

Toplam kapital maliyeti tır gaz hidrojen tankı maliyeti, tır alt taşıyıcı maliyeti ve tır sürücü kabini maliyeti toplanarak hesaplanır. Bu maliyet kalemleri için yapılan kabuller aşağıda görülmektedir.

$T1_{tm}$: Tır gaz hidrojen tankı maliyeti 100000 \$ olarak alınmıştır.

$T1_{um}$: Tır alt taşıyıcı maliyeti 60000 \$ olarak alınmıştır.

$T1_{cm}$: Tır sürücü kabini maliyeti 90000 \$ olarak alınmıştır.

$$C_{toplama} = T1_n \times (T1_{tm} + T1_{um} + T1_{cm}) \quad (8.14)$$

$$C_{toplama} = 3 \times (100000 + 60000 + 90000)$$

$$C_{toplama} = 750000 \$$$

Yıllık Amortisman Maliyeti (A_y) :

Yıllık amortisman maliyeti, tır ömrü 6 sene ve traktör ömrü 4 sene kabul edilerek hesaplanmıştır.

$$A_y = \frac{T1_n \times (T1_{tm} + T1_{um})}{n_a} + \frac{T1_n \times T1_{cm}}{n_b} \quad (8.15)$$

n_a = Tır/treyler ömrü 6 yıl olarak kabul edilmiştir.

n_b = Traktör ömrü 4 yıl olarak kabul edilmiştir.

$$A_y = \frac{3 \times (100000 + 60000)}{6} + \frac{3 \times 90000}{4}$$

$$A_y = \frac{480000}{6} + \frac{270000}{4}$$

$$A_y = 80000 + 67500$$

$$A_y = 147000 \$$$

Yıllık Yakıt Maliyeti (Y_m) :

Yıllık yakıt maliyeti (8.13) ile hesaplanan yıllık kullanılan yakıt miktarının, hesapların yapıldığı tarihteki motorinin litre fiyatı ile çarpılmasıyla hesaplanmıştır.

$$Y_m = Y_a \times \mu \quad (8.16)$$

1 lt. motorin fiyatı 04.04.2002 tarihi için 999.000 TL olarak alınmıştır. *

04.04.2002 T.C.Merkez Bankası döviz kuru 1.328.659 TL olarak alınmıştır.**

$$1 \text{ lt. Motorinin fiyatı } (\mu) = \frac{999.000}{1.328.659}$$

$\mu = 0,75$ \$ olarak hesaplanmıştır.

$$Y_m = 449462,3 \text{ lt} \times 0,75 \text{ \$/lt}$$

$$Y_m = 337096,7 \text{ \$}$$

Yıllık İşçi Maliyeti ($Sü_m$) :

Yıllık işçi maliyetinin hesaplanması için yıllık toplam yolculuk süresi, hesapların yapıldığı tarihte Catoni Inter-Link şirketi nakliye departmanından alınan tır sürücülerinin saat başı ücreti ile çarpılarak hesaplanmıştır.

$Sü_i$: Sürücülerin saat başına ücreti 13 \$ olarak alınmıştır.***

$$Sü_m = S_l \times Sü_i \quad (8.17)$$

$$Sü_m = 21480,75 \times 13$$

$$Sü_m = 279249,75 \text{ \$}$$

* http://www.poas.com.tr/akaryakit_fiyatlari.htm

** <http://www.tcmb.gov.tr>

*** Catoni Inter-Link şirketi nakliye departmanı

Toplam Yıllık Maliyet (C_k)

Toplam yıllık maliyetin bulunması için yıllık amortisman, yıllık enerji maliyeti ve yıllık soğutma maliyeti toplanır.

$$\text{Yıllık Toplam Maliyet} = A_y + Y_{im} + S\ddot{u}_m \quad (8.18)$$

$$C_k = 147000 + 337096,7 + 279249,75$$

$$C_k = 763346,45 \$$$

Toplam Birim Maliyet (C_{bk})

Toplam birim maliyetin hesaplanabilmesi için ilk önce maliyet kalemleri içerisindeki kapital maliyeti, enerji maliyeti ve soğutma maliyetinin birim değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Şimdi sırasıyla bu birim maliyetleri hesaplayalım:

Birim Kapital Maliyeti : A_{bGR}

Birim kapital maliyeti daha önceden hesaplanan toplam kapital maliyetinin yıllık taşınan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$A_{bGR} = \frac{A_y}{F_l} \quad (8.19)$$

$$A_{bGR} = \frac{147000}{864000}$$

$$A_{bGR} = 0,17 \$/\text{kg}$$

Birim Yakıt Maliyeti : Y_{bGR}

Birim yakıt maliyeti daha önceden hesaplanan toplam yakıt maliyetinin yıllık taşınan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$Y_{bGR} = \frac{Y_{im}}{F_l}$$

(8.20)

$$Y_{b_{GR}} = \frac{337096,7}{864000}$$

$$Y_{b_{GR}} = 0,39 \text{ \$/kg}$$

Birim İşçi Maliyeti : $S\ddot{u}_{b_{GR}}$

Birim işçi maliyeti daha önceden hesaplanan toplam işçi maliyetinin yıllık taşınan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$S\ddot{u}_{b_{GR}} = \frac{S\ddot{u}_m}{F_t} \quad (8.21)$$

$$S\ddot{u}_{b_{GR}} = \frac{279249,75}{864000}$$

$$S\ddot{u}_{b_{GR}} = 0,32 \text{ \$/kg}$$

Toplam Birim Maliyet (C_{b_k})

Hesaplanan birim maliyetlerin toplamı bize toplam birim maliyeti verecektir.

$$C_{b_k} = A_{b_{GR}} + Y_{b_{GR}} + S\ddot{u}_{b_{GR}} \quad (8.22)$$

$$C_{b_k} = 0,17 + 0,39 + 0,32$$

$$C_{b_k} = 0,88 \text{ \$/kg}$$

8.1.2 Sıkıştırılmış Gaz Hidrojenin Demiryoluyla Taşınması :

Önceki bölümdede belirtildiği üzere buradada iletim hesabı yapılırken hidrojen miktarı olarak 100kg/h alınacaktır.

Hidrojen miktarı (F) : 100 kg/h

Toplam yıllık hidrojen miktarı (F₁) :

Yıllık toplam taşınacak hidrojen miktarının hesaplanması için yılda 360 gün ve günde 24 saatlik çalışma süresi alınmıştır.

$$F_1 = F \times 24 \times 360 \quad (8.23)$$

$$F_1 = 100 \times 24 \times 360$$

$$F_1 = 864000 \text{ kg/yıl}$$

Taşınan Mesafe :

Hidrojenin taşınacağı mesafe tek ve çift yollu olarak ele alınıp hesaplar çift yollu taşımaya, yani gidiş-dönüş yoluna göre yapılacaktır.

- Tek Yollu Taşıma

Taşınan uzaklık (D₁) :

$$D_1 = 100 \text{ km}$$

- Çift Yollu Taşıma

Taşınan uzaklık (D₂) :

$$D_2 = D_1 \times 2 \quad (8.24)$$

$$D_2 = 100 \times 2$$

$$D_2 = 200 \text{ km.}$$

Yıllık Yolculuk Adedi (T):

Yıllık yolculuk adedi, yıllık taşınacak toplam hidrojen miktarının tırın gaz hidrojen kapasitesine bölünmesiyle hesaplanır.

$$T = \left(\frac{F_t}{Tr_k} \right) \quad (8.25)$$

Tr_k : Tren gaz hidrojen kapasitesi 453 kg

$$T = \frac{864000}{453}$$

$$T = 1907,3$$

Taşıma Yapılan Toplam Yol (M) :

Taşıma yapılan toplam yolun hesaplanması için, (8.25)'de hesaplanan yıllık yolculuk adedi, (8.24)'de hesaplanan çift yönlü mesafe ile çarpılır.

$$M = T \times D_2 \quad (8.26)$$

$$M = 1907,3 \times 200 \text{ km}$$

$$M = 381460 \text{ km}$$

Yolculuk Süresi (Y_s) :

Yolculuk süresi çift yönlü hesaplanan taşıma mesafesinin ortalama tren hızına bölünmesi ile hesaplanır. Burada ortalama tren hızı (H_r) olarak 40 km/h alınmıştır.

$$Y_s = \frac{D_1}{H_r} \quad (8.27)$$

H_r = Ortalama tren hızı

$$Y_s = \frac{100}{40}$$

$$Y_s = 2,5 \text{ h}$$

Sürüş Süresi (S_s) :

Sürüş süresi, yolculuk süresi ile yolculuk adedinin çarpımına eşittir.

$$S_s = T \times Y_s \quad (8.28)$$

$$S_s = 1907,3 \times 2,5 \text{ h}$$

$$S_s = 4768,25 \text{ h.}$$

Yükleme/ Boşaltma Süresi (S_{yb}) :

Toplam yükleme boşaltma süresi, trenin seyahat başına yükleme/boşaltma süresi 24 saat alınarak, yolculuk adedi ile çarpımıyla hesaplanabilir.

$$S_{yb} = T \times Tr_s \quad (8.29)$$

Tr_s = Tren yükleme boşaltma süresi

$$S_{yb} = 1907,3 \times 24$$

$$S_{yb} = 45775,2 \text{ h}$$

Toplam Süre (S_t) :

Toplam yıllık seyahat süresi, yıllık sürüş süresi ile yıllık yükleme/boşaltma süresinin toplamına eşittir.

$$S_t = S_s + S_{yb} \quad (8.30)$$

$$S_t = 4768,25 + 45775,2$$

$$S_t = 50543,45 \text{ h}$$

Tren Çalışma Süresi (S_{tr}) :

Trenin günlük çalışma süresi 24 saat olarak kabul edilerek, yılda 360 gün çalışması sonucu toplam tren çalışma süresi hesaplanmıştır.

$$S_{tr} = Tr_a \times 360 \quad (8.31)$$

Tr_a : Trenin günlük çalışma süresi

$$S_{tr} = 24 \text{ h} \times 360$$

$$S_{tr} = 8640 \text{ h.}$$

Gerekli Tren /vagon Adedi (Tr_n) :

Toplam seyahat süresi tren çalışma süresine bölünerek toplam kaç adet trene ihtiyaç olduğu hesaplanmıştır.

$$Tr_n = \frac{S_l}{S_r} \quad (8.32)$$

$$Tr_n = \frac{50543,45}{8640}$$

$$Tr_n = 5,85 \text{ adet}$$

$Tr_n = 6$ adet olarak hesaplara katılacaktır.

Toplam Kapital Maliyet (C_{toplam}) :

Toplam kapital maliyeti tren gaz hidrojen tankı maliyeti ve tren alt taşıyıcı maliyeti toplanarak hesaplanır. Bu maliyet kalemleri için yapılan kabuller aşağıda görülmektedir.

Tr_{tm} : Tren gaz hidrojen tankı maliyeti 200000 \$ olarak alınmıştır.

Tr_{um} : Tren alt taşıyıcı maliyeti 100000 \$ olarak alınmıştır.

$$C_{toplam} = Tr_n \times (Tr_{tm} + Tr_{um}) \quad (8.33)$$

$$C_{toplam} = 6 \times (200000 + 100000)$$

$$C_{toplam} = 1800000 \$$$

Yıllık Amortisman Maliyeti (A_y) :

Yıllık amortisman maliyeti, tren ömrü 15 sene kabul edilerek hesaplanmıştır.

$$A_y = \frac{C_{toplam}}{n_r} \quad (8.34)$$

$n_r =$ Tren ömrü 15 yıl olarak kabul edilmiştir.

$$A_y = \frac{1800000}{15}$$

$$A_y = 120000 \$$$

Yıllık Nakliye Maliyeti (N_{im}) :

Yıllık nakliye maliyetinin hesaplanması için trenin yolculuk maliyeti 400\$ olarak kabul edilerek, bu değer yıllık yolculuk adedi ile çarpılır.

$$N_{im} = T \times N_t \quad (8.35)$$

N_t : Tren yolculuk maliyeti 400 \$ olarak alınmıştır.

$$N_{im} = 4773,5 \times 400$$

$$N_{im} = 1909400 \$$$

Toplam Yıllık Maliyet (C_k)

Toplam yıllık maliyetin bulunması için yıllık amaortisman, yıllık enerji maliyeti ve yıllık soğutma maliyeti toplanır.

$$C_k = A_y + N_{im} \quad (8.36)$$

$$C_k = 120000 + 1909400$$

$$C_k = 2029400 \$$$

Toplam Birim Maliyet (C_{bk})

Toplam birim maliyetin hesaplanabilmesi için ilk önce maliyet kalemleri içerisindeki kapital maliyeti, enerji maliyeti ve soğutma maliyetinin birim değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Şimdi sırasıyla bu birim maliyetleri hesaplayalım:

Birim Kapital Maliyeti : A_{bGTR}

Birim kapital maliyeti daha önceden hesaplanan toplam kapital maliyetinin yıllık taşınan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$A_{bGTR} = \frac{A_y}{F_t} \quad (8.37)$$

$$A_{bGTR} = \frac{120000}{864000}$$

$$A_{bGTR} = 0,138 \$/kg$$

Birim Nakliye Maliyeti : $N_{b_{GTR}}$

Birim nakliye maliyeti daha önceden hesaplanan toplam nakliye maliyetinin yıllık taşınan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$N_{b_{GTR}} = \frac{N_{lm}}{F_l} \quad (8.38)$$

$$N_{b_{GTR}} = \frac{1909400}{864000}$$

$$N_{b_{GTR}} = 2,2 \text{ \$/kg}$$

Toplam Birim Maliyet (C_{bk})

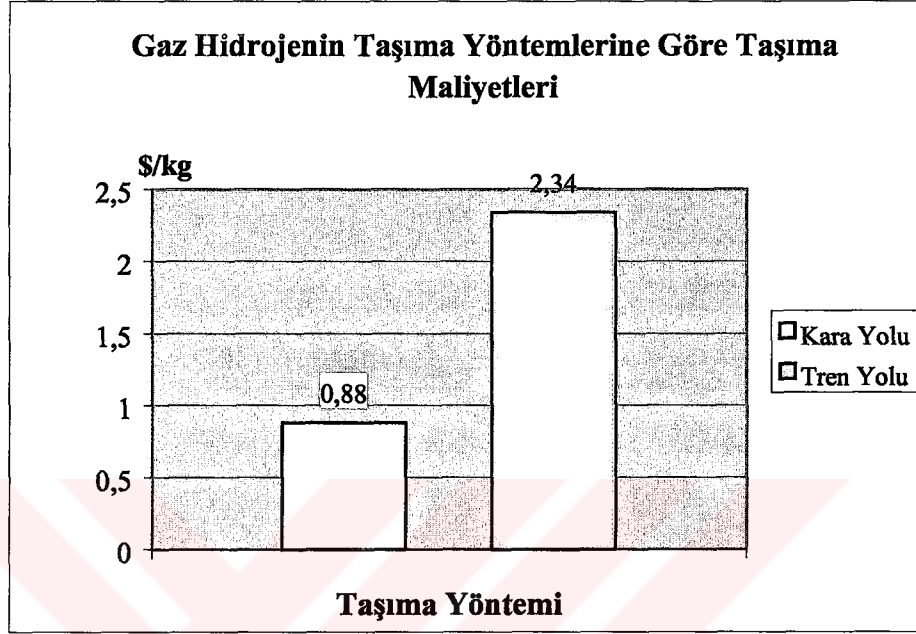
Hesaplanan birim maliyetlerin toplamı bize toplam birim maliyeti verecektir.

$$C_{bk} = A_{b_{GTR}} + N_{b_{GTR}} \quad (8.39)$$

$$C_{bk} = 0,138 + 2,2$$

$$C_{bk} = 2,34 \text{ \$/kg}$$

Aşağıdaki şekilde (Şelik 8.2) gaz hidrojenin farklı taşıma yöntemlerine göre bu bölümde hesaplanan taşıma maliyetleri görülmektedir.



Şekil 8.2 Gaz hidrojenin farklı taşıma yöntemlerine göre hesaplanan taşıma maliyetleri

8.2 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 (Huston,1984).

Tır tankları 360-4300 kg sıvı hidrojen taşıyabilirken tren vagonlarıyla 2300-9100 kg mertebelerine 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 arasında olmaktadır.

Bir başka taşıma şekli olan boru hatlarıyla sıvı hidrojen süper iletken tel içeren izole edilmiş hatlarda taşınabilir. Sıvı hidrojen süperiletken için soğutucu görevi görece 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 (Amos,1998).

8.2.1 Sıvı Hidrojenin Karayoluyla Taşınması

Sıvı hidrojenin iletim hesapları yapılırken hidrojen miktarı olarak 100kg/h alınacaktır.

Hidrojen miktarı (F) : 100 kg/h

Toplam yıllık hidrojen miktarı (F_y) :

Yıllık toplam taşınacak hidrojen miktarının hesaplanması için yılda 360 gün ve günde 24 saatlik çalışma süresi alınmıştır.

$$F_y = F \times 24 \times 360 \quad (8.40)$$

$$F_y = 100 \times 24 \times 360$$

$$F_y = 864000 \text{ kg/yıl}$$

Taşınan Mesafe :

Hidrojenin taşınacağı mesafe tek ve çift yöllü olarak ele alınıp hesaplar çift yöllü taşımaya, yani gidiş-dönüş yoluna göre yapılacaktır.

- Tek Yöllü Taşıma

Taşınan uzaklık (D_1) :

$$D_1 = 100 \text{ km}$$

- Çift Yöllü Taşıma

Taşınan uzaklık (D_2) :

$$D_2 = D_1 \times 2 \quad (8.41)$$

$$D_2 = 100 \times 2$$

$$D_2 = 200 \text{ km.}$$

Yıllık Yolculuk Adedi (T):

Yıllık yolculuk adedi, yıllık taşınacak toplam hidrojen miktarının tırın sıvı hidrojen kapasitesine bölünmesiyle hesaplanır.

$$T = \left(\frac{F_t}{T_{l_{sk}}} \right) \quad (8.42)$$

$T_{l_{sk}}$: Tırın sıvı hidrojen kapasitesi 4082 kg

$$T = \frac{864000}{4082}$$

$$T = 211,6$$

Taşıma Yapılan Toplam Yol (M) :

Taşıma yapılan toplam yolun hesaplanması için, (8.42)'de hesaplanan yıllık yolculuk adedi, (8.41)'de hesaplanan çift yöllü mesafe ile çarpılır.

$$M = T \times D_2 \quad (8.43)$$

$$M = 211,6 \times 200 \text{ km}$$

$$M = 42320 \text{ km}$$

Yolculuk Süresi (Y_s) :

Yolculuk süresi çift yönlü hesaplanan taşma mesafesinin ortalama tır hızına bölünmesi ile hesaplanır. Burada ortalama tır hızı (H_t) olarak 80 km/h alınmıştır.

$$Y_s = \frac{D_2}{H_t} \quad (8.44)$$

H_t = Ortalama tır hızı

$$Y_s = \frac{200}{80}$$

$$Y_s = 2,5 \text{ h}$$

Taşınan Hidrojen Miktarı (F_d)

Taşınan hidrojen miktarı, toplam hidrojen miktarından buharlaşma sonucu meydana gelen hidrojen kayıpları çıkartılarak hesaplanır.

$$F_d = F_t \times e^{-BO \left(\frac{Y_s}{2} \right)} \quad (8.45)$$

BO : Buharlaşma oranı günlük % 0,30 olarak alınmıştır.

$$F_d = 864000 \times e^{-0,0030 \left(\frac{2,5}{2} \right)}$$

$$F_d = 864000 \times \frac{1}{1,00375}$$

$$F_d = 860772 \text{ kg}$$

Sürüş Süresi (S_s) :

Sürüş süresi, yolculuk süresi ile yolculuk adedinin çarpımına eşittir.

$$S_s = T \times Y_s \quad (8.46)$$

$$S_s = 211,6 \times 2,5 \text{ h}$$

$$S_s = 529 \text{ h.}$$

Yükleme/ Boşaltma Süresi (S_{yb}) :

Toplam yükleme boşaltma süresi, tırn seyahat başına yükleme/boşaltma süresi 2 saat alınarak, yolculuk adedi ile çarpımıyla hesaplanabilir.

$$S_{yb} = T \times T1_s \quad (8.47)$$

$T1_s$ = Tır yükleme boşaltma süresi olarak seyahat başına 2 saat alınmıştır.

$$S_{yb} = 211,6 \times 2$$

$$S_{yb} = 423,2 \text{ h}$$

Toplam Süre (S_t) :

Toplam yıllık seyahat süresi, yıllık sürüş süresi ile yıllık yükleme/boşaltma süresinin toplamına eşittir.

$$S_t = S_s + S_{yb} \quad (8.48)$$

$$S_t = 529 + 423,2$$

$$S_t = 952,2 \text{ h}$$

Tır Çalışma Süresi (S_{tt}) :

Tırın günlük çalışma süresi 24 saat olarak kabul edilerek, yılda 360 gün çalışması sonucu toplam tır çalışma süresi hesaplanmıştır.

$$S_{tt} = T1_a \times 360 \quad (8.49)$$

$T1_a$: Tırın günlük çalışma süresi 24 saat olarak alınmıştır.

$$S_{tt} = 24 \text{ h} \times 360$$

$$S_{tt} = 8640 \text{ h.}$$

Gerekli Tır Adedi ($T1_n$) :

Toplam seyahat süresidir çalışma süresine bölünerek toplam kaç adet tıra ihtiyaç olduğu hesaplanmıştır.

$$T_{1_n} = \frac{S_t}{S_n} \quad (8.50)$$

$$T_{1_n} = \frac{952,2}{8640}$$

$T_{1_n} = 1$ adet olarak hesaplara katılacaktır.

Tır Sürücüsünün Çalışma Zamanı (S_{st}) :

Tır sürücüsünün çalışma zamanı, tır sürücüsünün günde 12 saat çalıştığı kabul edilerek yıllık 360 günlük bir çalışma süresine göre hesaplanmıştır.

$$S_{st} = S_{u_a} \times 360 \quad (8.51)$$

S_{u_a} : Tır sürücüsünün günlük çalışacağı süre olarak 12 saat alınmıştır.

$$S_{st} = 12 \text{ h} \times 360$$

$$S_{st} = 4320 \text{ h}$$

Gerekli Sürücü Adedi (S_{u_n}) :

Bir tır sürücüsünün yılda 4320 saat çalışacağı hesaplandıktan sonra gerekli sürücü adedi yıllık toplam yolculuk süresinin bu süreye bölünmesi ile hesaplanır.

$$S_{u_n} = \frac{S_t}{S_{st}} \quad (8.52)$$

$$S_{u_n} = \frac{952,2}{4320}$$

$S_{u_n} = 1$ adet kabul edilmiştir.

Yakıt Kullanımı (Y_a) :

Yıllık yakıt kullanımı taşıma yapılan toplam yolun, toplam mil hesabına göre uzaklığa bölünmesi ile litre olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Y_a = \frac{M}{T_{l_{mi}}} \quad (8.53)$$

$T_{1_{mi}}$: 6 mpg mil hesabıyla uzaklık

$$1 \text{ mil} = 1,609 \text{ km}$$

$$T_{1_{mi}} = 6 \times 1,609$$

$$T_{1_{mi}} = 9,654 \text{ km/g}$$

$$Y_a = \frac{42320}{9,654}$$

$$Y_a = 4383,7 \text{ gal.}$$

$$1 \text{ gal} = 4,545 \text{ lt.}$$

$$Y_a = 4383,7 \times 4,545$$

$$Y_a = 19924 \text{ lt.}$$

Toplam Kapital Maliyet (C_{toplam}) :

Toplam kapital maliyeti tır gaz hidrojen tankı maliyeti, tır alt taşıyıcı maliyeti ve tır sürücü kabini maliyeti toplanarak hesaplanır. Bu maliyet kalemleri için yapılan kabuller aşağıda görülmektedir.

$T_{1_{tm}}$: Tır gaz hidrojen tankı maliyeti 100000 \$ olarak alınmıştır.

$T_{1_{um}}$: Tır alt taşıyıcı maliyeti 60000 \$ olarak alınmıştır.

$T_{1_{cm}}$: Tır sürücü kabini maliyeti 90000 \$ olarak alınmıştır.

$$C_{toplam} = T_{1_n} \times (T_{1_{tm}} + T_{1_{um}} + T_{1_{cm}}) \quad (8.54)$$

$$C_{toplam} = 3 \times (100000 + 60000 + 90000)$$

$$C_{toplam} = 750000 \$$$

Yıllık Amortisman Maliyeti (A_y) :

Yıllık amortisman maliyeti, tır ömrü 6 sene ve traktör ömrü 4 sene kabul edilerek hesaplanmıştır.

$$A_y = \frac{Tl_n \times (Tl_{im} + Tl_{um})}{n_a} + \frac{Tl_n \times Tl_{cm}}{n_b} \quad (8.55)$$

n_a = Tır/treyler ömrü 6 yıl olarak kabul edilmiştir.

n_b = Traktör ömrü 4 yıl olarak kabul edilmiştir.

$$A_y = \frac{3 \times (100000 + 60000)}{6} + \frac{3 \times 90000}{4}$$

$$A_y = \frac{480000}{6} + \frac{270000}{4}$$

$$A_y = 80000 + 67500$$

$$A_y = 147000 \$$$

Yıllık Yakıt Maliyeti (Y_m) :

Yıllık yakıt maliyeti (8.13) ile hesaplanan yıllık kullanılan yakıt miktarının, hesapların yapıldığı tarihteki motorinin litre fiyatı ile çarpılmasıyla hesaplanmıştır.

$$Y_m = Y_a \times \mu \quad (8.56)$$

1 lt. motorin fiyatı 04.04.2002 tarihi için 999.000 TL olarak alınmıştır. *

04.04.2002 T.C.Merkez Bankası döviz kuru 1.328.659 TL olarak alınmıştır.**

$$1 \text{ lt. Motorinin fiyatı } (\mu) = \frac{999.000}{1.328.659}$$

$\mu = 0,75 \$$ olarak hesaplanmıştır.

$$Y_m = 19924 \text{ lt} \times 0,75 \$/\text{lt}$$

$$Y_m = 14943 \$$$

* http://www.poas.com.tr/akaryakit_fiyatlari.htm

** <http://www.tcmb.gov.tr>

Yıllık İşçi Maliyeti (Sü_m) :

Yıllık işçi maliyetinin hesaplanması için yıllık toplam yolculuk süresi, hesapların yapıldığı tarihte Catoni Inter-Link şirketi nakliye departmanından alınan tır sürücülerinin saat başı ücreti ile çarpılarak hesaplanmıştır.

Sü_{ii} : Sürücülerin saat başına ücreti 13 \$ olarak alınmıştır.***

$$Sü_m = S_f \times Sü_{ii} \quad (8.57)$$

$$Sü_m = 12378,6 \times 13$$

$$Sü_m = 160921,8 \$$$

Toplam Yıllık Maliyet (C_k)

Toplam yıllık maliyetin bulunması için yıllık amortisman, yıllık enerji maliyeti ve yıllık soğutma maliyeti toplanır.

$$C_k = A_y + Y_{tm} + Sü_m \quad (8.58)$$

$$C_k = 147000 + 14943 + 160921,8$$

$$C_k = 322864,8 \$$$

Toplam Birim Maliyet (C_{bk})

Toplam birim maliyetin hesaplanabilmesi için ilk önce maliyet kalemleri içerisindeki kapital maliyeti, enerji maliyeti ve soğutma maliyetinin birim değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Şimdi sırasıyla bu birim maliyetleri hesaplayalım:

Birim Kapital Maliyeti : A_{bgT}

Birim kapital maliyeti daha önceden hesaplanan toplam kapital maliyetinin yıllık taşınan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$A_{bgT} = \frac{A_y}{F_t} \quad (8.59)$$

*** Catoni InterLink Nakliye Departmanı

$$A_{b_{GR}} = \frac{147000}{864000}$$

$$A_{b_{GR}} = 0,17 \text{ \$/kg}$$

Birim Yakıt Maliyeti : $Y_{b_{GR}}$

Birim yakıt maliyeti daha önceden hesaplanan toplam yakıt maliyetinin yıllık taşınan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$Y_{b_{GR}} = \frac{Y_{im}}{F_t} \quad (8.60)$$

$$Y_{b_{GR}} = \frac{14943}{864000}$$

$$Y_{b_{GR}} = 0,017 \text{ \$/kg}$$

Birim İşçi Maliyeti : $Sü_{b_{GR}}$

Birim işçi maliyeti daha önceden hesaplanan toplam işçi maliyetinin yıllık taşınan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$Sü_{b_{GR}} = \frac{Sü_m}{F_t} \quad (8.61)$$

$$Sü_{b_{GR}} = \frac{160921,8}{864000}$$

$$Sü_{b_{GR}} = 0,186 \text{ \$/kg}$$

Toplam Birim Maliyet (C_{b_k})

Hesaplanan birim maliyetlerin toplamı bize toplam birim maliyeti verecektir.

$$C_{b_k} = A_{b_{GR}} + Y_{b_{GR}} + Sü_{b_{GR}} \quad (8.62)$$

$$C_{b_k} = 0,17 + 0,017 + 0,186$$

$$C_{b_k} = 0,373 \text{ \$/kg}$$

8.2.2 Sıvı Hidrojenin Demiryoluyla Taşınması

Önceki bölümde belirtildiği üzere buradada iletim hesabı yapılırken hidrojen miktarı olarak 100kg/h alınacaktır.

Hidrojen miktarı (F) : 100 kg/h

Toplam yıllık hidrojen miktarı (F₁) :

Yıllık toplam taşınacak hidrojen miktarının hesaplanması için yılda 360 gün ve günde 24 saatlik çalışma süresi alınmıştır.

$$F_1 = F \times 24 \times 360 \quad (8.63)$$

$$F_1 = 100 \times 24 \times 360$$

$$F_1 = 864000 \text{ kg/yıl}$$

Taşınan Mesafe :

Hidrojenin taşınacağı mesafe tek ve çift yöllü olarak ele alınıp hesaplar çift yöllü taşımaya, yani gidiş-dönüş yoluna göre yapılacaktır.

- **Tek Yönlü Taşıma**

Taşınan uzaklık (D₁) :

$$D_1 = 100 \text{ km}$$

- **Çift Yönlü Taşıma**

Taşınan uzaklık (D₂) :

$$D_2 = D_1 \times 2 \quad (8.64)$$

$$D_2 = 100 \times 2$$

$$D_2 = 200 \text{ km.}$$

Yıllık Yolculuk Adedi (T):

Yıllık yolculuk adedi, yıllık taşınacak toplam hidrojen miktarının trenin sıvı hidrojen kapasitesine bölünmesiyle hesaplanır.

$$T = \left(\frac{F_l}{Tr_{sk}} \right) \quad (8.65)$$

Tr_{sk} : Trenin sıvı hidrojen kapasitesi 9072 kg

$$T = \frac{864000}{9072}$$

$$T = 95,2$$

Taşıma Yapılan Toplam Yol (M) :

Taşıma yapılan toplam yolun hesaplanması için, (8.65)'de hesaplanan yıllık yolculuk adedi, (8.64)'de hesaplanan çift yöllü mesafe ile çarpılır.

$$M = T \times D_2 \quad (8.66)$$

$$M = 95,2 \times 200 \text{ km}$$

$$M = 19040 \text{ km}$$

Yolculuk Süresi (Y_s) :

Yolculuk süresi çift yöllü hesaplanan taşıma mesafesinin ortalama tren hızına bölünmesi ile hesaplanır. Burada ortalama tren hızı (H_r) olarak 40 km/h alınmıştır.

$$Y_s = \frac{D_2}{H_r} \quad (8.67)$$

$$H_r = \text{Ortalama tren hızı}$$

$$Y_s = \frac{200}{40}$$

$$Y_s = 5 \text{ h}$$

Taşıman Hidrojen Miktarı (F_d)

Toplam hidrojen miktarından buharlaşan hidrojen kayıpları çıkartılarak hesaplanır.

$$F_d = F_l \times e^{-BO \left(\frac{Y_s}{2} \right)} \quad (8.68)$$

BO : Buharlaşma oranı günlük % 0,30 olarak alınmıştır.

$$F_d = 864000 \times e^{-0,0030\left(\frac{2,5}{2}\right)}$$

$$F_d = 864000 \times \frac{1}{1,00375}$$

$$F_d = 860772 \text{ kg}$$

Sürüş Süresi (S_s) :

Sürüş süresi, yolculuk süresi ile yolculuk adedinin çarpımına eşittir.

$$S_s = T \times Y_s \quad (8.69)$$

$$S_s = 95,2 \times 5 \text{ h}$$

$$S_s = 476 \text{ h.}$$

Yükleme/ Boşaltma Süresi (S_{yb}) :

Toplam yükleme boşaltma süresi, trenin seyahat başına yükleme/boşaltma süresi 24 saat alınarak, yolculuk adedi ile çarpımıyla hesaplanabilir.

$$S_{yb} = T \times Tr_s \quad (8.70)$$

$$Tr_s = \text{Tren yükleme boşaltma süresi}$$

$$S_{yb} = 95,2 \times 24$$

$$S_{yb} = 2284,8 \text{ h}$$

Toplam Süre (S_t) :

Toplam yıllık seyahat süresi, yıllık sürüş süresi ile yıllık yükleme/boşaltma süresinin toplamına eşittir.

$$S_t = S_s + S_{yb} \quad (8.71)$$

$$S_t = 476 + 2284,8$$

$$S_t = 2760,8 \text{ h}$$

Tren Çalışma Süresi (S_{tr}) :

Trenin günlük çalışma süresi 24 saat olarak kabul edilerek, yılda 360 gün çalışması sonucu toplam tren çalışma süresi hesaplanmıştır.

$$S_{tr} = Tr_a \times 360 \quad (8.72)$$

Tr_a : Trenin günlük çalışma süresi

$$S_{tr} = 24 \text{ h} \times 360$$

$$S_{tr} = 8640 \text{ h.}$$

Gerekli Tren /vagon Adedi (Tr_n) :

Toplam seyahat süresi tren çalışma süresine bölünerek toplam kaç adet trene ihtiyaç olduğu hesaplanmıştır.

$$Tr_n = \frac{S_t}{S_{tr}} \quad (8.73)$$

$$Tr_n = \frac{2760,8}{8640}$$

$Tr_n = 1$ adet olarak hesaplara katılacaktır.

Toplam Kapital Maliyet ($C_{toplaml}$) :

Toplam kapital maliyeti tren gaz hidrojen tankı maliyeti ve tren alt taşıyıcı maliyeti toplanarak hesaplanır. Bu maliyet kalemleri için yapılan kabuller aşağıda görülmektedir.

Tr_{tm} : Tren gaz hidrojen tankı maliyeti 200000 \$ olarak alınmıştır.

Tr_{um} : Tren alt taşıyıcı maliyeti 100000 \$ olarak alınmıştır.

$$C_{toplaml} = Tr_n \times (Tr_{tm} + Tr_{um}) \quad (8.74)$$

$$C_{toplaml} = 1 \times (200000 + 100000)$$

$$C_{toplaml} = 300000 \$$$

Yıllık Amortisman Maliyeti (A_y) :

Yıllık amortisman maliyeti, tren ömrü 15 sene kabul edilerek hesaplanmıştır.

$$A_y = \frac{C_{toplam}}{n_r} \quad (8.75)$$

n_r = Tren ömrü

$$A_y = \frac{300000}{15}$$

$$A_y = 20000 \$$$

Yıllık Nakliye Maliyeti (N_m) :

Yıllık nakliye maliyetinin hesaplanması için trenin yolculuk maliyeti 400\$ olarak kabul edilerek, bu değer yıllık yolculuk adedi ile çarpılır.

$$N_m = T \times N_l \quad (8.76)$$

N_l : Tren yolculuk maliyeti

$$N_m = 95,2 \times 400$$

$$N_m = 38080 \$$$

Toplam Yıllık Maliyet (C_k)

Toplam yıllık maliyetin bulunması için yıllık amaortisman, yıllık enerji maliyeti ve yıllık soğutma maliyeti toplanır.

$$C_k = A_y + N_m \quad (8.77)$$

$$C_k = 20000 + 38080 = 58080 \$$$

Toplam Birim Maliyet (C_{bk})

Toplam birim maliyetin hesaplanabilmesi için ilk önce maliyet kalemleri içersindeki kapital maliyeti, enerji maliyeti ve soğutma maliyetinin birim değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Şimdi sırasıyla bu birim maliyetleri hesaplayalım:

Birim Kapital Maliyeti : $A_{b_{GTR}}$

Birim kapital maliyeti daha önceden hesaplanan toplam kapital maliyetinin yıllık taşınan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$A_{b_{GTR}} = \frac{A_y}{F_t} \quad (8.78)$$

$$A_{b_{GTR}} = \frac{20000}{864000}$$

$$A_{b_{GTR}} = 0,023 \text{ \$/kg}$$

Birim Nakliye Maliyeti : $N_{b_{GTR}}$

Birim nakliye maliyeti daha önceden hesaplanan toplam nakliye maliyetinin yıllık taşınan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$N_{b_{GTR}} = \frac{N_m}{F_t} \quad (8.79)$$

$$N_{b_{GTR}} = \frac{38080}{864000}$$

$$N_{b_{GTR}} = 0,044 \text{ \$/kg}$$

Toplam Birim Maliyet (C_{bk})

Hesaplanan birim maliyetlerin toplamı bize toplam birim maliyeti verecektir.

$$C_{bk} = A_{b_{GTR}} + N_{b_{GTR}} \quad (8.80)$$

$$C_{bk} = 0,023 + 0,044 = 0,067 \text{ \$/kg}$$

8.2.3 Sıvı Hidrojenin Denizyoluyla Taşınması

Önceki bölümdede belirtildiği üzere buradada iletim hesabı yapılırken hidrojen miktarı olarak 100kg/h alınacaktır.

Hidrojen miktarı (F) : 100 kg/h

Toplam yıllık hidrojen miktarı (F_y) :

Yıllık toplam taşınacak hidrojen miktarının hesaplanması için yılda 360 gün ve günde 24 saatlik çalışma süresi alınmıştır.

$$F_y = F \times 24 \times 360 \quad (8.81)$$

$$F_y = 100 \times 24 \times 360$$

$$F_y = 864000 \text{ kg/yıl}$$

Taşınan Mesafe :

Hidrojenin taşınacağı mesafe tek ve çift yöllü olarak ele alınıp hesaplar çift yöllü taşımaya, yani gidiş-dönüş yoluna göre yapılacaktır.

- Tek Yönlü Taşıma

Taşınan uzaklık (D₁) :

$$D_1 = 100 \text{ km}$$

- Çift Yönlü Taşıma

Taşınan uzaklık (D₂) :

$$D_2 = D_1 \times 2 \quad (8.82)$$

$$D_2 = 100 \times 2$$

$$D_2 = 200 \text{ km.}$$

Yıllık Yolculuk Adedi (T):

Yıllık yolculuk adedi, yıllık taşınacak toplam hidrojen miktarının tırın gaz hidrojen kapasitesine bölünmesiyle hesaplanır.

$$T = \left(\frac{F_t}{Tg_{sk}} \right) \quad (8.83)$$

Tg_{sk} : Gemi Tankının sıvı hidrojen kapasitesi 4082 kg

$$T = \frac{864000}{4082}$$

$$T = 211,6$$

Taşıma Yapılan Toplam Yol (M) :

Taşıma yapılan toplam yolun hesaplanması için, (8.83)'de hesaplanan yıllık yolculuk adedi, (8.82)'de hesaplanan çift yöllü mesafe ile çarpılır.

$$M = T \times D_2 \quad (8.84)$$

$$M = 211,6 \times 200 \text{ km}$$

$$M = 42320 \text{ km}$$

Yolculuk Süresi (Y_s) :

Yolculuk süresi çift yöllü hesaplanan taşıma mesafesinin ortalama tren hızına bölünmesi ile hesaplanır. Burada ortalama gemi hızı (H_g) olarak 16 km/h alınmıştır.

$$Y_s = \frac{D_2}{H_g} \quad (8.85)$$

H_g = Ortalama gemi hızı olarak 16 km/h alınmıştır.

$$Y_s = \frac{200}{16}$$

$$Y_s = 12,5 \text{ h}$$

Taşınan Hidrojen Miktarı (F_d)

Toplam hidrojen miktarından buharlaşan hidrojen kayıpları çıkartılarak hesaplanır.

$$F_d = F_t \times e^{-BO \left(\frac{Y_s}{2} \right)} \quad (8.86)$$

BO : Buharlaşma oranı günlük % 0,30 olarak alınmıştır.

$$F_d = 864000 \times e^{-0,0030 \left(\frac{2,5}{2} \right)}$$

$$F_d = 864000 \times \frac{1}{1,00375}$$

$$F_d = 860772 \text{ kg}$$

Sürüş Süresi (S_s) :

Sürüş süresi, yolculuk süresi ile yolculuk adedinin çarpımına eşittir.

$$S_s = T \times Y_s \quad (8.87)$$

$$S_s = 211,6 \times 12,5 \text{ h}$$

$$S_s = 2645 \text{ h.}$$

Yükleme/ Boşaltma Süresi (S_{yb}) :

Toplam yükleme boşaltma süresi, trenin seyahat başına yükleme/boşaltma süresi 48 saat alınarak, yolculuk adedi ile çarpımıyla hesaplanabilir.

$$S_{yb} = T \times Tg_s \quad (8.88)$$

$$Tg_s = \text{Gemi tankı yükleme boşaltma süresi}$$

$$S_{yb} = 211,6 \times 48$$

$$S_{yb} = 10156,8 \text{ h}$$

Toplam Süre (S_t) :

Toplam yıllık seyahat süresi, yıllık sürüş süresi ile yıllık yükleme/boşaltma süresinin toplamına eşittir.

$$S_t = S_s + S_{yb} \quad (8.89)$$

$$S_t = 2645 + 10156,8$$

$$S_t = 12801,8 \text{ h}$$

Gemi Çalışma Süresi (S_{ir}) :

Geminin günlük çalışma süresi 24 saat olarak kabul edilerek, yılda 360 gün çalışması sonucu toplam tren çalışma süresi hesaplanmıştır.

$$S_{ir} = Tg_a \times 360 \quad (8.90)$$

Tg_a : Geminin günlük çalışma süresi 24 saat olarak alınmıştır.

$$S_{ir} = 24 \text{ h} \times 360$$

$$S_{ir} = 8640 \text{ h.}$$

Gerekli Gemi Adedi (Tg_n) :

Toplam seyahat süresi gemi çalışma süresine bölünerek toplam kaç adet gemiye ihtiyaç olduğu hesaplanmıştır.

$$Tg_n = \frac{S_t}{S_{ir}} \quad (8.91)$$

$$Tg_n = \frac{12801,8}{8640}$$

$$Tg_n = 1,48 \text{ adet}$$

Tg_n = 2 adet olarak hesaplara katılacaktır.

Toplam Kapital Maliyet (C_{toplam}) :

Toplam kapital maliyeti gemi sıvı hidrojen tankı maliyeti ve tren alt taşıyıcı maliyeti toplanarak hesaplanır. Bu maliyet kalemleri için yapılan kabuller aşağıda görülmektedir.

Tg_{tm} : Gemi sıvı hidrojen tankı maliyeti 350000 \$ olarak alınmıştır.

$$C_{toplam} = Tg_n \times (Tg_{tm}) \quad (8.92)$$

$$C_{toplam} = 1 \times 350000$$

$$C_{toplam} = 350000 \$$$

Yıllık Amortisman Maliyeti (A_y) :

Yıllık amortisman maliyeti, gemi ömrü 6 sene kabul edilerek hesaplanmıştır.

$$A_y = \frac{C_{toplam}}{n_g} \quad (8.93)$$

n_g = Gemi ömrü 6 yıl olarak kabul edilmiştir.

$$A_y = \frac{350000}{6}$$

$$A_y = 58333,3 \$$$

Yıllık Nakliye Maliyeti (N_{tm}) :

Yıllık nakliye maliyetinin hesaplanması için geminin yolculuk maliyeti 3000\$ olarak kabul edilerek, bu değer yıllık yolculuk adedi ile çarpılır.

$$N_{tm} = T \times N_g \quad (8.94)$$

N_g : Gemi yolculuk maliyeti 3000 \$ olarak alınmıştır.

$$N_{tm} = 211,6 \times 3000$$

$$N_{tm} = 634800 \$$$

Toplam Yıllık Maliyet (C_k)

Toplam yıllık maliyetin bulunması için yıllık amaortisman, yıllık enerji maliyeti ve yıllık soğutma maliyeti toplanır.

$$C_k = A_y + N_{tm} \quad (8.95)$$

$$C_k = 58333,3 + 634800$$

$$C_k = 693133,3 \$$$

Toplam Birim Maliyet (C_{bk})

Toplam birim maliyetin hesaplanabilmesi için ilk önce maliyet kalemleri içersindeki kapital maliyeti, enerji maliyeti ve soğutma maliyetinin birim değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Şimdi sırasıyla bu birim maliyetleri hesaplayalım:

Birim Kapital Maliyeti : A_{bGTR}

Birim kapital maliyeti daha önceden hesaplanan toplam kapital maliyetinin yıllık taşınan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$A_{bGTR} = \frac{A_y}{F_t} \quad (8.96)$$

$$A_{bGTR} = \frac{58333,3}{864000}$$

$$A_{bGTR} = 0,0675 \text{ \$/kg}$$

Birim Nakliye Maliyeti : N_{bGTR}

Birim nakliye maliyeti daha önceden hesaplanan toplam nakliye maliyetinin yıllık taşınan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$N_{bGTR} = \frac{N_{tm}}{F_t} \quad (8.97)$$

$$N_{bGTR} = \frac{634800}{864000}$$

$$N_{bGTR} = 0,735 \text{ \$/kg}$$

Toplam Birim Maliyet (C_{bk})

Hesaplanan birim maliyetlerin toplamı bize toplam birim maliyeti verecektir.

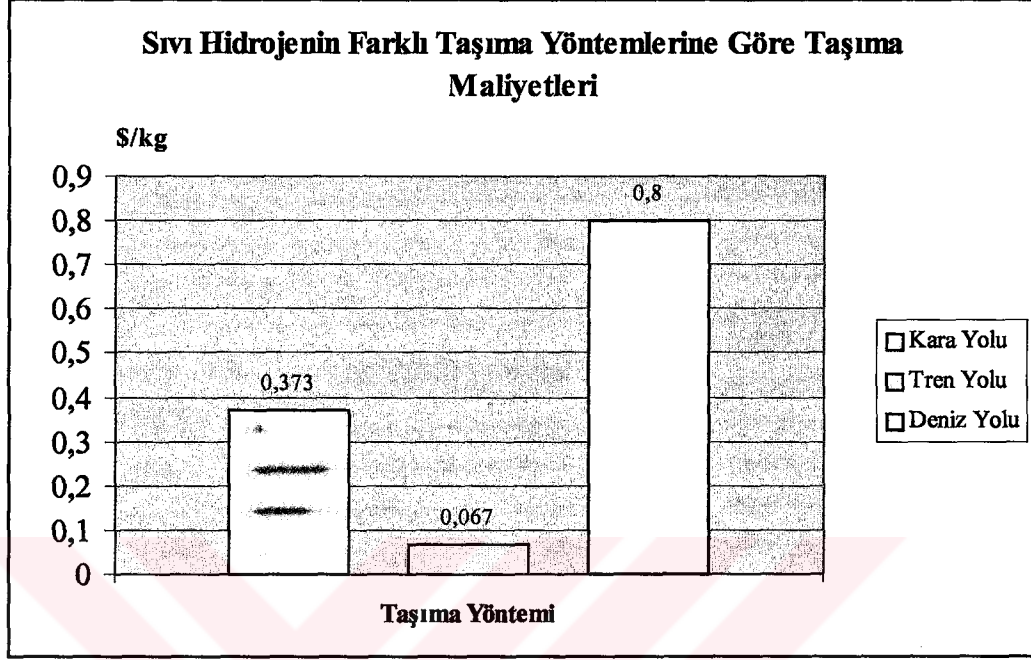
$$C_{bk} = A_{bGTR} + N_{bGTR} \quad (8.97)$$

$$C_{bk} = 0,0675 + 0,735$$

$$C_{bk} = 0,80 \text{ \$/kg}$$



Aşağıdaki şekilde (Şekil 8.3) sıvı hidrojenin farklı taşıma yöntemlerine göre bu bölümde hesaplanan taşıma maliyetleri görülmektedir.



Şekil 8.3 Sıvı hidrojenin farklı taşıma yöntemlerine göre hesaplanan taşıma maliyetleri

8.3 Metal Hidritlerin Taşınması

Hidrojen metal hidrit tarafından absorbe edildikten sonra, metal hidrit tır yada trene yüklenecek son kullanıcıya ulaştırılır ve boş hidrit konteyneri ile değiştirilir yada konvansiyonel 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 olan maliyetle taşınırlar. (Amos,1998)

8.3.1 Metal Hidritlerin Kara Yoluyla Taşınması

Metal hidritlerin iletim hesapları yapılırken hidrojen miktarı olarak 100kg/h alınacaktır.

Hidrojen miktarı (F) : 100 kg/h

Toplam yıllık hidrojen miktarı (F₁) :

Yıllık toplam taşınacak hidrojen miktarının hesaplanması için yılda 360 gün ve günde 24 saatlik çalışma süresi alınmıştır.

$$F_1 = F \times 24 \times 360 \quad (8.98)$$

$$F_1 = 100 \times 24 \times 360$$

$$F_1 = 864000 \text{ kg/yıl}$$

Taşınan Mesafe :

Hidrojenin taşınacağı mesafe tek ve çift yöllü olarak ele alınıp hesaplar çift yöllü taşımaya, yani gidiş-dönüş yoluna göre yapılacaktır.

- **Tek Yönlü Taşıma**

Taşınan uzaklık (D₁) :

$$D_1 = 100 \text{ km}$$

- Çift Yollu Taşıma

Taşınan uzaklık (D_2) :

$$D_2 = D_1 \times 2 \quad (8.99)$$

$$D_2 = 100 \times 2$$

$$D_2 = 200 \text{ km.}$$

Yıllık Yolculuk Adedi (T):

Yıllık yolculuk adedi, yıllık taşınacak toplam hidrojen miktarının tırın metal hidrit kapasitesine bölünmesiyle hesaplanır.

$$T = \left(\frac{F_t}{T_{l_{mk}}} \right) \quad (8.100)$$

$T_{l_{mk}}$: Tırın metal hidrit kapasitesi 453 kg

$$T = \frac{864000}{453}$$

$$T = 1907,3$$

Taşıma Yapılan Toplam Yol (M) :

Taşıma yapılan toplam yolun hesaplanması için, (8.100)'de hesaplanan yıllık yolculuk adedi, (8.99)'de hesaplanan çift yollu mesafe ile çarpılır.

$$M = T \times D_2 \quad (8.101)$$

$$M = 1907,3 \times 200 \text{ km}$$

$$M = 381460 \text{ km}$$

Yolculuk Süresi (Y_s) :

Yolculuk süresi çift yollu hesaplanan taşıma mesafesinin ortalama tır hızına bölünmesi ile hesaplanır. Burada ortalama tır hızı (H_t) olarak 80 km/h alınmıştır.

$$Y_s = \frac{D_2}{H_t} \quad (8.102)$$

H_t = Ortalama tır hızı

$$Y_s = \frac{200}{80}$$

$$Y_s = 2,5 \text{ h}$$

Sürüş Süresi (S_s) :

Sürüş süresi, yolculuk süresi ile yolculuk adedinin çarpımına eşittir.

$$S_s = T \times Y_s \quad (8.103)$$

$$S_s = 1907,3 \times 2,5 \text{ h}$$

$$S_s = 4768,25 \text{ h.}$$

Yükleme/ Boşaltma Süresi (S_{yb}) :

Toplam yükleme boşaltma süresi, tırın seyahat başına yükleme/boşaltma süresi 2 saat alınarak, yolculuk adedi ile çarpımıyla hesaplanabilir.

$$S_{yb} = T \times T_{1_s} \quad (8.104)$$

T_{1_s} = Tır yükleme boşaltma süresi olarak seyahat başına 2 saat alınmıştır.

$$S_{yb} = 1907,3 \times 2$$

$$S_{yb} = 3814,6 \text{ h}$$

Toplam Süre (S_t) :

Toplam yıllık seyahat süresi, yıllık sürüş süresi ile yıllık yükleme/boşaltma süresinin toplamına eşittir.

$$S_t = S_s + S_{yb} \quad (8.105)$$

$$S_t = 4768,25 + 3814,6$$

$$S_t = 8582,85 \text{ h}$$

Tır Çalışma Süresi (S_{t}) :

Tırın günlük çalışma süresi 24 saat olarak kabul edilerek, yılda 360 gün çalışması sonucu toplam tır çalışma süresi hesaplanmıştır.

$$S_{t} = T_{1a} \times 360 \quad (8.106)$$

T_{1a} : Tırın günlük çalışma süresi 24 saat olarak alınmıştır.

$$S_{t} = 24 \text{ h} \times 360$$

$$S_{t} = 8640 \text{ h.}$$

Gerekli Tır Adedi (T_{1n}) :

Toplam seyahat süresitır çalışma süresine bölünerek toplam kaç adet tıra ihtiyaç olduğu hesaplanmıştır.

$$T_{1n} = \frac{S_t}{S_n} \quad (8.107)$$

$$T_{1n} = \frac{8582,85}{8640}$$

$$T_{1n} = 0,99$$

$T_{1n} = 1$ adet olarak hesaplara katılacaktır.

Tır Sürücüsünün Çalışma Zamanı ($S_{sü}$) :

Tır sürücüsünün çalışma zamanı, tır sürücüsünün günde 12 saat çalıştığı kabul edilerek yıllık 360 günlük bir çalışma süresine göre hesaplanmıştır.

$$S_{sü} = S_{üa} \times 360 \quad (8.108)$$

$S_{üa}$: Tır sürücüsünün günlük çalışacağı süre olarak 12 saat alınmıştır.

$$S_{sü} = 12 \text{ h} \times 360$$

$$S_{sü} = 4320 \text{ h}$$

Gerekli Sürücü Adedi ($S_{ün}$) :

Bir tır sürücüsünün yılda 4320 saat çalışacağı hesaplandıktan sonra gerekli sürücü adedi yıllık toplam yolculuk süresinin bu süreye bölünmesi ile hesaplanır.

$$Sü_n = \frac{S_t}{S_{sü}} \quad (8.109)$$

$$Sü_n = \frac{8582,85}{4320}$$

$Sü_n = 2$ adet (yuvarlanmıştır 1,98 den)

Yakıt Kullanımı (Y_a) :

Yıllık yakıt kullanımı taşıma yapılan toplam yolun, toplam mil hesabına göre uzaklığa bölünmesi ile litre olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Y_a = \frac{M}{Tl_{mi}} \quad (8.110)$$

Tl_{mi} : 6 mpg mil hesabıyla uzaklık

1 mil = 1,609 km

$Tl_{mi} = 6 \times 1,609$

$Tl_{mi} = 9,654$ km/g

$$Y_a = \frac{381460}{9,654}$$

$Y_a = 39513,2$ gal.

1 gal = 4,545 lt.

$Y_a = 39513,2 \times 4,545$

$Y_a = 179587,5$ lt.

Toplam Kapital Maliyet (C_{toplam}) :

Toplam kapital maliyeti tır gaz hidrojen tankı maliyeti, tır alt taşıyıcı maliyeti ve tır sürücü kabini maliyeti toplanarak hesaplanır. Bu maliyet kalemleri için yapılan kabuller aşağıda görülmektedir.

$T1_{tm}$: Tır gaz hidrojen tankı maliyeti 2205 \$ olarak alınmıştır.

$T1_{mk}$: Tırın metal hidrit kapasitesi 453 kg

$T1_{um}$: Tır alt taşıyıcı maliyeti 60000 \$ olarak alınmıştır.

$T1_{cm}$: Tır sürücü kabini maliyeti 90000 \$ olarak alınmıştır.

$$C_{toplam} = T1_n \times [(T1_{tm} \times T1_{mk}) + T1_{um} + T1_{cm}] \quad (8.111)$$

$$C_{toplam} = 1 \times [(2205 \times 453) + 60000 + 90000]$$

$$C_{toplam} = 1148865 \$$$

Yıllık Amortisman Maliyeti (A_y) :

Yıllık amortisman maliyeti, tır ömrü 6 sene ve traktör ömrü 4 sene kabul edilerek hesaplanmıştır.

$$A_y = \frac{T1_n \times [(T1_{tm} \times T1_{mk}) + T1_{um}]}{n_a} + \frac{T1_n \times T1_{cm}}{n_b} \quad (8.112)$$

n_a = Tır/treyler ömrü 6 yıl olarak kabul edilmiştir.

n_b = Traktör ömrü 4 yıl olarak kabul edilmiştir.

$$A_y = \frac{1 \times [(2205 \times 453) + 60000]}{6} + \frac{1 \times 90000}{4}$$

$$A_y = \frac{1058865}{6} + \frac{90000}{4}$$

$$A_y = 176477,5 + 22500$$

$$A_y = 198977,5 \$$$

Yıllık Yakıt Maliyeti (Y_m) :

Yıllık yakıt maliyeti (8.110) ile hesaplanan yıllık kullanılan yakıt miktarının, hesapların yapıldığı tarihteki motorinin litre fiyatı ile çarpılmasıyla hesaplanmıştır.

$$Y_m = Y_a \times \mu \quad (8.113)$$

1 lt. motorin fiyatı 04.04.2002 tarihi için 999.000 TL olarak alınmıştır. *

04.04.2002 T.C.Merkez Bankası döviz kuru 1.328.659 TL olarak alınmıştır.**

$$1 \text{ lt. Motorinin fiyatı } (\mu) = \frac{999.000}{1.328.659}$$

$\mu = 0,75$ \$ olarak hesaplanmıştır.

$$Y_m = 179587,5 \text{ lt} \times 0,75 \text{ \$/lt}$$

$$Y_m = 134690,6 \text{ \$}$$

Yıllık İşçi Maliyeti ($Sü_m$) :

Yıllık işçi maliyetinin hesaplanması için yıllık toplam yolculuk süresi, hesapların yapıldığı tarihte Catoni Inter-Link şirketi nakliye departmanından alınan tır sürücülerinin saat başı ücreti ile çarpılarak hesaplanmıştır.

$Sü_i$: Sürücülerin saat başına ücreti 13 \$ olarak alınmıştır. *

$$Sü_m = S_t \times Sü_i \quad (8.114)$$

$$Sü_m = 8582,85 \times 13$$

$$Sü_m = 111577 \text{ \$}$$

* http://www.poas.com.tr/akaryakit_fiyatlari.htm

** <http://www.tcmb.gov.tr>

* Catoni InterLink Nakliye Departmanı

Toplam Yıllık Maliyet (C_k)

Toplam yıllık maliyetin bulunması için yıllık amortisman, yıllık enerji maliyeti ve yıllık soğutma maliyeti toplanır.

$$C_k = A_y + Y_{tm} + S\ddot{u}_m \quad (8.115)$$

$$C_k = 198977,5 + 134690,6 + 111577$$

$$C_k = 445245,1 \text{ \$}$$

Toplam Birim Maliyet (C_{bk})

Toplam birim maliyetin hesaplanabilmesi için ilk önce maliyet kalemleri içerisindeki kapital maliyeti, enerji maliyeti ve soğutma maliyetinin birim değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Şimdi sırasıyla bu birim maliyetleri hesaplayalım:

Birim Kapital Maliyeti : A_{bGR}

Birim kapital maliyeti daha önceden hesaplanan toplam kapital maliyetinin yıllık taşınan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$A_{bGR} = \frac{A_y}{F_t} \quad (8.116)$$

$$A_{bGR} = \frac{445245,1}{864000}$$

$$A_{bGR} = 0,51 \text{ \$/kg}$$

Birim Yakıt Maliyeti : Y_{bGR}

Birim yakıt maliyeti daha önceden hesaplanan toplam yakıt maliyetinin yıllık taşınan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$Y_{bGR} = \frac{Y_{tm}}{F_t} \quad (8.117)$$

$$Y_{bGR} = \frac{134690,6}{864000}$$

$$Y_{bGR} = 0,156 \text{ \$/kg}$$

Birim İşçi Maliyeti : $Sü_{bGR}$

Birim işçi maliyeti daha önceden hesaplanan toplam işçi maliyetinin yıllık taşınan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$Sü_{bGR} = \frac{Sü_m}{F_i} \quad (8.118)$$

$$Sü_{bGR} = \frac{111577}{864000}$$

$$Sü_{bGR} = 0,129 \text{ \$/kg}$$

Toplam Birim Maliyet (C_{bk})

Hesaplanan birim maliyetlerin toplamı bize toplam birim maliyeti verecektir.

$$C_{bk} = A_{bGR} + Y_{bGR} + Sü_{bGR} \quad (8.119)$$

$$C_{bk} = 0,051 + 0,156 + 0,129$$

$$C_{bk} = 0,336 \text{ \$/kg}$$

8.3.2 Metal Hidritlerin Demiryoluyla Taşınması

Önceki bölümdede belirtildiği üzere buradada iletim hesabı yapılırken hidrojen miktarı olarak 100kg/h alınacaktır.

Hidrojen miktarı (F) : 100 kg/h

Toplam yıllık hidrojen miktarı (F₁) :

Yıllık toplam taşınacak hidrojen miktarının hesaplanması için yılda 360 gün ve günde 24 saatlik çalışma süresi alınmıştır.

$$F_1 = F \times 24 \times 360 \quad (8.120)$$

$$F_1 = 100 \times 24 \times 360$$

$$F_1 = 864000 \text{ kg/yıl}$$

Taşınan Mesafe :

Hidrojenin taşınacağı mesafe tek ve çift yöllü olarak ele alınıp hesaplar çift yöllü taşımaya, yani gidiş-dönüş yoluna göre yapılacaktır.

- Tek Yöllü Taşıma

Taşınan uzaklık (D₁) :

$$D_1 = 100 \text{ km}$$

- Çift Yöllü Taşıma

Taşınan uzaklık (D₂) :

$$D_2 = D_1 \times 2 \quad (8.121)$$

$$D_2 = 100 \times 2$$

$$D_2 = 200 \text{ km.}$$

Yıllık Yolculuk Adedi (T):

Yıllık yolculuk adedi, yıllık taşınacak toplam hidrojen miktarının tırın gaz hidrojen kapasitesine bölünmesiyle hesaplanır.

$$T = \left(\frac{F_t}{Tr_k} \right) \quad (8.122)$$

Tr_k : Tren metal hidrit kapasitesi 907 kg

$$T = \frac{864000}{907}$$

$$T = 952,6$$

Taşıma Yapılan Toplam Yol (M) :

Taşıma yapılan toplam yolun hesaplanması için, (8.122)'de hesaplanan yıllık yolculuk adedi, (8.123)'de hesaplanan çift yönlü mesafe ile çarpılır.

$$M = T \times D_2 \quad (8.123)$$

$$M = 952,6 \times 200 \text{ km}$$

$$M = 190,5 \text{ km}$$

Yolculuk Süresi (Y_s) :

Yolculuk süresi çift yönlü hesaplanan taşıma mesafesinin ortalama tren hızına bölünmesi ile hesaplanır. Burada ortalama tren hızı (H_r) olarak 40 km/h alınmıştır.

$$Y_s = \frac{D_1}{H_r} \quad (8.124)$$

H_r = Ortalama tren hızı olarak 40 km/h alınmıştır.

$$Y_s = \frac{100}{40}$$

$$Y_s = 2,5 \text{ h}$$

Sürüş Süresi (S_s) :

Sürüş süresi, yolculuk süresi ile yolculuk adedinin çarpımına eşittir.

$$S_s = T \times Y \quad (8.125)_s$$

$$S_s = 952,6 \times 2,5 \text{ h}$$

$$S_s = 2381,5 \text{ h.}$$

Yükleme/ Boşaltma Süresi (S_{yb}) :

Toplam yükleme boşaltma süresi, trenin seyahat başına yükleme/boşaltma süresi 24 saat alınarak, yolculuk adedi ile çarpımıyla hesaplanabilir.

$$S_{yb} = T \times Tr_s \quad (8.126)$$

Tr_s = Tren yükleme boşaltma süresi olarak seyahat başına 24 saat alınmıştır.

$$S_{yb} = 952,6 \times 24$$

$$S_{yb} = 22862,4 \text{ h}$$

Toplam Süre (S_t) :

Toplam yıllık seyahat süresi, yıllık sürüş süresi ile yıllık yükleme/boşaltma süresinin toplamına eşittir.

$$S_t = S_s + S_{yb} \quad (8.127)$$

$$S_t = 2381,5 + 22862,4$$

$$S_t = 25243,9 \text{ h}$$

Tren Çalışma Süresi (S_{tr}) :

Trenin günlük çalışma süresi 24 saat olarak kabul edilerek, yılda 360 gün çalışması sonucu toplam tren çalışma süresi hesaplanmıştır.

$$S_{tr} = Tr_a \times 360 \quad (8.128)$$

Tr_a : Trenin günlük çalışma süresi 24 saat olarak alınmıştır.

$$S_{tr} = 24 \text{ h} \times 360$$

$$S_{tr} = 8640 \text{ h.}$$

Gerekli Tren /vagon Adedi (Tr_n) :

Toplam seyahat süresi tren çalışma süresine bölünerek toplam kaç adet trene ihtiyaç olduğu hesaplanmıştır.

$$Tr_n = \frac{S_t}{S_{tr}} \quad (8.129)$$

$$Tr_n = \frac{25243,9}{8640}$$

$$Tr_n = 2,92 \text{ adet}$$

$Tr_n = 3$ adet olarak hesaplara katılacaktır.

Toplam Kapital Maliyet (C_{toplam}) :

Toplam kapital maliyeti tren gaz hidrojen tankı maliyeti ve tren alt taşıyıcı maliyeti toplanarak hesaplanır. Bu maliyet kalemleri için yapılan kabuller aşağıda görülmektedir.

Tr_{m} : Tren metal hidrit tankı maliyeti 2205 \$ olarak alınmıştır.

Tr_k : Tren metal hidrit kapasitesi 907 kg

Tr_{um} : Tren alt taşıyıcı maliyeti 100000 \$ olarak alınmıştır.

$$C_{toplam} = Tr_n \times [(Tr_{m} \times Tr_k) + Tr_{um}] \quad (8.130)$$

$$C_{toplam} = 3 \times [(2205 \times 907) + 100000]$$

$$C_{toplam} = 6299805 \$$$

Yıllık Amortisman Maliyeti (A_y) :

Yıllık amortisman maliyeti, tren ömrü 15 sene kabul edilerek hesaplanmıştır.

$$A_y = \frac{C_{toplam}}{n_r} \quad (8.131)$$

$n_r =$ Tren ömrü 15 yıl olarak kabul edilmiştir.

$$A_y = \frac{6299805}{15}$$

$$A_y = 419987 \$$$

Yıllık Nakliye Maliyeti (N_m) :

Yıllık nakliye maliyetinin hesaplanması için trenin yolculuk maliyeti 400\$ olarak kabul edilerek, bu değer yıllık yolculuk adedi ile çarpılır.

$$N_m = T \times N_t \quad (8.132)$$

N_t : Tren yolculuk maliyeti 400 \$ olarak alınmıştır.

$$N_m = 952,6 \times 400$$

$$N_m = 381040 \$$$

Toplam Yıllık Maliyet (C_k)

Toplam yıllık maliyetin bulunması için yıllık amaortisman, yıllık enerji maliyeti ve yıllık soğutma maliyeti toplanır.

$$C_k = A_y + N_m \quad (8.133)$$

$$C_k = 419987 + 381040 = 801027 \$$$

Toplam Birim Maliyet (C_{bk})

Toplam birim maliyetin hesaplanabilmesi için ilk önce maliyet kalemleri içerisindeki kapital maliyeti, enerji maliyeti ve soğutma maliyetinin birim değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Şimdi sırasıyla bu birim maliyetleri hesaplayalım:

Birim Kapital Maliyeti : A_{bGR}

Birim kapital maliyeti daha önceden hesaplanan toplam kapital maliyetinin yıllık taşınan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$A_{b_{GTR}} = \frac{A_y}{F_t} \quad (8.134)$$

$$A_{b_{GTR}} = \frac{419987}{864000}$$

$$A_{b_{GTR}} = 0,486 \text{ \$/kg}$$

Birim Nakliye Maliyeti : $N_{b_{GTR}}$

Birim nakliye maliyeti daha önceden hesaplanan toplam nakliye maliyetinin yıllık taşınan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$N_{b_{GTR}} = \frac{N_{tm}}{F_t} \quad (8.135)$$

$$N_{b_{GTR}} = \frac{381040}{864000}$$

$$N_{b_{GTR}} = 0,441 \text{ \$/kg}$$

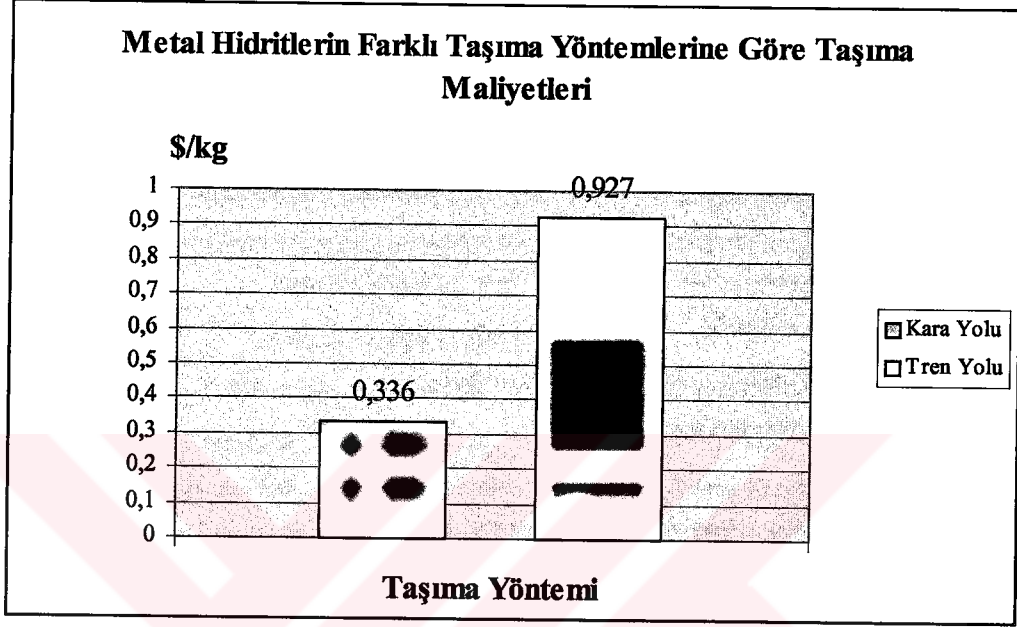
Toplam Birim Maliyet (C_{bk})

Hesaplanan birim maliyetlerin toplamı bize toplam birim maliyeti verecektir.

$$C_{bk} = A_{b_{GTR}} + N_{b_{GTR}} \quad (8.136)$$

$$C_{bk} = 0,486 + 0,441 = 0,927 \text{ \$/kg}$$

Aşağıdaki şekilde (Şekil 8.4) sıvı hidrojenin farklı taşıma yöntemlerine göre bu bölümde hesaplanan taşıma maliyetleri görülmektedir.



Şekil 8.4 Metal Hidritlerin farklı taşıma yöntemlerine göre hesaplanan taşıma maliyetleri

8.4 Hidrojenin Boru Hatlarıyla Taşınması

Hidrojenin boru hatlarıyla taşınması büyük miktarlarda hidrojenin taşınması durumunda ve enerji iletimi için en uygun metoddur.

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 arasındaki 400 km.'lik Air Liquide firmasına ait boru hattıdır. (Amos, 1998)

Boru hatlarıyla sıvı hidrojen süper iletken tel içeren izole edilmiş hatlarda taşınabilir. Sıvı hidrojen süperiletken için soğutucu görevi görecektir ve geleneksel güç hatlarının yüksek akım kayıpları olmadan elektriğin uzun mesafelere taşınmasını sağlar.

Hidrojenin boru hatlarıyla taşınması için gerekli maliyetler ile ilgili yapılan hesaplar aşağıdaki gibidir.

Taşınacak hidrojen miktarı (F) : 100 kg/h

Toplam yıllık hidrojen miktarı (F_y) :

Yıllık toplam taşınacak hidrojen miktarının hesaplanması için yılda 360 gün ve günde 24 saatlik çalışma süresi alınmıştır.

$$F_y = F \times 24 \times 360 \quad (8.137)$$

$$F_y = 100 \times 24 \times 360$$

$$F_y = 864000 \text{ kg/yıl}$$

Taşınan Mesafe :

Hidrojenin taşınacağı mesafe tek ve çift yönlü olarak ele alınıp hesaplar çift yönlü taşımaya, yani gidiş-dönüş yoluna göre yapılacaktır.

- **Tek Yollu Taşıma**

Taşınan uzaklık (D_1) :

$$D_1 = 100 \text{ km}$$

Alan (a) :

$$a = \frac{\pi r^2}{4} \quad (8.138)$$

$$\pi : 3,14$$

r : Boru çapı olarak 0,25 m. alınmıştır.

$$a = \frac{3,14 \times 0,25^2}{4} = 0,049 \text{ m}^2$$

Akım (A_f) :

Borudan saniyede geçecek hidrojen miktarını (8.138)'de hesaplanan alana bölerek akım hesaplanabilir.

$$A_f = \frac{F}{a} \quad (8.139)$$

$$F = 100 \text{ kg/h} = 0,027 \text{ kg/sn.}$$

$$A_f = \frac{0,027}{0,049}$$

$$A_f = 0,55 \text{ kg/m}^2 \text{ sn.}$$

Reynold's Sayısı (NRe) :

$$Nre = \frac{r \times A_f}{Vi} \quad (8.139)$$

r : Boru çapı olarak 0,25 m. alınmıştır.

ν : Viskozite $8,62 \times 10^{-6}$ kg/m.sn alınmıştır.

$$NRe = \frac{0,25 \times 0,55}{8,62 \times 10^{-6}}$$

$$NRe = 15951,3$$

Pürüzlülük Oranı (Po) :0,000184 olarak alınmıştır.

Giriş Basıncı (P_g) :

$$P_g = \sqrt{\frac{[4 \times f \times D_1 \times A_f^2 \times (R_{H_2} \times T_e)]}{r}} + P_i^2 \quad (8.140)$$

f : sürtünme katsayısı 0,005

R_{H_2} : 0,004124 m/kgK

T_e : Sıcaklık 283 Kelvin

P_i : 2 Mpa

$$P_g = \sqrt{\frac{[4 \times 0,005 \times 100 \times 0,55^2 \times (0,004124 \times 283)]}{0,25}} + 2^2$$

$$P_g = \sqrt{\frac{0,70609}{0,25}} + 4$$

$$P_g = \sqrt{6,8243}$$

$$P_g = 2,61 \text{ Mpa} = 2,61 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Enerji (E) :

Enerji, hidrojen miktarı, kompresör gücü ve basınçlara bağlı olarak aşağıdaki (8.141) numarlı formülle hesaplanabilir.

$$E = F \times K_g \times \frac{\ln\left(\frac{P_g}{0,1 \times 10^6}\right)}{\ln\left(\frac{20 \times 10^6}{0,1 \times 10^6}\right)} - \frac{\ln\left(\frac{P_i}{0,1 \times 10^6}\right)}{\ln\left(\frac{20 \times 10^6}{0,1 \times 10^6}\right)} \quad (8.141)$$

$$E = 111 \times 2,20 \times \left[\frac{\ln\left(\frac{2,61 \times 10^6}{0,1 \times 10^6}\right)}{\ln(200 \times 10^6)} - \frac{\ln\left(\frac{2 \times 10^6}{0,1 \times 10^6}\right)}{\ln(200 \times 10^6)} \right]$$

$$E = 220 \times \left[\frac{\ln 26,1 \times 10^6}{\ln 200 \times 10^6} \right] - \left[\frac{\ln 20 \times 10^6}{\ln 200 \times 10^6} \right] \text{ kW}$$

$$E = 220 \times (0,893 - 0,879)$$

$$E = 220 \times 0,014$$

$$E = 3,08 \text{ kW}$$

Yıllık Enerji (E_y) :

Yıllık enerji miktarı, 360 gün ve günde 24 saat çalışma için aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$E_y = E \times 24 \times 360 \quad (8.142)$$

$$E_y = 3,08 \times 24 \times 360$$

$$E_y = 26611,2 \text{ kWh/yıl}$$

Kompresör Kapital Maliyeti (C_k) :

Kompresör kapital maliyeti, aşağıda kabul edilen değerleri verilen kompresör faktörü ve kompresör basınç faktörü ile enerji, kompresör gücü ve maliyeti ile giriş basıncı kullanılarak (8.143) numaralı formülle hesaplanır.

α : Kompresör faktörü (0,80)

β : Kompresör basınç faktörü (0,18)

$$C_k = (K_m \times K_g) \times \left(\frac{E}{K_g} \right)^\alpha \times \left(\frac{P_g}{K_b} \right)^\beta \quad (8.143)$$

$$C_k = (1000 \times 4000) \times \left(\frac{3,08}{4000} \right)^{0,80} \times \left(\frac{2,61 \times 10^6}{2 \times 10^6} \right)^{0,18}$$

$$C_k = 4000000 \times 0,00323 \times 1,049$$

$$C_k = 13553,1 \$$$

Boru Kapital Maliyeti (C_b) :

Boru kapital maliyeti, boru maliyeti 621504 \$/km alınarak bu değer hidrojenin taşınacağı mesafe uzunluğu yani boru uzunluğu ile çarpılması ile hesaplanır.

$$C_b = B_m \times D_1 \quad (8.144)$$

$$C_b = 621504 \$/km \times 100 \text{ km}$$

$$C_b = 62150400 \$$$

Toplam Kapital Maliyeti (C_{toplam}) :

Toplam kapital maliyeti kompresör kapital maliyeti ile boru kapital maliyetinin toplamına eşittir.

$$C_{toplam} = C_k + C_b \quad (8.145)$$

$$C_{toplam} = 13553,1 + 62150400$$

$$C_{toplam} = 62163953,1 \$$$

Amortisman (A_{bh}) :

Amortisman, boru hattı için ömür 22 sene kabul edilerek, toplam kapital maliyetinin bu değere bölünmesi ile hesaplanır.

$$A_{bh} = \frac{C_{toplam}}{n_p} \quad (8.146)$$

n_p : Boru hattı için ömür 22 sene alınmıştır.

$$A_{bh} = \frac{62163953,1}{22}$$

$$A_{bh} = 2825634,2 \$$$

Enerji Maliyeti (E_m) :

Şebekeden çekilecek elektrik enerjisinin fiyatı 0,08 \$/kW olarak kabul edilmiştir. (Özistek,2002) Enerji maliyeti bu değer (7.142) ile hesaplanan enerji miktarı ile çarpılmasıyla hesaplanır.

$$E_m = E_y \times 0,08 \quad (8.147)$$

$$E_m = 26611,2 \times 0,08$$

$$E_m = 2128,9 \$$$

Toplam Yıllık Maliyet (C_k)

Toplam yıllık maliyetin bulunması için yıllık amaortisman, yıllık enerji maliyeti ve yıllık soğutma maliyeti toplanır.

$$C_k = A_{bh} + E_m \quad (8.148)$$

$$C_k = 2825634,2 + 2128,9 = 2827763,1 \$$$

Toplam Birim Maliyet (C_{bk})

Toplam birim maliyetin hesaplanabilmesi için ilk önce maliyet kalemleri içersindeki kapital maliyeti, enerji maliyeti ve soğutma maliyetinin birim değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Şimdi sırasıyla bu birim maliyetleri hesaplayalım:

Birim Kapital Maliyeti : A_b

Birim kapital maliyeti daha önceden hesaplanan toplam kapital maliyetinin yıllık taşınan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$A_b = \frac{A}{F_t} \quad (8.149)$$

$$A_b = \frac{2825634,2}{864000} = 3,2$$

Birim Enerji Maliyeti : E_b

Birim enerji maliyeti daha önceden hesaplanan toplam enerji maliyetinin yıllık taşınan toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır.

$$E_b = \frac{E_m}{F_t} \quad (8.150)$$

$$E_b = \frac{2128,9}{864000} = 0,0025 \text{ \$/kg}$$

Toplam Birim Maliyet (C_{bk})

Hesaplanan birim maliyetlerin toplamı bize toplam birim maliyeti verecektir.

$$C_{bk} = A_b + E_b \quad (8.151)$$

$$C_{bk} = 3,2 + 0,0025$$

$$C_{bk} = 3,2025 \text{ \$/kg}$$

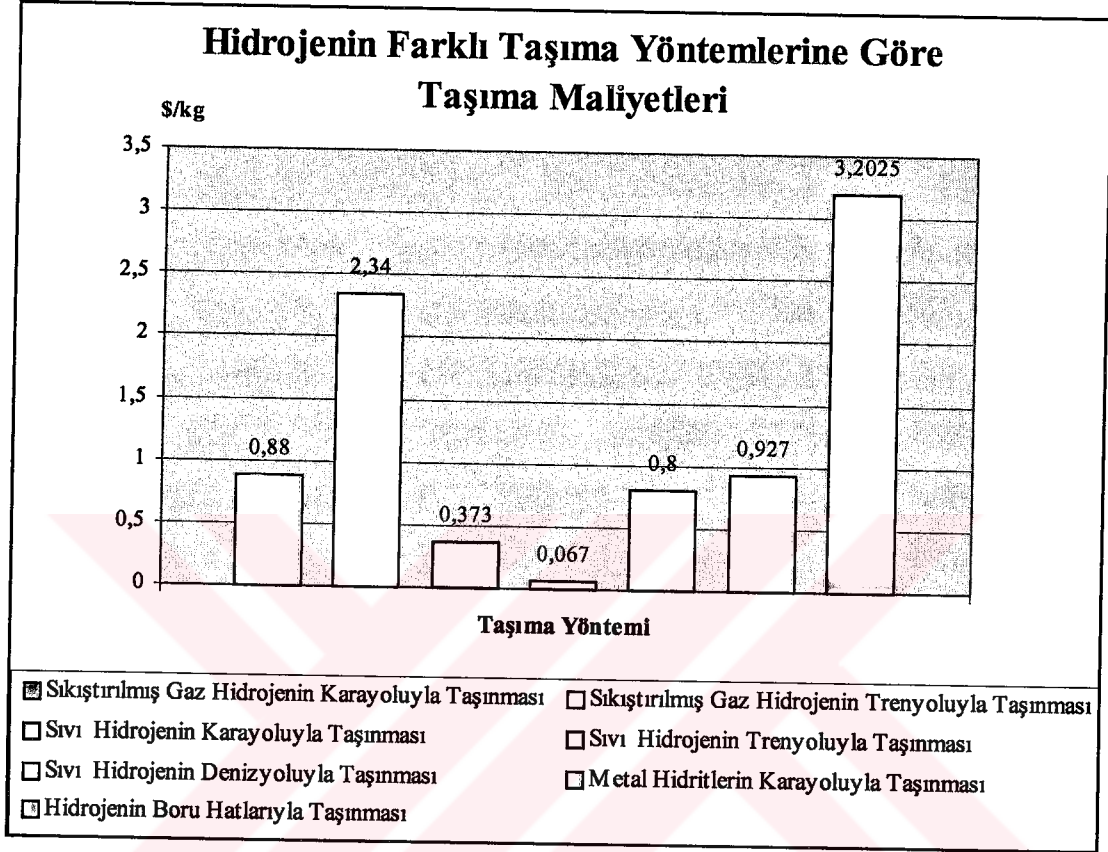
8.5 Taşıma Maliyetleri

Bu bölümde hidrojenin farklı formlarda ve farklı vasıtalar ve yöntemlerle taşınması için gerekli taşıma maliyetleri hesaplanmıştır. Yapılan bu hesapların detaylı sonuçları her yöntem için aşağıdaki çizelgede (Çizelge 8.1) gösterilmektedir.

Çizelge 8.1 Hidrojenin farklı formlarda ve farklı yöntemlerle taşınması için hesaplanan taşıma maliyetleri

	Yıllık Hidrojen Kapasitesi (kg/yıl)	Toplam Kapital Maliyeti (\$)	Amortisman (\$)	Yıllık Yakıt / Nakliye Maliyeti (\$)	Toplam Yıllık Maliyet (\$)	Toplam Birim Maliyet (\$/kg)
Sıkıştırılmış Gaz Hidrojenin Karayoluyla Taşınması	864000	750000	147000	337096,7	763346,45	0,88
Sıkıştırılmış Gaz Hidrojenin Demiryoluyla Taşınması	864000	1800000	120000	1909400	2029400	2,34
Sıvı Hidrojenin Karayoluyla Taşınması	864000	750000	147000	14943	322864,8	0,373
Sıvı Hidrojenin Demiryoluyla Taşınması	864000	300000	20000	38080	58080	0,067
Sıvı Hidrojenin Denizyoluyla Taşınması	864000	350000	58333,3	634800	693133,3	0,8
Metal Hidritlerin Karayoluyla Taşınması	864000	1148865	198977,5	134690,6	445245,1	0,336
Metal Hidritlerin Demiryoluyla Taşınması	864000	6299805	419987	381040	801027	0,927
Hidrojenin Boru Hatlarıyla Taşınması	864000	62163953,1	2825634,2	-	2827763,1	3,2025

Yapılan hesaplara göre Çizelge 8.1'de gösterilen sonuçlar aşağıdaki şekilde (Şekil 8.5) gösterilmektedir.



Şekil 8.5 Hidrojenin farklı formlarda ve farklı yöntemlerle taşınması için hesaplanan taşıma maliyetleri

8.6 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 faktörleri ayrı ayrı ele alalım.

- Miktar : Büyük miktarlardaki hidrojen için en ucuz taşıma yöntemi boru hatlarıyla taşımadır. Fakat okyanusların geçilmesi söz konusu oluyorsa tabiki de en ucuz yöntem sıvı hidrojenin tankerlerle taşınması olacaktır. Sıvı hidrojenin taşınması ikinci en ucuz iletim yöntemidir. Boru hattıyla taşımamanın çalıştırma maliyetleri çok düşüktür fakat ilk yatırım maliyeti çok yüksektir. Diğer tarafta sıvı hidrojenin de çalıştırma maliyetleri yüksek fakat ilk yatırım maliyetleri hidrojen miktarı ve taşıma yapılacak mesafeye bağlı olmak üzere daha düşüktür. Sıvı hidrojen ve boru hattı arasındaki başa baş noktası miktar ve mesafeye bağlı değişmektedir.

Küçük miktarlardaki hidrojen için boru hattı karlı olmamaktadır. Bu durumda en uygun yöntem sıkıştırılmış gaz halde taşımadır. Sıvı hidrojenle kıyaslandığında sıkıştırılmış gaz hidrojenin enerji tüketimi ve ilk yatırım maliyeti daha düşüktür. Hernekadar aynı miktardaki hidrojen için daha fazla tüp treylere ihtiyaç duyulsada ilk yatırım maliyeti çok daha aşağı maliyetlerde kalmaktadır. Bu ikisi arasında hangisinin ekonomik olarak tercih edileceği taşınacak mesafeye bağlı olmaktadır. Ayrıca kısa mesafeler için aynı tüp treylere bir gün içerisinde birden fazla defa kullanma söz konusu olabilmektedir.

Daha küçük miktarlar için boru hattına yapılacak ilk yatırım maliyeti çok yüksek olacaktır. Bu durumda sıkıştırılmış gaz ve sıvı hidrojen arasında seçim yaparken karar faktörü tamamen 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. 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 miktarlarda 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 yada 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 gеме 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. (Amos 1998)

- Güç Tedariği: Hidrojenle ilgili özel bir durum enerjinin uzun mesafe iletimidir. Hidrojen boru hatlarıyla taşındığı zaman daha düşük olmaktadır. (Amos, 1998) Bu da demek olmaktadır ki hidrojeni üretip boru hatlarıyla ısı yada elektrik enerji ihtiyacı olan yere taşımak düşük enerji kayıplarından dolayı çok daha ucuz olmaktadır. (Hart 1997)

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 ve
Metal hidrit, kısa mesafelerde taşımada kullanılması en uygun yöntemlerdir.

9 SONUÇ

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 kaynağı olarak kabul edilen hidrojen enerjisi önümüzdeki yüzyılın en önemli enerji kaynağı adaylarından biridir. Bu enerji; sudan elde edilebilmekte 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 enerjiyi devamlı olarak üretebilecektir.

Hidrojen doğal bir yakıt olmayıp, birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak değişik hammaddelerden üretilen sentetik bir yakıttır. Hidrojen içerme bakımından en zengin maddeler sırasıyla su (H_2O), fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğal gaz ... vb.) ve biyomasdır. 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. Bu maliyeti az da olsa düşürebilmek için elektrik enerjisi ihtiyacını karşılaması amacıyla bir küçük hidroelektrik santral kurulması düşünülmüştür ve ihtiyaca cevap verebilecek ve birim enerji maliyeti en düşük olacak şekilde santral için optimum güç olarak 10 MW yapılan hesaplarla belirlenmiştir. Kurulması düşünülen küçük HES de üretilen birim enerjinin maliyeti 0,06829 \$/kWh olarak hesaplanmıştır.

Hidrojen üretimi için en kolay bulunan ham madde olan suyun dünya üzerindeki toplam miktarının %99'u tuzludur ve kutup bölgelerindeki buz halindedir. Bu kadar bol miktarda bulunan ve maliyeti çok düşük olan deniz suyunun elektrolizinde karşılaşılan problemler ve yüksek maliyetlerinden dolayı bu çalışmada ilk önce deniz suyuna desalinasyon, arıtma işlemi uygulanarak elde edilecek tatlı sudan elektrolizle hidrojen üretimi yapılmıştır.

Deniz suyunun arıtılması yani desalinasyon işlemi için kullanılacak yöntem Ters Ozmoz yöntemidir. Bu yöntemin seçilmesindeki neden bu yöntemle su arıtmada sadece elektrik enerjisi yeterli olması, diğer yöntemlerdeki gibi ısı enerjisine gerek olmamasıdır.

Günlük kapasitesi 21447 m³ su /gün olan desalinasyon sisteminde, küçük HES’de üretilecek enerjinin yaklaşık 5 MW’ı kullanılarak yapılan hesaplarda birim maliyet 0,717 (\$/m³) yani 0,170 (\$/kWh) olarak bulunmuştur. Hidrojenin üretilmesi için son aşama olan elektroliz işleminde ise 1 kg hidrojen üretmek için gereken maliyet 5,373 (\$/kg) yani 0,1047 (\$/kWh) olarak bulunmuştur.

Sonuç olarak deniz uyundan elektrolizle hidrojen üretilmesi için hesaplanan gerekli toplam maliyet 0,2747 \$/kWh olarak hesaplanmıştır.

Günümüzde hidrojen çok çeşitli şekillerde depolanabilmektedir. Bilinen depolama yöntemleri, Gaz Hidrojen, Sıvı Hidrojen, Metal Hidrit, Carbon, Zeolit, Cam Küre ve Kimyasal formdadır. Bu çalışmada hidrojen depolama yöntemlerinden uygulamada en çok kullanılan dört tanesini ele alınıp maliyet analizleri yapılmıştır. Maliyet hesaplamaları yapılan hidrojen depolama yöntemleri sırasıyla: Gaz hidrojenin basınç altında depolanması, gaz hidrojenin yeraltında depolanması, hidrojenin metal hidritlerde depolanması ve sıvı hidrojenin depolanması yöntemleridir. Yapılan maliyet analizleri sonucunda, en düşük maliyetli depolama yönteminin 0,116 (\$/kg) birim maliyetli metal hidritte depolama ve en yüksek maliyetli depolama yönteminin de 1,48 (\$/kg) birim maliyetle sıvı hidrojenin depolanması olduğu söylenebilir.

Son olarak depolanan hidrojenin iletimi konusu incelenmiştir. Hidrojen sıkıştırılmış gaz, sıvı yada metal hidritlerle katı halde iletilebilir. Hidrojenin iletimi için uygulanan ve burada incelenen metodlar, karayolu, demiryolu, denizyolu ve boru hatları olacaktır. Yapılan hesaplar ve maliyet analizleri sonucu aynı miktardaki hidrojen için en düşük maliyetli iletim yöntemi olarak 0,067 \$/kg maliyetli sıvı haldeki hidrojenin demiryoluyla iletimi ve en yüksek maliyetli iletim yöntemi olarak ise 3,2025 \$/kg birim maliyetli boru hatlarıyla iletim olduğu bulunmuştur. Burada unutulmaması 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. Hidrojenin iletimindeki yöntemleri kısaca en uygun koşullara göre özetleyecek olursak;

- Boru hattı, büyük miktarlar ve uzun mesafelerdeki güç iletimi için,
- Sıvı hidrojen, uzun mesafelere iletimde,
- Sıkıştırılmış gaz, küçük miktarlar ve kısa mesafelerdeki iletimde ve
- Metal hidrit, kısa mesafelerde iletimde kullanılması en uygun yöntemlerdir.

Sonuç olarak şu an için üretiminden depolanması ve iletimine kadar çok yüksek maliyetler gerektiren bir enerji olan hidrojen enerjisi, diğer enerji formlarına göre sahip olduğu avantajları göz önüne alındığında üzerinde yoğun çalışmalar yapılarak en kısa zamanda özellikle doğa ve canlılar düşünülerek, tüm uygulama alanlarında kullanımına geçilmesi gereken enerjidir.



KAYNAKLAR

- Abdel-Aal, H. K.,(1975), "Proceedings Of Mechanical Engineering Congress", Shiraz, Iran.
- Abdel-Aal, H.K., (1986), "Water:Feed Stock For Hydrogen Production", Solar Energy Division, National Research Center, Cairo, Egypt, Hydrogen Energy Progress VI:30-36.
- Abdel-Aal, H.K. ve Hussein, I.A., (1993), "Parametric Study For Saline Water Electrolysis: Part III-Precipitate Formation and Recovery Of Magnesium Salts", International Journal Of Hydrogen Energy, 18:553-556.
- Abdel-Monem, A.E., (1984), "Electrolysis Of Sea Water Using A Packed Bed Reactor", Chemical Engineering Department, El-Minia University, Hydrogen Energy Progress VI :282-286.
- Akkuş,E., (2001), "Hidrojen", <http://www.webkimya.com/hid.htm>, (05.02.2002)
- Altan, M., Yörükoğulları, E., (1997), "Hidrojen Zeolit Sisteminin Enerji Teknolojisindeki Önemi", Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Türkiye 7. Enerji Kongresi.
- Amos, A.W., (1998), "Cost Of Storing And Transporting Hydrogen", National Renewable Energy Laboratory, Colorado.
- Avcı, E., (1999), Hidrojenin Eldesi, Kullanımı ve Uygulama Alanları, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Proje 2.
- Robert Bakish, Desalination – Challenge and Oppurtunity, London : 1973, Noyes Data Corporation
- Barbir, F., "Review Of Hydrogen Conversion Technologies", Clean Energy Research Institute, University Of Miami, Coral Gables, USA
- Buchner, H., (1984), "Hydrogen Use-Transportation Fuel", International Journal Of Hydrogen Energy, Pergamon Press, Great Britain, 9:501-514.
- Carpetis, C., (1985), "Break-Even And Optimisation Conditions For Overall Energy Systems Wherein Hydrogen Facilities Are Used", Hydrogen Energy Progress V, Stuttgart, 233-247
- Cheng, H., Yang, Q. ve Liu,C., (2000), "Hydrogen Storage In Carbon Nanotubes" , Institute Of Metal Research, China, Pergamon, Carbon 39:1447-1454.
- Cicconardi, S.P., Jannelli, E. ve Spazzafumo, M., (1993), "Hydrogen Energy Storage: Preliminary Analysis", International Journal Of Hydrogen Energy, Elsevier Science Ltd, Great Britain, 18:933-940.
- Cicconardi, S.P., Jannelli, E. ve Spazzafumo, M., (1997), "Hydrogen Energy Storage: Hydrogen And Oxygen Storage Subsystems", International Journal Of Hydrogen Energy, Elsevier Science Ltd,Great Britain, 22:897-902.

Domashenko,A., Golovchenko,A., Gorbatsky,Y., Nelidov,V. ve Skorodumov, T., “Production, Storage and Transportation Of Liquid Hydrogen. Experience Of Infrastructure Development and Operation”International Journal Of Hydrogen Energy, (2001),

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

Encyclopedia of Chemical Technology, (1991), “Hydrogen”, 4th edition, Vol:13, New York, Wiley

Günerhan, H., “Çevre ve Yeni Enerji Kaynakları”, Tesisat Mühendisleri Derneği, Teknik Bülten, Sayı:29, Ocak 1998, Ankara, 29:19-20

Hamed, O.A., Mohammed, A.K., Al-Sofi, İmam M., Mustafa, G.M.,Bamardauf, K. Ve Al-Washmi,H., (2001), “Simulation Of Multistage Flash Desalination Process”, Desalination, 134:195-203

Hart, D., (1997), “Hydrogen Power: The Commercial Future Of The Ultimate Fuel”, London, UK., Financial Times Energy Publishing

Hart, D., (2002), “Storing And Transporting Hydrogen”, Hydrogen Storage And Transportation Technology, www.esources.com/hydrogen, (25.04.2002)

Hoffman, K.C., (1973), “Economics Of Hydrogen Energy Systems”, Brookhaven National Laboratory Upton, New York

Hofmann, H., Fischer, J. ve Wendt, H, “Modeling of Advanced Electrolysis System”, Modeling and Simulation Of Electrolytic Solution Processes, Industrial Electrolytic Division, TH Darmstat, Federal Republic Of Germany, 88: 261-270

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

Huston, E.L., (1984), “Liquid and Solid Storage Of Hydrogen”, Proceedings Of The Fifth World Hydrogen Energy Conference, July 15-20, Toronto, Canada, 3:1171-1185.

Johnton, M.S., (2000), “On the production of Hydrogen Gas By The Electrolysis Of Water”, http://www.geocities.com/mj_17870/paper1-1.htm, (24.11.2001)

Kondrikov, N.B., (1990), “Problems Of Sea Water Electrolysis For Ocean Utilization & Hydrogen Production”, Far Eastern State University, Viladivostok, Russia

“Küçük Hidroelektrik Santraller”, Türkiye’nin Yeni ve Temiz Enerji Kaynakları, Türkiye Çevre Sorunları Vakfı,1983, 138-147

Lin,F.N., Moore,W.I. ve Walker S.W., (1984), “Economics Of Liquid Hydrogen From Water Electrolysis”, Hydrogen Energy Progress V:249-258, Canada

Mathis, D.A.,(1976), “Hydrogen Technology For Energy”, Noyes Data Corp., Park Ridge, NJ, USA

Ohta, T., Funk, J.E., Porter, J.D. ve Tilak, B.V., (1985), "Hydrogen Production From Water: Summary of Recent Research And Development Presented At The Fifth Whhec", International Journal Of Hydrogen Energy, 10:571-576

Özistek, B., (2002), "Çift Amaçlı Tesislerde Tatlı Su Üretiminin Teknik Ve Ekonomik İncelemesi", Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Petersen, U., Würsig, G. ve Krapp, R., (1994), "Design And Safety Considerations For Large Scale Sea Borne Hydrogen Transport", International Journal Of Hydrogen Energy, 19:597-604

Podgorny, A.N., Mishchenko, A.I. ve Soloyev, V.V., (1984), "Techno Economic Aspects Of Hydrogen Storage In an Automobile", International Journal Of Hydrogen Energy, Great Britain, 9-9.

Pottier, J. ve Bailleux, C., (1986), "Hydrogen : A Gas Of The Past, Present And Future 'A Drama In 3 Acts', Hydrogen Energy Progress VI : 197-216

Salzano, F.J., (1986), "Consideration Of Low Temperature Water Vapor Electrolysis Processes", Hydrogen Energy Progress VI, Upton, New York

Scott, K., (1995), "Electrochemical Processes For Clean Technology", Department of Chemical and Process Engineering, University of New Castle, The Royal Society of Chemistry

Stevenson, D., (1997), Water Treatment Unit Processes, London

Styrkovich, M.A. ve Malysenko, S.P., (1986), "Bulk Storage and Transmission Of Hydrogen", Hydrogen Energy Progress VI, Moscow, 765-786

Syed, M.T., Sherif, A.S., Veziroğlu, T.N. ve Sheffield, J.W., "An Economic Analysis Of Three Hydrogen Liquefaction Systems", International Journal Of Hydrogen Energy, Elsevier Science, 23:565-576

Tarnay, D.S., (1985), "Hydrogen Production At Hydro-Power Plants", Federal Energy Regulatory Commission, Washington, DC International Journal Of Hydrogen Energy, 10:577-584

Taylor, J.B., Alderson, J.E.A., Kalyanam, K.M., Lyle, A.B. ve Philips, L.A., (1986), "Technical and Economic Assessment Of Methods For The Storage Of Large Quantities Of Hydrogen", International Journal Of Hydrogen Energy, 11:5-22

Türkiye'nin Hidrolik Enerji Potansiyeli, (2000), www.eie.gov.tr/makale_01.html, (20.11.2001)

Venter, R.D. ve Pucher, G., (1995), "Modeling Of Stationary Bulk Hydrogen Storage Systems", Centre For Hydrogen And Electrochemical Studies, University Of Toronto, Canada, 1017-1027

Veziroğlu, T.N., (1984), "Applications Of Electrolytic Hydrogen Generator Technology", Nuclear /Hydrogen / Biogas, Alternative Energy Sources IV:191-205

Veziroğlu, T.N. ve Momirlan, M., 2002, "Current Status Of Hydrogen Energy", Renewable & Sustainable Energy Reviews, Elsevier Science, "(baskıda)"

Wendt, H., (1990), "Electrochemical Production and Combustion of Hydrogen", Electrochemical Hydrogen Technologies, 204-208

Wurster, R. ve Zittel, W., 1994, "Hydrogen Energy", Proceedings Of Energy Technologies To Reduce CO₂ Emission In Europe Workshop, Nederland, April 11-12

Yumurtacı, Z.S. ve Bilgen, E., Energy Transport Using Hydrogen From Small Hydraulic Power Systems, 2001

Yumurtacı, Z.S., (1994), Küçük Hidroelektrik Santraller Yardımıyla Türkiye'nin Hidroenerji Potansiyelinin Değerlendirilmesinin Araştırılması, Y.T.Ü., Makina Fakültesi, Doktora Tezi

İNTERNET KAYNAKLARI

[1] www.tusiad.org.tr, 2001)

[2] "Hidrojen Gazı", (2001),
<http://www.youthforhab.org.tr/tr/yayinlar/enerji/hidrojen/hidgazi.html>, (15.01.2001)

[3] "Hidrojen Enerjisi", (2002),
http://www.tubitak.gov.tr/btpd/btspd/platform/enerji/bolum6_7.html, (25.04.2002)

[4] Hidrolik Enerji, Enerji Teknolojileri Çalışma Grubu, (2001),
www.tubitak.gov.tr/btpd/btspd/platorm/enerji/bolum6_1.html, 15.01/2002

[5] "Production of Hydrogen", (2001),
<http://www.newenergy.org.cn/english/hydrogen/science/production.htm>, (28.11.2001)

[6] "Türkiye'nin Hidrolik Enerji Potansiyeli", (2000), www.eie.gov.tr/makale/01.html,
(20.11.2001)

[7] www.elsevier.com/locate/ijhydene, (19.12.2001)

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 23.04.1977

Doğum yeri Kırıkkale

Lise 1988-1995 Kadıköy Anadolu Lisesi

Lisans 1995-1999 Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak.
Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2000-2002 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Müh. Anabilim Dalı, Enerji Makinaları
Programı

Çalıştığı kurum

2001- Catoni Persa Ltd. Şti.

