

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TAŞITLARDA ALTERNATİF YAKIT OLARAK
HİDROJEN KULLANIMI**

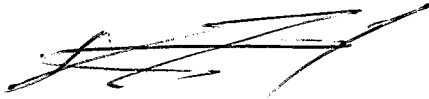
Mak. Müh. Fatih Emre TEMELCİ

**F.B.E Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Makinaları Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

93766

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Orhan DENİZ
Jüri Üyeleri: Prof. İrfan YAVAŞLIOL
Doç. Dr. Uğur KESGİN



İSTANBUL, 2000

	sayfa
İÇİNDEKİLER	
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
ÇİZELGE LİSTESİ	v
ÖNSÖZ	vi
ÖZET	vii
ABSTRACT.....	viii
1 GİRİŞ.....	1
2 ALTERNATİF YAKIT ARAYIŞLARI VE HİDROJEN	2
2.1 Taşıtların Çevresel Etkileri	2
2.2 Dünya Fosil Yakıt Rezervleri Durumu.....	5
2.3 Alternatif Yakıt Olarak Hidrojen.....	8
2.3.1 Hidrojenin fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	8
3 HİDROJEN ÜRETİM YÖNTEMLERİ	11
3.1 Fosil Yakıtlardan Üretim	11
3.1.1 Mevcut teknolojiler.....	11
3.1.2 Geliştirilmekte olan teknikler	14
3.2 Biyokütleden Üretim	15
3.3 Elektrikten Üretim (Elektroliz).....	16
3.3.1 Mevcut teknikler.....	17
3.3.2 Geliştirilmekte olan teknikler	18
3.4 Hidrojen Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	18
4 HİDROJEN DEPOLAMA YÖNTEMLERİ.....	20
4.1 Hidrojenin Basıncılı Gaz Halinde Depolanması.....	20
4.2 Hidrojenin Sıvı Halde Depolanması.....	21
4.3 Metal Hidritler Yardımıyla Depolama.....	22
4.4 Geliştirilmekte Olan Teknikler.....	23
4.5 Depolama Yöntemlerinin Karşılaştırılması	24
5 HİDROJENİN TAŞITLARDA KULLANILMA YÖNTEMLERİ.....	25
5.1 Yakıt Hücreleri İle Kullanım	25
5.1.1 Yakıt hücrelerinin tarihi.....	25
5.1.2 Yakıt hücreleri çalışma prensibi	27
5.1.3 Yakıt hücresi çeşitleri ve uygulama alanları.....	29
5.2 Hidrojenin Mevcut Yakıtın Zenginleştirilmesinde Kullanılması	33
5.3 Hidrojenin İYM’da Direk Olarak Kullanımı	45
5.3.1 Hidrojenle çalıştırma durumunda karşılaşılan problemler	45
5.3.2 Motorda yapılması gerekli modifikasyonlar.....	46
5.3.2.1 Harici karışım teşkili ve yapılması gerekli modifikasyonlar.....	46
5.3.2.2 Dahili karışım teşkili ve yapılması gerekli modifikasyonlar.....	51

5.3.2.3	Diesel motorlarında kullanım ve yapılması gerekli modifikasyonlar.....	53
6	SONUÇLAR.....	55
	KAYNAKLAR.....	58
	ÖZGEÇMİŞ.....	60



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Yıllara göre atmosferdeki CO ₂ konsantrasyonu.	5
Şekil 3.1	Reformasyon tesis şeması	12
Şekil 3.2	Değişik elektroliz hücreleri yapısı, a-hücre duvarı, b- elektrolit, c- katod, d- anod, e- hidrojen çıkışı, f- oksijen çıkışı, g- gaz toplayıcı, h- diyafram, i- harici anod, j- harici katod, k- bipolar elektrod, l- yalıtıcı	17
Şekil 4.1	MAN deneme otobüsünde kullanılan basınçlı hidrojen silindirleri.....	21
Şekil 4.2	Sıvı hidrojen depolama tankı	22
Şekil 5.2	%100 benzinle $\phi=1.0$ şartında çevrim parametreleri	36
Şekil 5.3	%90 benzin %10 hidrojen karışımı ve $\phi=1.0$ durumunda çevrim parametreleri..	36
Şekil 5.4	%90 benzin %10 hidrojen ve $\phi=0.8$ durumunda çevrim parametreleri	37
Şekil 5.5	%100 benzinli ve $\phi=1.0$ koşulu için yanma ürünleri analizi.....	38
Şekil 5.6	%90 benzin %10 hidrojen karışımı ve $\phi=1.0$ koşulu için yanma ürünleri analizi	39
Şekil 5.7	%90 benzin %10 hidrojen karışımı ve $\phi=0.8$ için yanma ürünleri analizi.....	40
Şekil 5.8	$\phi=1.0$ için performans ve emisyon değerlerinin karşılaştırılması.....	41
Şekil 5.9	$\phi=0.8$ için performans ve emisyon değerlerinin karşılaştırılması.....	42
Şekil 5.10	Hidrojen miktarının is oluşumuna etkisi.....	43
Şekil 5.11	Harici karışım teşkilli bir motorun kesiti.....	47
Şekil 5.12	Dahili karışım teşkilli bir motor kesiti ve püskürtme sistemi	51
Şekil 5.13	Hidrojen enjektörünün kesiti.....	52
Şekil 5.14	Hızlı tepki valfi.	52
Şekil 5.15	Hidrojenle çalıştırılan 2 stroklu bir Diesel motor kesiti.....	54
Şekil 6.1	Benzin, doğalgaz ve hidrojenin yakıt olarak kullanımının karşılaştırılması.....	56

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1	Çeşitli yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	9
Çizelge 4.1	Mevcut hidrojen depolama yöntemlerinin karşılaştırılması.....	24
Çizelge 5.1	Yakıt hücresi tipleri ve özellikleri.....	29
Çizelge 5.2	Yakıt hücresi tipleri uygulama alanları ve kullanılabilme tarihleri.....	30
Çizelge 5.3	Hidrojenle çalıştırılan motordan ölçülen değerler($\phi=0.4$ için).....	49
Çizelge 5.4	Hidrojenle çalıştırılan motordan ölçülen değerler($\phi=0.5$ için).....	50
Çizelge 5.5	Hidrojenle çalıştırılan motordan ölçülen değerler ($\phi=0.8$ ve 1.06 için).....	50



ÖNSÖZ

Bu tezi hazırlarken destek ve yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Orhan DENİZ'e, araştırmalarımnda yardımcı olan Araç. Gör. Tarkan SANDALCI'ya, konuyla ilgili araştırma yapan ve bilgilerini benden esirgemeyen başta Ballard, Linde AG ve MAN AG olmak üzere tüm firma ilgililerine teşekkür etmeyi bir borç bilirim.



ÖZET

Günümüzde taşıtlarda kullanılan fosil yakıtlar, gerek emisyonları, gerekse rezervlerinin yetersizliği nedeniyle gelecekte ihtiyaca cevap veremeyecektir. Bu sebeple yapılan alternatif yakıt arayışlarında, yüksek yanma hızı, geniş tutuşma aralığı, düşük ateşleme enerjisi ve en önemlisi teorik olarak sadece su buharı emisyonu vermesi gibi olumlu özellikleriyle hidrojen büyük avantaj sahibidir.

Hidrojen taşıtlarda direk olarak içten yanmalı motorlarda kullanılabilirdiği gibi, mevcut yakıtın zenginleştirilmesinde ve elektrik motorlu taşıtlarda yakıt hücrelerinde elektrik üretimi amacıyla kullanılabilir. İçten yanmalı motorlarda hidrojen kullanımında karşılaşılan erken tutuşma ve geri tutuşma gibi sorunlar, gelişmiş püskürtme sistemleri ve çeşitli modifikasyonlarla giderilmiştir. Ancak hidrojenin kullanılabilmesi için, mevcut yakıtlarla rekabet edebilecek üretim maliyetlerine ve gereksinimlere cevap verebilecek depolama tekniklerine sahip olmalıdır.

Mevcut ve geliştirilmekte olan hidrojen üretim ve depolama yöntemleri incelenmiş ve hidrojenin taşıtlarda kullanım yöntemleri hakkında bilgi verilerek daha önce yapılmış çalışma sonuçları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen depolama, hidrojen üretim, yakıt hücreleri, içten yanmalı motorlar, hidrojen katkısı.

ABSTRACT

It is clear that fossil fuels used in vehicles wouldn't satisfy the needs when emissions and reserves are considered. In alternative fuel researchs with its high flame speed, large ignition area, low ignition energy and particularly with emission of only water vapor, hydrogen has a great advantage.

Hydrogen can be used in fuel cells to produce electricity in electric powered vehicles and can be used in enrichment of existing fuel and can be used as primary fuel in internal combustion engines. Problems like backfire and preignition that occurs when operating with hydrogen can be altered by using advanced injection systems and some modifications. But hydrogen should have competitive production costs and satisfying storage technics.

Existing and advanced production and storage technics are examined and information on hydrogen's usage technics in vehicles are given with previous works.

Keywords: Hydrogen storage, hydrogen production, fuel cells, internal combustion engines, hydrogen blending.



1. GİRİŞ

Hidrojenin taşıtlarda yakıt olarak kullanılması düşüncesi çok eskilere dayanmakla beraber, çeşitli teknolojik güçlükler sebebiyle kullanımı gerçekleşmemiştir. Ancak son zamanlarda, özellikle çevresel bilinç, toplum baskısı ve mevcut yakıtların rezervlerinin orta vadede tükenecek olması nedeniyle başlayan alternatif yakıt arayışları neticesi tekrar gündeme gelmiştir.

Bu çalışmada, hidrojenin günümüzde taşıtlarda yakıt olarak kullanılabilme potansiyeli incelenmiştir. Hidrojenin kullanımını engelleyen faktörler olan üretim ve depolama teknolojileri incelenmiş, daha sonra hidrojenin taşıtlarda çeşitli kullanım yöntemleri ve bu yöntemler üzerinde yapılan çalışmalar ve sonuçları incelenmiştir.



2. ALTERNATİF YAKIT ARAYIŞLARI ve HİDROJEN

İnsanların yüz yıldan fazla bir süredir hayatlarına kolaylık getiren motorlu taşıtlar, hareketini sağlamak amacıyla mekanik enerjiye ihtiyaç duyarlar. Bu mekanik enerji ise, motor adı verilen ve ısı enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren bir enerji dönüştürücüsü tarafından sağlanır.

İçten yanmalı motorlar, yakıtın içindeki kimyasal enerji bağlarını ısı enerjisine ve açığa çıkan ısı enerjisini de mekanik enerjiye çevirmek suretiyle çalışırlar. Yakıt olarak ise gerekli ısıyı, içten yanmalı motor çalışma prensiplerini bozmayacak şekilde karşılayabilecek her madde kullanılabilir. Neredeyse motor tarihiyle denk bir şekilde, bu amaçla petrol türevi yakıtlar, zamanla değişime uğrayarak da olsa, kullanılmışlardır. Peki günümüzde tatmin edici performans ve oturmuş sistemi olan bu petrol türevi yakıtlara neden alternatif aranmaktadır? Bu sorunu iki ana kısımda inceleyebiliriz. Bunlardan birincisi çevresel etkiler, diğeri ise enerji kaynağı olan yakıtın temin edilebilirliğidir.

2.1 Taşıtların Çevresel Etkileri

Bugün, konuyla en ilgisiz kişiler bile çevrenin kirlendiğinden söz etmektedirler. Gerçekten de insanoğlu, sanayileşme ile birlikte artan bir şekilde dünyamızı kirletmektedir. Çok geniş bir konu olan çevre kirliliğine burada detaylı olarak değinilmeyecek, fakat taşıtlardan oluşan hava kirliliği incelenecektir.

Hava Kirliliği Nedir?

Hava kirliliği, havanın yapısının, doğal bileşiminde bulunan ana maddelerin değişmesi ya da yabancı maddelerin girmesi sonucu insan sağlığını etkileyecek, hayvan, bitki ve insan yapılarına zarar verecek şekilde bozulmasıdır. Hava kirliliğinin oluşmasında, meteorolojik ve topografik özellikler gibi doğal etkenler de rol alsada, esas etken yanma sonucu oluşan emisyonlardır.

Dünya'da toplam enerji ihtiyacının %70'lik bir kısmı, taşıtlarda ise %100'e yakın bir kısmı fosil kaynaklardan sağlanmaktadır. Bu yakıtlar temelde hidrojen ve karbondan oluşmuşlardır. Yakıtın yanması, yakıtın içindeki yanabilen elemanlar ile havanın oksijeni arasında yüksek hızda oluşan kimyasal reaksiyonlardır. İdeal yanma prosesinde, hava

içindeki oksijen (O_2), karbonla birleşerek karbondioksit (CO_2), ve hidrojenle birleşerek su buharı (H_2O) oluşturur. Havadaki azot ise reaksiyona girmeyecektir. Ancak yanma sıcaklığının etkisiyle azot oksitler (NO_x) meydana gelmektedir. Bu reaksiyon sonucu, motorda mekanik enerjiye çevrilmek üzere ısı açığa çıkar. Bu olay, dediğimiz gibi, tam yanma durumunda gerçekleşir.

Ancak yanma, yukarıda anlatıldığı gibi tam olarak gerçekleştirilememektedir. Motorda, yanma için gerekli karışım olan yakıt/hava karışımı oranında yakıtın gerekenden fazla olması durumunda fazlalık kısım tam yanmayacak ve yanma sonucu CO_2 ve H_2O yanında CO (karbonmonoksit) ve HC (hidrokarbonlar, yanmamış yakıt molekülleri) oluşacaktır. Yakıt/hava karışımı ideal şartlarda ayarlanırsa bile, yakıt ve havanın tam karışmaması dolayısıyla zengin ve fakir karışım bölgeleri oluşabilir ve yanma tam gerçekleşmeyebilir. Ayrıca yakıt içindeki kükürt ve çeşitli nedenlerle eklenen katkı maddeleri de yanma sonucunda kirletici olarak karışımıza çıkmaktadırlar. Ancak, taşıtlardan kaynaklanan kirlenme sadece yanma sonucunda oluşmaz. Yakıtın, motorda, depoda, besleme hattında ve doldurma sırasında oluşan buharlaşması da kirlilik yaratır.

Bütün bu nedenlerle oluşan başlıca kirleticiler şunlardır:

- Yanmamış hidrokarbonlar (HC)
- Karbonmonoksit (CO)
- Azot Oksitler (NO_x)
- İs (yanmamış karbon tanecikleri) ve partiküller (metaller, sıvı yağ ve yakıt tanecikleri)
- Kükürt dioksit (SO_2)
- Kurşun bileşikleri

CO, kokusuz ve renksiz, çok zehirli bir gazdır. Atmosferde çok uzun süre kalma özelliğine sahiptir. Kana oksijen taşıma görevine sahip hemoglobine bağlanarak akciğerden vücut dokularına oksijen taşınmasını bozar.

HC, kötü kokulu ve tahriş edici maddelerdir. Solunum yollarındaki mukozayı (iç tabakayı) tahriş eder ve bayıltıcı etkiye sahiptirler. Ayrıca kanserojendirler. Gaz halindeki hidrokarbonlar güneş ışığı altında azot oksitlerle birleşerek fotokimyasal sis oluştururlar. Bu tabaka gözlerin yanmasına ve solunum sisteminin etkilenmesine sebep olurken aynı zamanda bitkiler için de zararlıdır.

NO_x, CO gibi kandaki hemoglobin ile birleşmektedir. Yüksek konsantrasyonlarda öldürücü olmakla beraber genelde çok düşük konsantrasyonlarda bulunduğundan akciğer ve solunum sistemine olumsuz etkileri vardır. En önemli zehirleyici etkisi ise ciğerde nemle birleşerek nitrik asit oluşturmasıdır.

Kükürtdioksit (SO₂), renksiz ve keskin kokulu bir gazdır. Fotokimyasal ve katalitik reaksiyonlar ile sülfirik asit ve bunun tuzlarına dönüşür. SO₂, üst solunum yollarında keskin, boğucu, tahriş edici özelliğe sahiptir.

İs ve partiküller, insan vücudunda birikerek solunum sistemine zarar vermektedir.

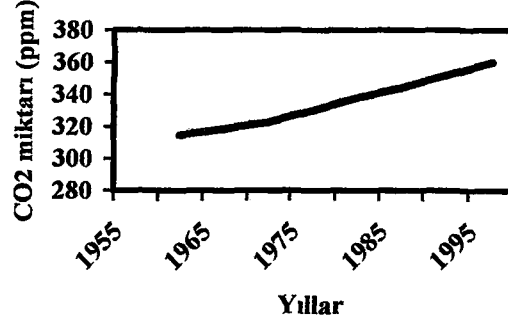
Kurşun bileşikleri, solunum yoluyla vücuda girer ve beyin ve böbrek gibi organlarda birikerek sinir sistemi ve böbrek fonksiyonunu olumsuz etkiler.

Tüm bu olumsuz ve tehlikeli özelliklere sahip emisyonların önemi uzun yıllardır anlaşılmış olup, motorlu taşıtlarda bu emisyonları azaltmak ve yok etmek için çeşitli tedbirler alınmıştır. Bu amaçla, gerek yanma özellikleri iyi, gerekse toksik maddeleri az olan alternatif yakıt arayışlarına gidilmiş ve doğal gaz, LPG, metanol ve geliştirilmiş benzin gibi yakıtlar kullanılmaya başlanmıştır. Mevcut yakıtlar için gerek yanma öncesi, gerekse yanma sonrası emisyon kontrolleri geliştirilmiştir. Örneğin, günümüzde son derece gelişmiş yakıt kumanda sistemleri ile gerekli yakıt/hava karışımı mükemmel bir şekilde sağlanmakta, buna rağmen oluşan emisyonlar, katalitik konvertörler yardımıyla zararsız bileşikler haline getirilmektedir.

Ancak bu halde bile, ve mükemmel yanma durumunda bile, açığa CO₂ (karbondioksit) çıkmaktadır. İçinde karbon olan her yakıtın yanması sonucu CO₂ oluşacaktır. Bu gaz, atmosferde çok biriktiği zaman, güneşten gelen enerjinin, ısı şeklinde yansımalarını engeller (tıpkı bir seranın camı gibi) ve yeryüzüne geri gönderir. Böylece devamlı surette bir ısı birikmesi oluşur. Bu olaya yukarıdaki benzetmeden ötürü sera etkisi denir.

Bu olayın sonucunda, dünya sıcaklığı giderek artmaktadır. Bu sıcaklık artışının olumsuz iklim değişiklikleri (kuraklık, buzulların erimesi ve deniz seviyelerinin yükselmesi vb) yaratacağı iddia edilmektedir. Amerikan Çevre Koruma Ajansı (EPA) verileri, dünya ortalama sıcaklığının 1940'lara göre 0.4°C, 20.yy başına göre ise yaklaşık 1°C arttığını

göstermektedir. Bu sıcaklık artışı, atmosferdeki CO₂ artışıyla beraber artmakta, atmosferdeki CO₂ konsantrasyonu ise her geçen yıl artmaktadır. Amerikan Çevre Koruma Ajansı EPA tarafından yayınlanan, atmosferdeki CO₂ konsantrasyonun yıllara göre değişimi Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1.- Yıllara göre atmosferdeki CO₂ konsantrasyonu.(2)

Buradan görülmektedir ki, her ne kadar insan sağlığına direk olarak zararlı olan emisyonlar azaltılsa da, dünya için büyük tehdit oluşturan CO₂ konsantrasyonu, içinde karbon bulunan yakıtlar kullanıldığı sürece oluşacaktır.

2.2. Dünya Fosil Yakıt Rezervleri Durumu

Günümüzde fosil enerjiye bağımlılık ve bu enerjinin dünyadaki rezerv durumu sınırlı bir bilim çevresi dışında ne kamuoyunda ne basında ne de çevre örgütlerinde gerektiği önemi görememektedir. Bu çevrelerde, fosil kaynakların sınırlı kaynaklar olduğu, ancak birkaç on yıl için bir sorun olmadığı, gelecekte ise bu sorunun bir şekilde çözüleceği inancı vardır. Bu inancın başlıca nedenlerinden biri, dünyada şimdiye kadar yaşanan iki büyük petrol krizinin birkaç yılda aşılabilemiş olmasıdır. Ancak bu yaklaşım, ağır hasta birinin iyileştikten sonra hiç ölmeyeceği inancına kapılması gibi saçma bir inanıştır.

Kısıtlı doğal rezervlerin kullanılmasının engellenmesi ve bu kaynakların kontrolsüzce kullanımının engellenmesi, sürdürülebilir bir ekonomik gelişmenin iki temel bileşenidir. Son zamanlarda ikinci argüman, enerji tartışmalarında, uluslararası konferanslarda tartışılmakta ve genelde herkes tarafından gerekliliği kabul edilmektedir. Fakat rezervlerin sınırlılığı, toplumda yeterli önemi almamasıyla gizli bir tehlike olarak beklemektedir. Bu yüzden tartışmalar rezervler üzerine değil, çevresel etkiler üzerine yoğunlaşmaktadır.

Buna karşılık, özellikle petrol konusunda, rezerv problemi son derece önemli bir hale gelmiştir, ve yakın bir gelecekte tartışmaların sadece emisyonlar ve çevresel etkileri ile sınırlı kalmayacağı açıktır.

Bu konuda çalışma yapan ve kamuoyunun dikkatini bu konuya çekmeye çalışan uzmanların araştırmalarına göre, sanıldığı gibi aksine yakın gelecekte yine petrol krizleri gündemde olacaktır. Her ne kadar gelecekle ilgili kesin yargılara varılamasa da önümüzdeki 20 yılın son 20 yıl gibi çalkantılı olması beklenmektedir.

Petrol kullanımından itibaren uzunca bir süre, dünya petrol rezervleri ve bu rezervlerin insanoğluna ne kadar yeteceği ile ilgili bir düşünce yoktu. Bilinen ilk çalışma 50'li yılların ortalarında ABD'li M. King Hubbert tarafından yapılmıştır. Hubbert ayrıca, dünya petrol tüketim eğrisinin çan şeklinde olduğunu iddia eden ilk kişidir. Çan şeklindeki tüketim eğrisi bugün bu konuyla ilgilenen uzmanlarca kabul edilmiş bir teoridir. Bu düşünceye göre, petrol kullanımı, dolayısıyla üretimi, zamanla artacak ve rezervlerin yarısı tüketildiğinde maksimuma ulaşacak ve sonra azalmaya başlayacaktır. Hubbert, 1974'te yaptığı ikinci çalışmada, o zamanki 200 milyar varil kullanılabilir rezerv bilgisiyle, petrol üretiminin 1995'te maksimuma ulaşacağını iddia etmiştir (1).

Halkın ilgilendiği ve büyük çapta tartışılan ilk çalışma, 1972 yılında Roma Klubü tarafından yapılmıştır. Oldukça sınırlı ve hatalı bir çalışma sonucu, 20 yıllık rezerv olduğu sonucuna varılmıştır. Bu hatalı sonuç, kamuoyunun bu konuya olan bugünkü yaklaşımının sebeplerinden biridir.

Kamuoyunun ilgisini çeken ve tartışılan diğer bir çalışma, 1980 yılında ABD başkanı Carter tarafından oluşturulan Amerikalı bilim adamlarının hazırladığı "Global 2000" adlı bir araştırmadır. Bu araştırmada, yeni petrol kaynaklarının bulunmasının hızının azaldığı ve petrol üretiminin maksimum değerine milenyum sonunda, yani 2000 yılı civarında ulaşacağı iddia edilmiştir. Bu çalışmadaki hatalar, 1974'te Hubbert'in yaptığı hatalarla aynıdır, yani petrol krizleri sonrası oluşan tüketim azalması ve buna karşılık, eski doğu bloku ülkelerindeki ve diğer kalkınmakta olan ülkelerdeki kalkınma neticesi tüketim artışı, bu çalışmalarda öngörülmemiştir.

1980'den 1995'e kadar, kamuoyu, objektif çalışmalar tarafından değil, petrol şirketlerinin raporları tarafından aydınlatılmıştır. Bu raporların ise ne kadar doğruyu yansıttığı bilinemez.

Uzun bir aradan sonra 1995 yılında, “Dünya Petrol Rezervleri 1920-2050” adlı çalışma, petrol rezervleri hakkında yapılan tarafsız bir çalışma olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışma, 100.000’den fazla petrol alanı kullanılması ve bu alanda çalışma yapan uzmanlar tarafından hazırlanmış olması nedeniyle yapılan en kapsamlı araştırmadır. Bu çalışma sonuçları incelendiğinde, şaşırtıcı bir biçimde, Hubbert’in ve Global 2000 çalışmasının sonuçlarının uyum içinde olduğu görülmektedir (1).

Açıklanan petrol rezervleri incelenecek olursa, 98 yılı verileriyle, 400000’den fazla bilinen petrol yatağı mevcuttur. Ancak bu yatakların %1’inden az bir kısmı, toplam rezervin neredeyse %75’ine sahiptir. Sadece iki yatakta bulunan 50 milyar varil rezerv, tüm dünya rezervinin %5’ini ifade etmektedir (1).

Zaman içinde petrol rezervlerinin bulunmasını inceleyecek olursak da oldukça ilginç sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Çok büyük rezervler, onyıllarca yıl önce keşfedilmiştir. Bugün üretilen petrolün %80’i 30 yıl veya daha fazladan beri bilinen kuyulardan çıkarılmaktadır. 1960’larda, bulunan petrol miktarı maksimum yapmıştır (1). Yaşanan iki büyük krizden sonra artan arama çalışmalarına rağmen, petrol bulma oranı giderek azalmıştır.

1995 yılındaki çalışmayı hazırlayan Petroconsultants’in verilerine göre, 1996 yılı itibariyle günümüze kadar üretim 784 milyar varil, bilinen rezervler 836 milyar varil, bulunması olası rezerv 180 milyar varildir (1). Bu verilerin ışığı altında, şu günlerde, çıkarılabilir toplam rezervin yarısını tüketmiş durumdayız. Önümüzdeki yıllarda, yıllık petrol üretim değeri düşecektir.

Petrolün yarısının tükendiği andan sonra ne olacağı konusunda çan eğrisinden yola çıkılarak yıllık üretimin giderek azalacağını söylemiştik. Örneğin, Almanya’da pik üretimin gerçekleştiği 1968’de, Almanya’nın rezervlerinin üretime olan oranı neticesinde 11 yıllık rezervi olmasına rağmen, bugün Almanya’nın üretimi 1968 yılındakinin %40’ından daha aşağılara düşmüştür. Aynı şekilde Amerika’da pik üretim 1971 yılında yaptıktan sonra yıllık üretim düşmüş, Alaska’da bulunan petrolün etkisiyle 1985’de ikinci pikini yapmıştır ve üretim tekrar düşüşe geçmiştir. Bu üretim düşüşünü karşılamak için ABD kotalarını %30’dan %50’e çıkarmak zorunda kalmıştır.

Günümüzde, rezervlerin üretime oranı baz alındığında 40 yıldan biraz fazla bir petrol rezervi bulunmaktadır. Bu ise talebin hiç artmaması durumunda gerçekleşecektir. Ancak en basit şekilde, her zaman olan fiyat dalgalanmalarının yanında, üretimdeki azalmadan ötürü ortalama fiyatlar yükselecektir. Almanya ve Amerika örneğindeki gibi, azalmayı ithalat yoluyla karşılayamayacağımıza göre, petrol yerine uygun enerji kaynakları kullanımı yolu araştırılmalıdır.

2.3. Alternatif Yakıt Olarak Hidrojen

Önceki konulardaki bilgilerin ışığında, hem emisyon gereksinimini karşılayan hem de fosil yakıtlara bağlılığı ortadan kaldıracak bir yakıt olan hidrojen adeta yeniden keşfedilmiştir. Çünkü 20 yy'nın başlarına kadar, içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılması belki bugünkünden çok tartışılan hidrojen, gerek günün teknolojisinin üretim ve depolama yönünden güçlükler doğurması, gerekse Hindenburg zeplin kazasının, hidrojen kullanımının güvensiz olduğu yönünde bir yargı oluşması nedeniyle gündemden çıkmıştı.

2.3.1. Hidrojenin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Hidrojen renksiz ve kokusuz bir gazdır. Özgül kütlesi 0.899 g/l'dir Hidrojen -252.77°C 'da kaynamaya başlar. Sıvı hidrojenin özgül kütlesi 70.99 g/l dir. Bu özellikleriyle hidrojen, tüm yakıtlar içinde en yüksek enerji/ağırlık oranına sahiptir. 1 kg hidrojen 2.1 kg doğal gaz veya 2.8 kg benzinle aynı enerji miktarına sahiptir. Fakat enerji/hacim oranı benzinin 1/4'ü ve doğal gazın 1/3'ü mertebesinde dir. Suda, ağırlıksal olarak %11.2 hidrojen vardır.

Hidrojen havayla, 4-75% hacimsel oranlarında yanar. Çok geniş yakıt karışım oranını ifade eden bu değer, hidrojenin motorlarda kullanımı için avantaj sağlayacak en önemli özelliklerindedir. Benzin için hava fazlalık katsayısının 0.3-1.7 değerleri arasında tutuşma sağlanabilmekteyken hidrojen için bu değer aralığı 0.14-4.35'dir. Metan için aynı değer aralığı 0.6-1.9'dur.

Hidrojenin en yüksek yanma sıcaklığı olan 2318°C , %29 hacimsel hidrojen/hava karışımında elde edilir. Fakat oksijen ile yakılma durumunda sıcaklık 3000°C 'a kadar çıkabilmektedir. Bu maksimum sıcaklık değeri, diğer yakıtlarda da hemen hemen bu civardadır.

Hidrojen için stokiyometrik yakıt/oksijen karışımını tutuşturmak için gerekli minimum enerji 0.02 mJ'dür. Bu değer doğalgazın tutuşma enerjisinin onda biri kadardır. Bu düşük değer, tutuşma garantisi bakımından avantaj sağlamakla beraber, ileriki konularda incelenecek erken tutuşma, geri tutuşma gibi çeşitli sorunları da yaratmaktadır.

Çizelge 2.1.- Çeşitli yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri (Sarca, 1988).

		Hidrojen	Metan	Metanol	Etanol	Benzin
		H ₂	CH ₄	CH ₃ OH	C ₂ H ₅ OH	C ₈ H ₁₈
C/H oranı		0	0.25	0.25	0.33	0.56
Molekül ağırlığı	Kg/mol	2.02	16.04	32.04	46.07	91.40
Özgül kütle	Kg/m ³ sıvı	0.07	0.424	0.79	0.79	0.73
Özgül kütle	Kg/m ³ gaz	0.084	0.78	-	-	-
Isıl değeri	MJ/kg	119.93	50.8	20.1	26.9	43.4
Isıl değeri	MJ/l	8.41	20.8	15.9	21.3	31.8
Buharlaştırma ısısı	MJ/kg	0.447	0.509	1.102	0.856	0.272
Tutuşma sınırı	%hacim	4.1-74	5-15.4	6-37	3.5-19	1.3-7.6
Hava fazlalık katsayısı		0.15-4.35	0.59-2	0.24-2.22	0.29	0.26-1.67
Alev hızı	M/s	2.91	0.37	0.52	-	0.37
Alev sıcaklığı	K	2383	2227	2151	2197	2266
Difüzyon katsayısı		0.61	0.16	-	-	0.08
Kaynama noktası	K	20.65	117.7	338.1	351.7	305
Donma noktası	K	14	-	175.4	155.9	217
Oktan sayısı	ROS	130	130	110	106	91-100
Oktan sayısı	MOS	-	105	87	89	82-94

Hidrojenin patlama bölgesi 13%-59% aralığı içindedir. Bu aralık diğer yakıtlarla kıyaslandığında oldukça fazladır. Hidrojenin difüzyon katsayısı 0.61 değerindedir ve metanla karşılaştıracak olursak 4 kat daha fazladır. Bu özelliği sayesinde hidrojen hava ile daha hızlı bir şekilde karışmakta, daha düzgün bir karışım teşkili sağlanabilmektedir. Fakat bu özellik havalandırılmayan bölgelerde yüksek riskler taşımaktadır.

Hidrojenin yanma hızı da oldukça yüksektir. Stokiyometrik karışım oranlarında hidrojen hava karışımlarının yanma hızı, benzin hava karışımlarının yaklaşık 7-8 katı kadardır.

Yüksek difüzyon katsayısı ve yanma hızı sayesinde karışım teşkili daha düzgün ve yanma daha hızlı olacağı için motordan ısı kaybı azalacak, dolayısıyla motorun termik verimi artacaktır.

Ancak, bütün bu pozitif özelliklerine rağmen hidrojenin günümüzde taşıtlarda kullanılmamasının en önemli sebeplerinden biri, ekonomik anlamda mevcut yakıtlarla üretim ve depolama yönünden rekabet edememesidir. Üzerinde yoğun çalışmalar devam eden bu alanlarda elde edilen ilerlemeler yakın gelecekte hidrojenin taşıtlarda kullanılmasına olanak sağlayacaktır.



3. HİDROJEN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Hidrojen doğada saf halde bulunmayıp, diğer elementlerle bileşik halinde bulunduğu için, hidrojenin bir enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi için önce enerji kullanılarak üretilmesi gerekmektedir. Burada, hidrojenin üretiminde kullanılan enerjiyi en basit şekilde birincil enerji kaynaklarından ve ikincil enerji kaynaklarından olacak şekilde ikiye ayırabiliriz.

Birincil enerji kaynaklarıyla üretim, fosil yakıtların reformasyonu ve kömürün ve ağır fuel-oilin kısmi oksidasyonudur. Bunların dışında araştırma geliştirme aşamasında olan birçok yöntem mevcuttur. Bunların başında biyokütle gazlaştırılması gelmektedir, bunun yanında güneş ışığına maruz bırakılan mantarlar ile üretim de kayda değer ilerlemeler kaydetmiştir. Ancak sadece biyokütle gazlaştırılması, yakın gelecekte piyasada mevcut yöntemlere rekabet edebilecek olan yöntem olarak görülmektedir.

Halihazırda, hidrojen üretiminde ikincil enerji kaynağı olarak sadece elektrik kullanılmaktadır. Bu, suyun elektrolizi ile veya klorin-alkalin elektrolizinin yan ürünü olarak gerçekleşmektedir. Gelecekte kullanılma potansiyeli olan diğer bir ikincil enerji kaynağı metanoldür ve taşıtlarda metanolün reformasyonu ile hidrojen üretimi, yakın gelecekte bu alanda rol oynayabilir.

3.1. Fosil Yakıtlardan Üretim

Dünyada üretilen yaklaşık 500 milyar Nm³ hidrojenin çok büyük bir kısmı, fosil yakıtlar kullanılarak üretilmektedir. Ancak, orta ve uzun vadede hidrojen, enerji piyasasında önemli bir paya sahip olduğunda, önceki konularda incelenen sebeplerden ötürü, fosil yakıtlardan büyük miktarlarda hidrojen üretimi mümkün olmayacaktır. Bunun yerine, elektrik kullanımı gibi temiz ve modern yöntemler büyük potansiyele sahiptir.

3.1.1. Mevcut teknolojiler

a- Hafif hidrokarbonların buhar reformasyonu

Buhar reformasyonu, metandan benzine kadar hafif hidrokarbonların su buharı ile endotermik, katalitik dönüşümüdür. Bu işlem genelde 850°C sıcaklık ve 2.5 Mpa basınç altında aşağıdaki denklik uyarınca gerçekleşmektedir.



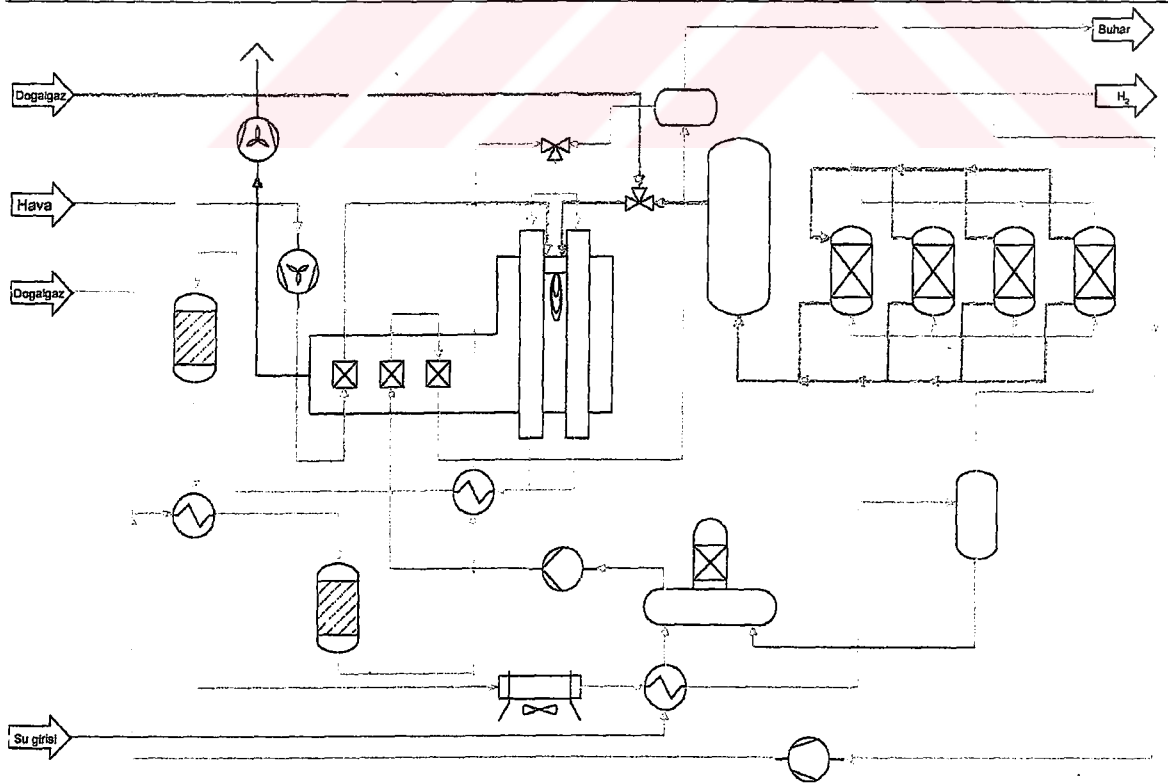
Çıkan karbonmonoksidin ekzotermik katalitik dönüşümü aşağıdaki denklik uyarınca saf hidrojen meydana getirmektedir.



Emme veya membran ayırmasıyla karışımdaki karbondioksit alınmaktadır. Bu yöntem, kendini kanıtlamış ve sıkça kullanılmakta olan bir yöntemdir. Bir buhar reformasyon tesisinde yaklaşık 100,000 Nm³/h kapasitesinde üretim yapılmaktadır.

Bu yöntemde, LPG, nafta, doğalgaz gibi hafif hidrokarbonlardan hidrojen elde etmek mümkünse de en çok doğalgaz bu amaçla kullanılmaktadır. Bu işleme ait bir tesisin şeması şekil 3.1'dedir.

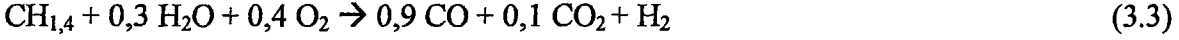
Yıllık 800 milyon Nm³ hidrojen üretebilen bir tesisin yaklaşık kuruluş maliyeti desülfirizasyon, CO dönüşüm, temizleme ve egzost gazı kullanımı dahil 1999 fiyatlarıyla 200 milyon DM'dir. İşletme ve diğer giderler de hesaba katılırsa hidrojen üretim birim maliyeti yaklaşık 0,20 DM/Nm³ H₂ dir (Linde AG; Wurster, 1997).



Şekil 3.1.- Reformasyon tesis şeması (Linde AG).

b- Ağır Hidrokarbonların Kısmi Oksidasyonu

Kısmi oksidasyon, ağır hidrokarbonların (ham petrolün rafinasyonu işlemi sırasında açığa çıkan artıklar) oksijen ve buhar yardımıyla ekzotermik veya ototermal dönüşümü işlemidir. Oksijen ve su buharı miktarı, işlem ototermal olacak şekilde, yani dışarıdan bir enerji girişine gereksinim duyulmayacak şekilde kontrol edilmektedir. Reaksiyonun denklemi aşağıdaki gibidir.



Teknik olarak kendini kanıtlamış bir yöntemdir ve endüstriyel tesislerde yaklaşık 100,000 Nm³/h kapasitesinde üretilebilmektedir. Önceki yöntemde de açıklanan teknik özelliklere sahip, yılda 280,000 ton ağır yakıttan yıllık 800 milyon Nm³ hidrojen üretebilen bir tesisin yatırımı için gerekli miktar 1999 yılı fiyatlarıyla yaklaşık 300~350 milyon DM'dir. İşletme ve finansal giderler de hesaba katıldığında hidrojen üretim birim maliyeti yaklaşık 0,25 DM/Nm³ civarında olmaktadır (Linde AG; Wurster, 1997).

c-Kömürün Kısmi Oksidasyonu

Kömürün hazırlanması dışında, proses işlemleri yukarıda anlatılan yöntem olan ağır hidrokarbonların kısmi oksidasyonu ile tamamen aynıdır. Burada sadece, kömür, pompalamaya uygun hale gelmesi için, toz haline getirilip su ile karıştırılır ve %50~70 katı içerikli karışım oluşturulur. Bu yöntem, araştırma geliştirme amaçları dışında, zengin kömür rezervlerine sahip Güney Afrika Cumhuriyeti ve Çin gibi ülkelerde kullanılmaktadır.

Bu amaçla kurulacak bir tesisin yatırım maliyeti, yılda 500,000 ton kömürden 800,000 Nm³ hidrojen üretebilmek için, yaklaşık 450~500 milyon DM'dir. İşletme ve finansal giderler de gözönünde bulundurulursa hidrojen üretim birim maliyeti, 1999 yılı fiyatlarıyla, 0,30 DM/Nm³ olacaktır (Wurster, 1997; LBST).

3.1.2. Geliştirilmekte olan teknikler

a- Doğal Gaz veya Ağır Fuel Oilden Elektrik ile Hidrojen Üretimi

1980'lerin başında geliştirilmeye başlanan ve geliştiren şirketin ismiye, Kvaerner metodu olarak bilinen bu yöntemde hidrokarbonlar, plazma-ark prosesi denen bir işlemle 1600° C sıcaklığında, saf karbon ve hidrojene ayrılmaktadır. Önemli hiçbir emisyon oluşmayan bu yöntemin birincil enerji kaynağı olan doğal gaz veya ağır fuel oil dışında gereksinimi sadece elektrik ve soğutma suyudur. Norveç'te 1992 yılında kurulan deneme tesisinde, 1000 Nm³/h doğal gazdan, 2100 kWh elektrik kullanılarak 2000 Nm³/h hidrojen ve 500 kg/h saf karbon üretilmiştir. Proses sonucu yaklaşık 1000 kW yüksek sıcaklıkta buhar açığa çıkmaktadır. Elde edilen ürünlerin tamamının, buhar dahil, kullanım potansiyeli olan ürünler olduğu düşünülürse, tesis neredeyse %100 verimle çalışmaktadır (Wurster, 1997; LBST; 4).

Deneme çalışmaları yürütülen bu sistemin, 20 üniteye çıkarılarak 100000 Nm³/h kapasitesinde üretim yapması planlanmaktadır. Ünite başına 6 milyon Nm³ üretmesi planlanan bu tesisin yatırım maliyeti yaklaşık 300 milyon DM olarak hesaplanmaktadır (Wurster, 1997; LBST; 4).

b- Küçük Kısmi Oksidizerler ve Reformerler

Küçük reformerler ve kısmi oksidizerler, yakıt hücreleri sistemleri için geliştirilmektedirler. Bu sistemler küçük stasyonel sistemler için ve özellikle taşıtlar için düşünülmektedir. Kimyasal denklem eşitliğine göre, doğal gaz reformerleri, dizel veya metanolün kısmi oksidizerlerine göre oldukça yüksek sıcaklıklarda çalışmak zorundadırlar. Bu yüzden bu prosesin daha düşük maliyette gerçekleştirilmesi, küçük doğal gaz reformerine göre daha kolay olacaktır (LBST).

Mobil uygulamalarda, yüksek enerji yoğunluğu ve sıvı yakıtın klasik yöntemlerle depolama kolaylığı, yakıt hücreleri için hidrojen temininde bu yöntemin kullanılabilme potansiyelini arttırmaktadır. Bu bağlamda, motorin ve metanolün reformasyon veya kısmi oksidasyonu çok önemli bir rol oynamaktadır.

3.2. Biyokütleden Üretim

Biyokütle, ağaç, zirai artıklar ve ürünler, hayvansal dışkıları vs gibi organik maddelerdir. Halihazırda ticari olarak bu yöntem kullanılmamaktadır. Değişik üretim metodları için biyokütleden hidrojen elde edilmesi, değişik araştırma-geliştirme aşamasındadır. Bu yöntemler: katı biyokütleden üretim, biyolojik hidrojen üretimi ve sıvı gübrelerin fermentasyonu (mayalanması) dır. Biyokütleden direk hidrojen üretiminin avantajı, elektroliz kullanmadan yenilenebilir kaynaklardan faydalanılabilmesi, böylece daha yüksek sistem verimi ve elde edilen olumlu genel sonuçtur.

a- Biyokütlenin Buharla Gazlaştırılması

Biyokütleden ısı bozunma (piroliz) ve gazlaştırma yöntemiyle hidrojen elde edilebilir. İlk aşamada kok, metanol ve primer gazlar elde edilmektedir. İkinci aşamada oksijen (hava) veya buharla temas neticesi %20 hidrojen, %20 karbonmonoksit (CO), %10 karbondioksit (CO₂) ve yaklaşık olarak %5 metan (CH₄) ve %45 azottan (N₂) oluşan bir karışım elde edilir. Hava yerine saf oksijen veya buhar kullanılması durumunda azot bileşeni olmayacaktır. Bu gaz karışımının hidrojen zengin karışım haline getirilmesi, kullanılan ilk maddeye göre, katılar için gazlaştırma, sıvılar için reformasyon ile gerçekleştirilir. Hidrokarbonların buhar ile endotermik reaksiyonu hidrojen zengin sentetik gazlar oluşturur. Prosesteki hidrojen yüzdesi, basınç ve sıcaklık parametrelerinin etkisi altındadır. Gerçek anlamıyla gazlaşmadan önce organik madde, ısının etkisiyle önce koka dönüşür, yoğunlaşır ve gazlaşır. Bu ilk aşama işlemi çözünme veya bozunma (piroliz) olarak adlandırılır. İşlem esnasında ortamda oksijen mevcudiyeti, ara ürünlerin reformasyonundan çok kısmi oksidasyonuna sebebiyet verir.

Kömürün gazlaştırılması yönteminde sahip olunan tecrübe göz önüne alındığında bir veya iki yıl içinde bu metodun ticari anlamda kullanılabileceği düşünülmektedir. Günde 100 ton kapasiteli, oksijen takviyeli ototermal odun gazlaştırıcı sistemi halihazırda geliştirilmiş bulunmaktadır (Wurster, 1997; LBST).

b- Biyolojik Hidrojen Üretimi

Hidrojenin açığa çıktığı veya ara kademe ürünü olarak olduğu birçok biyolojik proses vardır. Temelde bu prosesler ikiye ayrılır: 1- Fotosentez, ki bu işlem için ışık ortamı

gereklidir. 2- Fermentasyon, ki bunun için ise karanlık gereklidir. Bu yöntemler hala geliştirme safhasının oldukça başındadırlar. Şu an için, fotosentez prosesinde, yosun-bakteri sistemi kullanımı en uygun çözüm gibi görülmektedir. Araştırmalar, bu yöntemle $0,25 \text{ DM/Nm}^3 \text{ H}_2$ birim üretim maliyetinin de altında üretim yapılabileceğini göstermektedir. İki yıl içinde teknik sorunların çözülüp ticari destek bulması beklenmektedir. Fakat ticari anlamda hazır olması yaklaşık bir 8~10 yıl alacaktır (Wurster, 1997; 4).

3.3. Elektrikten Üretim (Elektroliz)

Sudan hidrojen elde etme yöntemleri arasında elektroliz, halihazırda tek önemli yöntemdir ve gelecekte de öyle olacaktır. Suyun elektrolizi ticari olarak 80 yıldan beri gerçekleştirilmektedir.

80'lerin sonlarına kadar, elektrolizle hidrojen üretimi yaklaşık yıllık $0,5\sim 1$ milyar Nm^3 seviyelerindeydi, ki bu da toplam hidrojen üretiminin yaklaşık % $0,1\sim 0,2$ 'sine tekabül etmekteydi. Ancak bu küçük oran bile son yıllarda düşme eğilimine girmiştir, çünkü elektroliz yöntemi, maliyetler nedeniyle diğer yöntemlerle rekabet edemez hale gelmiştir. Hidrojenin elektroliz ile üretimi, ikincil enerji olan elektrik enerjisini kullanarak endirek olarak üretildiği için, elektriğin çok ucuza üretildiği koşullarda avantajlı olmaktadır. Bu ise günümüzde büyük hidroelektrik potansiyelinin (örneğin Norveç, Kanada ve Brezilya gibi ülkelerde), veya nükleer ağırlıklı mevcut güç santrallerinin fazla enerjisinin kullanılabilmesi potansiyelinin (Fransa, Belçika, İsviçre gibi) olması anlamına gelmektedir. Ancak ileride, yenilenebilir kaynakların rekabet edebilir duruma gelmesiyle, depolama potansiyeli olan ikincil enerji hidrojenin bu kaynaklardan elektroliz yardımıyla üretilmesi daha avantajlı olacaktır. Zaten hidrojenin taşıtlarda kullanılabilmesi projesinin bir bölümü de bu senaryo üzerine dayandırılmaktadır.

Suyun elektroliz ile ayrıştırılması, iki elektrodta gerçekleşen iki kısmi reaksiyondan oluşur. Elektrodlar iyon geçirebilen bir elektrolit ile ayrılmıştır. Hidrojen negatif elektrodta (katod), oksijen de pozitif elektrodta (anod) oluşmaktadır. Yük değişimi iyonların hareketi ile sağlanır. Üretilen gazları ayırmak için iki reaksiyon bölgesi iyot geçirmeyen bir diyafram ile ayrılmıştır. Suyun ayrılması için gerekli enerji elektrik ile karşılanmaktadır.

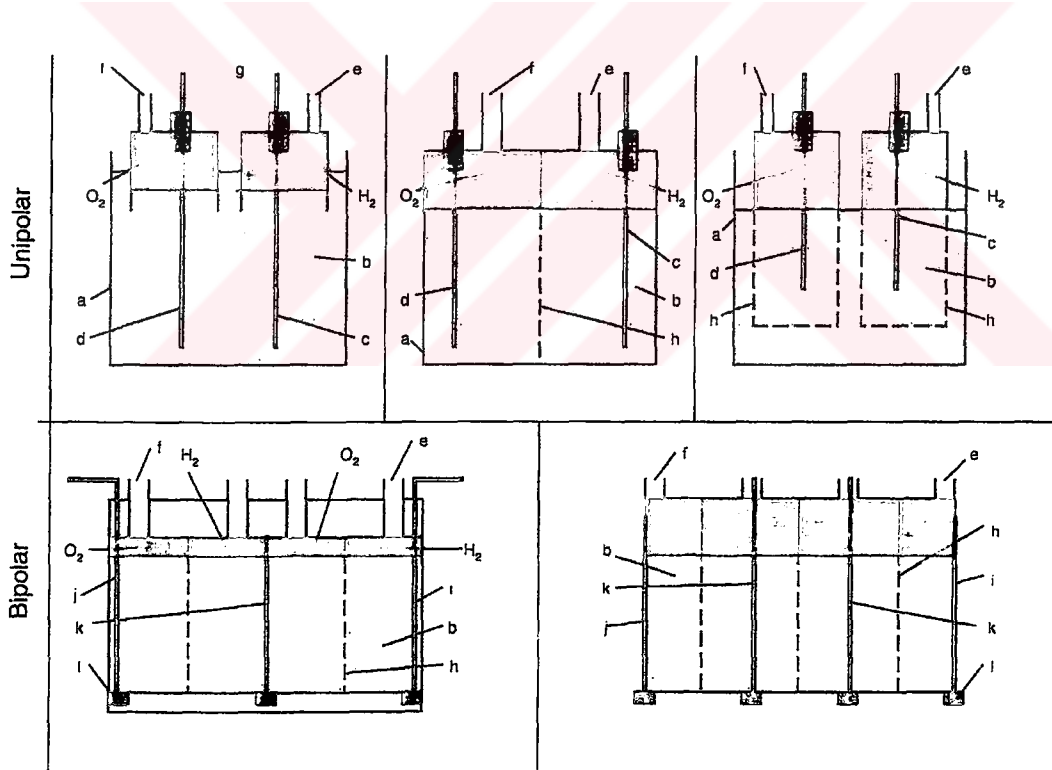
Genel elektroliz mantığı yukarıda açıklanmıştır. Bundan sonra ise özel olarak hidrojen üretiminde kullanılan elektroliz prosesleri açıklanacaktır.

3.3.1. Mevcut teknikler

a- Klasik Su Elektrolizi

Klasik alkalın elektrolizinde elektrolit olarak su kullanılmaktadır. Katod ve anod bölgeleri mikro delikli bir diyafram ile ayrılmıştır. Bu diyaframın yerine geçmişte asbestli diyafram kullanılmaktaydı. Yaklaşık 0,2~0,5 MPa çıkış basınçları ile bu yöntemin verimi %65 seviyelerine kadar ulaşabilmektedir. Yeni üretilen diyafram ve membranlar, daha iyi kapanma özellikleri nedeniyle mevcut malzemelere göre dalgalı enerjide daha iyi sonuçlar vermektedir. Bu özellik, özellikler yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının bu yöntemde kullanılabilmesine olanak vermektedir (Linde AG).

Tek bir sistemin kapasitesi, artan elektrod yüzey alanıyla düşen verim dolayısıyla yaklaşık 500 Nm³/h civarında tutulmaktadır. Şekil 3.2.'de değişik elektroliz hücreleri gösterilmektedir.



Şekil 3.2.- Değişik elektroliz hücreleri yapısı, a-hücre duvarı, b- elektrolit, c- katod, d- anod, e- hidrojen çıkışı, f- oksijen çıkışı, g- gaz toplayıcı, h- diyafram, i- harici anod, j- harici katod, k- bipolar elektrod, l- yalıtıcı (Linde AG).

Elektroliz ünitelerinin maliyetleri, büyük kapasiteli ünitelerde 500 DM/kW_{el} birim fiyatından başlamakta ve kapasite düştükçe birim maliyet de yükselmektedir. Çalışma

verimleri ise küçük kapasiteli elektrolizerler için %50~60, büyük kapasiteliler için ise %65~70 civarında olmaktadır (Linde AG).

3.3.2. Geliştirilmekte olan teknikler

a- Yüksek Basıncılı Su Elektrolizi

Özel malzeme seçim ve uygulamalarıyla, yüksek basınçlı su elektrolizi yöntemiyle 5 Mpa basınca kadar hidrojen üretimi mümkün olmaktadır. Yöntemin en büyük eksiği, değişken akım kaynağı ile çalışmamasıdır, ancak bu konuda çalışmalar devam etmektedir. Araştırma çalışmaları yapan firmalar, ürünlerin 2~3 yıl içinde hazır olacağı açıklamalarını yapmaktadırlar.

Hali hazırda piyasada olan küçük güçlü cihazlar yaklaşık 10,000 DM/kW'dır. Her ne kadar kesin açıklamalar yapılmamış olsa da büyük güçlü cihazların yaklaşık 2000~2500 DM/kW birim maliyetli olması beklenmektedir (LBST).

b- Yüksek Sıcaklık Su Elektrolizi

Yüksek sıcaklık elektrolizerleri, birkaç yıl önce yoğun bir şekilde gündemdeydi. Bu yöntemin en önemli avantajı, suyun ayrıştırılması için gerekli enerjinin dışarıdan alınarak elektroliz için gerekli enerjinin azaltılmasıdır. Bu amaçla güneş enerjisi veya santrallerdeki atık ısıların kullanılması düşünülmüştür. Ancak destek bulamaması nedeniyle bu yöntem üzerine araştırmalar son yıllarda oldukça azalmıştır (LBST).

3.4. Hidrojen Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Yukarıda belirtildiği üzere günümüzde en çok kullanılan yöntem, hafif hidrokarbonların, özel olarak da doğalgazın reformasyonu yöntemidir. Ancak gelecekte fosil kaynakların, gerek rezerv gerekse çevre bilincinin etkisiyle alternatif arayışının neticesinde geleceğin yakıtı olarak belirlenen hidrojenin bu yöntemle üretimine de bir alternatif gerekmektedir. Günümüzde tek potansiyeli olan yöntem elektrolizdir. Enerji olarak elektrik bağımlısı olan elektroliz yöntemini ile hidrojen üretimi günümüzde maliyetli olsa da, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının gelişmesi ile elektroliz yönteminin popülerlik kazanacağı aşikardır. Hidrojenin depolanabilmesi sayesinde, mevcut santrallerde veya yeni ve yenilenebilir enerji

kaynaklarıyla üretilecek fazla enerjinin depolanmasında kullanılabilir. Böylece depolanması daha zor olan elektrik enerjisi depo edilmiş bu hidrojenden elde edilebilir.



4. HİDROJEN DEPOLAMA YÖNTEMLERİ

Hidrojen, taşıtlarda basınçlı gaz, sıvılaştırılmış gaz olarak ve metal hidritler yardımıyla depolanabilmektedir. Her depolama şeklinin belli bazı avantaj ve dezavantajları mevcuttur.

Gaz halinde hidrojen, hafif fakat dayanıklı malzemelerden yapılmış kaplarda yüksek basınç altında saklanmaktadır. Hidrojen atomları çok küçük olduğu için birçok maddeye nüfuz edebilmektedir. Bu ise kaçak ihtimalini meydana getirmektedir. Bu yüzden hidrojen depolanacak kabın bu kaçaqlara dayanıklı olması gerekmektedir. Genelde bu kapların içi dayanıklı fiberler (aramid, cam veya karbon) ile kaplanmaktadır.

Hidrojen -253°C sıcaklığında sıvılaşmaktadır. Bu düşük sıcaklık, hidrojenin sıvı halde depolanmasının en büyük zorluğunu teşkil etmektedir. Çünkü bu kaplar, sıcaklığın istenilen seviyede tutulabilmesini sağlamak için çok iyi yalıtılmalıdır. Fakat her ne kadar iyi yalıtılsa da, sıvı halde depolanan kaplarda buharlaşmadan ötürü günlük yaklaşık %1~2 hidrojen kaybı olmaktadır.

Gaz halindeki hidrojen bazı katı metaller içinde depolanabilir. Yüksek basınç ve düşük sıcaklık altında metal, hidrojeni emer ve tersinde, yani düşük basınç yüksek sıcaklık altında hidrojeni salar. Genel olarak bu sistemler, su içine yerleştirilen hidrit taşıyan tüpler şeklindedir ve suyun sıcaklığı kontrol edilerek hidrojen açığa çıkarılır.

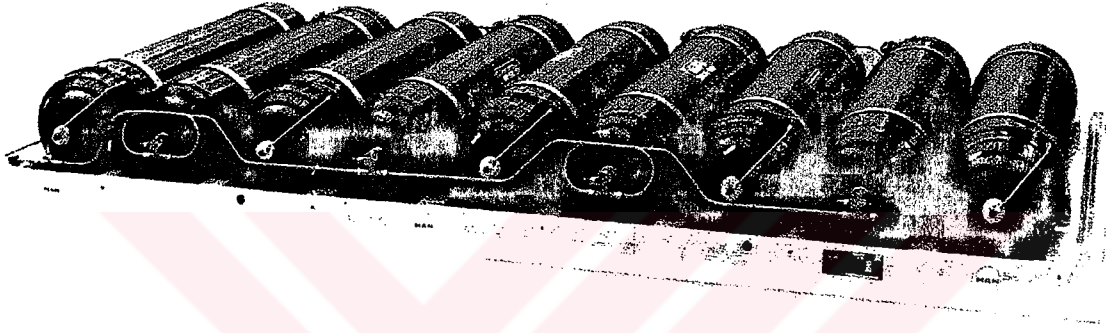
4.1. Hidrojenin Basınçlı Gaz Halinde Depolanması

Son yıllarda, doğalgazın taşıtlarda alternatif yakıt olarak kullanılması sonucu basınçlı gaz tankları oldukça gelişmiştir. Günümüzde yaklaşık 20 MPa sıkıştırma basıncı kullanılmaktadır, ancak özellikle Amerika'da yapılan çalışmalar şu anda 24.8 MPa, yakın gelecekte de 30 MPa basıncının kullanılabileceğini göstermiştir. Son yıllarda, tank malzemesi olarak kullanılmakta olan çelik yerine ağırlık avantajı nedeniyle kompozit malzemeler tercih edilmektedir.

Basınçlı gaz tanklarının fiyatları, kullanılan malzemeye göre çok değişmektedir. Ancak artık kullanılmakta olan tamamen kompozit malzemedan yapılmış, 24.8 MPa çalışma basınçlı 150 litrelik bir tankın fiyatı 8000 DM civarındadır (Würster, 1997).

Ancak tüm gelişmelere rağmen hidrojenin sıkıştırılmış gaz şeklinde depolanması neticesinde enerji yoğunluğu çok düşüktür. 24.8 MPa basınç altında saklanması durumunda enerji yoğunluğu yaklaşık 2 kWh/kg'dır ki bu eski çelik tanklarda 2 MPa basınçlı gaz için sadece 0.7 kWh/kg'dır (Wurster, 1997).

Almanya'da Erlangen kentinde test edilen MAN NL 163 BZ modeli otobüste depolama 24.8 MPa basınçlı gaz halinde yapılmıştır ve 9 tankta toplam 1548 litre geometrik hacme sahip tanklar taşıta 250 km'den biraz daha fazla menzil sağlamaktadır. Bu otobüsün hidrojen silindirleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir (MAN AG).

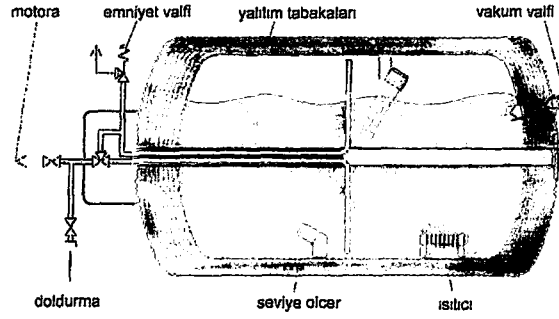


Şekil 4.1.- MAN deneme otobüsünde kullanılan basınçlı hidrojen silindirleri (MAN AG).

4.2. Hidrojenin Sıvı Halde Depolanması

Bu depolama yöntemi, özellikle taşıtlarda kullanım için büyük potansiyeli ve avantajı olan bir yöntemdir. Günümüz teknolojisi, sıvı hidrojenin üretiminden dağıtım ve kullanımına kadar tüm alanları sorunsuz bir şekilde karşılayabilmektedir. Sıvı hidrojen kapları, 100 litreden 5000 m³'e kadar çok geniş bir aralıkta tüm boyutlarda yapılabilmektedir. Sıvı hidrojen kapları, ısı yalıtımlı ve çift cidarlı yapılmaktadır. İki cidar arasında ısı yalıtımı amacıyla alüminyum folyolar ve bunların aralarında da plastik folyolar kullanılmaktadır. İki cidar arası vakum altında tutulmaktadır.

Bu yalıtım, oldukça etkili fakat bir o kadar zor ve maliyetlidir. Daha önce de belirtildiği gibi, yalıtımın kalitesine göre %1~2 arası günlük hidrojen kaybı vardır. Bu kayıp ayrıca kabın yüzey alanı/hacim oranına da bağlıdır. Şekil 4.2'de sıvı hidrojen depolama tankı kesit çizimi görülmektedir.



Şekil 4.2.- Sıvı hidrojen depolama tankı (1).

Hidrojenin sıvı halde depolandığı iki deneme projesi Almanya'da BMW 7 serisi otomobile ve MAN SL 202 tipi otobüste gerçekleştirilmiştir. MAN otobüsüne yerleştirilen sistem 3 adet 190 litrelik eliptik tanklardan oluşmaktadır. Bu ise tank başına 150 Nm^3 veya 450 kWh enerjiye tekabül etmektedir. Enerji yoğunluğu ise 4.5 kWh/kg ve 2.13 kWh/l 'dir. Tanklarda 200-300 yalıtım folyosu kullanılmıştır ve günlük %1 kayıp oluşmaktadır. Ancak otobüste kullanılan sistemde birden fazla tank olduğu için bağlantı borularında meydana gelen kayıptan ötürü bu oran yükselmektedir (MAN AG).

4.3. Metal Hidritler Yardımıyla Depolama

Hidritler, soğutulduğunda hidrojen emen, ısıtıldığında ise gazı serbest bırakan özel metallerdir. Hidrojen atomları metalin içinde çözülmekte ve ısı uygulanana kadar içinde kalmaktadır. En büyük avantajları, düşük doldurma basınçları (seçilen malzemeye göre $0.25-10 \text{ MPa}$) ve yüksek hacimsel yoğunluklarıdır (yaklaşık $0.29-0.39 \text{ kWh/kg}$ ve $1-1.5 \text{ kWh/l}$). Fakat, ağır olmaları en büyük dezavantajlarıdır. En çok kullanılan metaller, FeTi (demir titanyum), LaNi (lantanum nikel) MgNi (magnezyum nikel) ve Mg (magnezyum)'dir. Bu metallerin özellikleri birbirinden çok farklıdır. Magnezyum, içlerinde en ucuz ve en çok depolama kapasitesi olan metaldir. Ağırlığının %6-7'sini depolayabilen magnezyum, gerek doldurma, gerekse hidrojeni açığa çıkarma için oldukça fazla enerjiye gereksinim duyar. Bu değer 10.33 kWh/kg 'dır ve taşıtın egzost ısısı bu enerjiyi karşılayamaz. Bunun yanında magnezyum nikel de son derece ucuz ve depolama kapasitesi yüksek bir metaldir ve hidrojeni açığa çıkarmak için gerekli enerji 8.8 kWh/kg 'dir. Demir titanyum, içlerinde depolama kapasitesi en düşük olan metaldir. Ağırlığının sadece %1-1.9'u oranında hidrojen depolayabilir. Ayrıca hem magnezyum hem de magnezyum nikelden iki kat daha ağırdır (Lynch 1974b; Wurster, 1997).

Hidrojen metalle kimyasal bir bağ yaptığı için diğer depolama sistemleriyle karşılaştırıldığında en güvenli olan yöntemdir. Tekrar ısıtılmadığı sürece hidrojen metalden ayrılmayacaktır.

Hidrojenin tekrar açığa çıkarılması için gerekli olan ısı da egzost sisteminden veya soğutma sisteminden karşılanmaktadır.

Sistemlerin fiyatı, istenen özelliklere göre değişmektedir (sıcaklık ve basınç seviyesi, depolama kapasitesi, boyutlar). Kabaca, 1 Nm³'lük depolama için 800-3000 DM, 10 Nm³'lük depolama için 400-1500 DM/Nm³, ve 100 Nm³'lük depolama için 300-100 DM/Nm³ birim fiyatları alınabilir (Wurster, 1997).

4.4. Geliştirilmekte Olan Teknikler

Halihazırda kullanılmakta olan ve yukarıda açıklanan üç yöntemin dışında geliştirilmekte olan yeni teknikler de mevcuttur. Bunların en önemlisi ve potansiyel teşkil edeni gazın katılar üzerine tutunması yöntemidir. Kimyasal olarak aktive edilmiş karbonlar yüksek basınç ve oldukça düşük sıcaklık altında yüzeylerinde hidrojen tutabilmektedirler. Atmosferik basınç ve sıcaklıklarda ise gaz açığa çıkmaktadır. Günümüzde 6 MPa basınç ve 87 K sıcaklığında aktive edilmiş karbon, ağırlığının yaklaşık %4.8'i oranında hidrojen tutabilmektedir. Ancak yeni geliştirilmekte olan ve mikroskobik karbon tüpü denen madde ile hidrojenin yüzeyde tutunma yüzdesi arttırılabilmektedir. Mikroskobik karbon tüpleri, mikroskobik gözenekleri ile hidrojenin kılcal yapıya daha fazla tutunmasını sağlamaktadır. Mikroskobik karbon tüpleri ile 82 K ve 0.07 MPa basınçta ağırlıkça %8.4 hidrojen depolanabilmiştir (3).

Araştırmacılar, ayrıca cam mikroküreler ile hidrojen taşınabilmesi potansiyeli üzerinde durmaktadırlar. Bu yöntemde 1 mikron kalınlığında ve 25 ile 500 mikron arası değişen çaplarda cam küreler, camın 200 ile 400°C arasında artan geçirgenliği kullanılarak basınç altında hidrojenle doldurulmaktadır. Küre soğutulduğunda ise içindeki gazın dışarı çıkmasına izin vermemektedir. Küreler tekrar ısıtılarak hidrojen açığa çıkartılmaktadır. Küreler 1000 MPa basınca kadar kırılmalara dayanıklıdır ve 62 MPa basınçlı hidrojeni tutabilmektedir. Bu yöntemin en büyük avantajı, 15 dakika gibi diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında kısa bir sürede kürelerin %95'inin doldurulabilmesidir. Küreler, ağırlıkça %10 oranında hidrojen taşıyabilmektedirler (3).

4.5. Depolama Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Yukarıda anlatılan depolama yöntemleri birçok bakımdan birbirinden farklı özelliktedir. Hepsinin avantajlı ve dezavantajlı yönleri mevcuttur. Çizelge 4.1'de, mevcut depolama yöntemlerinin bir karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 4.1.- Mevcut hidrojen depolama yöntemlerinin karşılaştırılması (LBST).

	Hacimsel Depolama Kapasitesi	Kütlesel Özgül Depolama Kapasitesi	Hacimsel Enerji Yoğunluğu	Kütlesel Özgül Enerji Yoğunluğu
	(gH ₂ /l)	(gH ₂ /kg)	(kWh/l)	(kWh/kg)
Basınçlı gaz (25 Mpa, kompozit tank)	17,5	64	0,6	2,15
Sıvı Hidrojen	35	105	1,2	3,5
Metal Hidrit	80	10	2,7	0,35

Bu yüzden taşıtlarda kullanım için en iyi depolama yöntemini seçmek şu aşamada olanaksızdır. Zaten demonstrasyon projelerinde bulunan şirketler incelendiğinde, hepsinin farklı bir depolama yöntemini kullandığı ve o yöntemin en avantajlı yöntem olduğu görülmektedir. Örnek verecek olursak, BMW yaklaşık 20 yıldır hidrojenin sıvı halde depolanması üzerine çalışırken, Mazda ve DaimlerChrysler metal hidrit şeklinde depolamanın avantajlı olduğu düşüncesindedirler.

Ancak buna rağmen, otomobil ve diğer küçük taşıt projelerinde, basınçlı gaz yöntemindeki düşük enerji yoğunluğu sağlaması nedeniyle menzil sorunu sebebiyle basınçlı gaz şeklinde depolama kullanılmamaktadır. Bu yöntem sadece gerekli menzili sağlayan yüksek hacimli depoların sorun olmadığı otobüslerde kullanılmaktadır.

Depolama yöntemlerini ekonomiklik ve güvenlik yönünden karşılaştırabiliriz. Bu durumda en güvenli yöntem metal hidritler olacaktır. Çünkü hidrojen metalle bir bileşik yapmıştır ve herhangi bir şekilde kaçak ihtimali yoktur. Ancak ekonomiklik yönünden en avantajlı yöntem basınçlı gaz şeklinde depolamadır. Gerek doldurma istasyonu, gerekse depolama ekipmanları en ucuz yöntemdir. Fakat gerek ağırlık gerekse hacim yönünden karşılaştırıldığında sıvı depolama en avantajlı olmaktadır. Sıvı depolama, taşıt ve doldurma istasyonunda gerektirdiği özel yalıtım ve malzemeler sebebiyle en pahalı yöntemdir.

5. HİDROJENİN TAŞITLARDA KULLANILMA YÖNTEMLERİ

Hidrojen taşıtlarda, içten yanmalı motorlarda kullanılabildiği gibi, elektrik motorlarına güç sağlamak için yakıt hücrelerinde de kullanılabilmektedir. Hidrojen ayrıca, içten yanmalı motorlarda ana yakıt olarak kullanılabileceği gibi, benzin veya Diesel yakıtına zenginleştirme şeklinde de kullanılabilmektedir.

5.1. Yakıt Hücreleri ile Kullanım

Daha önce sözünü ettiğimiz alternatif yakıt arayışları sonucu, tahrik kaynağı olarak içten yanmalı motorlar yerine elektrik motoru kullanımının potansiyeli araştırılmıştır. Uzun yıllar süren çalışmalar sonucu birçok deneme modeli geliştirilmiştir. Gerçekten de 0 emisyon sağlayan bu taşıtlar geleceğin taşıtı olarak görülmekteydi, fakat elektrik depolaması büyük sorun olmaktaydı. Çok büyük ve ağır bataryalar, hem taşıtın performansını ve kullanılabilirliğini etkiliyor, hem de taşıtın yeterince uzaklara gitmesini sağlayacak gücü sağlayamıyordu. Son yıllarda, elektrik motoruna devamlı elektrik akımı sağlayabilecek yakıt hücrelerinin kullanımı gündeme gelmiştir. Bunun başlıca sebebi, bataryalara oranla çok daha hızlı gelişen teknolojileri sonucu elde ettikleri avantajdır.

Yakıt hücrelerinin çalışma prensibi, temelde elektrolizin tersi olarak açıklanabilir. Elektrolizde su, elektrik akımı yardımıyla oksijen ve hidrojene ayrılmaktadır. Yakıt hücrelerinde ise hidrojen ve oksijenin reaksiyonu sonucu su ve elektrik akımı oluşmaktadır.

5.1.1. Yakıt hücrelerinin tarihi

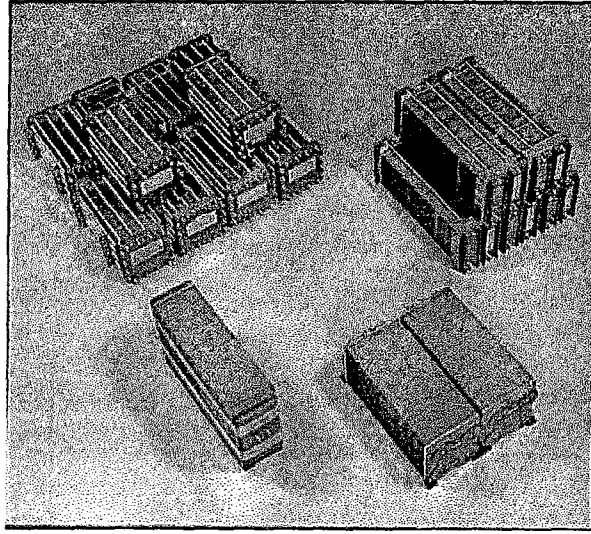
Yakıt hücresi prensibi, 1839 yılında İngiliz William Grove tarafından ortaya atılmıştır. Hidrojen ve oksijenin teorik olarak %100 verimle elektrik ürettiği bir galvanik gaz bataryasından söz etmiştir.

1894 yılında Oswald, karbon ve oksijeni birleştiren benzer bir prensip ortaya atmıştır. Ancak 1000°C'ı geçen işlem sıcaklıkları nedeniyle malzeme sorunu, düşüncesini gerçekleştirmesini engellemiştir. O tarihten sonra araştırmalar, daha kolay kontrol edilen hidrojen oksijen reaksiyonu üzerine yoğunlaşmıştır.

Yakıt hücrelerinin esas gelişimi 2. Dünya Savaşından sonra gerçekleşmiştir. İngiliz Bacon, yüksek basınçlı bir hücre geliştirmeyi başarmıştır ve çalışan bir sistem 1954 yılında sunulmuştur. Bunu, alkalın yakıt hücreleri ve asidik polimer membranlı yakıt hücrelerinin geliştirilmesi takip etmiştir. Bu yakıt hücreleri, uzay programları ve askeri amaçlar için geliştirilmiştir. Bu yakıt hücreleri oldukça yüksek maliyetlere sahipti ve bu yüzden sadece askeri amaçlar için kullanılmışlardır.

1970'lerin başında, fosforik asit yakıt hücreleri, yüksek sıcaklık molten karbonat ve katı oksit yakıt hücrelerinin geliştirilmesine başlandı. Tüm bu çalışmalar, birkaç yüz MW'lık güç santralleri uygulamaları için yapılmaktaydı. Araştırmaların çoğu, bu ünitelerin, elektrik veya elektrik/buhar kombine üretimi için kullanılması için yapılmaktaydı. O tarihlerde, deneme amaçlı 100 kW_e gücünde üniteler bir Amerikan şirketi tarafından üretilmiştir. 2000 yılında ticari olarak üretimi planlanan bu yakıt hücrelerinde 1500 \$/kW_e maliyet değerine inilebilmiştir. Fakat, bu maliyetten daha düşük değerlere, en azından yakın gelecekte, düşülebilmesi pek mümkün görülmemektedir. Yüksek sıcaklık molten karbonat ve katı oksit yakıt hücreleri de günümüzde geliştirilme safhasını tamamlamış ve 2001-2005 yılları arasında kullanıma geçilmesi beklenmektedir (Wurster, 1999).

Proton değişim membranlı yakıt hücrelerin üzerine, 1980'lerin başına kadar ciddi anlamda çalışma yapılmamıştır. Bu tarihten sonra, günümüzün en büyük yakıt hücreleri üreticileri olan Ballard, Siemens, IFC ve çeşitli üniversitelerin yoğun araştırmaları, membran-elektrod grubunda ciddi gelişmeler sunmuştur. Bu sayede kısa zamanda, proton değişim membranlı yakıt hücrelerinde ağırlık ve maliyet düşmesi, bunun yanında büyük performans artışları olmuştur. Bu gelişmeler neticesi birçok taşıt üreticisi, içten yanmalı motora alternatif olarak proton değişim membranlı yakıt hücrelerinin kullanımını düşünmüş ve araştırma geliştirme çalışmalarına başlamışlardır. Halihazırda birçok deneme projesi hayata geçirilmiş olmakla beraber, 2001 yılında kullanıma sunulması düşünülmektedir. Günümüzde proton değişim membranlı yakıt hücrelerinin maliyeti 1000 \$/kW_e civarındadır. Ancak bu konuda çok hızlı bir ilerleme kaydedilmektedir. Maliyet ve boyutlar her geçen gün azalmaktadır. Bu ise, gelecekte yakıt hücrelerinin kullanılabilme potansiyelini arttırmaktadır. Şekil 5.1'de, yakıt hücresi boyutlarının zamanla gelişmesi rahatlıkla görülebilir. Şekildeki her dört yakıt hücresi kümesinin de gücü 50 kW'dır (Ballard).



Şekil 5.1.- Yakıt hücrelerinin zamanla gelişimi. Her yakıt hücresi kümesi 50 kW gücündedir (Ballard).

5.1.2. Yakıt hücreleri çalışma prensibi

Elektrik üretimi söz konusu olduğunda, günümüzde kullanılan makinalarla (türbinler, motorlar), yakıtın içindeki kimyasal enerji önce termal sonra mekanik enerjiye sonra da elektrik enerjisine çevrilmektedir. Yakıt hücrelerinde kullanılan elektrokimyasal enerji çevrimi ile ise yakıtın içindeki enerji direk olarak elektrik enerjisine çevrilmektedir.

Termik makinalarda, Carnot çevrimine göre verim bilindiği üzere $\eta_c = 1 - T/T_0$ 'dır. Yani işlem sıcaklığı yükseldikçe verim artmaktadır. Fakat yakıt hücrelerinde ise çevrilebilir hücre veriminden söz edilebilir. Bu verim ise metan için tüm çalışma sıcaklıklarında sabit kalırken, hidrojen için sıcaklık arttıkça verim azalmaktadır.

Bir yakıt hücresinin çalışması, proton değişim membranlı yakıt hücresinin çalışma prensibi incelenerek kolayca anlaşılabilir. Burada membran, asidik elektrolit gibi davranmaktadır. Reaksiyona giren hidrojen ve oksijen, devamlı surette iki elektroda gönderilir. Hidrojen, gözenekli anod tarafına difüze eder ve burada proton ve elektronlarına ayrılır:



Hidrojen iyonları, protonlar için çok geçirgen olan polimer membranı geçerek katoda gider. Bu sırada elektronlar da, harici bir elektrik devresiyle katoda gider. Katod ve elektrolitin sınır bölgesinde hidrojen iyonları, devreden gelen elektronlar ve gözenekli katoda difüze eden oksijen ile reaksiyona girerek su oluştururlar:



Bu reaksiyonda oluşan su, hava yardımıyla dışarı alınır. Anoddaki elektron fazlalığı ve katoddaki elektron azlığı neticesinde iki elektrod arasında bir potansiyel farkı oluşur. Bu potansiyel farkı kısa devre durumunda 1.1 V olmakla beraber devrede bir direnç olması durumunda 0.7 V'a düşer ve yakıt temin edildiği sürece bu değer korunur. Yakıt hücrelerindeki elektrodların özellikleri, bataryadakilerin tersine çalışma ömrü boyunca çok az değişir.

Elektrolit, besleme gazlarının ayrı tutulmasını ve iyonların iki elektrod arasında hareketini sağlamalıdır. Bu sebeple elektrolit gazlar için geçirgen, iyonlar için de çok iletken olmalıdır. Alkali çözeltiler ve asitler ve asit veya alkalın karakteristikli katılar bu iş için uygundur.

Bütün yakıt hücrelerinin en önemli kısmı, membran-elektrod grubudur. Elektrodlarda, yakıtın kimyasal enerjisinin elektrik akımına dönüşmesi ve dış devreye verilmesi gerçekleşir. Yani yakıtın kütleli akışı, elektrik akımının akışına ve iyon akışına dönüşür. Bu sebeple elektrodlar, gaz molekülleri, iyonlar ve elektronlar için geçirgen olmalıdır. Bu ise üç fazlı reaksiyon bölgesinin (elektrolit, katalitik yüzey, redükleyici gaz) oluşmasıyla sağlanabilir. Büyük bir dönüşüm oranı yakalayabilmek için bu üç fazlı reaksiyon bölgesinin, dolayısıyla da elektrod yüzey alanının mümkün olduğunca büyük olması gerekmektedir. Bunun yanında, gaz molekülleri, iyonlar ve elektronların geçiş işleminin optimizasyonu ve mümkün olduğunca yüksek elektrokimyasal reaksiyon hızı sağlanması da önemlidir. Bu bölgelerdeki reaksiyon hızı sadece katalitik kaplamalar yardımıyla artırılabilir. Asidik elektrolit kullanılması durumunda ancak, zamanla daha az eriyen platinum, ruthenium gibi asal metaller katalizör olarak kullanılabilir. Yakıt hücresinin çalışma sıcaklığının düşürülmesiyle, reaksiyon prosesinin katalitik hızı daha da önem kazanır.

Teknik olarak uygun voltaj değerini yakalayabilmek için, anod, katod ve elektrolitten oluşan tek bir hücreden birkaç tanesi seri bağlanmalıdır. Bu hücrelerin arasına iki kutuplu levhalar yerleştirilmelidir. Bu levhalar, elektrodlara gaz teminini ve hücrelerin elektriksel olarak bağlanmasını sağlar. Sandviç şeklinde dizilen bu hücre ve levha grubuna yakıt hücresi kümesi denir. Reaksiyon sıcaklığını almak için bu kümenin içine birkaç tane soğutucu levha yerleştirilir. Hücrelere gaz temini ve su çıkışı her hücre için münferit olabileceği gibi kümenin sonundaki levhalardan da sağlanabilir.

Teorik olarak yakıt hücreleri, okside olabilen tüm akışkanları dönüştürebilir. Pratikte ise hidrojen ve hidrokarbon yakıtlar arasında farklar meydana gelmektedir. Bütün yakıt hücresi çeşitleri, yukarıda anlatılan yöntemle hidrojeni dönüştürebilir. Fakat hidrokarbonların kullanılmasında, çözümü için ya çok büyük katalizör yüzeyi ya da çok yüksek sıcaklık gereken oksidasyon problemleri vardır. Bu yüzden hidrokarbon yakıtlar, yakıt hücrelerinde, önce su buharıyla reforme edilerek hidrojen üretiminde kullanılmasıyla, yani dolaylı yollardan kullanılabilir (Ballard; Appleby ve Foulkes, 1989; Wurster, 1999).

Yakıt hücreleri, içten yanmalı motorlarla karşılaştırıldığında çok daha verimli cihazlardır.

5.1.3. Yakıt hücresi çeşitleri ve uygulama alanları

Yakıt hücreleri, genellikle çalışma sıcaklıklarına göre düşük, orta ve yüksek sıcaklık yakıt hücreleri olarak sınıflandırılırlar. Çizelge 5.1'de, yakıt hücresi tiplerinin çeşitli özellikleri açıklanmıştır. Çizelge 5.2'de ise değişik yakıt hücresi konseptlerinin uygulama alanları ve öngörülen kullanılabilirlik tarihleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.1.- Yakıt hücresi tipleri ve özellikleri (Wurster, 1999).

YAKIT HÜCREŞİ TİPİ	ÇALIŞMA SICAKLIĞI (°C)	ELEKTROLİT	YAKIT	OKSİDASYON ORTAMI	TİPİK ÜNİTE GÜÇLERİ (kW _e)
Alkalin Y.H.	70-100	Alkalin çözelti	H ₂	Oksijen	<< 100
Proton Değişim Membranlı Y.H.	50-100	Florinli sülfonlu polimer elektrolit	H ₂	Hava	0.1-500
Fosforik Asit Y.H.	160-210	Dengelenmiş fosforik asit	H ₂	Hava	5-200
Molten Karbonat Y.H.	650	Molten karbonat çözümü	H ₂ ve CO	Hava	800-2000
Katı Oksit Y.H.	800-1000	Seramik katı elektrod	H ₂ ve CO	Hava	2.5-100000

Çizelge 5.2.- Yakıt hücresi tipleri uygulama alanları ve kullanılabilme tarihleri (Wurster, 1999).

Yakıt Hücresi Tipi	Uygulama Alanı	Ticari Anlamda Kullanılabilme
Alkalın Y.H.	Uzay ve askeri amaçlı uy.	Kullanımda
PDM Y.H.	Güç üretimi için stasyonier uy. Otobüs, kamyon vs için mobil uy. Otomobiller için mobil uy.	2000-2001 2001-2002 >2005
Fosforik Asit Y.H.	Güç üretimi için stasyonier uy. Mobil uygulamalar	Kullanımda >2001
Molten Karbonat Y.H.	Güç üretimi için stasyonier uy.	2001
Katı Oksit Y.H.	Güç üretimi için stasyonier uy. Raylı sistemler için mobil uy.	2001 >2005

Ağırlık, güç ve performans ve fiyat kriterleri gözönünde tutulduğunda, yukarıda anlatılan yakıt hücresi tiplerinden sadece Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresinin, otomotiv endüstrisi tarafından kullanılabilme şansı vardır. Günümüzde yakıt hücreleri konusunda araştırma geliştirme faaliyetinde bulunan ve ileride örnek projeleri hakkında kısa bilgiler verilecek olan şirketler, Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi kullanımı üzerine çalışmaktadırlar.

PDM Yakıt Hücresi Kullanan Bazı Firmalar ve Deneme Projeleri

Burada projeler, yolcu ve şehir içi otobüsleri ve binek otomobiller ve diğer ticari araçlar olarak ikiye ayrılarak sınıflandırılacaktır.

a- Otobüs Projeleri

Ballard Güç Sistemleri

New-Flyer 40LF modeli düşük kabinli otobüsüne toplam 205 kW_e'lik PDM yakıt hücresi kümesi yerleştirilmiş ve 95 km/h'lik maksimum hıza ulaşılmıştır. Depolama yöntemi olarak basınçlı gaz kullanılmıştır. Menzili 400 km olan araç, fren enerjisi geri kazanım tekniği ile 560 km'lik menzil yakalamıştır. 3 adet otobüs, Şikago Otobüs İşletmesi tarafından 1998'den beri test amaçlı kullanımdadır.

DaimlerChrysler

NEBus adı verilen projede, düşük kabinli ve 58 yolcu kapasiteli otobüs kullanılmıştır. Ballard tarafından temin edilen toplam 190 kW_e'lik PDM yakıt hücresi kümesi kullanılmıştır. Otobüs, 85 km/h son hıza sahiptir ve menzili 250 km'dir. Toplam 1029 litre geometrik hacme sahip basınçlı gaz tankları kullanılmıştır. 1998'de Mexico City'de iki haftalık bir deneme programı yapılmıştır ve önümüzdeki günlerde yeni programlar düşünülmektedir.

MAN AG

NL 163 BZ düşük kabinli modelinde Siemens tarafından temin edilen toplam 120 kW_e'lik PDM yakıt hücresi kümesi kullanılmıştır. Toplam 1530 litre geometrik hacme sahip basınçlı gaz tankları ile 200-300 km menzile sahiptir. Maksimum hızı 60 km/h olan otobüs Almanya'da Erlangen kentinde 6 aylık bir denemeye tabi tutulmuştur.

Yine MAN firmasının NL 223 BZ düşük kabinli modeline toplam 120 kW_e'lik DeNora tarafından sağlanan yakıt hücresi kümesi yerleştirilmiştir. Maksimum hızı 75 km/h olan otobüste toplam 150 litre geometrik hacme sahip sıvılaştırılmış hidrojen depolaması kullanılmıştır. 300 km menzile sahip araç, Berlin, Lizbon ve Kopenhag'da denenmiştir.

b- Binek Araçlar ve Diğer Ticari Araçlar

Ford

Özel geliştirilmiş son derece hafif taşıtta Ballard tarafından sağlanan toplam 65 kW_e'lik yakıt hücresi kümesi kullanılmıştır. Tam güç kullanımında 465 km olan menzil normal kullanımda 2.9 l/100 km yakıt tüketimiyle yaklaşık 600 km menzile sahiptir. 1999 yılında tanıtımı yapılmıştır.

DaimlerChrysler

NECar adı verilen projede toplam 50kW_e'lik Ballard yakıt hücreleri kullanılmıştır. Şu anda iki modeli (NECar III ve NECar IV) olan şirket 2000 yılında NECar V'i sunacaktır. III ve V modelinde metanolün taşıtta reformasyonu ile üretilen hidrojen, IV modelinde ise sıvı halde depolanmış hidrojen kullanılmaktadır. Tüm modeller, 3.7 l/100 km yakıt tüketimine sahiptir. IV modeli 145 km/h son hıza diğerleri ise yaklaşık 110 km/h son hıza sahiptir. Şirket, maliyetlerin düşünülen seviyeye gelmesi durumunda 2005 yılında seri üretime geçileceğini bildirmiştir.

Renault

Laguna Break modeline toplam 30 kW_e'lik DeNora yapımı yakıt hücresi yerleştirilmiş ve yakıt hücresine destek amacıyla ivmelenme ve yokuş sırasındaki güç ihtiyacını karşılamak için batarya yerleştirilmiştir. Sıvı hidrojen depolamanın kullanıldığı model 100 km/h maksimum hıza ve 500 km menzile sahiptir.

Toyota

RAV4 modeline toplam 20 kW_e'lik yakıt hücresi ve pik yükleri karşılamak için batarya yerleştirilmiştir. 250 km menzile ve 100 km/h maksimum hıza sahiptir. Metal hidrit depolama yöntemi ile hidrojenin depolandığı aracın bu sene içerisinde geliştirilmiş modeli tanıtılacaktır.



5.2. Hidrojenin Mevcut Yakıtın Zenginleştirilmesinde Kullanılması

Hidrojen, içten yanmalı motorlarda direk olarak kullanılabilmesi gibi, motorun mevcut yakıtına, dizel veya benzinli, katkı amacıyla da kullanılabilir. Hidrojenin günümüz teknolojisinde taşıtlarda kullanımı için en büyük zorluklar olan depolama teknik ve maliyetleri, gerekli hidrojen miktarının göreceli olarak az olması sonucu zenginleştirme işleminde büyük bir sorun olmamaktadır. Ayrıca aynı sebeple, gücünü motordan alan generatörler kullanılarak hidrojen, araç giderken üretilmektedir.

Her ne kadar yanma prosesi tam anlaşılmamış ve yanma odasında neler olup bittiği hala muamma ise de, içerik olarak daha fazla hidrojene sahip yakıtların yanma hızının diğer yakıtlara göre daha fazla olduğu bilinmektedir. Bunun sonucunda yanma tam yanmaya yaklaşmakta ve sonucunda özellikle CO emisyonlarında oldukça büyük miktarlarda azalmalar olmaktadır. Ayrıca gerekli enerji miktarının hidrojenle karşılanan kısmı artacağı için karbon yüzdesi, böylece de CO₂ emisyonları da azalacaktır. Cassidy'nin yaptığı çalışmalarda 0.66 denklik oranında (ϕ), ki bu değer benzinin fakir çalışma limit değerine yakındır, hidrojenin kütleli olarak %6.8 katkısının alev hızını %61 hızlandırdığını bulmuştur (Jamal ve Wyszynski, 1994).

Hidrojen zenginleştirme düşüncesi ilk olarak Amerika'da, Jet Tahrik Laboratuvarı'ndan Bresheas tarafından NO_x emisyonlarını azaltmak için motorun fakir karışımında çalışabilmesini sağlamak amacıyla ortaya atılmıştır. Çalışmada, NO_x konsantrasyonunun yakıt fakirleştikçe azaldığını ve yakıtın içine hidrojen katılmasıyla karışımın fakir çalışma sınırının genişletildiğini ve motorun termik veriminin %20~50 arası değişen oranlarda arttığı sonucuna varmışlardır. Bundan sonra bu konuda daha kompleks birçok çalışma yapılmıştır (Jamal ve Wyszynski, 1994).

Stebar ve Parks, General Motors laboratuvarında CFR motorunda yaptıkları çalışmada, 8:1 sıkıştırma oranı ve 1200 d/d hızda, hidrojenin kütleli olarak %10 oranında katılmasının, fakir çalışma limit oranını 0.89'dan 0.55'e ve NO_x emisyonlarını 20 g/kWh'den 0.27 g/kWh'e düşürdüğünü bulmuşlardır. Kütleli olarak %20 hidrojen katılması durumunda limit oran 0.4'e düşmüştür. 0.55 denklik oranı için motor gücü %30 düşmüş fakat termal verim %33'den %37'e çıkmıştır. Çalışmalarında, katkının CO emisyonlarına çok az etkisi olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca hidrokarbon emisyonlarının (HC) ise olumsuz bir şekilde arttığını görmüşlerdir. Bu olumsuz artış karışım fakirleştikçe artmakta ve sınırda,

stokiyometrik çalışmadaki değerinin iki katına çıkmaktadır. Bunun sebebi, benzin/hava ve hidrojen/hava yanmalarının ayrı gerçekleşmesidir. Böylece, çok daha hızlı yanan hidrojenin alevi, henüz yanmamış hidrokarbonları okside etmektedir (Jamal ve Wyszynski, 1994).

Hoehn ve Dowdy'nin çalışmalarında, 0.53 ve daha düşük denklik oranlarında, NO_x ve CO emisyonlarının çok düşük olduğunu ve benzinli çalışmaya göre termal verimin yüksek olduğu sonucuna varmışlardır. Ancak Hoehn ve Dowdy de hidrokarbon emisyonlarının arttığı sonucunu bulmuşlardır (Jamal ve Wyszynski, 1994).

Parks, 1200 d/d ve 8:1 sıkıştırma oranında çalışan CFR motorunda yaptığı çalışmada, denklik oranını 0.9'dan 0.1'lik derecelere azaltıp %0, %13, %23, %48, ve %100 hidrojen enerji miktarı (β) için hidrokarbon ve NO_x emisyonlarının değişimini incelemiştir. %100 dışındaki tüm β değerleri için minimum hidrokarbon emisyon değerleri $\phi=0.8$ değerinde oluşmakta ve o β için fakir karışım limit değerine kadar artmaktadır. Sabit ϕ koşulunda, değeri arttıkça hidrokarbon emisyonları da artmaktadır. Tüm β değerleri için, NO_x emisyonları $\phi=0.85$ değerinde maksimum yapmakta, fakir karışım limit değerine doğru ilerledikçe çok hızlı bir şekilde düşmektedir. Sabit ϕ için, NO_x emisyonları β artışıyla doğru orantılı bir şekilde artmaktadır (Jamal ve Wyszynski, 1994).

Rauckis ve McLean, 1000 d/d hızında, 8:1 sıkıştırma oranı ve 10° ateşleme avansıyla çalışan bir CFR motorunda $\phi=1.12$ ve $\phi=0.57$ ve $\beta=0$ ve $\beta=28$ değerleri arasında çalışma gerçekleştirmişlerdir. Silindir basınç değerleri ölçülmüş ve boyutsuz bir yanma modelinde hidrojenin 0-2%, 2-10% ve 10-90% kütle oranları, yanma süresinin hesabında kullanılmıştır. Sonuç olarak tutuşma gecikmesi süresinin, özellikle fakir karışım oranlarında, hidrojen artışıyla beraber bariz bir şekilde azaldığını bulmuşlardır (Jamal ve Wyszynski, 1994).

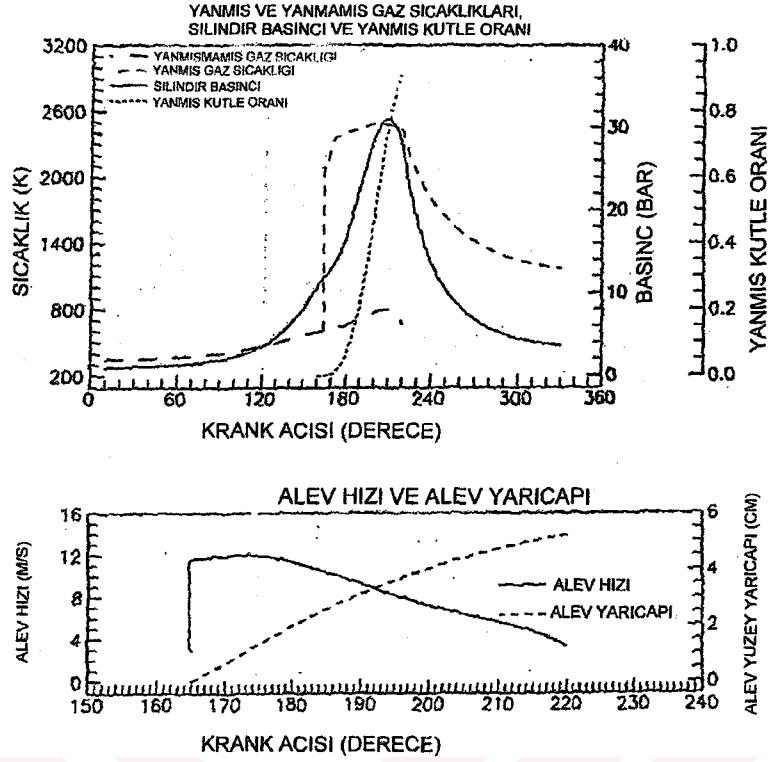
Lucas ve Richards, 1275 cm^3 hacminde 4 silindirli ve sıkıştırma oranı 8.9:1 ile 11.7:1 arasında ayarlanabilen bir motorda çalışma yapmışlardır. Burada hidrojen akışı, benzinsiz çalışma ve tam açık gaz kelebeği durumunda motoru rölantide çalıştırabilmek için 69.5 mg/s'e ayarlanmıştır. Hidrojen akışı bu debinin üstüne çıkmamakta, yüklenme sırasında gerekli güç benzin ile sağlanmaktadır. Bu şekilde çalışma, kısmi yük bölgesinde termik verimin artmasını ve özgül yakıt harcamasının da %30'lara varan ölçüde azalmasını sağlamıştır. Fakat maksimum güçte, hidrojenle çalışan tüm motorlarda olduğu gibi, bir miktar azalma meydana gelmiştir. Bunun sebebi, gerekli hidrojenin hacmen benzine göre

fazla yer kaplaması nedeniyle daha az havanın yanma odasına girebilmesi, yani volümetrik verimin düşmesidir. Bu sorun ileriki konularda daha detaylı incelenecektir, ancak şu aşamada hidrojenin yüksek basınçlı olarak silindire püskürtülmesi ile giderilebileceği, ancak hidrojen zenginleştirme için bu işlemin gereksiz ve pahalı olduğunu söyleyebiliriz. Çalışmanın ikinci aşamasında hidrojen debisi 89 mg/s'e çıkarıldığında, kısmi yük termal verimi daha da yükselmiş fakat güçte daha fazla düşme meydana gelmiştir. Bu çalışma, gaz keleşi konumu değiştirilmeden yapıldığı için, denklik oranı ve hidrojen enerji oranının motor performansına birleşik etkisi incelenmemiştir. Çalışma sonucunda, hidrojen takviyesinin NO_x ve CO emisyonlarını azalttığı, ancak özellikle düşük yüklerde hidrokarbon emisyonlarını arttırdığı gözlenmiştir (Jamal ve Wyszynski, 1994).

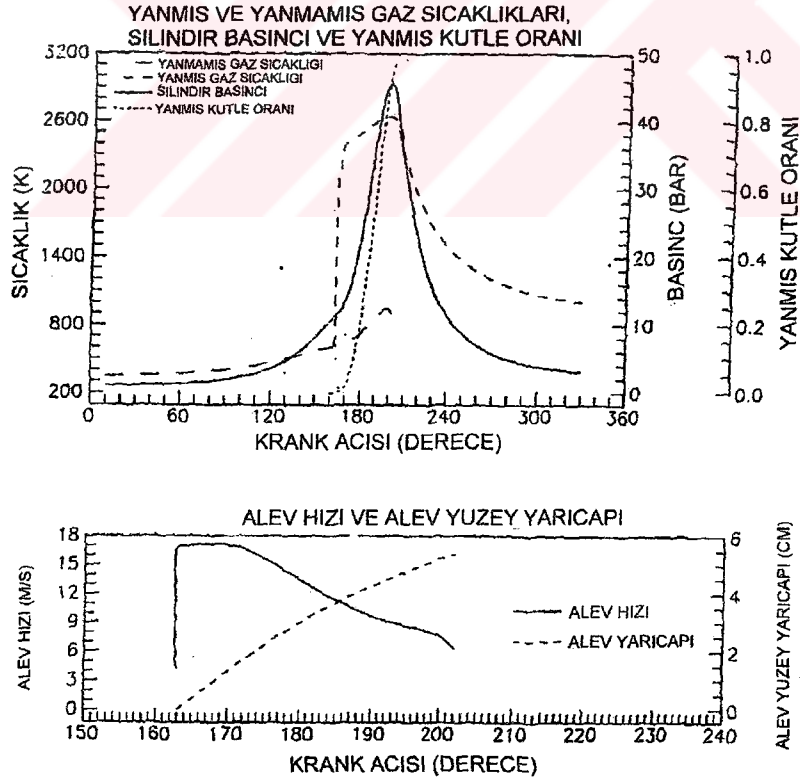
Sher ve Hacoheh, 2310 cm³ hacminde 4 silindirli bir motorda, benzin ve hidrojen takviyeli benzin ile çalışma yapmışlardır. %2 ile %6 arası kütleli hidrojen takviyesi durumunda özgül yakıt tüketimi %10 ile %20 arasında azalmıştır. %6'nın üzerine çıkılması yakıt harcamında marjinal bir etki yapmaktadır. Çalışmada ayrıca, stokiyometrik çalışma koşulları civarında HC ve CO emisyonlarının azaldığı fakat yüksek reaksiyon sıcaklığı dolayısıyla NO_x emisyonlarında artış olduğu bulunmuştur (Jamal ve Wyszynski, 1994).

Al- Janabi ve Al-Baghdadi, tek silindirli, 7.5:1 sıkıştırma oranlı 500 cm³ hacimli bir Ricardo motorunda 1500 d/d hızında yaptıkları çalışmada hidrojen katkısının termodinamik çevrim parametrelerine ve motor performans ve emisyonlarına etkisini araştırmışlardır. Çalışma stokiyometrik karışım ($\phi=1.0$) ve fakir karışım ($\phi=0.8$) için gerçekleştirilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekillerde yeralmaktadır (Al-Janabi ve Al-Baghdadi, 1999).

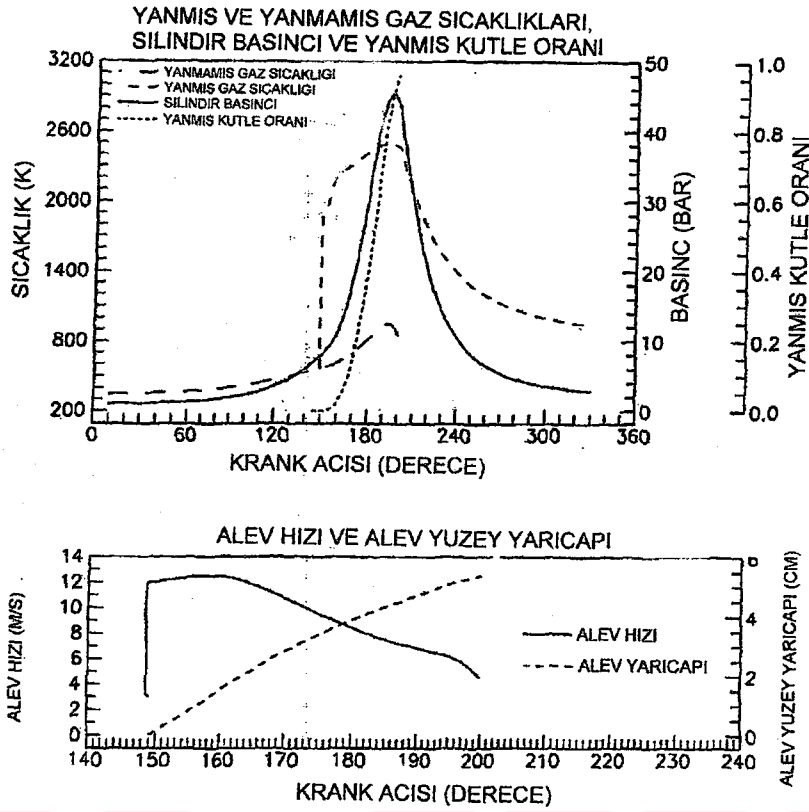
Şekil 5.2, 5.3 ve 5.4'te, benzinle çalışma ve hidrojenle zenginleştirilmiş durumlarda ve değişik denklik oranlarında çalıştırma sonucu çevrim parametreleri gösterilmektedir.



Şekil 5.2.- %100 benzine $\phi=1.0$ şartında çevrim parametreleri (Al-Janabi ve Al-Baghdadi, 1999).



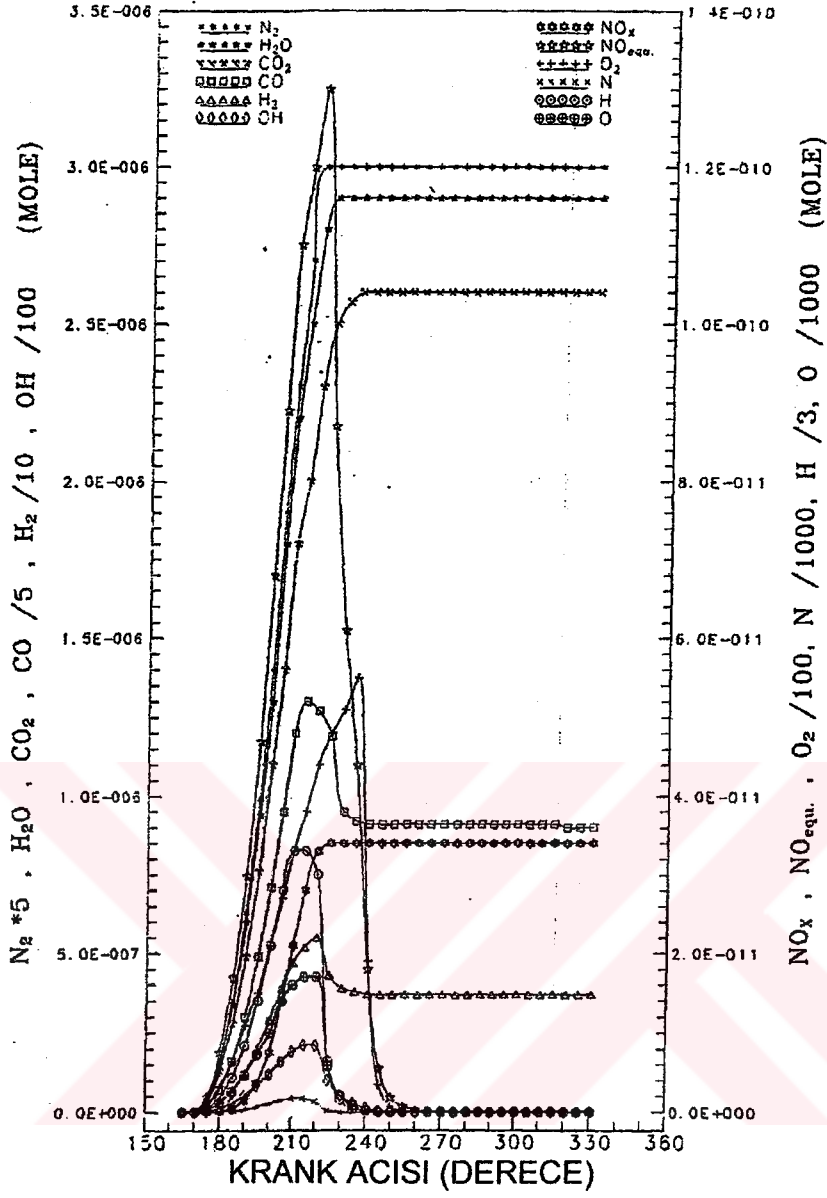
Şekil 5.3.- %90 benzin %10 hidrojen karışımı ve $\phi=1.0$ durumunda çevrim parametreleri (Al-Janabi ve Al-Baghdadi, 1999).



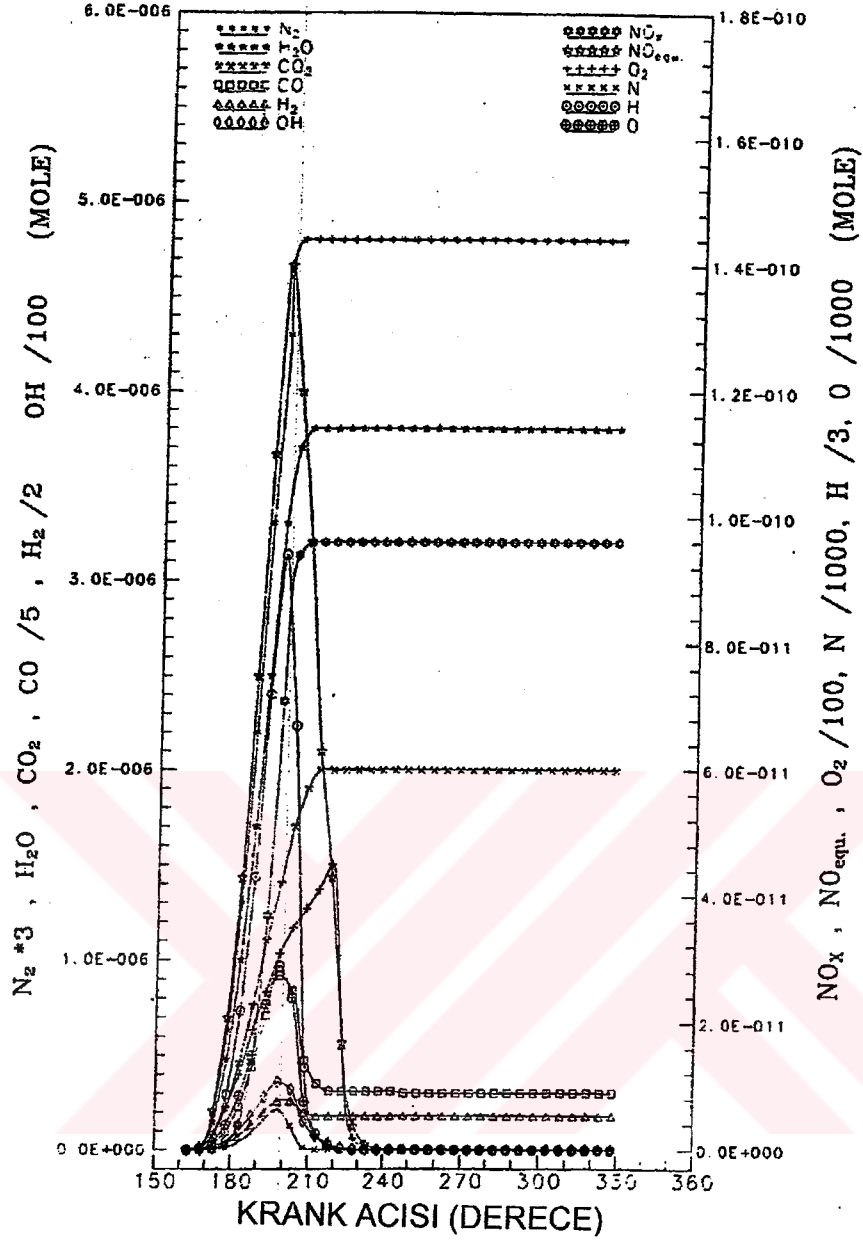
Şekil 5.4.- %90 benzin %10 hidrojen ve $\phi=0.8$ durumunda çevrim parametreleri (Al-Janabi ve Al-Baghdadi, 1999).

Şekillerden görüldüğü üzere, hidrojen katkısıyla beraber silindir basınç ve sıcaklıklarında ve yanma hızında oldukça büyük artışlar meydana gelmektedir. Bunun sebebi, hidrojenin yanma hızının yüksekliği ve böylece yanmanın, sadece benzinle olan yanmaya göre çok daha hızlı olması, böylece ısı kaybının minimum olmasıdır.

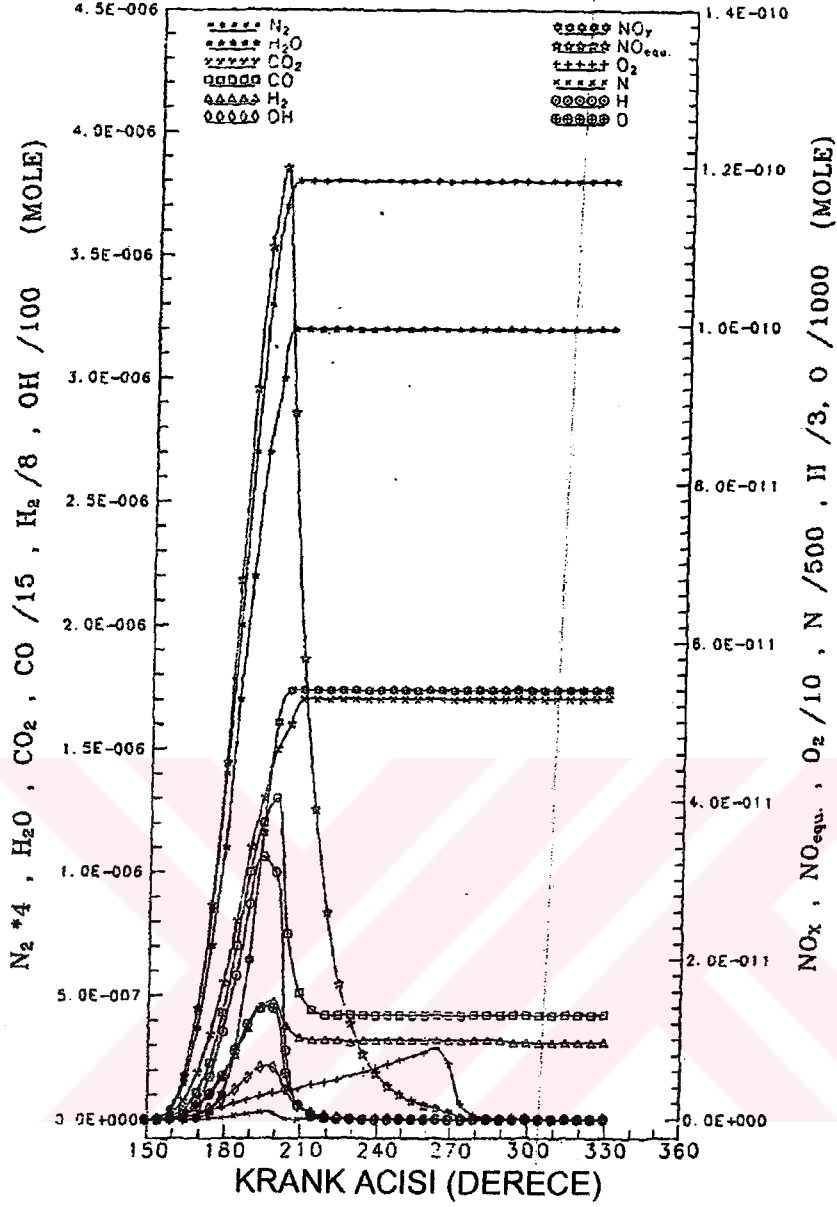
Şekil 5.5, 5.6 ve 5.7'de, benzinle çalışma ve hidrojenle zenginleştirilmiş durumda çalışmada, değişik denklik oranlarında yanma sonucu oluşan emisyonların karşılaştırmaları yer almaktadır.



Şekil 5.5.- %100 benzinli ve $\phi=1.0$ koşulu için yanma ürünleri analizi (Al-Janabi ve Al-Baghdadi, 1999).



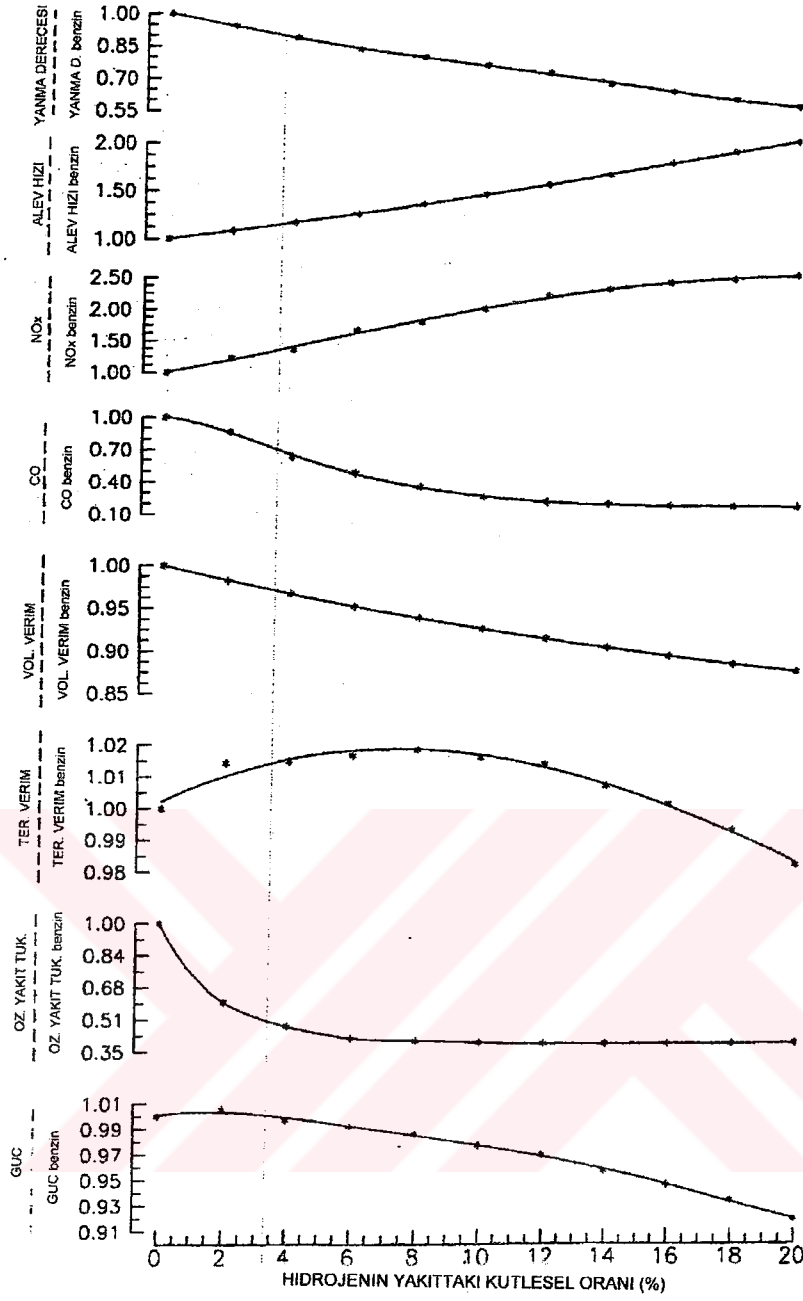
Şekil 5.6.- %90 benzin %10 hidrojen karışımı ve $\phi=1.0$ koşulu için yanma ürünleri analizi (Al-Janabi ve Al-Baghdadi, 1999).



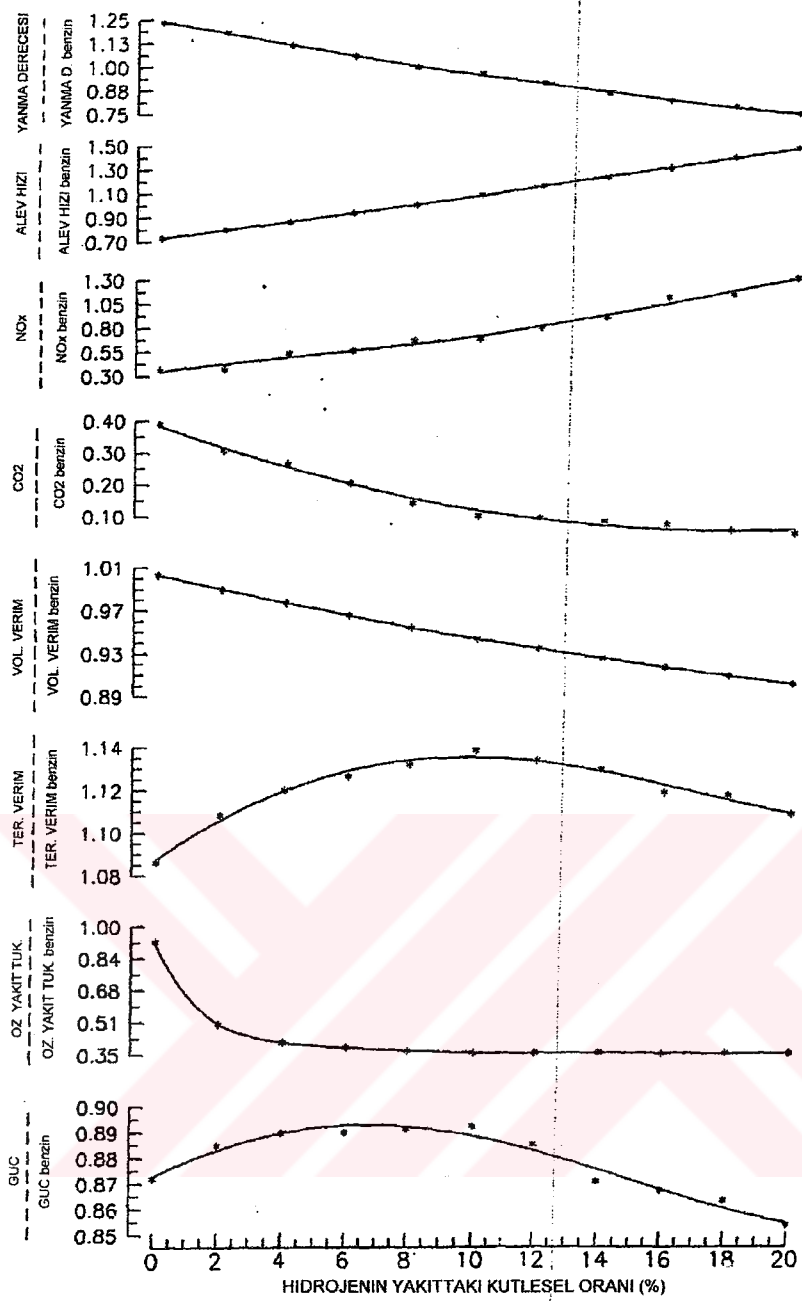
Şekil 5.7.- %90 benzin %10 hidrojen karışımı ve $\phi=0.8$ için yanma ürünleri analizi (Al-Janabi ve Al-Baghdadi, 1999).

Şekillerden açıkça görüldüğü gibi, karışımdaki hidrojen oranı arttıkça CO ve CO₂ konsantrasyonları azalmaktadır, bunun sebebi, daha önce belirttiğimiz gibi, karışımdaki karbon oranının azalması ve yanmanın daha mükemmel gerçekleşmesidir. Şekillerden ayrıca NO_x konsantrasyonunun, stokiyometrik karışım için %182, fakir karışım için %383 arttığı görülmektedir. Bu da, NO_x konsantrasyonunun silindir içi sıcaklığına son derece bağlı olmasının neticesidir.

Şekil 5.8 ve 5.9'da, hidrojen katkısının oluşturduğu performans ve emisyonlar, benzinle çalışma durumundaki performans ve emisyonlarla kıyaslanmıştır.



Şekil 5.8.- $\phi=1.0$ için performans ve emisyon değerlerinin karşılaştırılması (Al-Janabi ve Al-Baghdadi, 1999).



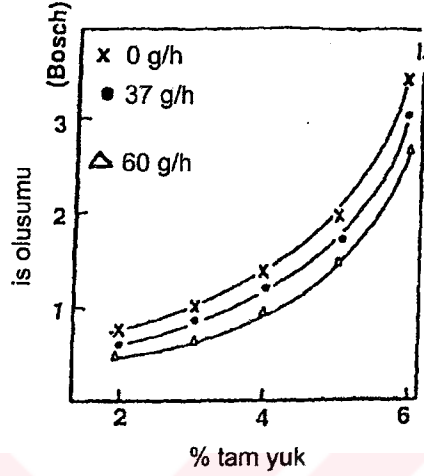
Şekil 5.9.- $\phi=0.8$ için performans ve emisyon değerlerinin karşılaştırılması (Al-Janabi ve Al-Baghdadi, 1999).

Şekillerden görüldüğü gibi, volümetrik verim, hidrojen oranının artmasıyla beraber düşmektedir, bunun sebebi hidrojenin yoğunluğunun benzine oranla daha küçük olmasıdır. Termik verim, hidrojen oranının artmasıyla beraber %8'lik karışım değerine kadar artmakta, daha sonra düşen volümetrik verimin etkisiyle düşmektedir. Özgül yakıt tüketiminde ise, hidrojen oranının %6'ya kadar artmasıyla bir düşüş, kalan kısımda ise sabit bir eğilim vardır. Ayrıca hidrojen oranının artmasıyla alev hızının arttığı, dolayısıyla da yanma süresinin kısaldığı şekillerden görülmektedir.

Dizel Motorunda Yapılan Çalışmalar

Burada, dizel motoru ile yapılmış olan iki çalışmaya yer verilecektir.

Bu çalışmalardan ilkinde, tek silindirli, 350 cm³ hacminde ön yanma odalı, 20:1 sıkıştırma oranlı bir motor kullanılmıştır. Çalışma sırasında 9.75 mg/s ve 19.5 mg/s olmak üzere iki hidrojen debisi kullanılmıştır. Deney sonuçları Şekil 5.10'da gösterilmiştir (Peavey, 1998).



Şekil 5.10.- Hidrojen miktarının is oluşumuna etkisi (Peavey, 1998).

Şekilden görülebileceği üzere hidrojenin düşük devirde etkisi düşük devir ve yüksek yükleme durumunda daha fazla olmaktadır.

Diğer çalışmada, direk püskürtmeli 550 cm³'lük bir motor kullanılmıştır. Deney sonucunda, güçte düşme ve vuruntu sınırını yukarı çekmek için kullanılan su püskürtme sebebiyle hidrokarbon emisyonlarında artış görülmüştür (Peavey, 1998).

Sonuçlar

Yapılan bu deneyler sonucu, hidrojenin içten yanmalı motorlarda katkı olarak kullanılmasının sonuçlarını şu şekilde sıralayabiliriz:

- Karışım tutuşabilirlik sınırları genişlemektedir.
- Fakir karışımlarla çalışabilme sebebiyle NO_x ve CO emisyonlarında azalma
- Yakıttaki hidrojen oranı artıp karbon miktarı azaldığı için CO₂ emisyonunda azalma
- Yanma daha hızlı ve kısa sürede gerçekleştiği için ısı kaybının azalması neticesinde termik verim artışı
- Volümetrik verimdeki azalmadan dolayı güçte düşme

- Karışım fakirleştikçe, HC emisyonlarında artış.

Yakıtta hidrojen ekleme işlemi için, çok düşük miktarlarda hidrojen depolaması iş göreceği, hatta daha önce de belirtildiği gibi motordan güç alan generatörler de kullanılabileceği için, sorunsuz bir şekilde kullanılabilir ve halen kullanılmaktadır



5.3. Hidrojenin İYM'da Direk Olarak Kullanımı

Yakıt olarak hidrojenin kullanıldığı içten yanmalı bir motorun, benzinle çalışan motordan pek bir farkı yoktur. Fakat, motorda gerekli bazı modifikasyonlar yapılmadan hidrojen yakıtı ile çalıştırılırsa bazı problemlerle karşılaşılacaktır.

5.3.1. Hidrojenle çalışma durumunda karşılaşılan problemler

Hidrojenin, ilk bölümde incelenen yakıt olarak kullanılmasında sağlanan avantajları yanında bazı problemleri de vardır. Benzinle çalışan motorun modifikasyonsuz bir şekilde hidrojenle çalıştırılması durumunda aşağıdaki işletme problemleri oluşur (Lynch, 1974a).

1- Emme Kanalı Geri Tutuşması

Bu olay, hidrojenin geniş yanma sınırları ve küçük tutuşma enerjisinin bir sonucudur. Hidrojen-hava karışımı sıcak silindirin veya silindirin sıcak bir bölgesinin veya emme kanalındaki sıcak bir parçanın etkisiyle emme devam ederken tutuşur. Geri tutuşma genellikle bir gürültü yapar ve emme sistemindeki parçalara zarar verir. Denklik oranı (ϕ)'nin 0.65-1.05 değerleri arasında geri tutuşma eğilimi vardır ve ϕ 'nin 1.05'den büyük değerleri için devamlı geri tutuşma oluşur.

2- Erken Tutuşma

Hidrojen motorunda rastlanan bir diğer güçlük de bujide ateşleme yapılmadan önce yanma odası içindeki karışımın tutuşmasıdır. Bu olay başladıktan sonra giderek artan bir erken tutuşma oluşur motor durur. Bu olayın sebebi silindir içindeki tutuşmaya sebep olabilecek sıcak bölgelerdir.

3- Hızlı Basınç Artışı

Bujide ateşleme yapıldıktan sonra yanma, hidrojen motorunda benzine oranla çok daha hızlı olur. Bunun sonucu olarak silindir içindeki basınç çok hızlı artar. Bu artış, benzinli motorda 0.14-0.19 bar/°KMA iken hidrojen motorunda bu değer üç katına kadar çıkabilmektedir.

4- Dalgalı Yanma

Denklik oranı (ϕ)'nin 0.9'dan büyük değerlerinde, hidrojenle çalışma durumunda darbeli yanma rejimi başlar. Bunun sonucunda motorda düşük güç, fazla ısınma gibi sorunlar ortaya çıkar.

5- NO_x Emisyonu

Motorda hidrojen kullanılması sonucu CO, CO₂, HC emisyonu ve partikül gibi emisyonlar oluşmaz. Bunun yanında, yağlama yağının yanma odasına geçmesinden ötürü az da olsa karbonlu emisyonlar olacaktır. Bu emisyonları saymazsak, hidrojen motorundan oksijen, yanmamış hidrojen, su buharı, azot ve azot oksitler çıkacaktır. Bunların içinde en tehlikelisi azot oksitlerdir. Yüksek güçlerde ve stokiometrik karışım oranına yakın değerlerde NO_x emisyonu çok fazladır.

Yukarıda sayılan olumsuzlukları gidermek için karışıma su katılması, egzost gazının resirkülasyonu gibi yöntemler kullanılmaktadır. Ancak yine de motorda, özellikle yakıt kontrol sisteminde bazı değişiklikler yapılmalıdır.

5.3.2. Motorda yapılması gerekli modifikasyonlar

Motorun hidrojenle sorunsuz bir biçimde çalıştırılabilmesi için en önemli değişiklik, yakıt kumanda sisteminde yapılmalıdır.

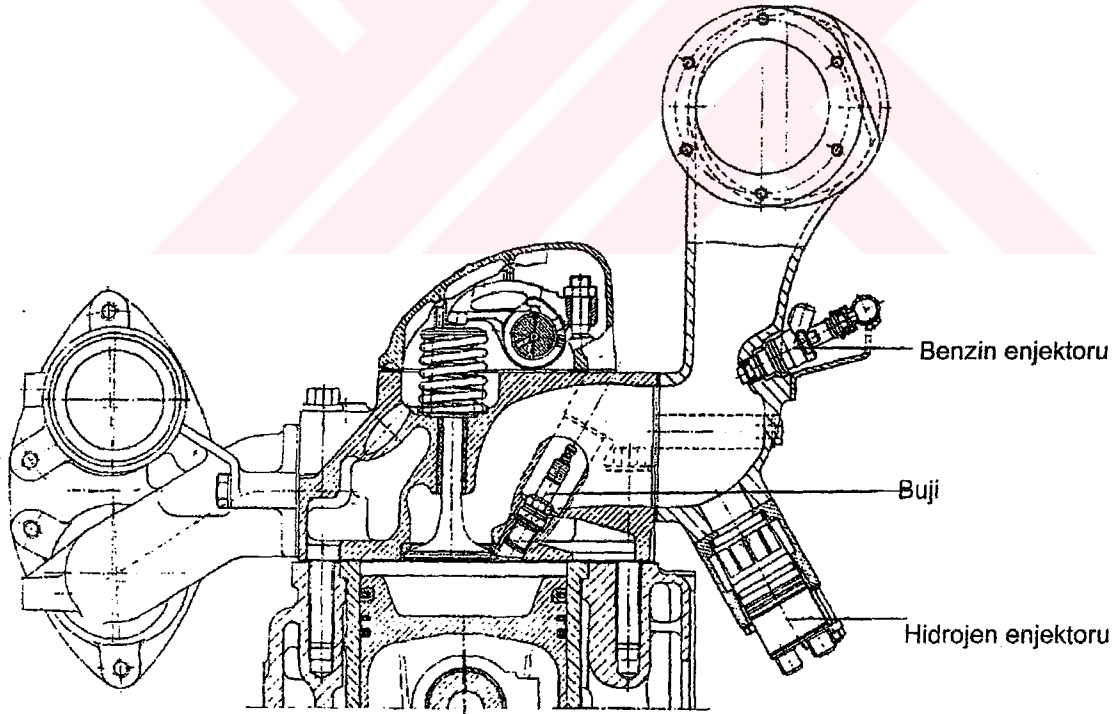
Hidrojen motorunda yakıt hava karışım teşkili iki kısma ayrılır: Harici karışım teşkili ve dahili karışım teşkili. Harici karışım teşkili, gaz yakıt karbüratörü kullanılarak veya düşük basınçlı enjektörlerle emme kanalına püskürtme yapılarak sağlanır. Dahili karışım teşkili ise, hidrojenin yüksek basınç altında sıkıştırma periyodunun sonunda silindirin içine püskürtülmesidir.

5.3.2.1. Harici karışım teşkili ve yapılması gerekli modifikasyonlar

Yukarıda anlatıldığı gibi karışımın yanma odasından önce hazırlanmasına harici karışım teşkili denir. Hidrojenin motorlarda kullanılma potansiyelinin araştırıldığı ilk yıllarda karışım, bugünkü doğalgaz ve LPG karbüratörlerine benzer bir karbüratör ile emme

kanalında yapılırdı. Bu sistemde, yakıt besleme sisteminden gelen hidrojenin basıncı 0.0348 bar değerine düşürülerek karıştırıcıya verilir. Benzin karbüratörü ise, karışıma su ilave etmek için kullanılmaktadır. Güç ihtiyacına karşı karışım teşkilini daha düzgün yapmak için ikinci bir hidrojen besleme devresi kullanılmaktadır. Birinci devre karışım oranını 0.5 değerinde tutarken, artan güç ihtiyacı gerekli olan karışım oranı artışı ikinci devre tarafından sağlanır. Ancak karbürasyon sisteminin en önemli dezavantajı, karışım teşkil zamanının kontrol edilememesi ve motorun hidrojenle çalışmasında ortaya çıkan ve yukarıda anlatılan problemlili çalışmaya sebebiyet vermesidir.

İkinci bir yöntem, düşük basınçlı bir enjektör yardımıyla hidrojenin emme kanalına püskürtülmesidir. Bu sistemde, karbürasyonda karşılaşılan mahsurlar, emme süpüresi açıkken püskürtme yapılması sayesinde, emme kanalının büyük bölümünde karışım bulunması engellenerek giderilmiştir. Bu sistemde de besleme hattından gelen hidrojen regülatör yardımıyla püskürtme basıncına indirilmekte, ve yakıt kontrol sisteminden gelen kumandayla püskürtme gerçekleşmektedir. Böyle bir motorun kesiti Şekil 5.11'de verilmiştir.



Şekil 5.11- Harici karışım teşkilli bir motorun kesiti (MAN AG).

Ancak her iki yöntemde de, harici karışımın en büyük dezavantajlarından olan volümetrik verim düşüşü, dolayısıyla motor gücü düşüşü yaşanmaktadır. Çünkü silindire giren karışımda, hidrojenin düşük yoğunluğu sebebiyle hacmen fazla hidrojen bulunmaktadır.

Güçteki düşüş yaklaşık %20 ile 30 arasındadır. Ayrıca, yukarıda anlatılan çeşitli anormal yanma olaylarının giderilebilmesi için motorda bazı modifikasyonlar yapılması gerekmektedir. Bu modifikasyonlar aşağıda açıklanmıştır (Hedrick ve Winsor, 1994; Swain ve Swain, 1995).

Yağlama Yağı

Çalışma sırasında bir miktar yağlama yağının yanma odasına girmesi kaçınılmazdır. Düşük yükte çalışma sırasında bu yağ, piston üzerinde sıvı halde toplanacaktır ve sıcaklık düşük kaldığı sürece sıvı halde olacaktır. Ancak yükün artması durumunda sıcaklık artışı olacak, dolayısıyla yağ buharlaşacak ve ateşlemeye sebep olacaktır. Yanma sonucu kalan yağ tortuları da sonraki çevrimlerde ateşlemeye yani erken tutuşmaya sebep olacaklardır. Bu sebepten yağ seçimi, buharlaşması en az olandan yana yapılmalıdır.

Süpaplar

Süpap kılavuz yolları, yağın silindire girdiği iki yoldan biridir. Kılavuz contaları, bu yağ sızıntısını minimuma indirecek şekilde olmalıdır. Ayrıca, özellikle egzost süpap başları, daha iyi soğutulabilmesi için daha küçük seçilmeli ve süpap içindeki soğutucu sodyum kanalı mümkün olduğunca büyük olmalıdır.

Segmanlar

Segmanlar, yağın silindire girme yerlerindedir. Bu sebeple, segmanların sızdırmazlığı çok iyi olmalıdır. Ayrıca segmanlar, silindir içinde kalan gaz ve segman boşluklarındaki tortuların kartere atılabilecek şekilde ayarlanmalıdır. Bu amaçla ilk kompresyon segmanının boşluğu, diğerlerinden daha az seçilmelidir.

Bujiler

Karışımın kendi kendine tutuşmasını önlemek için, soğuk yüzeyli bujiler seçilmelidir. Fakir karışımlarda ortaya çıkan düşük enerji açığa çıkışına karşı gerekirse ikinci bir buji kullanılmalıdır.

Soğutma Sistemi

Silindir sıcaklıklarının düşük tutulabilmesi için soğutma sisteminin bu özelliği sağlayabilecek şekilde gözden geçirilmesi gerekmektedir.

Ayrıca bütün bu değişikliklere olanak verecek şekilde ve stokiyometrik karışım oranlarında yüksek enerji açığa çıkışına karşı düşük türbülans yaratan bir silindir kafasının yeniden tasarlanması gerekmektedir.

Örnek olarak Amerikan Enerji Bakanlığı araştırma laboratuvarlarında yapılmış olan, 9.2:1 sıkıştırma oranlı bir Toyota 2TC motorunun hidrojenle çalıştırılması için yapılan çalışmada, mevcut buji yerine daha küçük 10 mm'lik iki adet buji kullanılmış, daha iyi soğutma sağlayan iki adet egzost süpüğü, büyük süpüğün yerine kullanılmış, pistonların ısınma sorununa karşı kalın etekli pistonlar kullanılmış, segmanlar, ilk segman boşluğu 0.15 mm, diğerleri sırasıyla 0.30, 0.32 mm olacak şekilde değiştirilmiş, 0W30 kalitesinde yağ seçilmiş, sızdırmazlık sorunu olan orijinal süpüğü contaları, GM motorlarında kullanılan contalarla değiştirilmiş, ve bu değişiklikler için silindir kafası yeniden dizayn edilmiştir. Yakıt kontrolü için emme kanalına Siemens marka enjektör ve kontrol sistemi yerleştirilmiştir.

Bu değişiklikler sonrası, motor sorunsuz bir şekilde çalışmıştır. Ancak güçte yaklaşık %20 kayıp gözlenmiştir. Bu motorun hidrojenle çalıştırılması sırasında ölçülen değerler Çizelge 5.3'de gösterilmiştir (Swain ve Swain, 1995).

Çizelge 5.3- Hidrojenle çalıştırılan motordan ölçülen değerler (denklik oranı (ϕ) 0.4 için), FOEB:fren ortalama efektif basınç, SOEB:sürtünme ortalama efektif basınç, İOEB:indike ortalama efektif basınç.(Swain ve Swain, 1995).

Motor Devri	1000	1800	2830	3500	4000
Vol. Verim (%)	79.0	84.6	87.9	88.4	74.3
FOEB (bar)	2.60	2.55	2.16	1.47	0.38
SOEB (bar)	1.48	2.14	3.00	3.53	3.97
İOEB (bar)	4.08	4.69	5.16	5.00	4.35
Termik Verim (%)	36.0	38.6	40.7	39.2	40.2
Ateşleme Avansı (°KMA)	23	27	31	33	35
NO _x (ppm)	7.4	7.9	10.2	14	18

Çizelge 5.4- Hidrojenle çalıştırılan motordan ölçülen değerler (denklik oranı (ϕ) 0.5 için), FOEB:fren ortalama efektif basınç, SOEB:sürtünme ortalama efektif basınç, İOEB:indike ortalama efektif basınç.(Swain ve Swain, 1995).

Motor Devri	1000	1800	2830	3500	4000
Vol. Verim (%)	79.2	84.9	88.2	88.6	74.1
FOEB (bar)	3.29	3.40	3.01	2.49	0.85
SOEB (bar)	1.48	2.14	3.00	3.56	3.97
İOEB (bar)	4.77	5.54	6.01	6.05	4.82
Termik Verim (%)	34.8	37.7	39.3	39.2	37.3
Ateşleme Avansı (°KMA)	15	17	20	22	25
NO _x (ppm)	45	71	90	120	175

Çizelge 5.5- Hidrojenle çalıştırılan motordan ölçülen değerler (denklik oranı (ϕ) 0.8 ve 1.06 için), FOEB:fren ortalama efektif basınç, SOEB:sürtünme ortalama efektif basınç, İOEB:indike ortalama efektif basınç.(Swain ve Swain, 1995).

Motor Devri	1000	1800	2830	3500	4000
Vol. Verim (%)	1800	2830	3500	1800	2830
Denklik Oranı (ϕ)	0.8	0.8	0.8	1.06	1.06
FOEB (bar)	5.45	5.11	4.65	6.23	6.07
SOEB (bar)	2.14	3.00	3.56	2.14	3.00
İOEB (bar)	7.59	8.11	8.21	8.37	9.07
Termik Verim (%)	35.9	36.8	36.9	32.6	33.9
Ateşleme Avansı (°KMA)	5	5	6	2	3
NO _x (ppm)	5200	6800	7400	4100	4400

Almanya'da Alman Enerji Enstitüsü tarafından 3500 cc'lik bir BMW motorunda yapılan çalışmada ise benzinle çalışmada 170 kW olan motor gücü, süpap zamanlı enjeksiyon, ve değişken su katkısıyla hidrojenle çalıştırılma durumunda 120 kW'a düşmüştür (Peavey, 1998).

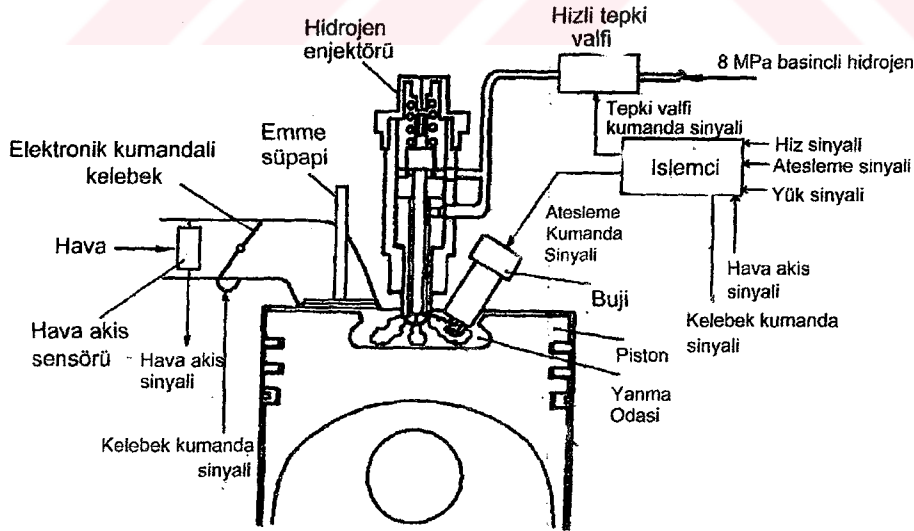
Yine Almanya'da, BMW'nin kendi bünyesindeki hidrojen araştırmalarında kullandığı 735 modeli, benzinle çalışmada 140 kW güç üretirken, hidrojenle 80 kW üretmektedir (Wurster, 1997).

5.3.2.2. Dahili karışım teşkili ve yapılması gerekli modifikasyonlar

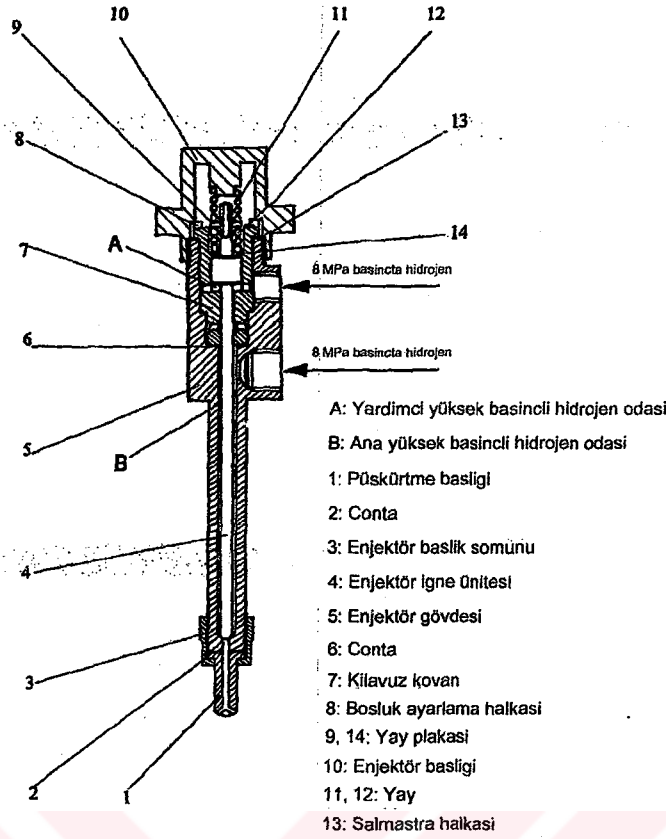
Dahili karışım teşkilinde, yakıt emme süpüğü kapandıktan sonra silindir içine püskürtülür. Emme periyodunda silindir içine sadece hava alındığından volümetrik verimde kayıp olmaz. Dahili karışım teşkilinde, harici karışım teşkilinde karşılaşılan yanma problemleri oluşmaz, böylece motorda özel bazı modifikasyonlar gerekmez, ancak püskürtme sıkıştırma strokunda olduğu için karışımın oluşabilmesi için çok kısa bir zaman kalmaktadır. Bu yüzden oluşan homojen olmayan karışım, tutuşma gecikmesi, tam yanmama ve azot oksit emisyonlarında artış görülebilir. Bu ise, silindir içinde türbülans oluşumu sağlanarak veya yakıt püskürtme sisteminde homojen karışım teşkil edecek şekilde modifikasyonlarla giderilebilir.

Püskürtme, erken ve geç püskürtme olarak yapılabilir. Erken püskürtme, sıkıştırma periyodu başında başlar ve üst ölü noktaya 90° öncesine kadar devam eder. Geç püskürtme ise, üst ölü noktadan 5° öncesine kadar devam eder.

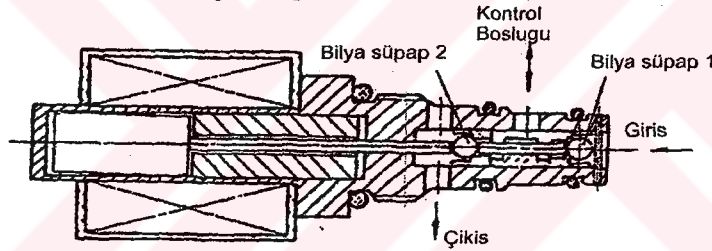
Görüldüğü gibi, dahili karışım teşkilinde kilit eleman püskürtme sistemidir. Püskürtme sistemi, hem yüksek basınçlara çıkabilmeli, hem bu basınçta hidrojen kaçağı yaratmamalı, hem de yanma kalitesi için iyi bir karışım teşkili sağlayabilmelidir. Şekil 5.12, 5.13, 5.14'de böyle bir püskürtme sistemi tanıtılmıştır (Guo vd., 1999).



Şekil 5.12- Dahili karışım teşkilli bir motor kesiti ve püskürtme sistemi (Guo vd., 1999).



Şekil 5.13.- Hidrojen enjektörünün kesiti (Guo vd., 1999).



Şekil 5.14.- Hızlı tepki valfi (Guo vd., 1999).

Sistem, bir mikro işlemci sistemi ve bu işlemcinin kontrol ettiği hızlı tepki valfi ve enjektörden oluşmaktadır. Şekilde de görüldüğü gibi, giren hava debisi, motor hızı ve motor yükü sinyallerini alan işlemci, ateşleme ve püskürtme zamanına ve püskürtme süresine karar verir ve hızlı tepki valfine püskürtme sinyali verir. Hızlı tepki valfi, yüksek hızlarda bile değişimlere hızlı yanıt verebilen bir kumanda elemanıdır ve sinyal geldiğinde, manyetik gücün etkisiyle 1 numaralı bilya yuvasından kalkarak basınçlı gazın enjektöre gitmesini sağlamaktadır. Enjektör ise, klasik Diesel enjektöründen pek farklı değildir. Ana ve yardımcı yüksek basınçlı hidrojen odaları bulunan enjektörde, hızlı tepki valfinin basınçlı hidrojene yol vermesiyle basıncın etkisiyle iğne kalkmakta ve püskürtme gerçekleşmektedir (Guo vd., 1999).

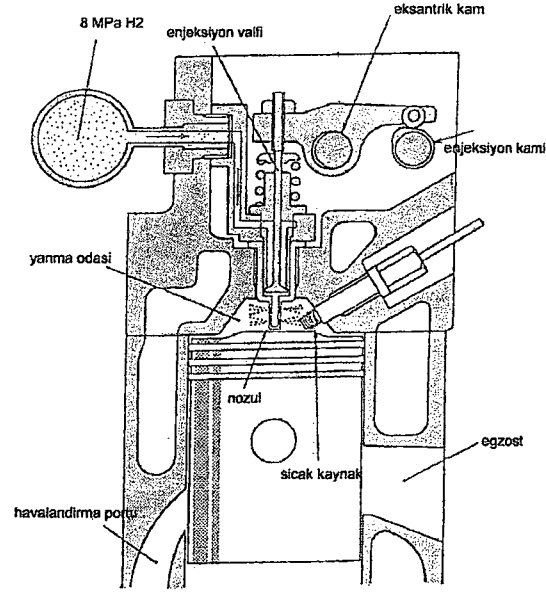
Yukarıda anlatılandan farklı tipte enjeksiyon tipleri de mevcuttur. Ancak fark, yukarıda anlatılan hızlı tepki valfinin enjektör bünyesinde olmasıdır. Bu tip sistemlerin en büyük

dezavantajı, meme ucundaki yüksek basınç nedeniyle sızdırmazlık sorunları ve sızdırmazlık elemanlarının kısa ömrüdür.

Yeni Zelanda Canterbury Üniversitesinde, benzer bir püskürtme sistemiyle Ricardo E6 deney motorunda yapılan çalışmada, benzinli çalışmaya göre pik güçte %20'lik bir artış gözlenmiştir. Sıkıştırma oranının artırılması durumunda güç artmış, fakat 12:1 den daha fazla sıkıştırma oranı, güçte artış sağlamamıştır. Ayrıca, güç artışına rağmen, sıkıştırma oranının 8:1'den fazla artırılması durumunda vuruş başlamıştır. Yüksek sıkıştırma oranlarında vuruntunun giderilmesi, hava fazlalık katsayısının artırılması ile giderilebilmiştir. NO_x emisyonları ise, stokiometrik karışım civarında, benzinle çalıştırılmadaki ile hemen hemen aynı değerleri vermiş ve λ 'nın 1.8'den büyük değerleri için çok düşük olmuştur. Kısmi yüklerde elde edilen termik verim değeri, benzinle çalışmadakine göre iyi olsa da, aynı konuda yapılmış diğer çalışmalarla kıyaslandığında artış biraz az gözükmektedir. Bunun sebebi, hatalı püskürtme sistemi seçimi ve enjektörün silindir kafasında yanlış yerleştirilmesi olabilir (Glasson ve Green, 1993).

5.3.2.3. Diesel motorlarında kullanım ve yapılması gerekli modifikasyonlar

Bilindiği gibi Diesel motorlarında, emme periyodunda silindir içine yalnız hava alınır ve bu hava sıkıştırma periyodunda sıkıştırılarak, periyodun uygun bir yerinde Diesel yakıtı püskürtülür. Sıkıştırılan havanın sıcaklığı, Diesel yakıtının kendi kendine tutuşmasını sağlar. Yukarıda anlatılan geç püskürtmeli dahili karışım incelenecek olursa Diesel çevriminden tek farkının buji olduğu görülür. Bujinin olmaması durumunda, karışımın kendi kendine tutuşabilmesi için gerekli sıcaklık ancak 28:1 gibi sıkıştırma oranlarında sağlanabilmektedir. Ancak pratikte bu sıkıştırma oranı zor olacağı için buji yerine en azından bir sıcak kaynak kullanılmalıdır. Bu sıcak kaynak, Diesel motorundaki gibi, yakıtın püskürtülürken tutuşmasını sağlamaktadır. Şekil 5.15'de, Japonya'da Musashi Teknoloji Enstitüsü'nde yapılan çalışmada kullanılan, 2 stroklu 3 silindirli bir Suzuki Diesel motoru görülmektedir. Bu motorda hidrojen, sıkıştırma periyodunun ilk yarısında 6 MPa basınçla, turboşarj kullanılması durumunda ise 8 MPa basınçla püskürtülmektedir. Bu çalışmada, Diesel yakıtıyla çalışmaya göre %50 güç artışı gözlenmiştir (Peavey, 1998).



Şekil 5.15- Hidrojenle çalıştırılan 2 stroklu bir Diesel motor kesiti (Peavey, 1998).

6. SONUÇLAR

Önceki konularda görüldüğü üzere hidrojen, günümüzde kullanılan yakıtlara alternatif olarak kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Peki neden kullanılmamaktadır? Genelde herhangi bir yakıtın, konumuzla ilgili olarak ise hidrojenin kullanılabilmesi için gerekli birçok şartın karşılanabilmesi gereklidir. Bu şartları 7 ana başlık altında toplayabiliriz:

1. taşıt ve işletme maliyeti,
2. sürüş menzili,
3. yakıt ikmal altyapısı,
4. tahrik sisteminin özgül gücü,
5. tahrik sisteminin verimi,
6. düşük emisyon özelliği,
7. yakıtın yenilenebilirlik özelliği.

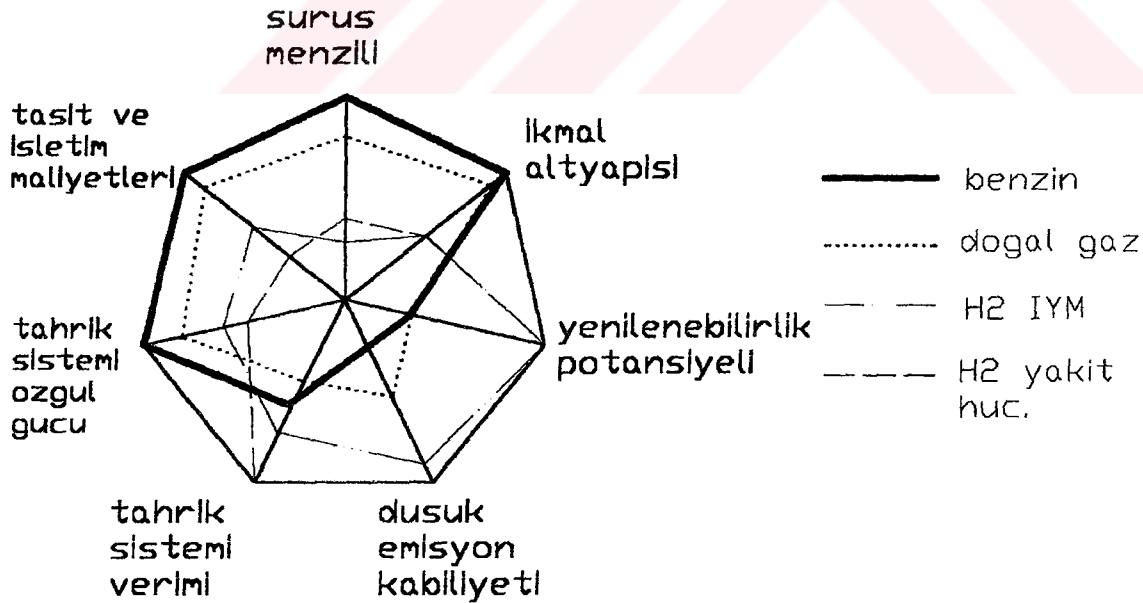
Yukarıda sıralanan özellikleri ayrıca iki ana grupta toplayabiliriz. Bunlar bireysel öncelikler ve toplumsal önceliklerdir. İlk dört madde, bireysel önceliklere dahildir. Son üç madde ise toplumsal önceliklerdir. Yani bir birey, taşıt tercihi yaparken emisyonlar veya yakıtın yenilenebilirliğinden önce taşıtın maliyeti, yakıtın yaygınlığı ve gücü gibi kıstasları göz önünde bulunduracaktır.

Bu özellikler, hidrojen yakıtlı taşıtların kullanıma hazırlığı ve diğer rakipleriyle (doğal gaz, LPG, elektrik vs) olan karşılaştırmasında kullanılmaktadır. Hidrojenin bu özelliklerden hangilerinde mevcut ve alternatif yakıtlara üstün olduğu incelenecek olursa bunların, en azından günümüz şartlarında, son üç özellik, yani tahrik sisteminin verimi, düşük emisyon özelliği ve yenilenebilirlik özelliğidir. Yani günümüzde bireylerin tercih kıstaslarında hidrojen, diğer yakıtlara göre dezavantajlı konumdadır.

Bunun yanında, kamu hizmeti yapan araçlar (hükümet ve belediye araçları) ve filo araçlarında ise tercih kıstasları bireylerinkinden farklıdır. Bu araçlar, genellikle çalışma sürelerinin sonunda garajlarına dönerler ve günde bir ikmal yaparlar. Bunun yanında taşıttan beklenen performans, güç değil verimlilik yönündedir. Ayrıca, ülkemizde olmasa da özellikle Amerika ve AB üyesi ülkelerde, özellikle kamu hizmeti yapan filo araçlarına çok sıkı emisyon limitleri konulmuş ve belli miktarda aracın alternatif yakıtla çalışma zorunluluğu getirilmiştir. Bu durumda bu araçlarda yakıt olarak hidrojenin tercih edilmesi

şansı yüksektir. Gerçekten de, her ne kadar demonstrasyon çalışması için de olsa, hidrojen yakıtlı otobüs projeleri hayata geçirilebilmiştir. Amerika'da Şikago Otobüs İşletmesi, Ballard Güç Sistemlerinin temin ettiği yakıt hücreli otobüsü seferlerinde denemiş ve olumlu görüş bildirmiştir. Aynı şekilde Almanya'da çeşitli firmaların oluşturduğu konsorsiyum, MAN marka otobüslerde hidrojenin hem yakıt hücresinde hem de içten yanmalı motorda kullandığı projeleri Erlangen ve Münih şehirlerinde denemiş, hem konsorsiyum hem de otobüs işletmeleri olumlu sonuçlar aldığını açıklamıştır. Bu tip projelere bir örnek de yine Almanya'da Münih havaalanında gerçekleştirilmiştir. Havaalanında kullanılan otobüsler (MAN marka ve yukarıda değinilen projedekiler ile aynı) ve BMW marka araçlar hidrojenle çalışmaktadır.

Görüldüğü gibi, kamu hizmetindeki araçların hidrojenle çalıştırılması için sorunlar, kişisel araçların hidrojenle çalıştırılmasındakine göre daha azdır ve hatta destekleyici yanları da mevcuttur. Bu araçlarda da, yakıt hücresi kullanımı, gerek verim gerekse beklenen güç ihtiyacı gözönüne alındığında daha avantajlıdır. Şekil 6.1'de, benzin, doğalgaz, ve hidrojenin (yakıt hücreleri ve içten yanmalı motorlarda kullanım) birbirlerine göre karşılaştırılması görülmektedir. Bu diyagramda, özellikler, merkezden dışa doğru iyileşmektedir. Hidrojenin mevcut yakıtla zenginleştirilmesi, diyagramı karıştırmamak için gösterilmemiştir.



Şekil 6.1.- Benzin, doğalgaz ve hidrojenin yakıt olarak kullanımının karşılaştırılması.

Ancak bu araçların dışında hidrojenin yakıt olarak kullanılması, kısa vadede mümkün görülmemektedir. Bunun en önemli sebebi, maliyetler ve hareketliliğin devamı için

hidrojenin ikmal istasyonlarının yaygınlaşması gerekliliğidir (ki bu da bir maliyet sorunudur). Bu sebeple hidrojen günümüzde ancak mevcut yakıtı zenginleştirmede kullanılabilir görünmektedir. Gelecekte ise, bireysel tercihlerde güç ve sürüş zevki gibi faktörler belirleyici olduğu için, yakıt hücrelerindense içten yanmalı motorlarda kullanım potansiyel sahibidir. İçten yanmalı motorun yakıt hücrelerine göre bir diğer avantajı da, çift yakıtla, yani hem benzin hem hidrojenle çalışabilme özelliğidir. Böylece, özellikle yakıt ikmal yaygınlığı sorunu hidrojen kullanımını engellemeyecektir.



KAYNAKLAR

Al-Janabi, S. ve Al-Baghdadi, (1999), "A Prediction Study of Hydrogen Blending On The Performance And Pollutants Emission of A Four Stroke Spark Ignition Engine", International Journal of Hydrogen Energy, Vol 24:363-375.

Appleby, A.J. ve Foulkes, F., (1989), Fuel Cell Handbook, Van Nostrand Reinhold, New York 1989.

Arslan E. ve Soruşbay C., (1988), "Hidrojen Yakıtlı İçten Yanmalı Motorlarda Yanma Performansı", Mühendis ve Makina Dergisi, Cilt 29 (Sayı 339):23-28.

Ballard Inc. Katalogları.

Billings, R.E., (1975), "Hydrogen's Potential As a Vehicular Fuel for Transportation", International Academy of Science Teknik Raporları No 75001.

Glasson, N. ve Green, R., (1993), "Performance of a Spark Ignition Engine Fuelled with Hydrogen Using a High-Pressure Injector", Int. Journal of Hydrogen Energy, Vol. 19 (No 11):917-923

Guo, L. vd., (1999), "A Hydrogen Injection System With Solenoid Valves For a Four Cylinder Hydrogen Fuelled Engine", Int. Journal of Hydrogen Energy, Vol. 24:378-382

Hedrick, J.C. ve Winsor, R.E., (1994), Advanced Hydrogen Utilization Technology Demonstration, National Renewable Energy Laboratory, Colorado/A.B.D.

Jamal, Y. ve Wyszynski, M.L., (1994), "On-Board Hydrogen Generation of Hydrogen Rich Gaseous Fuels", International Journal of Hydrogen Energy, Vol 19 (No 7):557-572.

Kamal, M. Ve Lloyd, A., (1996), "Market Applications for Hydrogen-Fuelled Vehicles", Hydrogen Technology Advisory Panel Raporu.

LBST, "Hydrogen in the Energy Sector", Ludwig Bölkow Systemtechnik Raporu

Linde AG, (1999), Gas Processing Tanıtım Broşürü.

Lynch, F.E., (1974a), "Backfire Control Techniques for Hydrogen Fuelled Internal Combustion Engines", International Academy of Science Teknik Raporları No 74001.

Lynch, F.E., (1974b), "Metal Hydrides", International Academy of Science Teknik Raporları No 74004.

MAN AG, Teknik Katalogları.

Onuncu Dünya Enerji Konferansı Dökümanları, Cocoa Beach/A.B.D., 20-24 Haziran 1994.

Peavey, M., (1998), Fuel From Water, Merit Inc. Louisville/A.B.D.

Sarıca T., (1988), Hidrojenin motora yakıt olarak kullanılmasında sağlanan avantaj, uygulama teknikleri, karşılaşılan problemler ve geleceğe yönelik değerlendirmeler, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Swain, M. Ve Swain, N., (1995), Elimination of Abnormal Combustion in a Hydrogen Fuelled Engine, National Renewable Energy Laboratory, Colorado/A.B.D.

Wurster, R. ve Altmann M., (1996), "Feasibility Study on Fuel Cell Propulsion for Urban City Buses and Delivery Trucks", 11. Dünya Hidrojen Enerjisi Konferansı, Haziran 1996, Stuttgart/Almanya.

Wurster, R. (1997), "Hydrogen Application in Urban Vehicles", Norsk Hydrogenforum, 2 Haziran 1997 Oslo.

Wurster, R., (1999), "PEM Fuel Cells in Stationary and Mobile Applications", 6. ITC Kongresi, 13-19 Eylül 1999, Biel/Almanya.

İnternet Kaynakları

- 1- Ludwig Bölköw Systemtechnik GmbH Web Sitesi www.lbst.de
- 2- Amerikan Çevre Koruma Ajansı Web Sitesi www.epa.gov
- 3- Amerikan Enerji Bakanlığı Web Sitesi www.doe.gov
- 4- Amerikan Hidrojen Derneği (AHA) Web Sitesi www.clean-air.org



ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi	07.12.1976	
Doğum Yeri	Ankara	
Lise	1990-1993	TED Ankara Koleji
Lisans	1993-1997	Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Enerji Opsiyonu
Yüksek Lisans	1998-2000	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Müh. Anabilim Dalı, Enerji Mak. Programı
Çalıştığı Kurumlar		
	1997-1999	Yenen Mühendislik Ltd. Şti.

