

**BENZİNLİ MOTORLARDA HİDROJEN KULLANIMININ PERFORMANS VE
EMİSYONLARA ETKİSİ**

Murat KOÇAR

**Zonguldak Karaelmas Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Bilimi Anabilim Dalında
Bilim Uzmanlığı Tezi
olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Haziran 2007**

KABUL:

Murat KOŞAR tarafından hazırlanan “BENZİNLİ MOTORLARDA HİDROJEN KULLANIMININ PERFORMANS VE EMİSYONLARA ETKİSİ” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalında, Bilim Uzmanlığı Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 21/06/2007

Başkan : Doç. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ (ZKÜ)

Üye : Doç. Dr. Mustafa ACARER (ZKÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. M. Bahattin ÇELİK (ZKÜ)



ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım./...../2007



Doç. Dr. Mustafa SÖZEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildi ini ve sunuldu unu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdi i ekilde, bu çalı madan kaynaklanmayan bütüin atıfları yaptı umı beyan ederim.”

Murat KO AR

ÖZET

Bilim Uzmanlı ı Tezi

BENZ NL MOTORLARDA H DROJEN KULLANIMININ PERFORMANS VE EM SYONLARA ETK S

Murat KO AR

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine E itimi Ana Bilim Dalı

Tez Danı manı: Yrd. Doç. Dr. M. Bahattin ÇEL K

Haziran 2007, 67 sayfa

Dünya enerji ihtiyacının büyük bir kısmının petrolden kar ılanmasına ra men petrol rezervleri azalmaktadır. Bunun sonucu, petrol ürünü yakıt kullanan ula ım sektöründe yakıt harcamaları artmaktadır.

Ayrıca petrol kökenli yakıt kullanımının insan sa lı ını ciddi boyutlarda tehdit eden çevre kirlili i yapması ve küresel ısınma gibi problemlere neden olması, bilim adamlarını yeni ve yenilenebilir alternatif yakıtların ara tırılmasına sevk etmi tir.

Hidrojen; temiz, hafif, çevreci, zararsız, çe itli yöntemlerle üretimi kolay bir alternatif yakıt olarak ön plana çıkmaktadır. Bu çalı mada hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanılabilirli i incelenmi , benzin ve saf hidrojenle çalı tırılan tek silind irli buji ate lemeli bir motorda performans ve emisyonlar deneysel olarak kar ıla tırılmı tir.

Anahtar Sözcükler: Hidrojen, çten Yanmalı Motor, Alternatif Yakıt, Çevre.

Bilim Kodu: 626.10.01

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

EFFECTS OF USING HYDROGEN IN GASOLINE ENGINES ON PERFORMANCE AND EMISSIONS

Murat KO AR

**Zonguldak Karaelmas University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Machine Education**

Thesis Advisor: Asst. Prof. M. Bahattin ÇELİK

June 2007, 67 pages

Although the majority of the world energy demand is supplied by the petroleum oil, petroleum reserves decrease day by day. For this reason, the fuel cost in the transportation sector goes higher.

Hydrogen, being a clean, environmentally friendly, harmless alternative fuel, which is also easy to produce, looms large. In this thesis, usability of hydrogen in internal combustion engines was investigated, and performance and emissions of a single cylinder spark ignition engine which was run on gasoline and hydrogen fuel were compared experimentally.

Keywords: Hydrogen, Internal Combustion Engine, Alternative Fuel, Environment.

Science Code: 626.10.01

TE EKKÜR

Bu tez çalı masının yürütülmesi a amasında beni her zaman destekleyen, yönlendiren yakın ilgi ve yardımlarını esirgemeyen tez danı manım Sayın Yrd. Doç. Dr. M. Bahattin ÇEL K'e te ekkür ederim.

Ayrıca, çalı mam sırasında sahip oldu u imkânları esirgemeyen Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Karabük Teknik E itim Fakültesi Otomotiv Anabilim Dalı saygıde er hocalarım Yrd. Doç. Dr. Bülent ÖZDALYAN, Yrd. Doç. Dr. Abdürrezzak AKTA 'a, ayrıca Ar . Gör. O uzhan DO AN, Ö r. Gör. Engin ÖZBA ve Emrah DEN Z'e te ekkürlerimi sunarım.

Son olarak, ö renim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen anneme, babama ve aileme minnettarlıklarımı sunarım.

Ç İNDEK İLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TE EK KÜR	vi
Ç İNDEK İLER	vii
EK İLLER D İZ İN	x
Ç İZELGELER D İZ İN	xi
S İMGELER ve KİSALTMALAR D İZ İN	xii
BÖLÜM 1 G İR	1
BÖLÜM 2 KAYNAK ARA İTİRMASI	5
BÖLÜM 3 H İDROJEN YAKITININ ÖZELL İKLER , ÜRET İM , DEPOLANMASI VE KULLANILMASI.....	11
3.1 H İDROJEN İN K İMYASAL VE F İZ İKSEL ÖZELL İKLER	11
3.2 H İDROJEN ÜRET İM	12
3.2.1 Fotobiyolojik Hidrojen Üretimi	13
3.2.2 Fotoelektrokimyasal Hidrojen Üretimi	13
3.2.3 Hidrojenin Termokimyasal Yöntemle Üretilmesi	14
3.2.4 Hidrojenin Elektrolizle Üretilmesi	15
3.2.5 Buhar Yapılandırması İle Hidrojen Üretimi (Steam Reforming)	15
3.2.5.1 Katalitik Buhar Yapılandırma (SR)	16
3.2.5.2 Kısmi Oksidasyon İle Yapılandırma (POX).....	17
3.2.5.3 Ototermal Yapılandırma (ATR).....	17
3.3 H İDROJEN İN DEPOLANMASI.....	18
3.3.1 Katı Hal Depolama	18
3.3.2 Fiziksel Depolama	19

Ç NDEK LER D Z N (devam ediyor)

3.3.3 Hidrojenin Basınçlı Gaz Olarak Depolanması	19
3.3.4 Hidrojenin Sıvı Olarak Depolanması	19
3.3.5 Hidrojenin Ta ıtlarda Metal Hidrid ekinde Depolanması.....	20
3.4 H DROJEN ENERJ S N N KULLANIMI	21
BÖLÜM 4 MOTOR YAKITI OLARAK H DROJEN	23
4.1 H DROJEN N D ER YAKITLARLA KAR İLA TIRILMASI.....	23
4.2 ÇTEN YANMALI MOTORLARDA H DROJEN KULLANIMI	25
4.2.1 Motor Yakıtı Olarak Hidrojen	26
4.2.2 Buji ile Ate lemeli Motorlara Hidrojen Takviyesi ve Egzoz Gazları Emisyonu	28
4.2.3 Buji ile Ate lemeli Motorun Hidrojen Motoruna Dönü türülmesi	28
4.2.3.1 Karı ım Hazırlama Yöntemleri.....	29
4.3 H DROJEN N MOTORLARDA YAKILMASI VE İLET M PROBLEMLER	31
BÖLÜM 5 DENEYSEL ÇALI MALAR	37
5.1 DENEYSEL ÇALI MANIN AMACI	37
5.2 DENEYLERE İL İK N ÖZELL KLER	37
5.2.1 Deney Yeri	37
5.2.2 Deney Motoru.....	38
5.2.3 Deneyde Kullanılan Hidrojen Yakıtı	39
5.3 DENEYDE KULLANILAN ÖLÇÜM C HAZLARI	39
5.3.1 Motor Deney Seti Ve Dinamometresi.....	39
5.3.2 Yakıt Tüketimi Ölçme Düzene i.....	40
5.3.3 Akı metre (Debimetre)	40
5.3.4 Hava debisi ölçümü	41
5.3.5. Sulu Güvenlik.....	42
5.3.6 Egzoz Gaz Analizörü	43
5.4 H DROJEN YAKITININ MOTORA VER LMES	43
5.5 DENEYLER N YAPILI İ.....	44
5.6 DENEYLERE İL İK N ÖLÇÜM VE HESAPLAMALAR	45

Ç NDEK LER D Z N (devam ediyor)

5.6.1 Motor Momenti Ve Gücü	45
6.5.2 Yakıt Tüketimi Ve Özgül Yakıt Tüketimi	46
BÖLÜM 6 DENEY SONUÇLARI VE TARTI MA	49
6.1 MOTOR PERFORMANSI	49
6.1.1 Motor Momenti.....	50
6.1.2 Motor Gücü	50
6.1.3 Özgül Yakıt Tüketimi	51
6.2 EGZOZ EM SYONLARI	52
6.2.1 CO ve CO ₂ Emisyonu	52
6.2.3 HC Emisyonu	53
6.2.4 NO _x Emisyonu	53
BÖLÜM 7 SONUÇLAR VE ÖNER LER	55
7.1 SONUÇLAR	55
7.2 ÖNER LER	56
KAYNAKLAR	59
EK AÇIKLAMALAR A DENEYSEL ÇALI MALARIN SONUÇLARINA A T	
Ç ZELGELER	63
ÖZGEÇM	67

EK LLER D Z N

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
3.1	Sıfır emisyonlu motor sistemi eması	20
4.1	Enerji kaynaklarının evrimi	24
4.2	1000 cm ³ hacimli bir motor için yanma odasındaki yakıt hava karı ımlarının maksimum kalorifik de erleri.....	30
4.3	Hidrojen yakıt pili	34
4.4	Tek hücreli hidrojen hava yakıt pili	35
5.1	Deney tesisatının genel görünümü.....	37
5.2	Deney tesisatının ematik görünü ü.....	38
5.3	Elektrikli dinamometre.....	39
5.4	Elektrikli dinamometre panosu.....	39
5.5	Yakıt tüketimi ölçüm düzene i.....	40
5.6	Akı metre (Debimetre).....	41
5.7	Hidrojen akı metrenin motora ba lantısı.....	41
5.8	Hava akı metresinin motora ba lantısı.....	42
5.9	Sulu güvenlik.....	42
5.10	Egzoz gaz analiz cihazı.....	43
5.11	Motora hidrojen ve hava verilmesinde kullanılan elemanlar.....	44
6.1	Motor hızına göre benzin ve hidrojen için moment de i imleri.....	50
6.2	Motor hızına göre benzin ve hidrojen için motor gücü de i imleri.....	51
6.3	Motor hızına göre benzin ve hidrojen için özgül yakıt tüketimi de i imleri.....	52
6.4	Motor hızına göre benzin ve hidrojen için CO emisyonları.....	52
6.5	Motor hızına göre benzin ve hidrojen için CO ₂ emisyonları.....	53
6.6	Motor hızına göre benzin ve hidrojen için HC emisyonları.....	53
6.7	Motor hızına göre benzin ve hidrojen için NO _x emisyonları.....	54

Ç ZELGELER D Z N

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Hidrojen ve benzinin özellikleri.....	12
4.1 De i ik yakıtların yanma özellikleri	27
5.1 Deney motorunun teknik özellikleri.....	38
5.3 Egzoz gaz analizörünün teknik özellikleri.....	43
A.1 Benzinli çalı mada elde edilen motor performansı de erleri	64
A.2 Hidrojenli çalı mada elde edilen motor performansı de erleri.....	64
A.3 Benzinli çalı mada elde edilen egzoz emisyonu de erleri	65
A.4 Hidrojenli çalı mada elde edilen egzoz emisyonu de erleri	65

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

B	:	Saatteki Yakıt Tüketimi
b_e	:	Özgül Yakıt Tüketimi
CO	:	Karbon Monoksit
CO ₂	:	Karbon Dioksit
HC	:	Hidrokarbon
H ₂ SO ₄	:	Sülfürik Asit
M_e	:	Motor Momenti
n	:	Motor Devri
NO _x	:	Azot Oksit
P_e	:	Motor Gücü
ppm	:	Milyondaki Kısım (Parts Per Million)
SO ₂	:	Kükürt Dioksit
V_h	:	Silindir Kurs Hacmi

KISALTMALAR

BMEP	:	Fren Ortalama Efektif Basıncı
EGR	:	Egzoz Gazı Resirkülasyonu
EY	:	Eksik Yanma
HFK	:	Hava Fazlalık Katsayısı
YM	:	Çıtten Yanmalı Motor
KEY	:	Kısmi Eksik Yanma
KMA	:	Krank Mili Açısı
OEC	:	Oxygen Enriched Charging (Oksijence zenginleştirilmiş dolgu)
ÖYT	:	Özgül Yakıt Tüketimi
PB	:	Püskürtme Basıncı
PS	:	Püskürtme Sonu
SOF	:	Soluble Organic Fraction (Çözünebilir organik parça)

SS	:	Setan Sayısı
TDI	:	Turbo Dizel Enjeksiyon
TG	:	Tutu ma Gecikmesi
TSEK	:	Türk Standartları Enstitüsü Kalite Uygunluk Belgesi
TTY	:	Teorik Tam Yanma
TY	:	Tam Yanma
ÜÖN	:	Üst Ölü Nokta

BÖLÜM 1

G R

Enerji insanın temel gereksinimlerinin karşılanması, ülkelerin sosyal ve ekonomik olarak kalkınmasında en önemli ihtiyaçlardan biridir. Dünya nüfusu ve endüstriyel gelişimlere paralel olarak enerji ihtiyacı giderek artmakta buna karşın fosil enerji kaynaklarının rezervleri hızla tükenmektedir.

Enerji kullanımı ile ilgili önemli bir konu istenmeyen emisyonlardır. Fosil yakıtlar temelde bir sera gazı olan CO₂ yayarlar. Endüstrinin gelişiminden bu yana CO₂ konsantrasyonu yaklaşık üçte bir oranında artmış ve dünyanın ortalama sıcaklığı küresel ısınma olayından dolayı giderek artmaktadır (Subramanian et al, 2006). Birincil enerji kaynaklarının rezervlerinin kısıtlı olması, yakıt fiyat artışları, nüfus artışı, endüstriyel gelişim, ulusal kaynakların değerlendirilmesi zorunluluğu, 21. yüzyılın sosyo-ekonomik yapılanması, mevcut yakıtların çevre üzerindeki olumsuz etkileri (sera etkisi, küresel ısınma, iklim değişiklikleri, yağış anormallikleri, asit yağmurları, sağlık problemleri gibi), yeni enerji teknolojileri kapsamında, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı gerekliliğinin temellerini oluşturmaktadır. Alternatif enerji olarak en çok düşünülen enerji türü hidrojen enerjisidir.

İmdi ise 1970'lerde başlayan 21. yüzyılın neresinde biteceği henüz bilinmeyen yeni bir dalgalanma içindeyiz. Bu yeni dalgalanmayı etkileyen enerji türü hidrojendir. Hidrojen aşağıda sıralandığı gibi çeşitli avantajlara sahip ideal bir enerji taşıyıcısıdır;

1. Hidrojen yenilenebilir enerji kaynakları da dâhil olmak üzere herhangi bir enerji kaynağı kullanılarak üretilebilir.
2. Hidrojen elektrik kullanılarak üretilebilir ve nispeten yüksek verimle de elektrik üretilir. Hidrojenin güneş enerjisinden doğrudan üretim süreçleri geliştirilmiştir.
3. Fosil yakıtların son kullanımında sadece bir süreç ile dönüştürülürken, hidrojen kullanılacak enerji ile aynı şekilde farklı süreç ile dönüştürülebilmektedir.

4. Son kullanımda hidrojen kullanılacak enerji ekline dönüürken en yüksek verime sahiptir. Hidrojen fosil yakıtlardan %39 daha verimlidir. Kısaca hidrojen birincil enerji kaynaklarını korur.
5. Hidrojen gaz ekinde (büyük ölçekli depolamada), sıvı ekinde (hava ve uzay ulaımında) veya metal hidrit ekinde (araçlar ve di er küçük ölçekli depolamada) depolanabilir.
6. Hidrojen boru hatları veya tankerler ile büyük mesafelere taınabilir (bir çok durumda elektrikten daha ekonomik ve verimlidir).
7. Hidrojen di er yakıtlardan farklı güvenlik ekipmanı ve prosedürü gerektirse de onlardan daha fazla tehlikeli de ildir. Hidrojen güvenlik sıralamasında propan ve metanın (do al gaz) arasındadır. Yangın tehlikesi ve zehirlilik dikkate alındı ında hidrojen en güvenilir yakıttır.
8. Hidrojen elektrikten veya güne enerjisinden üretilirken, taınırken veya depolanırken ve son kullanımda herhangi bir kirletici üretmez veya çevreye zararlı herhangi bir etkisi yoktur. Hidrojenin yanması veya yakıt hücresinde tüketilmesi sonucu son ürün olarak sadece su üretilir. Yanma yüksek sıcaklıkta olursa havadaki azot ve oksijenden NOx oluşabilir. Ancak bu sorun di er yakıtlarla aynıdır ve kontrol edilebilir.
9. Çevresel hasarlar ve yüksek kullanma verimi dikkate alındı ında güne enerjili hidrojen enerji sistemleri en düük etkin maliyete sahiptir (URL-1, 2007).

Yenilenebilir enerji kaynakları içinde hidrojenin önemi her geçen gün hızlı bir ekinde artmaktadır. Yıldız ve gezegenlerde serbest halde en çok bulunan element olan hidrojen, dünyada da fazla miktarda bulunmasına rağmen, serbest halde bulunmamaktadır. Hidrojen kömür ve do al gaz gibi fosil yakıtlardan, güne enerjisi ve nükleer enerjiden, su gibi sonsuz bir kaynaktan elde edilebilir. Sınırsız kaynağa sahip olan ve havayı kirletmesi açısından içten yanmalı motorlarda kullanılan di er alternatif yakıtlara göre pek çok avantaja sahip hidrojenin, içten yanmalı motorlarda kullanım çalışmalarına 1900'lü yılların başında başlanmıştır ve günümüzde de çalışmalar çok yoğun bir ekinde devam etmektedir. Gaz haldeki hidrojen renksiz, kokusuz ve tatsız bir gazdır. Hafif olan kütlesi nedeniyle çok yüksek yayılma özelliğine sahiptir. Gaz haldeki hidrojen aynı hacimdeki havadan 15 kat daha hafiftir. Kullanım alanları incelendiğinde hidrojenin, fosil yakıtlara göre oldukça fazla alanda

kullanılabilece i ortaya çıkmaktadır; hidrojen alevli yanma, do rudan buhar üretimi, katalitik yanma, kimyasal dönü türme, elektrokimyasal dönü türme uygulamalarında yakıt olarak kullanılabilirken, fosil yakıtlar sadece alevli yanma uygulamalarında kullanılabilmektedirler (Çetinkaya ve Karaosmano lu, 2002).

Dünyada birincil enerji kayna ı olarak kömür, do al gaz ve petrol gibi fosil kökenli yakıtlar, elektrik üreten nükleer güç santrallerinde kullanılan uranyum, güne , rüzgâr, bio-kütle, jeotermal ve hidroelektrik güç kaynakları dünyanın enerji ihtiyacını kar ılayan ana kaynaklardır. Bu birincil kaynaklar enerji temininde do rudan kullanılabilir. Fakat ço unlukla hizmete sunulması ve üretim için ihtiyaç olan yerlere ula tırılması için elektrik gibi bir enerji ta ıyıcısına dönü türülerek kullanılır. Hidrojen, gelece e yönelik olarak kurulacak enerji sisteminde kullanılacak potansiyele sahip bir enerji ta ıyıcısıdır. Hidrojen ve elektri in ortak kullanımı için sistemler geli tirilecektir. Bu yakıtın enerji ta ıyıcısı olarak enerji ekonomisine entegrasyonu pratik ve uygulanabilir, yenilenebilir enerji kaynaklarının geli tirilmesine ba lıdır. Bu geli meler ile hidrojen, ev ve ofis ısıtmada, elektrik üretiminde, endüstriyel i lemlerde, kara ve hava ula ımında kullanılacak ekilde depolanacak ve nakledilecektir (URL-2, 2007).

Hidrojen, fosil yakıtlara olan ba lılı ı ortadan kaldırılarak kirlili in önlenmesini sa layabilir. Bu amaçla ülkeler engellerin a lması için gereken teknolojilere ula abilmek için belli programlar olu turarak bu yönde ara tırma ve geli tirme çalı maları yapmaktadırlar. Hidrojen ilk etapta fosil yakıtlara ek olarak kullanılabilir. Hidrojen, petrol, etan, metan, do al gazla birlikte .Y.M.'da yakıt olarak birle tirilebilir. Böylece kirlili i azaltıp performans da artırılabilir. Örnek olarak benzin-hava kar ımına % 5 hidrojen ilavesi azot oksit emisyonunu % 30-40 azaltabilir, ikinci etapta emisyonu sıfıra indirecek hidrojen-yakıt piline sahip ta ıtların geli tirilmesiyle ula ımda do rudan hidrojene geçilecek ve bu yaygınla acaktır. Üçüncü etapta ise ısıtmada, endüstride, ula ımda ve evsel kullanımda tamamen hidrojene dayalı bir enerji sistemi geli tirilecektir (URL-2, 2007).

Gelece e yönelik olarak yapılan programlar hidrojenin üretimi, depolanması, da ıtımı ve kullanımı olmak üzere dört grupta toplanmı tır. Üretim alanında çe itli yöntemler üzerinde e güdümlü olarak çalı lmaktadır. Bu yöntemler, elektroliz, fotokonversiyon, gazifikasyon, ileri ayr ıtırma (pyrolosis) vb.'dir. Bu çalı malarda amaç uygun maliyetlerin ve teknolojilerin bulunması ve uygulanmasıdır.

Depolama alanında; kar ıla tırılabilir maliyete sahip, güvenilir, ta nabilir veya sabit olarak kullanılabilir, yüksek hacimsel ve kütsel yoğunluğa sahip, hidrojen maliyetinin %50'sinden düşük maliyete sahip sistemlerin geliştirilmesidir.

Bu amaçla, gaz ve sıvı depolama sistemleri, katı gaz absorpsiyonu, metal hidrit sistemi gibi yöntemler üzerinde ara tırmalar yapılmaktadır (URL-2, 2007).

Da ıtım alanında; ihtiyaç duyulan yerlere zamanında düşük maliyette ve uygun teknolojiler kullanılarak ula tırılması amaçlanmaktadır. Bunun içinde öncelikle doğal gaz için fakat hidrojenin iletilmesinde de kullanılabilir da ıtım a nının ve ta ıt üstündeki nakliye için kullanılacak sistemlerin geliştirilmesine çalışılmaktadır. Bir di er alternatif olarak ba ımsız hidrojen üretiminde kullanılacak yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesidir. Bu alternatifte hidrojen doğrudan doğruya kullanılabilir i yerde üretilecek ve kullanılacaktır.

Kullanım alanında; hidrojenin di er yakıtlarla birlikte veya tek ba ına .Y.M.'da kullanılarak kirlili in azaltılması, petrol kaynaklarına olan ba ılı ı azaltarak emisyonu sıfıra düşürecek yakıt pilleri ile ta ıtların çalıştırılması, endüstriyel i lemler ve ısıtma gibi kullanım alanlarında uygun teknolojilerin geliştirilmesi ve uygulanmasıdır (URL-2, 2007).

Hidrojen içten yanmalı motorlarda saf olarak kullanıldığında erken ate leme, geri tutulma ve vuruntu gibi problemlere neden olmaktadır. Özellikle karbüratörlü motorlarda düşük motor hızlarında geri tepme yüzünden motor düzenli çalışmamaktadır.

Bu çalışmada tek silindirli karbüratörlü bir motorda saf yakıt olarak hidrojenin kullanılabilirliği incelenmiştir. Hidrojenle çalışmada performansın düşmesi ve geri tepme olmaması için hidrojenin motora sevk edilmesinde karbüratör devre dışı bırakılması, hidrojen emme supabının hemen arkasına gönderilmiştir. Vuruntu ve erken ate lemeyi önlemek için motor ilave fan yardımıyla so utulmuştur. Yapılan testler ile her iki yakıt performans ve emisyonlar tarafından kıyaslanmıştır.

BÖLÜM 2

KAYNAK ARA TIRMASI

Enerji ihtiyacının artmasına karşın petrol türevi yakıt rezervlerinin azalması, mevcut ve yeni alternatif yakıtlar üzerindeki ilgiyi artırdığı gibi hidrojen yakıtının, yakıt hücrelerinde kullanımı yanında içten yanmalı motorlarda da kullanımı konularında çok sayıda çalışmayı netice vermiştir.

Hidrojenin içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanımına yönelik çalışmalar ilk kez 1807 yılında Francois Isaac de Rivaz tarafından ilk hidrojen motoru ve aracının tasarlanmasından başlamakla birlikte 1900'li yıllardan itibaren yoğunluk kazanmıştır.

1820 yılında Hidrojenin yakıt olarak kullanımı Reverend Cevil tarafından İngiltere'de tasarlanmıştır.

1854 yılında İtalya'da Bursanti ve Matteucci tarafından serbest pistonlu bir hidrojen motoru geliştirilmiştir.

1900 yılında karbüratörün geliştirilmesi sonucu sıvı yakıtlarda benzine verilen önem artmıştır.

1920 yılında Rudolf Erren Almanya'da hidrojen motoru üzerinde çalışmalarına başlamış, daha sonra bu çalışmalarına İngiltere'de devam etmiştir.

1924 yılında Ricardo, İngiltere'de hidrojenle çalışan bir motorda yüksek verim, geri tutulma ve erken tutulma konularını çalışmalarıyla vurgulamıştır.

1930 yılında Erren, Hastings ve Campbell yaptıkları çalışmada hidrojenin hava kirliliğini ve mevcut kaynakları açısından avantajlı bir yakıt olduğunu vurgulamıştır.

1940 yılında Avustralya'da benzin sıkıntısı nedeniyle hidrojen yakıt olarak kullanılmıştır.

1950 yılında Kanada'da King erken tutuma ve geri tutuma konularında çalışmaları yaptı. A.B.D. Hava Kuvvetlerinde jet motorlarının hidrojenle çalıştırılması üzerine denemeler yapılıyor. Uzay programında hidrojen-oksijen yakıtlı güç sistemleri üzerine çalışmaları yapılmıştır.

1960 yılında Billings A.B.D.'de hava kirliliği sorununa çözüm olarak hidrojen yakıtını önermiştir.

1970 yılında Petrol krizi sebebiyle alternatif yakıtların araştırılması yapılmıştır. A.B.D'de UCLA ve Miami Üniversitelerinde Los Alamos, Billings, General Motors gibi kuruluşlarda, Almanya'da Mercedes, DEVLAR gibi kuruluşlarda, Japonya Musashi Enstitüsünde hidrojenin motorlarda kullanımı üzerine çalışmaları yapılmıştır (Soru bay vd, 1990).

Son on beş yıl içerisinde hidrojenle çalışan ve de ik araçlarda kullanılan motorlar üretilmiştir. Çıtan yanmalı motorlarda yakıt olarak hidrojen kullanılabilen olup, bunlar çoğunlukla enjeksiyonlu motorlardır. BMW, Buick, Daimler Benz, Ford, GM, Honda, Mazda, Suzuki, Toyota gibi otomobil firmalarının 1990 öncesi deneme ve prototip amacıyla ürettikleri hidrojenli araçlar vardır. Örneğin BMW hidrojen yakıtlı 6 silindirli 735 IL model bir prototip üretilmiştir. 211 beygir gücündeki benzinli modelle karşılaştırıldığında, 140 beygir gücündeki hidrojen yakıtı kullanan motor, aynı 170 km/h'lik bir hız kazandırmıştır. Aynı istenildiği zaman benzinle de çalışmaktadır.

Soru bay vd (1990) tarafından yapılan çalışmada hidrojen yakıtlı motorların geri tutuma ve erken tutuma sorunlarına çözüm getirmek ve yüksek basınçlı püskürtme mekanizmaları gerektiren dâhili karıım hazırlama yöntemlerinin sakıncalarından kurtulmak amacıyla, basit yapıya sahip bir sistem geliştirilmiştir ve sistemin etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Sistemde gaz halindeki hidrojen, silindire emme supabı oturma yüzeyine çevresel olarak açılan 1 mm çapındaki 18 adet delikten gönderilmiştir. Böylece yakıt gönderme işlemi kam milinin hareketine bağlı olarak supabın yuvasından kalkması ile açılan delikler yardımıyla yapılmıştır. Emme manifoldunda yakıtın birikmesi ve karıımın geri tutulması sorununa çözüm getirilmiştir. Ayrıca karıım oranı değiştirilerek yük ayarlanabilmesi için, gaz kelebeğinin daimi olarak tam açık olması sonucu motorun volumetrik verimi ve gücü

artırılmıştır. Ancak yaptıkları çalışmada yakıt olarak gaz halinde hidrojen kullanılmış olması, benzin motoruna oranla motor performansının düşmesine neden olmuştur.

Vandenborre ve Sierens (1996) tarafından yapılan çalışmada dizel motorlu bir şehir otobüsü hidrojenle çalıştırılarak döndürülmüştür. CO₂, CO, HC ve H₂ emisyonları, ölçüm cihazının çözünürlüğü altında kalmış ve sıfır değerini göstermiştir. Testin en zorlu anlarında yalnız maksimum 120 ppm kadarlık bir NO_x konsantrasyonu ölçülmüştür.

Kahraman vd (2006) yaptığı çalışmada dört silindirli buji ateşlemeli bir motor hidrojen ve benzin ile çalıştırılarak, performans ve emisyon karakteristikleri açısından deneysel olarak incelenmiştir. 20 MPa basınçta sahip olan hidrojen, gaz hidrojenle harici karıştırma yöntemine göre çalışacak şekilde uyarlanan motora iki adet regülatörden geçtikten sonra atmosferik basınçta verilmiştir. Karbüratörlü Buji Ateşlemeli motorun benzinle ve hidrojenle çalışması sonucunda motor devrine karşı tork, güç, ısı verim, ortalama efektif basınç, egzoz gazı sıcaklığı ve egzoz emisyonlarının (NO_x, CO, CO₂, HC ve O₂) değerini kıyaslanmıştır. Deneysel sonuçları düşük hızlarda hidrojenle çalışmada güç kaybı olduğu, ancak yüksek hızlarda hidrojenin benzin ile yarışabileceği gösterilmiştir.

Das (1990) tarafından yapılan bir çalışmada, geri tutulma, erken ateşleme, vuruntu ve hızlı basınç artışı gibi öteden beri hidrojen motoru ara tırnacılarını sıkıntıya sokmuş olan problemlerin sebeplerini ortaya koymuş ve bu problemlerin çözümü için uyarlanmış çözümler tartışılmıştır.

Mathur ve Das (1991) tarafından yapılan bir çalışmada ise geri tutulma, erken ateşleme, vuruntu ve yanma esnasında hızlı basınç artışı gibi iyi tanımlanmış problemlere çözüm arayışına yönelik olarak farklı yakıt besleme teknikleri denenmiş ve zamanlı manifold enjeksiyonunun (TMI) bu problemlerin üstesinden gelmek için en uygun yakıt besleme tekniği olduğu ileri sürülmüştür. Özel olarak tasarlanmış bir zamanlı manifold enjeksiyonu sistemi kullanılarak hidrojen yakıtlı bir içten yanmalı motorun performans karakteristikleri değerlendirilmiş ve motorun ısı verim, özgül yakıt tüketimi ve ortalama efektif basınç gibi performans parametreleri, bütün çalışma bölgesinde deneysel olarak tespit edilmiştir.

Das (2002) tarafından yapılan di er bir çalı mada ise hidrojen yakıtlı motorun yumu ak çalı masında yakıt besleme tekni inin çok belirleyici bir rol oynadı ı deneysel olarak ortaya konulmu tur.

Furuhama ve Fukuma (1986) tarafından yapılan bir çalı mada, otomobillerde güvenli ve kolay bir ekilde kullanılabilce i kanıtlanmı olan hidrojen yakıtı ile ilgili olarak anormal yanma ve NO_x olu umu problemleri incelenmi ve anormal yanma ve NO_x olu umu arasında bir korelasyon oldu u gösterilmi tir. Bu problemlerin ortadan kaldırılması birkaç motor modifikasyonu ve deneysel olarak geli tirilen “birle ik yanma prosesi” ile ba arılmı tur.

De Boer vd (1976) tarafından yapılan çalı mada hidrojen motorları ile hidrokarbon yakıtlarıyla çalı an motorlar arasındaki farklar açıklanmı tur. Hidrojenin dikkate de er özelliklerinin, kısmi yüklerde gaz kelebe i kullanılmadan fakir karı ımla çalı tırılabilmesinden dolayı yüksek ısı verim potansiyeline sahip oldu u vurgulanmı tur. Aynı zamanda erken ate leme ve geri tutu ma problemlerinin sebebini te kil eden bu fakir karı ım halinde bu problemleri a mak için fakir karı ımların do rudan silindir içine püskürtülmesi veya dü ük sıkı tırma oranlarının kullanılması önerilmi tir. Do rudan silindir içerisine püskürtme i leminin yüksek bir maksimum güç üretme avantajı oldu u öne sürülmü tür. En yüksek NO emisyonları, e de erlik oranının 0,8 civarında oldu u durumda meydana geldi i belirtilmi tir. Ayrıca hidrojen motorunun önümüzdeki birkaç on yılda belli uygulama alanlarında kullanım imkânı bulabilece i sonucuna varılmı tur.

Subramanian vd (2006) tarafından yapılan çalı mada tek silindirli bir motor, farklı e de erlik oranlarında ve tam gazda çalı tırılmı tur. 0.55 e de erlik oranından sonra NO seviyelerinin arttı ı gözlendi i ve maksimum 7500 ppm de erine kadar çıktı ı bildirilmi tir. Ate leme zamanının geciktirilmesi ile ısı verimde önemli bir dü ü olmadan NO emisyonlarında büyük dü ü ler sa lanmasının mümkün olmadı ı ve su püskürtülmesi sayesinde NO seviyelerinde 2490’a kadar ani dü ü lerin görüldü ü bildirilmi tir.

Mohammadi vd (2007) tarafından yapılan çalı mada hidrojenin emme manifoldunda yani harici karı ım olu turma yöntemi ile karı ım hazırlama yönteminde ortaya çıkan geri tutu ma ve vuruntu mahzurlarını gidermek ve hidrojen yakıtının avantajını daha fazla kullanmak için dahili karı ım hazırlama metodu kullanılmı tur. Hidrojen, tek silindirli bir deney motorunun silindiri içerisine bir yüksek basınç gaz enjektörü kullanılarak do rudan püskürtülmü ve

enjeksiyon ve ate leme zamanlamasının motor performansı ve NO_x emisyonlarına olan etkileri geni bir motor yükünde incelenmiştir. Sonuçlar, hidrojenin do rudan enjeksiyonu ile geri tutu manın önlenmesi ve sıkı tırma zamanı sonlarında hidrojenin püskürtülmesi ile yüksek ısı verim ve güç çıkışı elde edilebildiğini göstermektedir.

Verhelst ve Sierens (2004) tarafından yapılan çalışmada bir şehir otobüsüne yerleştirilmek üzere bir GM V8 motoru hidrojenle çalışır hale dönüştürülmüştür. Sıralı tip çok noktalı enjeksiyon sistemi uygulanmıştır. Motorla ilk testler doğal gaz, hidrojen ve hitan için bir harici karıştırma sistemi (ventüri tipi) kullanılarak yapıldı. Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanımındaki spesifik özellikler arasında daha küçük buji tırnak aralığı gerektiği, püskürtme basıncının ayarlanabilmesi, ağırlı fakir karışımlar için oksijen sensörünün ilave kalibrasyonu, gaz keleşmesi olmaksızın düşük yük artlarında çalıştırılmak için fakir karıştırma avantajı gelmekle beraber rölantide egzoz gazları içerisindeki hidrojen konsantrasyonunun artması gibi dezavantajı olduğu bildirilmiştir.

Li ve Karim (2004) tarafından yapılan çalışmada hidrojenle çalıştırılan içten yanmalı motorlarda vuruntu olmasının önlenmesi üzerinde durulmuş ve sıkı tırma oranı, emme sıcaklığı ve ate leme zamanlaması gibi kilit çalışmaları denemelerinin vuruntuyu sınırlayan etkenlerin oranları üzerindeki etkileri analitik ve deneysel olarak incelenmiştir.

Yıldırım vd (2000) yaptıkları bir çalışmada tek silindirli bir deney motorunda karıştırma tekilinin hidrojen yakıtlı motorların performansı üzerindeki etkisini araştırmak üzere hem emme portuna püskürtme hem de silindir içerisine püskürtme tipinde hidrojen yakıt besleme sistemleri tasarlanmıştır. Düşük yük artlarında ısı verim ve motor çalışması kararlılığı açısından emme portuna püskürtmenin daha üstün olduğu ancak, yüksek yük artlarında ise silindir içine püskürtmenin daha avantajlı olduğu bildirilmiştir. Bu durumda hidrojen yakıtlı motorlar için en optimum çalışmaları ikili bir enjeksiyon sistemi ve gaz keleşmesi ile sağlanabileceği savunulmuştur.

BÖLÜM 3

H DROJEN YAKITININ ÖZELLİKLERİ , ÜRETİMİ , DEPOLANMASI VE KULLANILMASI

Bu bölümde hidrojen yakıtının özellikleri, üretimi, depolanması ve kullanılması ile ilgili bilgiler verilmiştir.

3.1 H DROJENİN TEMEL VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Atomik sembolü “H” olan hidrojenin atom ağırlığı 1,00797, atom sayısı 1 olan en basit ve en hafif elementtir. Hidrojen doğada en çok bulunan element olmasına rağmen, hafifliği sebebiyle atmosfere yükselip orada serbest kaldığından, yeryüzünde serbest halde çok az bulunur. Görünmez ve kokusuz bir gaz olan hidrojene yeryüzünde diğer elementlerle bileşik yapımı halinde rastlanır. 0 °C’deki yoğunluğu 0,08987 g/l ve havaya göre özgül ağırlığı 0,0695’dir.

Hidrojenin yanma ısısı oldukça yüksektir ve zehirli etkisi yoktur. Yanma sonucunda ise sadece su buharı meydana gelir. Aynı ağırlıktaki benzine göre sıvı hidrojenin enerjisi 2,75 kat daha fazladır (Stout, 1984).

Hidrojen çok amaçlı bir yakıttır. Hava ya da oksijen ile birlikte yakılarak ısıtma amaçlı olarak kullanılabilir. Motor ya da gaz türbiniyle bir jeneratörü tahrik ederek veya yakıt pili olarak kullanılmasıyla yüksek bir verim ile elektrik üretilebilir. Taşılarda; basınç altında, sıvı halde ve metal hidrid şeklinde depo edilerek motor yakıtı olarak yararlanılır. Kimya endüstrisinde ham madde olarak kullanılır.

Hidrojen sahip olduğu birim enerji başına üretilmesi en ucuz sentetik yakıttır. Sentetik yakıt sisteminde 1Gj'lük enerji 18,65\$'a mal olurken, güneş enerjisinden üretilen hidrojen 13,02\$'a mal olmaktadır (Acarolu, 1998). Ayrıca çevreyi hemen hemen hiç kirletmez ve sentetik yakıtlar (metanol, amonyak vb.) içerisinde en temiz olanıdır (Veziroğlu, 1981).

Hidrojeni geleneksel olmayan birincil enerji kaynakları ile karşılaştırdığımızda şu farklı üstünlükleri görürüz; kolay kullanılabilir, tükenmezdir, yenilenebilir, depolanması mümkündür, ekonomik şekilde üretilebilir, en az kirlilik oluşturanıdır, birincil enerji kaynaklarına bağımlı değildir, üretiminde en uygun bileşik çok bol olan sudur, hidrojenin yüksek alevlenme hızı ve geniş tutulma aralığı, hafifliği ve yakıt olarak ideal özellikleri nedeniyle hidrojen taşıtlar için iyi bir yakıttır (Özer, 1991).

Renksiz, kokusuz, zehirsiz ve dünyada en çok bulunan element olan hidrojen ve benzin yakıtının özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Hidrojen ve benzinin özellikleri (Dipolu, 1988; Sorubay ve Arslan, 1988).

Özellik	Birim	Hidrojen	Benzin	
Kimyasal denklemi		H ₂	C ₈ H ₁₈	
C/H oranı		0	0,444	
Moleküler kütle		2.02	114	
Özgül kütle	Sıvı	g/cm ³	0.07	0.73
	Gaz	g/cm ³	0.84x10 ⁻⁴	-
Isıl değer	Alt	Mj/kg	119.93	43.4
	Üst	Mj/kg	141.86	31.8
Stokiyometrik karışım için	Hava-yakıt oranı	Kütlesel	34.32	14.7
	Hava-yakıt oranı	Hacimsel	2.38	45.79
Buharlaştırma ısısı	Mj/kg	0.447	0.272	
Tutulma sınırı	% hacim		4.1-74	1.3-7.6
			0.15-4.35	0.26-1.87
Laminer alev hızı	m/s	2.91	0.37	
Adyabatik alev sıcaklığı	(°K)	2383	2226	
Difüzyon katsayısı	m ² /s	0.61	0.08	
Kaynama noktası	(°K)	20.3	-	
Tutulma sıcaklığı	(°K)	833	713	
Oktan Sayısı	Ara tırma Oktan Sayısı	ROS	130	91-100
	Motor Oktan Sayısı	MOS	-	82-94

3.2 HİDROJEN ÜRETİMİ

Bugün hidrojenin üretimi için birçok yöntem mevcuttur. Bunlardan en çok kullanılan yöntem doğal gazın buhar reformasyonudur. Ancak uygulamalarda ihtiyaç duyulan saf hidrojen için göreceli olarak pahalı bir teknik olan, elektroliz kullanılmaktadır.

Hidrojenin geleceğin yakıtı olması için ileri teknolojiler kullanılarak fosil yakıtlarla maliyet

bakımından rekabet edebilecek yenilenebilen enerji kaynakları ile hidrojen üretimi geli tirilmektedir. Üzerinde çalı ılan teknolojiler genel olarak üç kategoriye ayrılabilir;

1. Fotobiyolojik hidrojen üretimi,
2. Fotoelektro kimyasal hidrojen üretimi,
3. Termokimyasal hidrojen üretimi.

Bunların dı nda da daha önceden geli tirilen di er yöntemlerde mevcuttur;

1. Elektroliz,
2. Buhar yapılandırması (Steam reforming).

3.2.1 Fotobiyolojik Hidrojen Üretimi

Ço u fotobiyolojik sistemde, hidrojen üretimi için kullanılan bakteriler ve ye il yosunlar, klorofil aracılı ı ile güne ı ı nı absorbe eder ve enzimler sayesinde hidrojenin ayrılması sa lanır. Fotobiyolojik üretim teknolojisi uzun vadede hidrojen üretimi için oldukça ümit vericidir. Ancak iki önemli sınırlama mevcuttur. Birincisi; göreceli olarak dü ük güne enerjisi dönü üm verimlili ine sahip olmasıdır. Güne enerjisinin ancak % 5-6'sı hidrojen enerjisine dönü türülebilir. kincisi; suda hidrojeni ayıran enzimlerin hemen hemen tümü suyun ayrı masının sonucu di er ürün olan oksijenin de açı a çıkmasını sa ladı ndan, hidrojenin saf olarak üretilmesine engel olmaktadır (URL-2, 2007).

3.2.2 Fotoelektrokimyasal Hidrojen Üretimi

Fotoelektrokimyasal i lem optik enerjinin kimyasal enerjiye dönü türülebilmesi için bir fotoelektrokimyasal pil ve yarı iletken elektrotlar kullanılır. Fotoelektrokimyasal sistemin ba lı ca iki tipi vardır; biri yan iletken kullanım, di eri erimi metal karı ımlarının kullanımınıdır.

Birinci tipte yarı iletken bir yüzey suyun ayrı tırılması için hem güne enerjisini absorbe etmek hem de bir elektrot gibi davranacak ekilde kullanılır. Bu teknoloji ile enerji dönü üm verimlili i 1974'te % 1'den daha az iken bugün % 8'in üstüne yükselmesine ra men hala geli mesinin ilk a amalarındadır. Hatta daha yüksek verimlilik, kimyasal reaksiyonun süresinin azaltılmasına yardımcı olacak bir di elektrik arjı ile elde edilir.

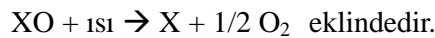
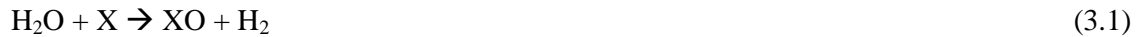
Fotoelektrokimyasal sistemin ikinci tipi katalizör olarak erimi metal karışımlarını kullanır. Çözülebilir (eriyebilen) metal karışımları enerjiyi absorbe eder ve suyun ayrıştırılmasında kullanılan bir elektrik aracı olur. Araştırmacılar suyu ayrıştırma ve hidrojen üretimini daha verimli yapacak katalizörün saptanmasına odaklanmıştır. Bu metod günümüzde yarı iletken i leminden daha az gelişmiştir (URL-2, 2007).

3.2.3 Hidrojenin Termokimyasal Yöntemle Üretilmesi

Kömür, diğer katı atıkları ve bio-kütlelerin ısısından yararlanarak hidrojen içeren çeşitli gazlar üretilir. Gazların bileşimi depolama tipine, oksijenin mevcudiyetine, reaksiyon sıcaklığına ve diğer parametrelere bağlıdır. Üretilen gazdaki hidrojen, gaz karışımı içinde çok küçük yüzdelerde dolamaktadır.

Yenilenebilir hidrojen araştırmaları, bugün bir yakıt ya da kimyasal gaz depolamada kullanmak için bio-kütleden orta ısı düzeyinde gazlara odaklanmıştır. Bio kütlenin gazifikasyonu için, ya çöpler ya da depolayıcı kabul edebilecek bir enerji kaynağı olarak özel olarak yetiştirilen otlar ve ağaçlar kullanılır (URL-2, 2007).

Diğer bir termokimyasal üretim teknolojisi de suyun doğrudan oksijenle hidrojene ayrıştırılmasını sağlayan kapalı çevrimli termokimyasal yöntemdir. Bu teknoloji diğer yöntemlere göre daha ayrıntılıdır. Verimi daha yüksektir. Termokimyasal i lemin kısaca geliştirilen çeşitli bileşimlerin suyla doğrudan reaksiyon sonucu hidrojen ve oksijenin açığa çıkartılmasıdır. i lemin iki aşamada gerçekleşir; ilk aşamada bileşik suyla reaksiyona girer ve hidrojen açığa çıkar, ikinci aşamada ilk aşamada elde edilen bileşikler yüksek sıcaklıklarda ayrıştırıldığında ise ilk bileşik ve oksijen gazı elde edilir (URL-2, 2007). Bu i lemin;



Burada "X" Al, Fe gibi su ile reaksiyona giren elementi ifade etmektedir.

3.2.4 Hidrojenin Elektrolizle Üretilmesi

Elektroliz; hidrolik, rüzgar, jeotermal, güneş ya da nükleer enerji ile üretilen elektrik enerjisi ile sudan hidrojen üretilmesinde kullanılmaktadır. Elektrolizle hidrojen üretebilmek için önce elektrik üretim a amalarına ihtiyaç vardır. Bu a amalar sonunda orijinal enerjinin yaklaşık yarısı kaybedilir, buna rağmen bu işlem günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Suyun elektrolizi elektrotlar aracılığı ile sudan doğrudan doğruya akım elektri in geçirilmesiyle yapılır. Su gerçekten iletken olmadığı için KOH gibi elektrolitler ilave edilir (URL-2, 2007).

Elektroliz iliminin verimliliğini yükseltmek için yeni elektrot malzemeleri üzerinde çalışılmaktadır. Kullanılan elektrolitik hücreler oldukça az bakıma ihtiyaç duyar ve yirmibe yıldan fazla ömürleri vardır. Bu nedenle hidrojen üretmek için güneş enerjisi ve rüzgar jeneratörleri ile şehirden uzak yerlere uyarlanması mümkündür. Bu sistem 1000 MW in üzerindeki elektrik enerjisi kapasiteli elektroliz fabrikalarında kullanımı planlanmaktadır. Bu tesislerin her birinde yılda yaklaşık 150.000 ton hidrojen üretme kapasitesine sahip olacaktır (URL-2, 2007).

3.2.5 Buhar Yapılandırması ile Hidrojen Üretimi (Steam Reforming)

Araçta kullanılacak hidrojenin depolanmasında karşılaşılan zorluklar nedeniyle hidrojen yakıtlı araçların yakıt donanımları ile ilgili çeşitli metotların gelişmesine yol açmıştır. Bu konuda, iki temel fikrin önüne çıktığını görmekteyiz;

1. Doğal gaz, metanol, etanol gibi diğer alternatif yakıtların depolanarak, araç üzerinde yeniden yapılandırılmasıyla hidrojen üretimi,
2. Sabit merkezlerden temin edilecek hidrojenin araç üzerinde depolanması.

Hidrojen üretim yöntemlerinden biri olan yeniden yapılandırma (reforming) için üç değişik yöntem uygulanabilir;

1. Katalitik buhar yapılandırma (SR),
2. Non-katalitik kısmi oksidasyon (POX),
3. Katalitik kısmi oksidasyon (veya ototermal yapılandırma) (ATR).

Yapılandırma sistemlerinin verimi önemli oranda sistemin işletme sıcaklığına ve basıncına

ba lıdır. Yapılandırma sisteminin sıcaklı ı da kullanılacak yakıtın cinsine ve sistemin teknolojisine göre de i ir (URL-2, 2007).

Buna göre, buhar yapılandırma sistemi (SR) di erlerine nazaran daha dü ük sıcaklıklarda çalı abilmektedir. Yeniden yapılandırma ile hidrojen üretiminde birçok hidrokarbon, yakıt olarak kullanılabilir. Bunların içinde öne çıkan yakıt türleri ise metan, metanol ve etanoldur. Bununla birlikte kullanılan yakıt olarak, metanol en dü ük, metan biraz yüksek, etanol en yüksek yapılandırma sıcaklıklarına ihtiyaç duyarlar. Sonuç olarak metanol yakıt olarak yeniden yapılandırılması durumunda en verimli hidrojen üretimini sa lar. Yapılandırma yöntemleri hakkında a a ıda ayrıntılı bilgiler sunulmu tur (URL-2, 2007).

3.2.5.1 Katalitik Buhar Yapılandırma (SR)

Hidrokarbon yakıtların buhar yapılandırması yolu ile hidrojen ve bile ikleri üretimi kullanılan en eski ve en çok uygulanmı yöntemdir. SR için yakıt türleri genelde nafta, do al gaz ve di er hafif hidrokarbonlardır.

Bu yöntemde, hidrokarbon yakıt katalitik yolla buharla reaksiyona girerek di er bile ik gazlara (CO, CO₂ vb.) dönü türülür. lem endotermik oldu u için sistem için gerekli ısı yakıtın harici olarak yakılması ile sa lanır. Sanayi uygulamalarında bu i lem 600 °C - 1000 °C'de ve 40-100 Atm. basınç altında, nikel esaslı katalizör kullanılarak gerçekleştirilir (Arthur 1994). Ancak sülfür zehirlenmesini önlemek için nikelin sülfür ile temasının engellenmesi veya sülfür-resistant katalizör kullanılması gerekir. Hidrojen konsantrasyonunu artırmak için bile ik gazın (buhar ile CO reaksiyonu sonunda H₂ ve CO₂ elde edildi i) su gazı de i im reaksiyonuna girmesi gerekir. Su gazı reaksiyonu ise genellikle bir birine seri iki adyabatik de i im reaktörü tarafından gerçekleştirilir.

Standart nikel esaslı buhar yapılandırma katalizörleri metan ve metanol yapılandırması için uygundur (URL-2, 2007).

3.2.5.2 Kısmi Oksidasyon ile Yapılandırma (POX)

Kısmi oksidasyon katalizörsüz bir i lemdir. Reaksiyon için gerekli ısı yakıtın bir kısmının oksidasyonu ile sa lanır. Oksidasyonun miktarı oksijen ilavesinin kontrolü ile ayarlanır. POX i lemi için hava kullanılırsa çok az miktarda amonyak üretimi de söz konusu olur. POX i lemi genellikle a ır hidrokarbonların (A ır nafta, rafineri artıkları veya kömür gibi) yapılandırılmasında kullanılır.

POX, katalizör olmadığı için avantajlı olsa da katalizörlü yapılandırma i lemlerine nazaran yüksek sıcaklıklarda (1100-1500 °C) çalı tırılmaya ihtiyaç duyulur (URL-2, 2007).

3.2.5.3 Ototermal Yapılandırma (ATR)

Ototermal yapılandırma teknolojisi, buhar yapılandırma (SR) teknolojisinin katalizör bölümü ile kısmi oksidasyon teknolojisinin (POX) oksidasyon bölümünün bir arada kullanılması sonucu geli tirilmi tir. Oksijen katalizörü kullanılarak bir miktar yakıt kontrollü oksijen ilavesi ile oksidize edilir. ATR i lemindeki sıcaklık POX'e göre dü ük, fakat SR'e göre ise yüksek durumdadır. ATR i lemi için iki ayrı tip katalizör kullanılır. Biri platin esaslı katalizör, di eri ise buhar yapılandırma i leminde oldu u gibi nikel esaslı katalizördür.

Buhar yapılandırma i leminde, buhar uygun katalizör yardımı ile hidrokarbonla reaksiyona girerek hidrojen zengin gaz üretimi sa lanır. SR, aynı anda bir ya da birkaç reaksiyonun olabilece i endotermik bir i lemdir. Hidrojen üretiminde buhar yapılandırma tekni i için yüksek sıcaklık ve dü ük basınç uygun görülmektedir.

Yapılandırma yöntemlerinin birbirine göre tabii farklılıklarına ilave olarak, birçok de i ik faktöründe dikkate alınması gerekir. Bütün bu yapılandırma teknikleri hemen hemen aynı düzenek ve a malara sahiptir. Bu yöntemleri birbirinden ayıran temel farklılık endotermik reaksiyonlar için gerekli olan ısıyı sa lama teknikleridir.

Buhar yapılandırmasında (SR) ısı harici bir ısı kayna ı (fırın) vasıtası ile sa lanır. ATR ve POX'te ise bir miktar yakıtın oksidasyonu sayesinde olur. Bu farklılık, ATR ve POX yöntemlerine a ırlık, hacim ve reaksiyon hızı gibi avantajlar sa lar. Yeniden yapılandırma

sisteminin dezavantajı, üretilen ürünlerin birbirinden ayrılmasının zorlu undan dolayı hidrojen saflı ının dü ük olması ve yüksek sıcaklıklara ihtiyaç göstermesidir (URL-2, 2007).

3.3 H DROJEN N DEPOLANMASI

Hidrojenin kimyasal ve fiziksel özelli inden kaynaklanan problemlerden dolayı depolanma sorunları ortaya çıkmaktadır. Hidrojenin depolanmasında üç ana yöntem vardır; yüksek basınçlı gaz ekinde, kriyojenik (a ırı so utulmu) sıvı haldeki depolama; bu durumda hidrojen genellikle alçak basınçlıdır ve metal-hidrit ekinde depolanmasıdır (Ate , 1985).

Hidrojenin yakıt tankının doldurulmasında bir gecikme söz konusudur. Hidrojen gazının depoya doldurulması bugünkü benzinli ta ıtlardaki deponun dolum süresinden oldukça yava tır. Örne in 90 km'lik bir yol için gerekli hidrojen, bugünkü yöntemlerle ancak 10 dakikada doldurulmaktadır. Ara tırmaların büyük bir kısmı bu sorun üzerine yo unla mı tır (Uyarel, 1995).

3.3.1 Katı Hal Depolama

Katı hal depolama (gazı absorbe eden katılar ve metal hidritler) yöntemleri güvenilir teknolojilerdir ve fiziksel depolamaya göre birim hacim ba ına daha fazla hidrojen depolanabilir, ancak daha pahalı ve a ırdırlar. Katı hal depolamadaki ara tırma ve geli tirmeler ticari olarak uygulanabilecek karbon ve zeolitlerin hidrojeni absorbsiyon ve desorbsiyon özelliklerinin belirlenmesine odaklanmı tır. Yüksek performanslı depolama malzemelerinin geli tirilmesi için katı hal depolamanın temel mekanizmalarının tam olarak anla ılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Belirli ara tırmalar planlanmakta ve yürütülmektedir. Bunların bazıları;

1. Pratik ve teorik hidrojen depolama kapasiteleri arj ve de arj oranları, ısıl ve mekanik etkilerin olu umu, uygun malzemelerin belirlenmesi,
2. Magnezyum esaslı hidritler ve yüksek alanlı aktifle tirilmi karbon gibi konvansiyonel katı hal hidrojen depolama malzemelerinin üretilmesi için yöntemlerin geli tirilmesi (URL-2, 2007).

3.3.2 Fiziksel Depolama

Fiziksel depolama sistemleri hidrojenin fiziksel özelliklerinden yararlanarak yapılan depolama yöntemleridir. Hidrojen gazının güvenilir olarak kullanılabilmesi şartları belirlenerek çeşitli depolama sistemleri geliştirilmiştir. Genel olarak basınçlı gaz ve kriyojenik sıvı olarak sınıflandırılabilir, fakat ara uygulamalar da söz konusudur. Sıkıştırılmış gaz ya da kriyojenik sıvı depolama bu günün uygulamaları için pratik olarak kullanılmaktadır.

Fakat bugünün teknolojisi gelecekle yaygın olarak kullanım için yeterli değildir. Araştırmalar mevcut teknolojilerin iyileştirilmesine yönelik olarak devam etmektedir. Havacılık teknolojisi için geliştirilen düşük ağırlıklı grafit kompozit malzemeler hidrojen depolama için ümit vericidir. Bu malzemeler yüksek basınç (41 MPa) gereken düşük ağırlıkta sahip depoların imalatında kullanılacak potansiyele sahiptir (URL-2, 2007).

3.3.3 Hidrojenin Basınçlı Gaz Olarak Depolanması

Depolanma ve taşıma çevre sıcaklığında yapılabilir. Yüksek basınçtan dolayı depo içerisinde sıvı hale geçen kısmın enerji kaybı söz konusu değildir. Büyük hacimli depo gerektirir. Taşınması esnasında güçlükler ortaya çıkar (Ateş, 1985).

3.3.4 Hidrojenin Sıvı Olarak Depolanması

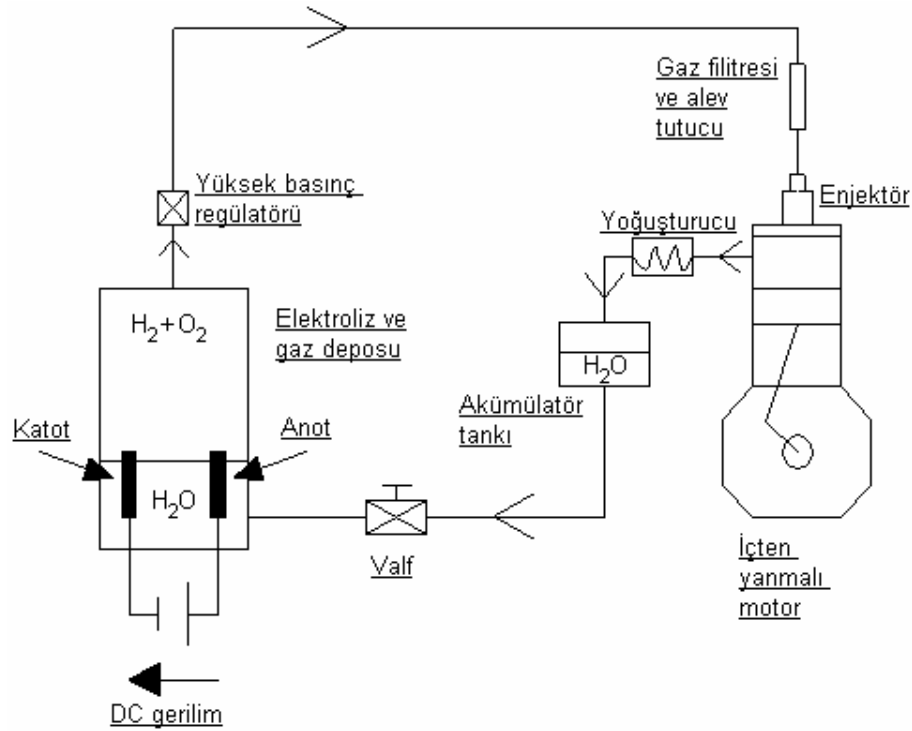
Sıvı hidrojen bilinen yakıtlar içerisinde kaynama noktasındaki yoğunluğu en küçük ve özgül ısıtma kuvvetinin en yüksek olması sebebiyle roketler, süpersonik ve hipersonik uzay araçlarında yakıt olarak kullanılır (Sherif, 1993).

Hidrojenin sıvı halde depolanmasının birtakım yararları ve zararları vardır; Ağırlık olarak nispeten hafif bir depolama şeklidir. Hidrojen yakıtı, sıvı hidrojen pompası yardımı ile silindire direkt olarak püskürtülebilir. Enerji gaz silindire ölü hacmin tam merkezinden püskürtülürse sıkıştırma oranı dizel motorlarınkine yakın bir değere çıkartılabilir. NO_x emisyonlarında azalma sağlanır. Sıvılaştırma için gerekli enerji büyüktür. Hidrojenin gaz halden sıvı hale geçerken bir kısmı buharlaşır ve bu sebeple faz değişiminin hızlı bir şekilde gerçekleşmesi gerekmektedir. Sıvı hidrojen deposunun herhangi bir zarara uğraması durumunda, hidrojen aniden buharlaşacağı için diğer sıvı yakıtlar gibi sıvı halde çevreye

yayılması söz konusu değildir. Havadan çok daha hafif olan hidrojen derhal yükselerek, yanıcı bir karışım meydana getirmeyecektir (Albay, 1993).

3.3.5 Hidrojenin Taşıtlarda Metal Hidrid Şeklinde Depolanması

Hidridler, bir tank içinde hidrojen gazının metal alaşım parçacıkları ile bileşik oluşturularak depolanmasıdır. Hafif kütleli metal hidridler tercih edilmektedir. Hidridlere ısı verildiğinde hidrojen serbest kalmaktadır (Ültanır, 1996). Hidrid oluşturulan metaller ve alaşımlar, bir süngerin suyu absorblaması gibi hidrojeni absorbe eder. Bir başka deyişle, bunlar hidrojeni çok yoğun bir şekilde depolayabilirler (Veziroğlu, 1998). Gaz hidrojen katı metallerin kafes şeklindeki içyapılarına nüfuz edecek kristal yapının çentikli yerlerine bağlanır (Yazıcıoğlu, 1995). Şekil 3.1'de sıfır emisyonlu motor sistemi şeması verilmiştir.



Şekil 3.1 Sıfır emisyonlu motor sistemi şeması (Bohacik et al, 1997).

Hidrojen-hava karışımı içindeki su buharı yanma sıcaklığını azaltacağından maksimum basıncın, dolayısıyla gücün azalmasına sebep olur. Bunun için karışım içindeki su buharı bir yoğunlaştırıcıdan geçirilerek su deposuna geri döndürülür. Yanma odası içinde bırakılan su

buharı miktarı ayarlanarak yanma hızı ve vuru mu kontrol edilebilir (Bohacik et al, 1997).

3.4 HİDROJEN ENERJİSİNİN KULLANIMI

Dünyada çe itli ülkelerde hidrojen enerji ara tırmaları yapılmaktadır. Brezilya ve Güney Amerika'da en büyük hidro güç tesisi Haipu'dur. Burada elektrolitik hidrojen üretilir. Üretilen hidrojen gazdır. Japonya'da WE-NET (World Energy Network) projesi ile Tokyo metropolitan bölgesinde hidrojen kullanımı ile olu acak azot oksit emisyonundaki azalma potansiyeli ara tılmaktadır. WE-NET Programı Japonya'nın Uluslar arası Ticaret ve Endüstri Bakanlığı nca desteklenmektedir. Bu programda Japonya hidrojen enerji sisteminde ilerleme sa lamak üzere 2020 yılına kadar 4 milyar\$ harcamayı planlamaktadır. Gelecekte de Pasifik denizinin ekvator bölgesinde yapay bir adada güne enerjisi radyasyon kullanarak deniz suyundan elektrolizle hidrojen üretmeyi planlamaktadırlar.

Almanya da ise Neurenburg yakınlarında mini bir hidrojen enerji sisteminin kuruldu u bir program yürütülmektedir. Solar-Wasserstoff-Bayern burada güne enerjili hidrojen tesisi, depolama sistemi ve hidrojen kullanma sistemleri kurmu tur. Almanya ayrıca Suudi Arabistan ile ortak yürüttü ü Hysolar programı ile Suudi Arabistan'ın Riyad yakınında güne enerjili hidrojen üretim tesisi kurulması planlanmaktadır. Suudi Arabistan ayrıca güne enerjili hidrojeni sürekli ihraç etmeyi planlamaktadır. Di er uluslararası ba arılı program Avrupa ve Kanada arasındaki Euro-Quebec'tir. Bu programda nispeten ucuz olan hidro güçten üretilerek Kanada'dan Avrupa'ya ithal edilecek sıvı hidrojenin deniz a ırı ta nımı, depolanması ve kullanım alanları ara tılmaktadır. zlanda da ise hükümet, üniversiteler, ta ima irketleri, fabrikalar ve çok uluslu araba ve petrol irketleri konsorsiyum olu turmu ve 2030 yılına kadar zlanda'nın tamamen hidrojen ekonomisine geçmesini planlamı lardır. Bunlardan ba ka INTA güne enerjili hidrojen tesisi (spanya), SAPHYS küçük ölçekli fotovoltaik-hidrojen enerji sistemi (talya, Almanya, Norveç) ve PHOEBUS pilot tesisi (Almanya) gibi birçok proje yürütülmektedir.

Son yıllarda hidrojenin kara ta ıtlarında kullanımına yönelik olarak hidrojen yakıtını kullanan araçlar gösterime girmi tir. Yolcu araçlarında BMW (LH₂), Renault (LH₂) ve ZEVCO (CGH₂); kamyonet tipi araçlarda Daimler-Benz (CGH₂), Hamburg Hidrojen Derne i (CGH₂), PSA (CGH₂) ve ZEVCO (CGH₂) ve ehir otobüslerinde ise Ansaldo (LH₂), Daimler-Benz (CGH₂),

Hidrojen sistemleri (LH₂), MAN (LH₂ ve CGH₂), Neoplan (CGH₂) firmaları hidrojen ile çalı an araçlarını gösterime sokmu lardır. Bunlara ek olarak araçların %65'inin skoter (küçük motosiklet) oldu u Tayvan'da yakıt hücreli skoter kullanımı desteklenmekte ve ZES (sıfır emisyonlu skoter) Asya Pasifik Yakıt Hücre Teknolojisi Ltd. ve Kwang-Yang Motor Co. i birli i ile üretilmektedir.

Petrol irketlerinin enerji ortamı olarak hidrojene bakı ları ku ku dolu olsa da son yıllarda bu bakı açısı de i mektedir. Bu irketlerden Londra'da Royal Dutch Shell, Shell Hidrojen adını verdikleri ubelerine hidrojen konusunda ara tırma yapmaları için 500M\$ yatırım yapmı tır. BP'de benzer bir giri imde bulunmu tur.

BÖLÜM 4

MOTOR YAKITI OLARAK HİDROJEN

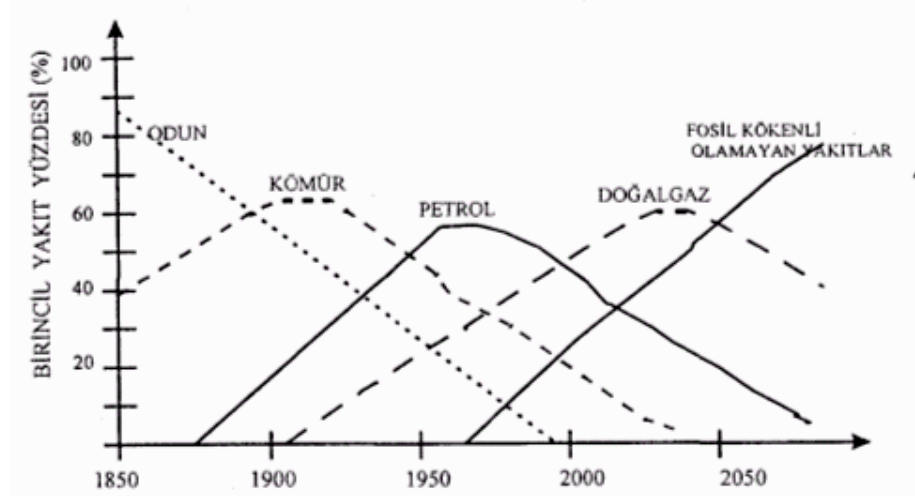
4.1 HİDROJENİN DİĞER YAKITLARLA KARŞILAŞTIRILMASI

Ulaşımında kullanılan enerji türlerinde hızlı bir değişim çağına giriyor. Hidrojen yakıt pili ile çalışan yeni taşıtlar geleceğin farklı yolcu taşımacılığı hakkında köklü bakış sunmaktadır. Çünkü geleceğin yakıtı yenilenebilir ve çevre kirliliğinden bağımsız olarak kullanılabilen yakıttır.

Batarya ile çalışan elektrikli otomobiller gibi diğer yakıt ve otomobil teknolojileri yanında hidrojenle çalışan taşıtlar ulaşım yakıtı olarak kullanılan petrolün alternatifidir. Bu alternatif çevre ve enerji problemlerine çözümler sunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen fazla miktarda üretilbilir olması ve kirliliğin çok az olması sebebi ile gelecek için desteklenebilecek bir yakıttır.

Dünya insanlık tarihi, ikinci büyük enerji geçişinin ortasındadır. Birinci geçiş a aç kaynaklarından kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil kökenli yakıtlara olmuştur. Bu yakıtlar 150 yıl boyunca enerji üretiminde küresel bir artış sağlamıştır. Böylece çok büyük gelişmeler kısa bir süreye sınırlanmıştır. İkinci enerji dönümü ile karbonu daha az, hidrojeni daha fazla içeren temiz, nükleer enerjiden daha güvenli ve yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş yapılması beklenmektedir (Şekil 4.1). (URL-2, 2007).

Ulaşım sektöründe hidrojen, kullanılabilir enerji taşıyıcısı olarak görülmektedir. Bugün dünyadaki enerji ve çevre problemlerinde belirgin olanları bu alandadır. Özellikle kent alanlarında otomobil egzoz emisyonları hava kirliliğinin en büyük kaynağıdır. Hidrojen yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilir. Örneğin güneş enerjisi ile sudan hidrojen elde edilebilir. Üretilen hidrojen bir .Y.M. da yakılabilir ya da yakıt pillerinden üretilen elektrik, elektrikli taşıtları çalıştırabilir. Her iki yöntemde de yanma ürünü olarak su açığa çıkar (URL-2, 2007).



ekil 4.1 Enerji kaynaklarının evrimi (URL-2,2007)

Hidrojen teknolojisi bir kaç yıl sonra kullanılabilir duruma gelecektir. Doğal gaz bu sürecin daha kısa ve kolay olmasını sağlayabilir. Hidrojen; doğal gaz, petrol ve diğer enerji taşıyıcılarına oranla daha kullanılıdır. Doğal gaz benzine oranla karbon monoksit ve toksik hava kirleticilerinde %95, hidrokarbon emisyonunda %80, azot oksit emisyonunda %30'luk bir azalma sağlar. Böylece küresel iklim değişimlerini azaltıcı özelliktedir. Hidrojen ve doğal gaz ortak yönleri sahiptir (URL-2, 2007);

1. Doğal gaz ve hidrojen .Y.M.'da kullanılabilir,
2. Hidrojen doğal gazla birlikte temiz kullanım imkânı sağlayabilir,
3. Her ikisinde de benzer depolama ve doldurma teknolojileri kullanılabilir,
4. Doğal gazdan hidrojen üretimi yapılabilir.

Bu noktalar göz önüne alındığında doğal gaza geçiş konusundaki yatırımlar, hidrojenin de kullanılmasında esas olacak şekilde yapılabilir.

Hidrojen yenilenebilir enerji kaynaklarının taşıyıcısı olarak kullanılırken;

1. Güneşin ısı gücü kullanılarak doğrudan olarak üretilebilir,
2. Isıya hassas fotovoltaik hücreler kullanılarak üretilebilir,
3. Rüzgardan elde edilecek elektrik kullanılarak üretilebilir,
4. Hidrolik güçten elde edilecek elektrik kullanılarak üretilebilir,
5. Bio-kütlelerdeki enerjiyi serbest hale getirerek hidrojen elde edilebilir.

Hidrojen; üretim, dağıtım, kullanım ve güvenlik bakımından benzinle karşılaştırıldığında bazı

avantajlara sahiptir. Öncelikle temizdir, yenilenebilir şekilde üretilir, sızdırmazdır. Güvenlik açısından da tehlikeli olduğu düşünülüyorsa da uzay çalışmalarından elde edilen tecrübelerle böyle olmadığı anlaşılmıştır. Fakat gerçek dünyada hidrojenin araçlarda kullanılması halinde karakteristiklerinin net olarak belirlenmesine ihtiyaç vardır. Böylece teknolojik çözümler geliştirilebilir.

4.2 İÇTEN YANMALI MOTORLARDA HİDROJEN KULLANIMI

Hidrojenin içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılması konusunda birçok çalışma yapılmaktadır. Fakat bu çalışmalarda benzine göre tasarlanmış olan motorlar kullanılmaktadır ve bu motorlar hidrojen kullanıma imkan sağlayacak şekilde modifiye edilmişlerdir. Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanılmasına ilişkin yapılan ilk incelemelerde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir (Vorst, 1975).

Bazı küçük değişikliklerle benzin motorları hidrojen ile çalışır duruma getirilebilirler. Isıl verimleri benzin motorunununkine yakındır.

Stokiyometrik çalışmalarda hidrojen motorunda yüksek miktarda NO_x oluşur. Fakat silindirlere gönderilen karışım fakirleştirilerek NO_x oluşumu azaltılabilir.

Benzin motorundan hidrojen motoruna çevrilen motorda, stokiyometrik hidrojen-hava karışımında %20 güç kaybı meydana gelir. Karbüratörlü motorlarda emme manifoldundaki alev tepmesi önemli bir problemdir.

Hidrojen motorunun bu dezavantajları, onun benzin motoru ile rekabet etmesini azaltmaktadır. Fakat günümüze kadar yapılan çalışmalar ile bu problemler çözülerek, hidrojenin motor verimine ve hava kirliliğinin azaltılmasına olan katkıları görülmüştür. Hidrojenin sıkı tırma oranı yüksek olan motorlarda kullanılması ile de sebep olduğu güç kaybı azaltılabilir. Ayrıca alevi doldurma uygulanarak ilave güç sağlanabilir. Sıkı tırma oranının artırılması ve fakir karışım ile hidrojen motorunun ısıl veriminde, benzinli motora göre %25'lik bir artış sağlanabilir. Fakir karışım ile alev tepmesi önemli miktarda azaltılır (Vorst, 1975).

Akaryakıt motorlarında görülen buhar tıkaçı, soğuk yüzeylerde yoğunlaşma, yeterince buharlaşma gibi sorunlar hidrojen motorlarında yoktur. Hidrojen motorları 20,13 °K' de (-253°C) ilk harekete geçerken bile sorun çıkarmaz (Ültanır, 1997).

Çıtlen yanmalı motorlarda hidrojenin kullanımı konusundaki ara tırmalar, 1900'lü yıllarda başlatılmıştır. Enerji kaynaklarının azalması sebebi ile ortaya çıkan enerji krizleri ve çevre sorunlarının önem kazanması, hidrojen üzerinde yapılan çalışmaları arttırmıştır. Geçtiğimiz 15-20 yılda hidrojen üzerine artan çalışmalar standart otomobillerin dönüşümü içindir. Çeşitli üniversiteler, enstitüler, ara tırma merkezleri, otomobil üreticileri ve hükümetler bu ara tırmaları desteklemekte ve pek çok projeler gerçekleştirilmektedir. Bu projelerin tümünde iki ana unsur bulunmaktadır. Bunlar;

1. Çıtlen yanmalı motorların hidrojenle çalışacak şekilde dönüşümü,
2. Araç üzerinde hidrojenin depolanması için teknolojilerin geliştirilmesi.

Çıtlen yanmalı pistonlu motorlarla çalıştırılan taşıtların büyük bir kısmı benzin ve mazot gibi sıvı yakıtları kullanmaktadır. Bunların yanında çok küçük bir oranda olsa da LPG, propan, doğalgaz gibi yakıtlarla da çalıştırılan taşıtlar vardır. Bütan, propan ve doğalgaz için kullanılan mühendislik prensipleri hidrojen kullanımı içinde uygulanabilir. Ancak bugünün donanımı (teçhizatı), yakıt-hava karışım oranlarındaki farklılık sebebi ile de iklilik yapılmaksızın doğrudan hidrojen sistemine aktarılamaz. Bu yüzden hidrojen için özel tasarımlar yapılması gerekmektedir. Çıtlen yanmalı motorlarda hidrojeni kullanmanın bir diğer yöntemi de motorların çift yakıtlı olarak çalıştırılmasıdır (URL-2, 2007).

Uygun de iklilikler ile benzin ve dizel motorlar çift yakıtlı olarak çalıştırılmaktadır. Bu, çevre kirliliğinin azaltılmasına, petrol kaynaklarının daha ekonomik kullanılmasına, fosil kökenli yakıtlardan hidrojen enerjisine bir geçiş dönemi oluşturularak, mevcut ekipmanların ve donatımın küçük modifikasyonlarla kullanılmasına yardımcı olacaktır.

4.2.1 Motor Yakıtı Olarak Hidrojen

Uzunca bir süreden beri hidrojenin motorlarda yakıt olarak kullanılma imkanları araştırılmaktadır. Günümüzde yakıt seçiminde ölçüt olarak alınan ula tırma yakıtı olma özelliği, çok yönlü kullanıma uygunluk, kullanım verimi, çevresel uygunluk, emniyet ve

maliyet açısından yapılan değerlendirilmeler hidrojen lehine sonuç vermektedir (Ültanır, 1997). 1970'lerde hidrojenin alternatif motor yakıtı olarak kullanılması yeniden gündeme gelmiştir. Egzoz emisyon değerlerinin düşük olması, petrole olan bağımlılığı azaltması hidrojenin uzun yıllar önceden tespit edilmiş olan avantajlarıdır. Bu önemli özelliklerinin yanında hidrojeni üstün bir alternatif yakıt yapan özellikler Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 Değerli ik yakıtların yanma özellikleri (Vorst, 1975).

Yakıt	Hidrojen	Metan	Propan	Benzin	Metanol
Kendi kendine tutuşma sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	585	540	510	440	385
Min. Tutuşma enerjisi (MJ)	0.02	0.28	0.25	0.25	–
Tutuşma aralığı (% hacim)	4-75	5-15	2.2-9.5	1.3-7.1	6.7-3.6
Max. Laminer alev hızı (cm/s)	270	38	40	30	–
Difüzyon katsayısı (cm^2/s)	0.63	0.2	–	0.08	–

Hidrojenin kendi kendine tutuşma sıcaklığı yüksek olmasına rağmen, hidrojen-hava karışımlarının tutulabilmesi için gerekli enerji miktarı düşüktür. Tutuşma aralığının geniş olması, hidrojenin daha geniş karışım aralığında düzgün yanmasını sağlar ve yanma sonucunda daha az kirlenici olur. Benzin motorları ise stokiyometrik orana daha yakın oranlarda yada zengin karışım oranlarında çalıştırılmak zorunda olduklarından egzoz gazlarında önemli miktarda azot oksit (NO_x), karbonmonoksit (CO) ve yanmamış hidrokarbon (HC)'ler olur. Hidrojen motorları, maksimum yanma sıcaklığını azaltacak biçimde fakir karışım ile çalıştırılabilirler. Böylece daha az NO_x çıkarırken, HC ve CO emisyonları olur. Alev hızının yüksek olması ise Otto motorlarında ideale yakın bir yanmanın oluşmasını sağlayarak, ısı verimini artırır. Geniş tutuşma aralığı sayesinde, gaz keleşine gerek kalmadığından, karışımın silindirlere kısılmadan gönderilmesi sonucu pompalama kayıpları azaltılmış olur (Vorst, 1975).

Hidrojenin yüksek sıkı tırma oranlarında, fakir karı ım ile yanabilmesi yakıt tüketimini azalttı ı gibi, yanma sonucu olu an maksimum sıcaklı ı da azaltır. Yanma sonucu partikül madde olu madı ından bujiler kirlenmez. Alev parlaklı ının dü ük olması, di er karbon esaslı yakıtlara göre radyasyon yolu ile olan ısı kaybını azaltaca ından daha yüksek verim sa lar (Kondo et al, 1997).

Hidrojenin alev hızının yüksek olması, buji kıvılcımından sonra karı ımın ba ka noktalardan tutu masından kaynaklanabilen vuruntu (detenasyon) ihtimalini azaltır. Bu durum sıkı tırma oranının arttırılmasını sa layaca ından motorun gücü de artar (Vorst, 1975).

4.2.2 Buji ile Ate lemeli Motorlara Hidrojen Takviyesi ve Egzoz Gazları Emisyonu

Benzin motoruna hidrojen takviyesi ile yanmamı hidrokarbon emisyonları azaltılarak ısı verim iyile tirilir (Apostolescu, 1996). Hidrojen takviyesi yapılan Otto motorlarında küçük bir ön yanma odası mevcuttur. Yanma odası bujinin yerine yerle tirilmi tir. Bu ön yanma odası içinde hidrojen enjektörü ile buji vardır. Esas yakıt ise (benzin, metanol, propan vs.) emme portlarındaki enjektörlerden püskürtülerek silindirlere gönderilir. Hidrojen takviyesi ile esas yanma odası içinde yakılan hidrokarbon esaslı yakıtların çok fakir karı ım oranlarında düzgün bir ekilde yakılması sa lanır. Böylece ısı verim arttırılarak, azot oksit emisyonları önemli derecede azaltılır (Glasson et al, 1996).

Hidrojenin hava ile yanmasının sonucu da, yakıtta karbon bulunmaması nedeni ile yanma ürünleri arasında CO, CO₂, HC'ler mevcut olmayacak, sadece motorun ya lama ya ının yanması nedeni ile olu an HC'ler egzoz gazları arasında bulunacaktır. Ayrıca yüksek yanma sıcaklıkları nedeniyle havanın kimyasal reaksiyonu sonucu azot oksitler olu acaktır (Soru bay ve Arslan, 1988).

Hidrojenin yanma ürünü su buharıdır ve sınırlı maksimum sıcaklıklardaki NO_x emisyonları ihmal edilebilir. Nitekim hidrojenle çalı an bir içten yanmalı motor, günümüz ta it motorlarından çok daha az NO_x emisyonuna neden olmaktadır (Ültanır, 1995).

4.2.3 Buji ile Ate lemeli Motorun Hidrojen Motoruna Dönü türülmesi

Yakıt besleme sistemleri açısından hidrojen motorları 4 kategoriye ayrılmaktadır. Karbürasyon, emme manifolduna püskürtme, emme supabının arkasına püskürtme ve do rudan silindir içine püskürtmedir (Tekin, 1997).

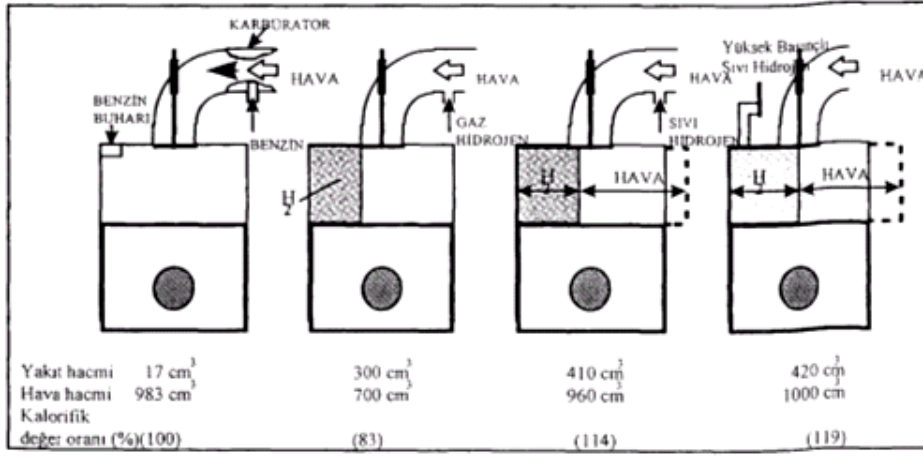
Hidrojen ile hava karı mı, sırasıyla dahili ve harici olarak adlandırabilece imiz yöntemlerle motorun yanma odası içerisinde veya motorun emme manifoldunda hazırlanmaktadır. Harici karı m hazırlama yönteminde, basit bir gaz karı tırıcı içerisinde dü ük basınçlarda hava ile karı tırılması veya hidrojenin yine dü ük basınçlarda motorun emme manifolduna sürekli veya kesikli olarak gönderilmesi mümkündür. Kesikli olarak yakıt gönderme durumunda, dizel ilkesi ile çalı an motorlardaki gibi yüke göre karı m ayarı yapılabilir. Bu durumda karbüratördeki gaz kelebe i ortadan kalkaca ı için motorun kısılma kayıpları da kaldırılacak ve hacimsel verim dolayısıyla motorun maksimum gücü artacaktır (Soru bay ve Arslan, 1988).

4.2.3.1 Karı m Hazırlama Yöntemleri

Hidrojen yakıtlı motorlarda yanma özelliklerini, emisyon özelliklerini ve motor performansını etkileyen en önemli i lem karı m hazırlama yöntemidir. Hidrojenin difüzyon hızının yüksek olması, geni yanma sınırlarına sahip olması ve yüksek devirlerde bile homojen karı m sa lanması mümkün oldu u için çe itli karı m hazırlama yöntemleri geli tirilmektedir. Genel olarak;

1. Karbürasyon,
2. Emme manifolduna enjeksiyon,
3. Emme supabı portuna enjeksiyon,
4. Do rudan silindire enjeksiyon.

Bir gaz karbüratörü ile karbürasyon kullanılan en eski ve basit tekniktir. Benzinli bir motorda yakıtın karı m içindeki hacimsel oranı %1,7 civarındadır. Buna kar ılıklı gaz halindeki hidrojenin stokiometrik ko ullarda kapladı ı hacim % 30 olaca ından e de er motordan alınacak maksimum güç miktarı %15 dolayında bir dü ü görülecektir. Ayrıca güç kontrolü için kullanılan gaz kelebe i sebebiyle de kısılma kayıpları, geri yanma ve erken tutu ma problemleri de mevcuttur (ekil 4.2).



ekil 4.2 1000 cm³ hacimli bir motor için yanma odasındaki yakıt hava karışımlarının maksimum kalorifik değerleri (Petkov et al, 1988).

Bu problemler göz önüne alındığında istenmeyen yanma olayları, güçteki düşüş ve kısımla kayıplarının ortadan kaldırılmasında yakıt enjeksiyon tekniğinin önemli etkisi vardır.

Hidrojenin emme manifolduna enjeksiyonu kısımla ile güç kontrolüne alternatif bir sistemdir. Bu metod hidrojenin tipik özellikleri (Geni yanma sınırları v.b.) sebebi ile avantajlıdır. Yakıt devamlı olarak gönderilebileceği gibi emme strouna bağılı olarak kesikli gönderilebilir. Geri yanmanın önlenmesi için emme manifoldu, içinde yanıcı bir karışımın devamlı olarak bulunması önlenmek üzere tasarlanmalıdır. Havanın yakıt dağılımından önce silindire püskürtülmesi çalışması açısından çok önemli iki role sahiptir. Birinci olarak soğutma etkisi sağlayarak yüzeylerdeki mevcut ısı kaynaklarını etkisiz kılmaktadır. İkinci olarak da silindir içersindeki yanma ürünlerinin seyreltilmesine ve soğutulmasına yardımcı olur (Das, 1990).

Karbüratörlü bir motor sisteminde egzoz ve emme supaplarının aynı anda açık olduğu supap bindirmesi esnasında sıcak atık gazlar ile hava dolgusu temas eder. Bu da geri yanmaya sebep olur. Manifolda enjeksiyon sisteminde bu tip geri yanma daha az görülür. Kesikli püskürtme ile bu olay daha da azaltılabilir.

Bazı ara tırmacılarda emme portuna (supabın oturma yüzeyinden) enjeksiyon üzerinde ara tırmalar yapmaktadır. Böyle bir sistemde hem hava, hem de yakıt emme strou esnasında yanma odasına girer. Emme manifoldunda karışım olmaz karışım yanma odasının içinde hazırlanır, geri yanmanın önüne geçilmi olur. Motorun gücü karbüratörlü ve emme manifoldundan beslenen bir sisteme göre artar. Aynı şekilde hidrojenin ayrı bir supaptan yanma

odasına gönderilmesiyle de gerçekte tirilir.

Hidrojenin yanma odasına do rudan enjeksiyonu önceki sistemlerin kötü yönlerini ortadan kaldırır. Motordan alınan gücün artmasına yardımcı olur. Geri yanma ve erken tutu manın önüne geçer. Fakat yüksek basınçlı püskürtme sistemlerine ihtiyaç duyulur. Piston üst ölü noktaya yakla tı nda yanma odası içindeki basınçtan daha yüksek bir basınçta püskürtmeye ihtiyaç duyulur. Bu noktada sıcaklık kontrollü depolama sistemi kullanılarak ek basınç arttırıcı i leme gerek kalmaksızın do rudan enjeksiyon i lemi yapılabilir (URL-2, 2007).

Hidrojenin yanma odasına sıvı olarak gönderilmesi de ara tırılan konulardan birisidir. Bu sistemde motordan alınan gücün artmasını sa lar. Hidrojenin sıvı ya da gaz olarak silindir içine do rudan püskürtme sistemlerinin dezavantajı pahalı ve karma ık mekanizmalar gerektirmeleridir.

Hidrojenin benzin ve mazotla karı ık olarak kullanıldı ı sistemlerde mevcuttur. Benzinli sistemde hidrojen - benzin - hava karı ımı yanma odasına gönderilir ve buji ile ate leme yapılır. Güç ayarı karı ım oranları de i tirilerek yapılır. Mazotlu sistem normal dizel motor gibi çalı ır. Yanma odasına hava-hidrojen karı ımı gönderilir. Yanma mazotunun püskürtülmesi ile yapılır (URL-2, 2007).

4.3 H DROJEN N MOTORLARDA YAKILMASI VE LET M PROBLEMLER

Hidrojen yakıtlı motorlarda yanma açısından ortaya çıkan en önemli iki sorun, geri tutu ma ve erken ate leme olaylarıdır. Yanma odasına gönderilen yakıt hava karı ımının silindire girmeden önce tutu ması sonucunda motorun emme manifoldun içinde geriye do ru alevin ilerlemesi geri tutu ma olarak tanımlanmaktadır. Bu olay emme sistemi elamanlarını tahrip etmekte ve emniyet açısından sorun olu turmaktadır. Yanma odasına gönderilen karı ımın bujide kıvılcım çakmadan önce sıcak odaklar tarafından tutu turularak yanmayı istenilenden önce ba latması da erken tutu ma olarak tanımlanmaktadır. Hidrojenin tutu ma enerjisinin dü ük olması bu iki sorunu ortaya çıkarmaktadır. Geri tutu ma hava fazlalık kat sayısının 2 ile 3 arasında oldu u durumlarda olu maktadır. Hidrojenin yakıt olarak kullanılabilmesi için bu sorunların ortadan kaldırılması gerekir (Soru bay ve Arslan, 1988).

Geri tutulanın sebeplerinden biri benzin ile kıyaslandığında hidrojenin tutulabilmesi için daha düşük iyonlaşma enerjisine ihtiyaç duymasıdır. Dolayısıyla hidrojen yakıtlı motorlarda buji kıvılcımından sonra ateşleme sisteminde kalan artık enerji miktarı daha fazla olur. Egzoz zamanı genişleme periyodundan sonra silindir içi basıncının atmosfer basıncına yakın olduğu durumlarda, sistemdeki artık enerji bujide kıvılcım oluşmasına sebep olur. Kıvılcımın oluştuğu nokta çevrimden çevrime farklılık gösterir. Enerji buji kıvılcımı emme zamanında oluşursa, diğer bazı etkenlerle birlikte geri tutulanın sebepleri olabilir. Artık enerji oluşumunu önlemek için ateşleme sistemi modifiye edilmelidir (Kondo et al, 1997).

Yüksek yük altında, yanma odasındaki sıcak noktalar karışımın erken ateşlenmesine sebep olur. Hidrojenin tutulma enerjisinin düşük olması nedeniyle; yanma odasındaki sıcak noktalar, supap bindirmesinde sıcak egzoz gazları, çok fakir karışımlarda yanma hızlarının düşük olması nedeni ile yanma süresinin artması sonucu yanan gazlarla yeni karışımın teması, motordan gelen sıcak partiküller, yanmayı istenilenden önce başlatılmaktadır. Bu amaçla yanma odası sıcaklığının düşürülmesi gerekmektedir. Bunun için; karışımın bir miktar fakirleştirilmesi, egzoz gazları resirkülasyonu (EGR), yanma odasına su püskürtülmesi, supap bindirmesi süresinin azaltılması, giriş havasının sıvı hidrojen kullanımı sonucu soğutulması gibi çeşitli yöntemler uygulanabilir. Ancak karışımın EGR uygulanması veya gönderilen hidrojenin azaltılması sonucu fakirleştirilmesi çevrimden çevrime olan farklılıkları artıracak ve motorun düzenli çalışmasını önleyecektir. Ayrıca EGR sonucu ortalama efektif basınçta düşecektir (Soruşay ve Arslan, 1988).

Hidrojen yakıtlı motorlarda hava-yakıt oranı 0,8 olduğunda egzoz gazları içindeki NO_x miktarı maksimum olur. NO_x oluşumunu azaltmak için hidrojene saf oksijen ilave edilmelidir. Bu durum ise sisteme daha karmaşık hale getirir ve taşıma maliyetini artırır. Bu sorunun çözümü için kullanılan yöntemlerden biri; taşıta üzerinde suyu elektroliz ederek, açığa çıkan hidrojen ve oksijenin basınç altında depo edilmesidir (Bohacik et al, 1997).

Hidrojen kullanımı için bugünkü araştırmalar ve geliştirme çabaları hidrojenin enerji ekonomisinden ilerlemesini kolaylaştıracak teknolojilere odaklanmaktadır. Bu teknolojiler yakıt pillerini, içten yanmalı pistonlu motorları, gaz türbinlerini, evsel kullanımı, kazanları v.b. içermektedir.

Ula ım; içten yanmalı pistonlu ve gaz türbinli motorlar ula ım araçlarında hakim olan güç kaynaklarıdır. Alternatif yakıt aray ının temel sebebi olan, evre kirli i ve petrol rezervlerinin azalmasında en çok etkilenecek alan da ula ım alanıdır. Bu sebeple, hidrojenin kullanımı konusunda üzerinde en çok ara tırma geli tirme çalı malarının yapıld ı alan da ula ımdır (URL-2, 2007).

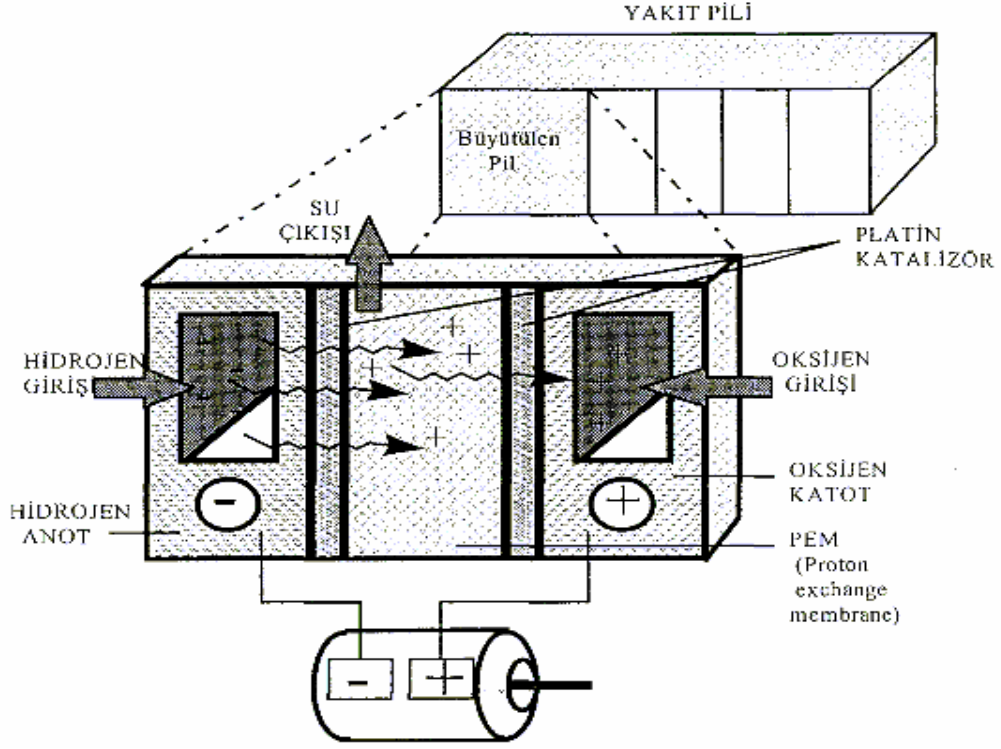
Hidrojenin, hava ula ımında kullanılması konusunda yapılan ara tırmalar sonucunda pek çok avantajlara sahip oldu u tespit edilmi tir. Kalkı esnasında bir uçak kendi a ırlı ı, yükün a ırlı ı ve gidece i yer için ihtiyaç duyulan yakıtın a ırlı ını kaldırması gerekmektedir. Hidrojen birim a ırlıkta jet yakıtına göre 2,5 kat daha fazla enerji içermektedir. Bu bir uçak için daha hafif yakıt yükü olarak açıklanabilir. Uçaklarda hidrojenin basınçlı gaz ya da kriyojenik sıvı olarak kullanımı mümkündür. Sıvı hidrojenin kullanılması durumunda daha önce de bahsedilen avantajlar yanında, bir sistem teklifi olarak uçak yapısının so utulmasıdır. Sperersonik uçakların d ı yüzeylerinde aı a çıkan yüksek sıcaklıklarda gereken mukavemete sahip malzemelerden olması sebebiyle bu uçaklarda titanyum ve di er a ır ala ımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Sıvı hidrojen kullanımı mümkün oldu unda alüminyum ve boron gibi hafif a ırlıklı ala ımlar kullanılabilir. Böylece menzil ve yk arttırılabilecektir (URL-2, 2007).

Yakıt pilleri de ula ım araçlarında hidrojenin kullanımı açısından di er bir alternatif yöntemdir. Bu yöntemde yakıt pili elektrik üretir ve üretilen elektrik, elektrik motorunu çalı tırarak aracın hareket etmesini sa lar. Yakıt pilleri hidrojeni do rudan d k voltajlı do ru akımına dn tören cihazlardır. Pilin hareketli parçası yoktur. Pil elemanının orta kısmında bulunan bir membranın bir tarafından oksijen (hava), di er tarafından ise hidrojen geçer. Hidrojen anotta elektronlar ve protonlara ayrılır, protonlar membrandan katoda geçer, negatif yüklü elektronlar arkasından ayrılır. Bu harici bir devre ile ba land ı nda terminaller arasında do ru elektrik akımı olu turur. Bu akım bir elektrik motorunu çalı tırabilir.

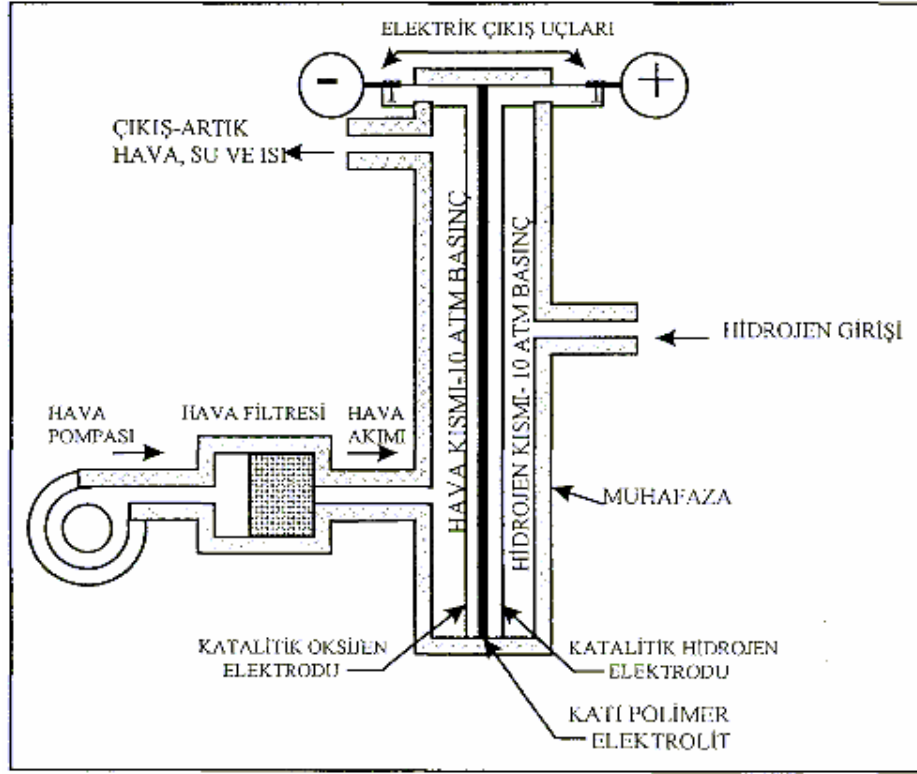
Hidrojen iyonları, elektronlar ve bu temiz i lemin tek yan ürünü olan suyu olu turmak için oksijenle katotta birle ir. Yakıt pilleri kirlilik üretmez ve sessizdir, çok az bakıma ihtiyaç duyar birkaç saniyede çalı tırılabilir.

ekil 4.3'te gruplanm ı halde ve ekil 4.4'de ise tek bir yakıt pili elemanının ematik resmi gösterilmi tir.

Yakıt pilleri yakıtın enerji potansiyelinin %75'inin üzerinde dönü türebilecek büyüklükte bir verimlilik potansiyeline sahiptir. Bu günün artları altında yapımı pahalıdır ve tamamı ile pratik olması için daha fazla teknolojik ilerlemeye ihtiyaç vardır.



ekil 4.3 Hidrojen yakıt pili (URL-2, 2007).



ekil 4.4 Tek hücreli hidrojen hava yakıt pili (URL-2, 2007).

YM' da hidrojen kullanımı ile ilgili ilk deneylerde propan ve doğal gaz için kullanılan yakıt-hava karışım cihazları hidrojene uygun olarak geliştirilmi ve motor üzerinde deneyler yapılmıştır. Hidrojen diğer yakıtlarla karıştırıldığında farklı yanma ve ateleme karakteristiklerine sahiptir. Başlıca karılaılan iki problem bunlardır (URL-2, 2007).

Geri yanma (Back flash) problemi: Hidrojen yakıtlı motorlar üzerinde yapılan çalışmalarda karılaılan problemlerin başında geri yanma ve erken tutulma gelmektedir. Geri yanma, yanma odasına gönderilen yakıt - hava karışımının emme tamamlanmadan çe itli etkenlerle tutulması sonucu motorun emme manifoldundan geriye doğru alevin ilerlemesidir. Emme sistemindeki elemanların tahrip olmasına yol açabilecek ve emniyet açısından sakıncalı olan bu olayın önlenmesi gerekmektedir.

Erken tutulma (Pre-ignition) problemi: Önlenmesi gereken diğer olaylardan biri de erken tutulmadır. Erken tutulma yanma odası içinde karışımın hidrojenin tutulma enerjisinin düşük olması sebebi ile bujide ateleme olmadan önce tutulmasıdır.

Genel olarak geri yanma ve erken tutu manın sebepleri unlardır:

1. Yanma odasındaki sıcak noktalar,
2. Supap bindirmesi sırasında sıcak egzoz gazları ile karı ımın temas etmesi,
3. Çok fakir karı ımlarda yanma hızının dü ük olması sebebi ile yanma süresinin artması sonucu yanmakta olan gazlarla yeni karı ımın teması,
4. Motor ya ından ve yanma ürünü olan sıcak partiküllerin erken tutu mayı ba latması vb. dir.

Geri yanma ve erken tutu manın önlenmesi için;

1. Yanma odasının sıcaklı ının dü ürlmesi, bu amaçla;
 - a. Karı ımın fakirle tirilmesi,
 - b. Egzoz gazlarının resirkülasyonu,
 - c. Emme manifolduna veya yanma odasına su püskürtülmesi,
 - d. Supap bindirme süresinin azaltılması,
 - e. Giri havasının sıvı hidrojen kullanımı ile so utulması vb.gerekir.
2. Do rudan enjeksiyon sistemlerinin kullanılması.

Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanılmasında bir di er problem de yanma ürünü olan ve so utma için püskürtülen suyun ya ı kirletmesidir. Ya daki bu kirlenme ya layıcılık özelli inin azalmasına sebep olur ve motorun çalı ması açısından potansiyel bir tehlikedir. Genellikle ya ile suyu ayırmada kullanılan yöntem ya ın suyun kaynama noktasına kadar ısıtılmasıdır (URL-2, 2007).

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALI MALAR

5.1 DENEYSEL ÇALI MANIN AMACI

Bu çalı mada, tek silindirli bir benzin motoru hidrojen ve benzinle çalı tırılarak test edilmi ve her iki yakıtla çalı manın motor performansı ve emisyonlara etkisi deneysel olarak incelenmi tir.

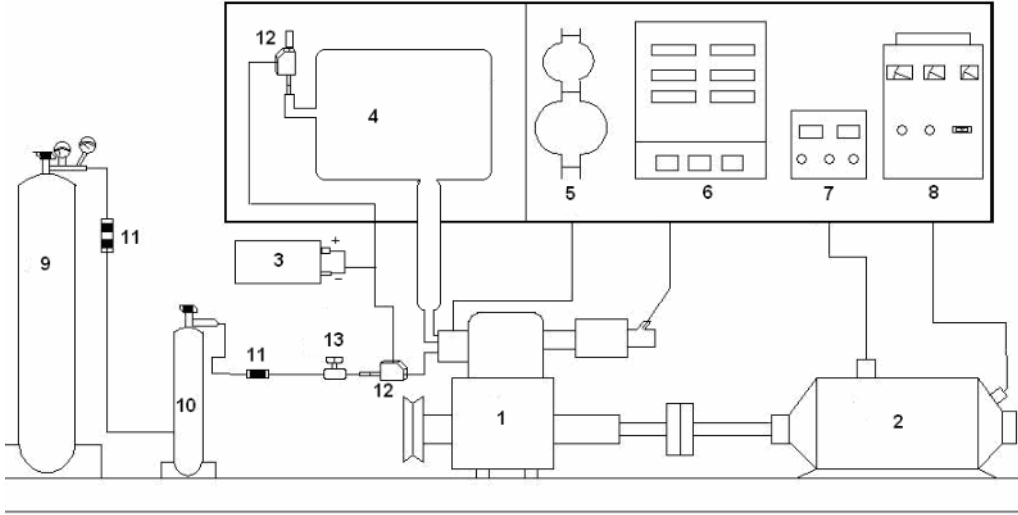
5.2 DENEYLERE L K N ÖZELL KLER

5.2.1 Deney Yeri

Deneyler Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik E itim Fakültesi Otomotiv Anabilim Dalı Motor Test Laboratuvarında yapılmı tir. Deney tesisatının genel görünümü ekil 5.1’de, ematik görünümü ise ekil 5.2’de verilmi tir.



ekil 5.1 Deney tesisatının genel görünümü.



1-Deney motoru 2- Elektrikli dinamometre 3- Güç kaynağı 4- Hava tankı 5- Yakıt ölçme düzeneği 6- Egzoz gaz analizörü 7- Load cell indikatörü 8- Dinamometre kontrol ünitesi 9- Hidrojen tüpü 10- Sulu güvenlik 11-Kuru güvenlik 12-Akım metre 13-Vana

ekil 5.2 Deney tesisatınınematik görünümü.

5.2.2 Deney Motoru

Fakülte laboratuvarında yapılan deneylerde tek silindirli 4 zamanlı Datsu LT200 marka bir ara tırma motoru kullanılmıtır. Motorun kendi elektronik ateleme sistemi kullanılmıtır, ateleme avansında herhangi bir deviyelik yapılmamıtır. Hidrojenle çalışılmadan önce karbüratör ve regülatör tamamen sökülüp devredışı bırakılmıtır, hava ölçüm hortumu dorudan doğruya emme manifolduna bağlanılmıtır. Manifold girişine monte edilebilecek şekilde yapılan bir ara parça üzerinden hidrojen gazı bir bakır boru aracılığıyla emme portuna verilmıtır. Deney motorunun teknik özellikleri Çizelge 5.1’de verilmıtır.

Çizelge 5.1 Deney motorunun teknik özellikleri.

Markası	Datsu LT200 (Hava Soğutmalı)
Silindir sayısı	1
Motor gücü	6,5 HP
Maksimum motor hızı	3600 d/d
Silindir çapı	68 mm
Strok	54 mm

5.2.3 Deneyde Kullanılan Hidrojen Yakıtı

Deneyde HABA firmasından temin edilen 50 litre hacmindeki çelik tüp içerisinde 150 bar basınç altında depolanmış % 99.9 saflıkta hidrojen gazı kullanılmıştır.

5.3 DENEYDE KULLANILAN ÖLÇÜM C HAZLARI

5.3.1 Motor Deney Seti Ve Dinamometresi

Deneylerde motorun yüklenmesi için Kemsan marka, 10 kW gücünde elektrikli dinamometre kullanılmıştır (ekil 5.3). Dinamometre kumanda panosu ekil 5.4'te verilmiştir. Deney seti motor kuvvetini, hızını ve sıcaklığını ölçecek donanıma sahiptir. Dinamometre kontrol ünitesi ile motorun istenilen devirde hassas olarak yüklenmesi ve mar yapıştırılması mümkündür.



ekil 5.3 Elektrikli dinamometre.



ekil 5.4 Elektrikli dinamometre panosu.

5.3.2 Yakıt Tüketimi Ölçme Düzeni

Benzin tüketimini ölçmek için kullanılan düzenek, hacimsel yöntemle göre çalışır. 10, 20 ve 150 ml'lik hacimlere sahiptir. Deney motoru ölçüm yapılacak olan hıza ayarlanıp kararlı hale geldikten sonra 10 cm³ lük yakıt haznesinde bulunan yakıtın harcanma süresi kronometre ile tespit edilmiş ve kaydedilmiştir. Yakıt tüketimi ölçme düzeni ekil 5.5.'de görülmektedir.



ekil 5.5 Yakıt tüketimi ölçüm düzeni.

5.3.3 Akı metre (Debimetre)

Motorun tükettiği hidrojen debisini ölçmekte kullanılan IFM markalı akı metre 19V-30V gerilimle çalışmaktadır. Ölçüm sonuçlarını l/min, m³/h, Nm³ birimde gösterebilmektedir. Akı metre ekil 5.6'da görülmektedir. Akı metrenin motora bağlantısı ekil 5.7'de görülmektedir.



ekil 5.6 Akı metre (Debimetre).



ekil 5.7 Hidrojen akı metrenin motora ba lantısı.

5.3.4 Hava debisi ölçümü

Hava ölçümü yine IFM marka ikinci bir elektronik debimetre kullanılarak yapılmı tır. Debimetre hava deposunun giri deli ine sızdırmaz bir ekilde do rudan ba lanarak tüm havanın debimetre üzerinden akması sa lanmı , böylece dijital göstergeden hava debisi Nm^3/h olarak anlık okunabilmi tir. Hava akı metresinin motora ba lantısı ekil 5.8'de verilmi tir.



ekil 5.8 Hava akı metresinin motora ba lantısı.

5.3.5. Sulu Güvenlik

Hidrojen tüpü ile motor arasında ba lanımı tır. Tüpten gelen hidrojen direk motora giri te tehlike arz etmemesi için sulu güvenlik kullanılmı tır. Hidrojen motora gitmeden önce sulu güvenlik tüpüne girmekte ve su içerisinden geçerek motora gitmektedir. ekil 5.9'da sulu güvenlik görülmektedir.



ekil 5.9 Sulu güvenlik.

5.3.6 Egzoz Gaz Analizörü

Deneylerde kullanılan egzoz gaz analizörü, MRU DELTA 1600L marka olup, NO_x, HC, CO, CO₂, (hava fazlalık katsayısı) ve O₂ parametrelerini ölçebilmektedir. Çizelge 5.3'te Egzoz gaz analizörünün teknik özellikleri verilmiştir. Ekil 5.10.'da ilgili emisyon cihazı görülmektedir.

Çizelge 5.3 Egzoz gaz analizörünün teknik özellikleri.

Değişkenler	Ölçüm Aralıkları	Hassasiyeti
Oksijen	%0 - 25	± %0,1 - ± %3
Karbonmonoksit	%0 - 15	± %0,06 - ± %5
Karbon dioksit	%0 - 20	%5 - ± %5
Hidrokarbon	0 - 20000 ppm	± 12 ppm - ± %5
Azot oksit	0 - 4000 ppm	± 12 ppm - ± %5



Ekil 5.10 Egzoz gaz analiz cihazı.

5.4 HİDROJEN YAKITININ MOTORA VERİLMESİ

Hidrojenin diğer yakıtlara göre en önemli üstünlüklerinden biri olan geniş tutulma aralığı avantajını kullanarak pompalama kayıplarını düşürmek ve motora daha fazla dolgu alabilmek

amacıyla karbüratör devre dışı bırakılmış ve hava tankının çıkış hortumu ekil 5.11’de görüldüğü gibi doğrudan doğruya boru aracılığıyla emme manifolduna bağlanmıştır. Bir gaz vanası ile debisi ayarlanabilen hidrojen gazı ise, manifolda bağlanan boru hattı üzerindeki bir delikten geçirilerek ucu emme supabının hemen arkasına yanacak şekilde sabitlenen 5 mm çapında bir bakır boru aracılığıyla emme supabının hemen arkasına verilmiş ve deliğin etrafı sızdırmaz şekilde kapatılmıştır. Bu sayede geri tepme probleminin önlenmesine çalışılmıştır. ekil 5.11’de motora hidrojen ve hava verilmesinde kullanılan elemanlar görülmektedir.



ekil 5.11 Motora hidrojen ve hava verilmesinde kullanılan elemanlar.

5.5 DENEYLERİN YAPILIŞI

Deneylere başlamadan önce motorun ayarları kontrol edilmiş ve motor çalışmaya sıcaklığın getirildikten sonra deneylere başlanmıştır. Benzin yakıtında stokiometrik hava–yakıt oranı 14,7 dir. Hidrojen’in stokiometrik hava–yakıt oranı ise 2.38’ dir. Benzinle yapılan deneyler, karbüratöre benzin deposunun hortumu bağlanarak, hava girişi ise hava tankına hava hortumu bağlanarak yapılmıştır. Hidrojenli çalışmada ise karbüratör çıkarılarak emme manifolduna doğrudan hava hortumu bağlanmıştır, hidrojen gazı ise özel olarak imal edilen bir ara parçanın içerisinden geçirilen ve emme supabının hemen arkasına kadar uzatılan 5 mm çapındaki bakır boru içerisinden verilmiştir. Benzinli çalışmada deneyler 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200, 2600, 3000, 3400, 3600, 3800 1/min motor hızlarında ve tam yükte, hidrojenle

yapılan çalı mada ise 1400, 1600, 1800, 2000, 2200, 2600, 3000, 3400, 3600, 3800 ve 4000 1/min motor hızlarında yapılmı tır.

Tüm testlerde ate leme avansı, motorun orijinal ate leme avansında gerçekte mi tir. Benzinli çalı mada motor fabrika çıkı ı hava-yakıt oranı olan yaklaşık 14,5/1 hava yakıt oranı ile çalı tırılmı tır.

Hidrojen ile çalı mada ise hidrojen gazının ba lı oldu u hortum hattı üzerinde bulunan kontrol vanası motor hızına göre açılarak gaz debisi artırılmı tır. Ölçölmek istenen motor hızına ula ıldı ında küçük artırımlarla gaz debisi ve yük artırılmaya devam edilmi tir. Her bir artırımdan sonra ula ılan de erler not alınmı ve motor geri tepme yapmadan kararlı ekilde çalı tı ı en son yükleme de erlerinde moment, hava ve yakıt debisi ve egzoz emisyon de erleri alınmı tır. Ölçüm esnasında hava debisi ve yakıt debisi iki adet IFM marka akı metre ile ölçölmü ve sonuçları kaydedilmı tir.

5.6 DENEYLERE İ L İ K N ÖLÇÜM VE HESAPLAMALAR

5.6.1 Motor Momenti Ve Gücü

Deney sırasında motor yükte çalı ırken kuvvet de eri dinamometreye 0.25 m uzaklıktaki load cell'den okundu.

Motor momenti a a ıdaki e itlikten hesaplanmaktadır;

$$M_e = F \cdot 0.81 \cdot 0.25 \quad (5.1)$$

Motor devri 2000 1/min'da dinamometreden okunan kuvvet $F=3.18\text{kg}$ oldu una göre, 2000 1/min'daki motor momentini; (5.1)'deki e itlikte yerine konularak $M_e=7.79\text{ Nm}$ olarak tespit edildi.

Motor gücü ise a a ıdaki e itlikten hesaplanmaktadır;

$$P_e = \frac{M_e \cdot n}{9549} \quad (5.2)$$

Örnek olarak motor gücü hesabında, motor devri 2000 1/min'da e itlik (5.1)'e göre hesaplanan motor momenti 7.79 Nm (5.2)'deki e itlikte yerine yazıldı ında;

$$P_e = \frac{7.79 \cdot 2000}{9549} = 1.63 \text{ kW} \quad \text{olarak hesaplanmı tır.}$$

6.5.2 Yakıt Tüketimi Ve Özgül Yakıt Tüketimi

Benzinli çalı mada yakıt tüketimini ölçmek için hacimsel yöntem kullanıldı. Motorun deney setinin yakıt ölçme borusundaki 10 ml yakıtı tüketme süresi kronometre ile tespit edilerek, saatteki yakıt tüketimi kg/saat cinsinden hesaplandı.

Ölçekli kap ve dijital tartı aleti kullanılarak deney ortamında yakıtın yo unlu u 0.735 kg/litre olarak bulunmu tur.

Örne in motor 2000 1/min ile çalı ırken 10 ml yakıtı 26 saniyede tüketti ine göre;

$$10 \text{ ml yakıt} = 0.01 \text{ litre}$$

$$10 \text{ ml yakıt} = 0.01 \times 0.735 = 0.00735 \text{ kg}$$

Motorun saat deki yakıt tüketimi;

$$B = 0.00735 \times 3600 / 26 = 1.018 \text{ kg/h}$$

olarak hesaplanmı tır.

Özgül yakıt tüketimi a a ıdaki e itli e göre hesaplanmaktadır ;

$$b_e = \frac{B \cdot 1000}{P_e} \quad (5.3)$$

Hesaplanan saatlik yakıt tüketimi e itlik (5.3)'de yerine yazıldı ında,

$$b_e = \frac{1.018 \cdot 1000}{1.63} = 624.54 \text{ g/kWh}$$

özgül yakıt tüketimi miktarı belirlenmiştir.

Hidrojen ile çalışmada yakıt tüketimini ölçmek için önce hidrojenin hacimsel debisi ölçülmüştür. Nm³/h olarak bulunan debisi hidrojenin özkütlesi ile çarpılarak bir saatteki hidrojen tüketimi bulunmuştur. Gaz halindeki hidrojenin özkütlesi Çizelge 3.1’de verildiği gibi 0,084 kg/m³ alınmıştır. Örneğin motor 2000 1/min ile çalışırken hidrojen gazının debisi 3,15 Nm³/h ise bu durumda hidrojenin saatteki kütleli debisi;

$$B=3,15 \times 0,084 = 0,2646 \text{ kg/h}$$

olarak bulunur. Bulunan kütleli debiyi denklik (5.3)’te yerine koyduğumuzda;

$$b_e = \frac{0,2646 \times 1000}{1,64} = 161,34 \text{ g/kWh}$$

denkleminde hidrojenin özgül yakıt tüketimi bulunur.

BÖLÜM 6

DENEY SONUÇLARI VE TARTI MA

6.1 MOTOR PERFORMANSI

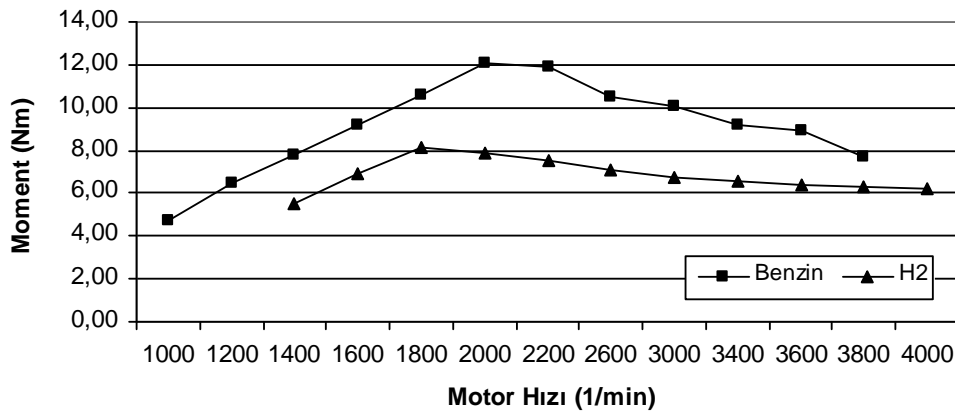
Bu çalı mada yapılan deneylerde hava giri i ve yakıt giri i ayrı ayrıdır ve dizel motorda oldu u gibi hava kısıtlanmadan her devirde motora girebilmektedir. Deneylerde motoru yüklemeyen önce bo ta çalı tılırken hidrojen gazı kontrol vanası bir miktar açılmakta, motor devrini aldıktan sonra yüksüz fakat sabit bir hızla dönmektedir. Bu durum, motor hızının devrinin artmasıyla beraber hava debisinin artması, yakıt debisinin ise vana kontrolünde oldu u için sabit kalması dolayısıyla belli bir devire gelindi inde karı m giderek fakirle ti i için kendi iç sürtünmeleri ile dengeye gelmesinden kaynaklanmaktadır.

Bu a amada karı m oldukça fakirle ti i ve hemen hemen hiç yüklenemedi i halde hidrojenin çok fakir karı mlarla da tutu abilme özelli inden dolayı motor bo ta sorunsuz çalı abilmektedir. Daha sonra küçük artırımlarla dinamometre üzerinden motor yüklendi inde hızı dü meye ba lamı ve bu durumda da gaz vanası azar azar açılarak tekrar devri artırılmı tır. Bu ekilde fakirden zengin karı ma do ru gidildikçe bir noktadan itibaren motorda vurutu ba lamakta ve hız dü mektedir. Bu kritik nokta literatürde (Subramanian et al, 2006) e de erlik oranının yakla ık 0.55 oldu u karı m olarak ifade edilmekte ve bu noktadan itibaren vurutunun ba ladı ı ve NO_x emisyonlarının hızla arttı ı ifade edilmektedir. Bu noktadaki motor gücünün ise %60'larına ula ılabildi i ifade edilmi tir (Subramanian et al, 2006).

Tam yük ve de i ik hızlarda yapılan testler ile her iki yakıtla çalı mada motor momenti, motor gücü ve özgül yakıt tüketimi de erleri belirlenmi tir.

6.1.1 Motor Momenti

Motor hızına karşılık moment değişimi ekil 6.1’de gösterilmiştir. Deney motoru en yüksek moment değerini benzinli çalışmada 2000 1/min’de, hidrojenli çalışmada ise 1800 1/min’de üretmiştir. Hidrojenle elde edilen moment değerinin benzinle elde edilen moment değerinden ortalama %33 düşüğe çıktığı görülmüştür. Hidrojenli çalışmada momentin düşüğe çıkmasının sebebi silindir içerisine alınan dolgu miktarının düşüğe olmasıdır. Stokiyometrik karışımla çalışmayan bir benzinli motorun hidrojenle aynı güç ve hızı verebilmesi için %40-60 kadar daha büyük hacimli olması gerekmektedir (Hailin and Karim, 2003). Hidrojenli çalışmada yüksek devirlerde moment değerinin düşüğe gitmektedir. Motorun avansı değeri artırılmamasına rağmen hidrojenin yüksek yanma hızı sayesinde yüksek devirlerde yanma iyileşmektedir. Düşük ve orta hızlarda ateşleme avansı değeri artırıldı inde hidrojenli çalışmada daha fazla moment elde edilebilir. Ateşleme sistemine rötar verilerek yapılan çalışmalarda (Das, 2002; Toshio et al, 2000; Homan et al, 1983; Li and Karim, 2004) daha iyi sonuçlar alınabilmektedir.

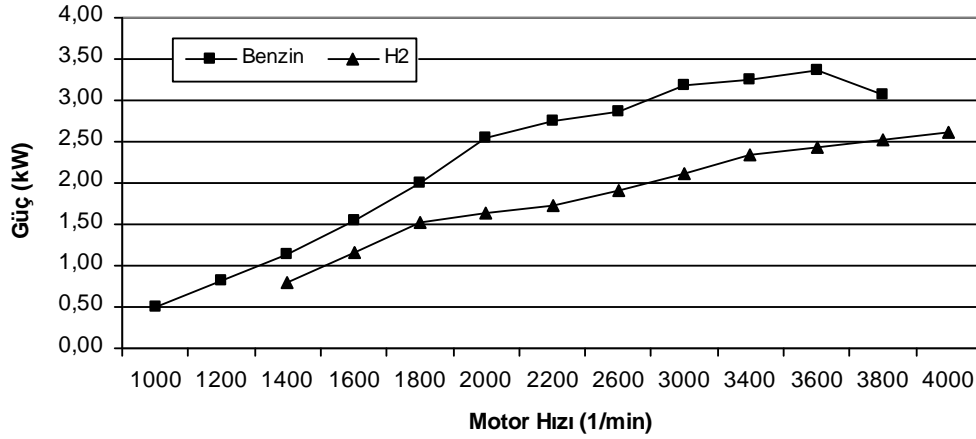


ekil 6.1 Motor hızına göre benzin ve hidrojen için moment değişimleri.

6.1.2 Motor Gücü

ekil 6.2’de her iki yakıt için efektif motor gücü sonuçları gösterilmiştir. Motor momentinde bahsedilen bütün faktörler güç için de geçerlidir. Motor momentine paralel olarak hidrojenli çalışmada elde edilen güç benzinli çalışmaya göre yaklaşık %30 daha düşüktür. Hidrojenli çalışmada yüksek hızlarda güçte bir azalma olmamıştır. Hidrojenin hızlı yanma özelliği sayesinde motorlar daha yüksek hızlara çıkacak şekilde tasarlanabileceğinden hidrojenin avantajı daha çok yüksek hızlarda ortaya çıkmaktadır. Yüksek hızlarda hidrojenli motorun

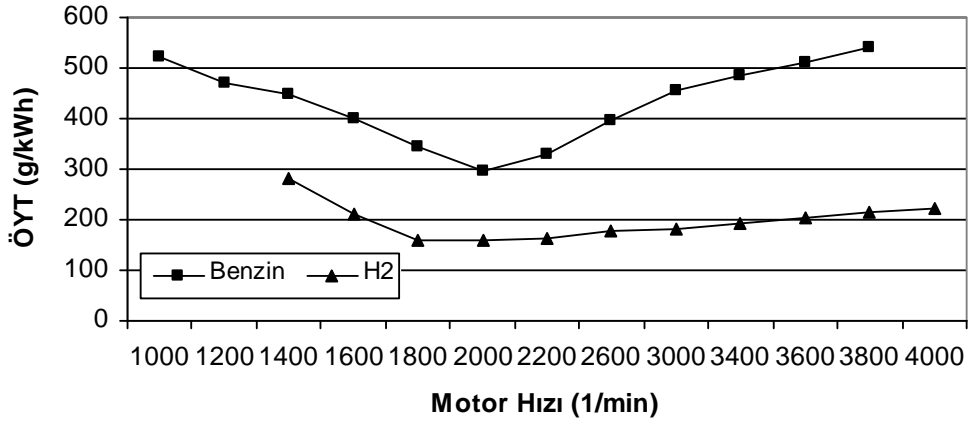
benzinli motora göre daha yüksek moment ve güç ürettiği literatürde bildirilmiştir (Kahraman et al, 2006).



ekil 6.2 Motor hızına göre benzin ve hidrojen için motor gücü değerleri.

6.1.3 Özgül Yakıt Tüketimi

Her iki yakıtın özgül yakıt tüketimi değerleri ekil 6.3 de verilmiştir. Hidrojen yakıtının alt ısı verimi benzine göre daha yüksek olduğu için hidrojen yakıtlı çalışmalarda özgül yakıt tüketimi azalmaktadır. Özgül yakıt tüketimini azaltan diğer bir sebep ise hidrojenin hızlı yanmasından kaynaklanan daha yüksek basınç artışıdır. Hidrojenli çalışmada basınç artışı hızının yüksek olması ve daha yüksek sıkıştırma oranlarında yakılabilmesi nedeniyle zamanında basınç düşüşü altında kalan alanı artırdığından ısı verim yüksek çıkmakta, dolayısıyla özgül yakıt tüketimi düşmektedir (Kahraman et al, 2006; Swain et al, 1983; Tang et al, 2002; Nagalingam et al, 1983). Ayrıca, moment ve güç değerlerine paralel olarak yüksek hızlarda hidrojenli çalışmada özgül yakıt tüketiminin benzinli çalışmaya göre oldukça düşük çıktığı tespit edilmiştir (ekil 6.3).

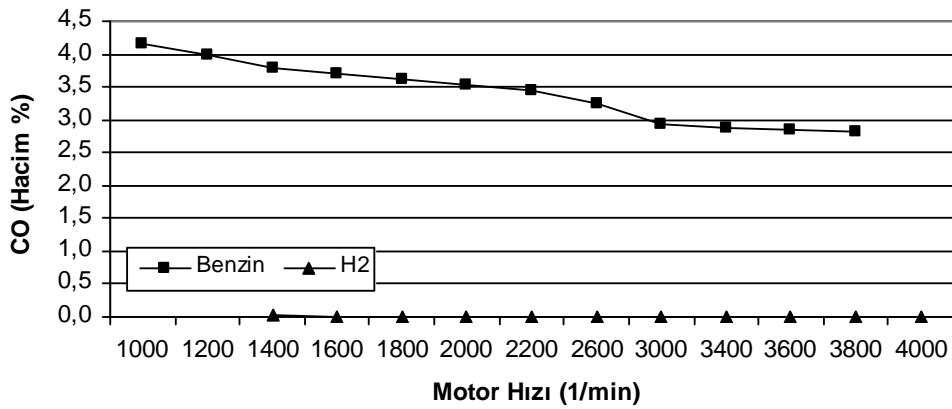


ekil 6.3 Motor hızına göre benzin ve hidrojen için özgül yakıt tüketimi de iimleri.

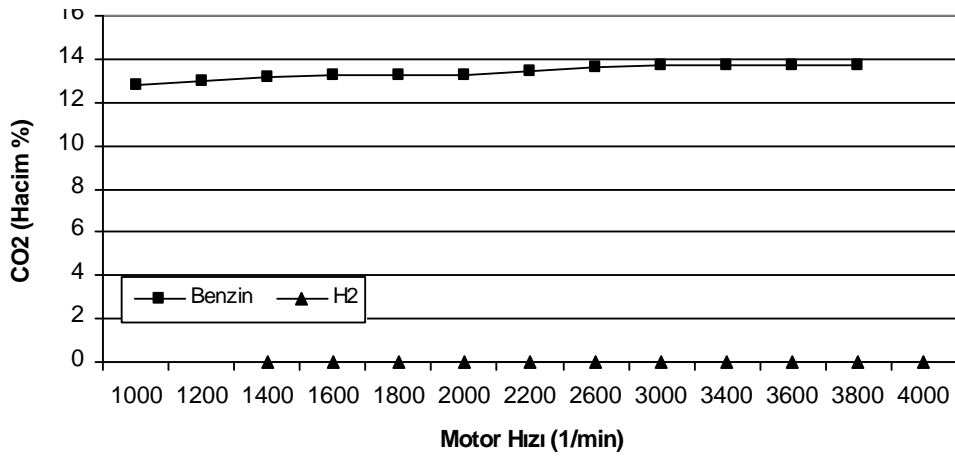
6.2 EGZOZ EM SYONLARI

6.2.1 CO ve CO₂ Emisyonu

ekil 6.4 ve 6.5’de her iki yakıt için CO ve CO₂ emisyonları gösterilmektedir. Hidrojenli çalı mada her iki emisyon de eri de sıfır de erine çok yakın çıkmı tır. Bünyesinde karbon (C) bulundurmeyen hidrojen yakıtından CO ve CO₂ emisyonları beklenmedi i halde, silindir yüzeylerinde ya layıcı film olu turan ve yanma odası tarafında kalan motor ya ının yanmaya katılması ile çok dü ük miktarlarda CO ve CO₂ emisyonu görölmektedir (Kahraman et al, 2006).



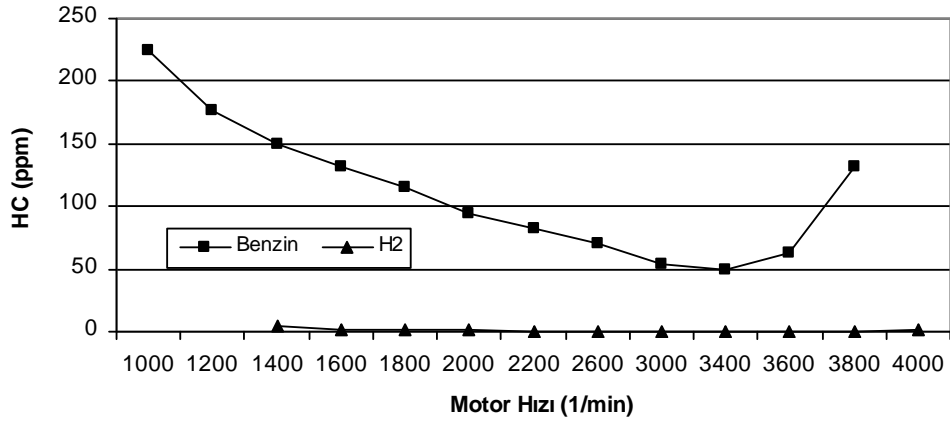
ekil 6.4 Motor hızına göre benzin ve hidrojen için CO emisyonları.



ekil 6.5 Motor hızına göre benzin ve hidrojen için CO₂ emisyonları.

6.2.3 HC Emisyonu

Her iki yakıt için HC emisyonu de i imleri ekil 6.6'da görülmektedir. HC emisyonlarının kayna ı da, CO ve CO₂'de oldu u gibi yanma odasında kalarak buharla an ve yanma reaksiyonuna girmeyen motor ya ıdır. Yanma sonucu ortaya çıkan yüksek sıcaklık ya filminin bir kısmının buharla masına sebep olur ve HC emisyonları olu ur (Kahraman et al, 2006).

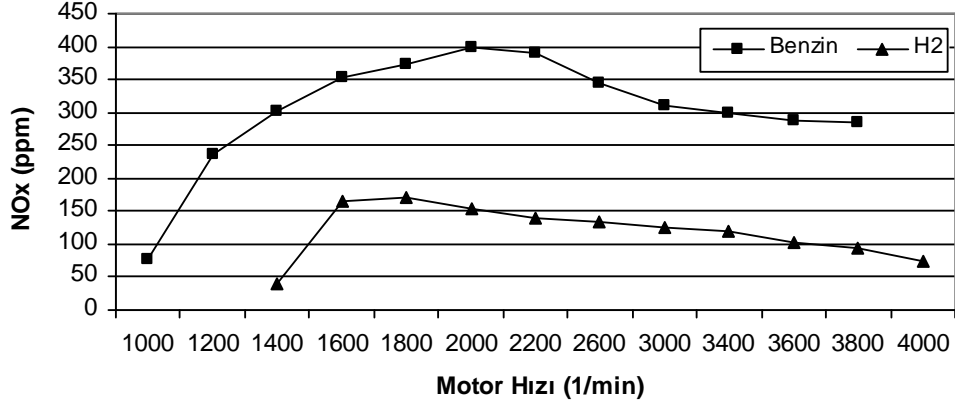


ekil 6.6 Motor hızına göre benzin ve hidrojen için HC emisyonları.

6.2.4 NO_x Emisyonu

ekil 6.7'de her iki yakıt için NO_x emisyonu de i imleri görülmektedir. Yanma odasında yüksek sıcaklıkta azot ve oksijenin birle mesiyle ortaya çıkan NO ve NO₂ emisyonları

hidrojen motorunda benzinli motora göre çok daha düşük çıkmaktadır. Her iki yakıtlı çalışmada da maksimum NO_x değerleri maksimum moment hızlarında elde edilmiştir. Maksimum moment hızında motora bir çevrimde daha fazla karışım girdiği için silindir sıcaklığı artmakta ve dolayısıyla NO_x emisyonları da artmaktadır. Hidrojenli çalışmada NO_x emisyonunun düşük çıkmasıyla ilgili olarak diğer çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Kahraman et al (2006) tarafından yapılan çalışmada hidrojen kullanıldığında durumdaki NO_x emisyonları benzinin yaklaşık onda biri kadar çıkmıştır. Berckmüller et al (2003) tarafından yapılan çalışmada e de erlik oranı 0.45'in altında tutulmuş ve NO_x emisyonu 100 ppm civarında ölçülmüştür. Yine Natkin et al, 0.5 e de erlik oranında 90 ppm NO_x emisyonu rapor etmiştir. 0.23 e de erlik oranı gibi bir fakirlikte çalıştırılan süper hızlı Ford motoru 3-4 ppm gibi bir emisyon değerine inmiştir (Natkin et al, 2003).



ekil 6.7 Motor hızına göre benzin ve hidrojen için NO_x emisyonları.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1 SONUÇLAR

Bu çalışmada tek silindirli karbüratörlü bir motorun saf olarak hidrojen yakıtı ile çalıştırılması sağlanmıştır ve hidrojen yakıtının motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkileri incelenmiştir. Hidrojenli çalışmada sıkça rastlanan geri tepme sorununu çözmek amacıyla hidrojen gazı bir bakır boru yardımıyla emme supabının hemen arkasına gönderilmiştir. Bu sayede harici karım tekli yöntemi ile yapılan, diğer bazı çalışmalarda (Kahraman et al, 2006; Sierens and Verhelst, 2001) karımlan düşük motor hızlarında geri tepme olayı, bu çalışmada gözlenmemiştir ve motor, hidrojen gazının tutulma sınırları dahilinde kararlı şekilde çalışmıştır. Bu durum supabına kadar uzatılan bakır borudan emme manifoldunun içine hidrojen gazının yayılmaya zaman bulamaması ile açıklanabilir. Karbüratörde karım hazırlama yönteminde ise karbüratör ile emme portu arasındaki manifold hacminin hava-hidrojen karımı ile sürekli dolu olması ve geri tutulmaya her an müsait olması şeklinde açıklanabilir.

Hidrojen yakıtının alt ısı değeri benzinden daha yüksek olduğu için hidrojen ile çalışmada benzinli çalışmaya göre özgül yakıt tüketimi düşük olmaktadır.

Hidrojen ile çalışmada benzinli çalışmaya göre sağlıklı zararlı olan CO ve HC emisyonları çok düşük olmaktadır. Hidrojen yandığında egzozdan normal şartlarda su buharı az miktarda NO_x emisyonu çıkmaktadır. Hidrojen ile çalışmalarda egzozda görülen CO, HC emisyonları motorun yakıtının bir sonucu olarak karımıza çıkmaktadır.

CO₂ gazı sera etkisine neden olan gazlardan biridir. Motorlarda CO₂ emisyonunu azaltmak için içerisinde C atomu olmayan veya az bulunan yakıtlar tercih edilmektedir. Bu nedenle hidrojen sera etkisi bakımından ideal bir yakıt olarak kabul edilebilir.

Bu çalımanın sonuçlarına göre, buji atelemeli motorların üzerinde bazı değişiklikler yapılarak bu motorlarda hidrojen yakıtının başarılı bir şekilde kullanılabilmesi söylenebilir.

7.2 ÖNERİLER

Hidrojenin YM'larda yakıt olarak kullanılmasıyla ilgili aşağıdaki hususlar önerilebilir;

1. Çıten yanmalı motorlarda hidrojen silindir içerisinde hacimsel olarak fazla yer kapladığı için benzinli çalımlarındaki kadar dolgu alınmamakta, bunun sonucu olarak da motorda elde edilen moment ve güç düşmektedir. Bu problemin çözümü için bulunabilecek çözümlerden bazıları şunlardır:

a. Daha büyük hacimli motorlar kullanmak. Ancak bu çözüm araç ağırlığını artırmak, motor maliyetini yükseltmek, motorun güç-ağırlık oranını düşürmek gibi olumsuz yan etkiler getirecektir.

b. Turbo arz ve süper arz gibi halen kullanımda olan ağırlı doldurma sistemlerini kullanarak emme zamanında silindire giren dolgunun daha yüksek bir basınçla silindir içerisine girmesini sağlamak.

c. Dizel motorlarında yaygın olarak kullanılan ara soğutucu (intercooler) gibi soğutma sistemleri kullanarak silindire emilecek dolguyu soğutmak ve yoğunluğunu artırmak.

d. Hidrojen yakıtını emme zamanının sonlarında doğrudan doğruya silindir içerisine bir enjektör aracılığıyla püskürterek içeriye azami ölçüde havanın girmesini sağlamak. Bu amaçla silindir kapağında özel hidrojen enjektörleri kullanımı bir çözüm olmakla birlikte daha pratik bir çözüm olarak ateleme bujisi ile entegre edilmiş ve silindir kapağında bir modifikasyona gitmeden buji yuvasına takılabilecek bir buji-enjektör sistemi çok daha uygulanabilir bir alternatif olacaktır.

2. Hidrojenin geniş yanma aralığına (% 4-77) sahip olmasından faydalanılarak dizel motorunda olduğu gibi gaz keleşimi olmadan hidrojen motorunu çalıştırmak, pompalama kayıpları ve hacimsel verim kaybını azaltacağından hava debisinden ziyade hidrojen gazı debisini, motorun çalışmaları ve diğer ortam parametrelerine (atmosfer basıncı, hava sıcaklığı vb) göre hassas bir şekilde ayarlayabilecek kontrol sistemlerine ihtiyaç vardır.

3. Hidrojen yakıtının oktan sayısı yüksek olduğu için yüksek sıkıştırma oranlarında fakir karışımla çalıştırılırsa hem motor gücü artar hem de NO_x emisyonları azaltılabilir. Hidrojenli motorların gereğinde benzin ve LPG gibi petrol yakıtları ile çalışabilmesi için de mümkün

sıkı tırma oranlı olması gereklidir. Hidrojen gazının dü ük sıkı tırma oranlarında kullanılması termik verimini dü ürup özgül yakıt tüketimini artıracaktır.

4. Hidrojenle çalış an içten yanmalı motorlarda en büyük sorunlardan birisi olan geri tepmenin kesin çözümü hidrojen gazının do rudan do ruya silindir içerisinde ve emme zamanının sonlarında veya bitiminden sonra püskürtülmesi ekinde görülmektedir.

5. Hidrojenin yanma hızı benzinden çok yüksek oldu undan dolayı, yanma sonu basıncını üst ölü noktayı geçtikten hemen sonra elde edebilmek için motorun ate leme avansı yakıtta göre de i tirilebilmelidir.

6. Temiz, sa lıklı ve ya anılabilir bir dünya için hidrojen gibi temiz yakıtların motorlu ta ıtlarda ve di er güç tesislerinde kullanımı yaygınla tırılmalıdır.

7. Enerjide hidrojen ça ına geçebilmenin en önemli ön artlarından birisi ise yenilenebilir enerji kaynaklarını (güne enerjisi ve onun türevleri olan; rüzgar, dalga, hidroelektrik ve biokütle enerjisi) kullanarak hidrojen üretim yapan tesislerinin hızla yaygınla tırılması gerekir.

KAYNAKLAR

- Acaro lu M** (1998) *Biyokütle enerjisi üretimi ve uygulamalar*. Yüksek Lisans ders Notları, (yayınlanmamı), Konyaç
- Albay A O** (1993) Fakir Karı ımlı Benzin Motorlarında Hidrojen veya Do al Gazın Ek Yakıt Olarak Kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, TÛ Fen Bilimleri Enstitüsü, stanbul.
- Ate A** (1985) çten Yanmalı Motorlarda Hidrojenin Yakıt Olarak Kullanılması ve Depolama Problemleri. Yüksek Lisans Tezi Selçuk.Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Berckmüller M, Rottengruber H, Eder A, Brehm N, Elsässer G and Müller-Alander G** (2003) Potentials of a charged SI-hydrogen engine. *SAE paper*; 01-3210.
- Bohacık T, Maria S D, Travbridge C and Saman W** (1997) Combustion characteristic of electrolytically produced hydrogen-oxygen mixture. *SAE Paper* No: 971703.
- Çetinkaya M ve Karaosmano lu F** (2002) *Yakıt Pillerinde Hidrojen Kullanımı*. 3e Electrotech, Bile im Yayıncılık A. ., stanbul, 100 s.
- Das L M** (1990) Fuel inuction techniques for a hydrogen operated engine. *Int. Journal of Hydrogen Energy*, 823-842.
- Das L M** (1990) Hydrogen engines-a view of the past and a look into the future. *Int. Journal of Hydrogen Energy*, 6: 443-1990.
- Das L M** (2002) Hydrogen engine: research and development (R&D) programmes in India Istitute of Technology (IIT), Delhi. *Int. Journal of Hydrogen Energy*, 953-965.
- De Boer P C T, McLean W J and Homan H S** (1976) Performance and emissions of hydrogen fuelled internal combustion engines. *Int. Journal of Hydrogen Energy*; 1(2): 153–72.
- Furuhama S and Fukuma T** (1986) High output power hydrogen engine with high pressure fuel injection, hot surface ignition and turbocharging. *Int. Journal of Hydrogen Energy*; 11: 399–407.
- Glasson N, Lumsden G, Dingli R and Watson H** (1996) Development of the haji system for a multi-cylinder spark ıgnition engine. *SAE Paper* No: 961104.
- Homan HS, McLean WJ and De Boer PCT** (1983) The effect of fuel injection on NOx emissions and undesirable combustion for hydrogen fuelled piston engines. *Int. Journal of Hydrogen Energy*, 8(2): 131–46.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Kahraman E, Ozcanli S C ve Ozerdem B** (2006) An experimental study on performance and emission characteristics of a Hydrogen fuelled spark ignition engine. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Kondo T, Lio S and Hiruma M** (1997) A study on the mechanism of backfire in external mixture formation hydrogen engines *SAE Paper* No: 971704.
- Li H and Karim G A** (2004) Knock in spark ignition hydrogen engines. *Int. Journal of Hydrogen Energy*, 859-865.
- Mathur H B and Das L M** (1991) Performance characteristics of hydrogen-fuelled SI engine using timed manifold injection. *Int. Journal of Hydrogen Energy*, 16(2): 115-27.
- Mohammadi M A, Shioji M, Nakai Y, Ishikura W and Tabo E** (2007) Performance and combustion characteristics of a direct injection SI hydrogen engine. *Int. Journal of Hydrogen Energy*, 296-304.
- Nagalingam B, Dübel M and Schmillen K** (1983) Performance of the supercharged spark ignition hydrogen engine. *SAE paper*; No: 831688.
- Natkin RJ, Tang X, Boyer B, Oltmans B, Denlinger A and Heffel JW.** Hydrogen IC engine boosting performance and NO_x study. *SAE paper*; No: 2003-01-0631.
- Özer Ü** (1991) Fosil yakıtlar yerine solar hidrojen, yanma ve hava kirliliği kontrolü. *1. Ulusal Yanma Sempozyumu*, G.Ü., Ankara.
- Petkov T, Veziroglu T N and Sheffield W** An outlook of hydrogen as an automotive fuel. *Int. Journal of Hydrogen Energy* Vol 14 No.7 s. 449-474 989.
- Sherif S A ve Zeytino lu N** (1993) Liquid hydrogen: potential and problems. *1. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*. TÜ, İstanbul.
- Sierens R and Verhelst S** (2001) A hydrogen fuelled V-8 engine for city-bus application. *Int. Journal of Automotive Technology*, 2, 39-45.
- Soru bay C ve Arslan E** (1988) Hidrojen yakıtlı içten yanmalı motorlarda yanma performansı. *Mühendis Ve Makine Dergisi*, (29):339.
- Soru bay C, Arslan E ve Ergeneman M** (1990) İçten yanmalı motorlarda hidrojenin yakıt olarak kullanımı. Türkiye 5. Enerji Kongresi, Ankara.
- Subramanian V, Mallikarjuna J M and Ramesh A** (2006) Effect of water injection and spark timing on the nitric oxide emission and combustion parameters of a hydrogen fuelled spark ignition engine. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Swain M R, Adt Jr R R and Pappas J M** (1983) *Experimental hydrogenfueled automotive engine design data base project*. Technical report, A Facsimile Report, Prepared for U.S. Department of Energy, DOE/CS/51212.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Tang X, Kabat D M, Natkin R J and Stockhausen W F** (2002) Ford P2000 hydrogen engine dynamometer development. *SAE paper*; 01-0242.
- Tekin M ve Çevik** (1997) Hidrojenin çten Yanmalı Motorlarda Kullanımı 5.Otomotiv Yan Sanayi Sempozyumu Bildiriler Kitabı, *MMO Yayınları* No:198, Bursa
- Toshio S, Nakajima Y and Fatakuchi T** Thermal efficiency analysis in a hydrogen premixed combustion engine. *JSAE Rev*; 21:177–82.
- URL-1** (2007) <http://www.cuhidro.com/projemiz.html>, Çukurova Hidromobil Grubu, Hidrojen Tanıtımı, 16.07.2007.
- URL-2** (2007) http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/alternatif_enerji/hirojen_arabada_kullanimi.htm, Obitet, Hidrojen Enerjisinin Araçlarda Yakıt Olarak Kullanılması, 16.07.2007
- Uyarel A Y** (1995) Alternatif yakıt raporu: hidrojenle çalı an miata. *Teknik Geli im Dergisi*, Yıl:3, Sayı:10.
- Ültanır M Ö** (1995) Hidrojen Enerjisi ve Türkiye'de Hidrojene Geçİ Sorunları. Türkiye 6. Enerji Kongresi Teknik Oturum Bildirileri – 1. Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, zmir.
- Ültanır M Ö** (1996) 21. yüzyılın yakıtı hidrojen. *Bilim ve Teknik* 344, TÜB TAK, Ankara.
- Ültanır M Ö** (1997) Temiz enerji olarak hidrojen yakıtı ve teknolojisi. *Türkiye 7. Enerji Kongresi*, Cilt III, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Ankara.
- Vandenborre H and Sierens R** (1996) Greenbus: a hydrogen fueled city bus. *Int. Journal of Hydrogen Energy*, 21(6):521–4
- Veziro lu N**, (1981) Yeni enerji kaynaklarının birle tiricisi: hidrojen enerji sistemi. *Do a Bilim Dergisi*
- Veziro lu N**, (1998) Uçaklar, trenler, otomobiller ve gemiler. *Ekoloji Çevre Magazin Dergisi*, Yıl:7, Sayı:26.
- Vorst W D V and Finegold J G** (1975), Automotive Hydrogen Engines, And Onboard Storage Methods. *Hydrogen Energy Fundamentals*, Miami Beach, Florida U.S.A.
- Yazıcıo lu M T** (1995) Ta ıtlarda Alternatif Tahrik ve Yakıt Tiplerinin Etüdü. Yüksek Lisans Tezi. .T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, stanbul.
- Yi H S, Min K and Kim E S** (2000) The optimised mixtue formation for hydrogen fuelled engines. *Int. Journal of Hydrogen Energy*, 685-690.

EK AÇIKLAMALAR A

DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SONUÇLARINA AİT ÇİZELGELER

Çizelge A.1 Benzinli çalı mada elde edilen motor performansı de erleri

Motor Hızı (1/min)	Motor Momenti (Nm)	Motor Gücü (kW)	Özgöl Yakıt Tüketimi (g/kWh)
1000	4,75	0,50	521
1200	6,50	0,82	470
1400	7,80	1,14	449
1600	9,20	1,54	401
1800	10,60	2,00	345
2000	12,10	2,53	295
2200	11,90	2,74	331
2600	10,52	2,86	395
3000	10,10	3,17	455
3400	9,15	3,26	487
3600	8,90	3,36	510
3800	7,70	3,06	540

Çizelge A.2 Hidrojenli çalı mada elde edilen motor performansı de erleri

Motor Hızı (1/min)	Motor Momenti (Nm)	Motor Gücü (kW)	Özgöl Yakıt Tüketimi (g/kWh)
1400	5,50	0,81	280
1600	6,90	1,16	210
1800	8,10	1,53	158
2000	7,85	1,64	161
2200	7,50	1,73	164
2600	7,05	1,92	177
3000	6,72	2,11	181
3400	6,58	2,34	193
3600	6,43	2,42	203
3800	6,33	2,52	215
4000	6,25	2,62	221

Çizelge A.3 Benzinli çalı mada elde edilen egzoz emisyonu de erleri

Motor Hızı (1/min)	CO (%)	HC (ppm)	NO_x (ppm)	CO₂(%)
1000	4,2	224	77	12,84
1200	4,0	177	237	13,01
1400	3,8	150	302	13,16
1600	3,7	131	352	13,24
1800	3,6	115	374	13,27
2000	3,5	94	400	13,29
2200	3,4	82	390	13,43
2600	3,2	71	345	13,66
3000	2,9	54	310	13,75
3400	2,9	50	300	13,75
3600	2,8	63	287	13,76
3800	2,8	132	285	13,73

Çizelge A.4 Hidrojenli çalı mada elde edilen egzoz emisyonu de erleri

Motor Hızı (1/min)	CO (%)	HC (ppm)	NO_x (ppm)	CO₂(%)
1400	0,03	5	40	0
1600	0,01	1	165	0
1800	0,01	1	172	0
2000	0,01	1	155	0
2200	0,01	0	140	0
2600	0,01	0	134	0
3000	0,01	0	125	0
3400	0,01	0	120	0
3600	0,01	0	103	0
3800	0,01	0	95	0
4000	0,01	1	75	0

ÖZGEÇM

Murat KO AR 1975'te Artvin'de do du; ilkokulu Artvin'de, ortaokulu zmit'te, liseyi zmir'de bitirdikten sonra 1997 yılında Kocaeli Üniversitesi Teknik E itim Fakültesi Otomotiv Ö retmenli i Bölümü'ne girdi; 2001 yılında mezun olduktan sonra 2002 yılında Z.K.Ü. Karabük Meslek Yüksekokulu'nda Ö retim Görevlisi olarak göreve ba ladı; halen Z.K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makine E itimi Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programını sürdürmektedir.

ADRES B LG LER

Adres: Karabük Üniversitesi Karabük MYO.
100. Yıl Mah. 78020 KARABÜK

Tel: (370) 433 66 03

Faks: (370) 433 66 04

E-posta: mk0841@yahoo.com