

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HİDROJEN VE METAN KARIŞIMLARININ İÇTEN YANMALI
MOTORLARDA KULLANIMININ DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

Barış AÇIKGÖZ

KOCAELİ 2012

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

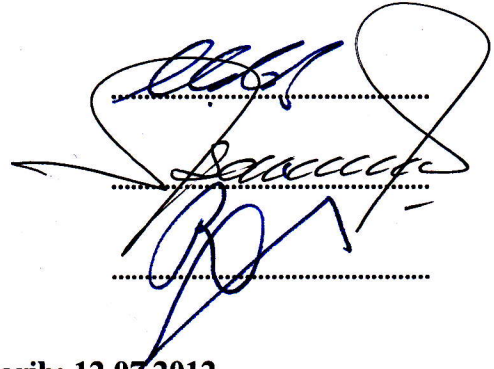
**HİDROJEN VE METAN KARIŞIMLARININ İÇTEN YANMALI
MOTORLARDA KULLANIMININ DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

Barış AÇIKGÖZ

Yrd.Doç.Dr.Cenk ÇELİK
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr.H.İbrahim SARAÇ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr.Hasan Rıza GÜVEN
Jüri Üyesi, İstanbul Üniv.



.....
.....
.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 12.07.2012

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında; farklı yüzde oranlarındaki Hidrojen-Metan karışımlarının içten yanmalı motorlarda alternatif bir yakıt olarak kullanılmasının motor performansına ve emisyonlarına etkileri, yakıtın avantajları ve kullanım zorlukları, motorlarda verimli olarak kullanılabilmesi için yapılması gereken modifikasyonlar anlatılmıştır.

Bu deneysel çalışmaların yapılması sırasında hiçbir desteğini ve bilgisini esirgemeyen hocam Yrd. Doç. Dr. Cenk ÇELİK'e, desteklerinden dolayı UNIDO-ICHET direktörü Dr. Mustafa Hatipoğlu'na, deneysel çalışmalarımda bana yardımcı olan Prof Dr. Nafiz Kahraman, Doç. Dr. Orhan Akansu, Yrd. Doç. Dr. Bilge Çeper'e ve Dr. Burak Gökalp'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca maddi ve manevi hiçbir desteklerini esirgemeyen aileme ve eşim Fatma YİĞİT AÇIKGÖZ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz - 2012

Bariş AÇIKGÖZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
TABLolar DİZİNİ	iv
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	4
1.1. Hidrojenin Özellikleri ve Diğer Yakıtlarla Karşılaştırılması	4
1.2. İçten Yanmalı Motorlarda Yanma	12
1.2.1. Yanma olayı ve yanma çeşitleri	12
1.2.2. Bujili ateşlemeli motorlarda yanma	13
1.2.2.1. Birinci faz	14
1.2.2.2. Ana faz	14
1.2.2.3. Son faz	14
1.2.3. Hava fazlalık katsayısı (HFK)	15
1.2.4. Ateşleme avansı	16
1.3. Yakıt Olarak İçten Yanmalı Motorlarda Hidrojen Kullanılması	17
1.4. Hidrojenin Emisyonlara Etkisi	19
1.5. Motorlarda Hidrojen Kullanımının Ortaya Çıkardığı İşletim Problemleri	20
1.6. Motor Yakıtı Olarak Doğalgaz	21
1.7. Doğalgazın Taşıtlarda Kullanımı	23
1.8. Doğalgazın Otto Motorlarında Kullanımı	23
1.9. Test Öncesi Alınması Gereken Güvenlik Önlemleri	24
2. LİTERATÜR TARAMASI	26
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	30
3.1. Deney Düzeneği ve Kullanılan Ölçü Aletleri	30
3.2. Deney Motoru ve Modifikasyonlar	31
3.3. Egzoz Emisyon Cihazı	34
3.4. Kütleli Debimetre	35
3.5. Alev Tutucu	36
4. BULGULAR	37
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	43
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ	48

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Yanma olayında fazların gelişimi	13
Şekil 1.2. NO _x emisyonlarından kaçınma stratejisi.....	15
Şekil 1.3. Hidrojen yakıtlı motor çalışmaları	17
Şekil 1.4. Hidrojen besleme yöntemleri	17
Şekil 3.1. Deney düzeneği	30
Şekil 3.2. Deney düzeneğinin şematik görünümü	31
Şekil 3.3. Deney motoru.....	32
Şekil 3.4. Deney motoru fabrika performans eğrileri.....	33
Şekil 3.5. Gaz ve benzin besleme hattı	34
Şekil 3.6. NLP CNG gaz sistemleri dönüşüm kiti.....	34
Şekil 3.7. Sun MGA 1500 egzoz gaz analiz cihazı	35
Şekil 3.8. Bronkhorst kütleli debimetre	36
Şekil 3.9. Alev tutucu	36
Şekil 4.1. Motor momenti değişimi	38
Şekil 4.2. Motor gücü değişimi	38
Şekil 4.3. Yakıt harcama grafiği	39
Şekil 4.4. HC emisyonlarının HFK'ya bağlı olarak değişimi	39
Şekil 4.5. CO ₂ emisyonlarının HFK'ya bağlı olarak değişimi	40
Şekil 4.6. CO emisyonlarının HFK'ya bağlı olarak değişimi	41
Şekil 4.6. NO _x emisyonlarının HFK'ya bağlı olarak değişimi	42

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. Yakıtların genel özelliklerinin karşılaştırılması	5
Tablo 1.2. Hidrojenin özellikleri	6
Tablo 1.3. H ₂ , CH ₄ ve benzinin güvenlik açısından özelliklerinin karşılaştırılması.....	7
Tablo 1.4. H ₂ , CH ₄ ve benzinin güvenlik açısından karşılaştırılmaları.....	8
Tablo 1.5. Farklı cins yakıtların yanma süreleri	10
Tablo 3.1. Motorun teknik özellikleri.....	32
Tablo 3.2. Sun MGA 1500 egzoz gaz analiz cihazı teknik özellikleri.....	35

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

CH ₄	: Metan
CO	: Karbon Monoksit
CO ₂	: Karbon Dioksit
d/d	: Devir / dakika
H ₂	: Hidrojen
H ₂ S	: Hidrojen Sülfür
HC	: Hidrokarbonlar
lt	: Litre
NO	: Azot oksit
O ₂	: Oksijen

Kısaltmalar

AÖN	: Alt ölü nokta
EGR	: Egzoz gazları resirkülasyonu
EY	: Eksik Yanma
HFK	: Hava fazlalık katsayısı
KMA	: Krank mili açısı
TY	: Tam Yanma
TTY	: Teorik Tam Yanma
ÜÖN	: Üst ölü Nokta

HİDROJEN VE METAN KARIŞIMLARININ İÇTEN YANMALI MOTORLARDA KULLANIMININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Doğalgaz, içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılabilir olacak önemli alternatif yakıtlardan birisidir. Kolay bulunabilirliği, rezervlerinin petrole göre daha fazla olması, düşük maliyet ve temiz yanma karakteristikleri ile dağıtım sistemlerinin var oluşu doğalgazı son derece elverişli bir alternatif yakıt haline getirmiştir. Bunun yanında önemli bir alternatif yakıt da hidrojendir. Hidrojen yakıt olarak kullanıldığında, fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak önemli avantajlar sağlamaktadır. Doğalgaz ile hidrojeni belli oranlarda karıştırdığımızda ise doğalgaza göre daha düşük emisyonlu ve daha verimli bir yakıt ortaya çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında; farklı yüzde oranlarındaki Hidrojen-Metan karışımlarının içten yanmalı motorlarda alternatif bir yakıt olarak kullanılmasının motor performansına ve emisyonlarına etkileri, yakıtın avantajları ve kullanım zorlukları, motorlarda verimli olarak kullanılabilmesi için yapılması gereken modifikasyonlar anlatılmıştır. Tez çalışması dahilinde dört zamanlı, iki silindirli, su soğutmalı benzinli Lombardini LGW523 motoru, farklı oranlardaki Metan-Hidrojen karışımları (%100 CH₄, %10 H₂-%90 CH₄, %20 H₂-%80 CH₄ ve %30 H₂-%70 CH₄) ile tam yük altında test edilmiştir. Motor performansı açısından bakıldığında, karışımlar arasında en yüksek tork ve güç eldesi doğalgazın içine %20 H₂ ilavesi ile olmuştur. Karışımdaki hidrojen yüzdesinin artması ile CO ve CO₂ azalırken, yanma odasında sıcaklık arttığından dolayı motor çıkışında NO_x artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Doğalgaz, Emisyonlar, Hidrojen, İçten yanmalı motor, Motor performansı

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF USAGE OF NATURAL GAS AND METHANE MIXTURES IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES

ABSTRACT

Natural gas, can be used as an alternative fuel in internal combustion engines. Easy accessibility, rich reserves, low cost, clean burning characteristics, available distribution lines makes the Natural gas a good clean fuel. Furthermore, Hydrogen is an important alternative and renewable fuel. It has some significant chemical and physical properties. If you mix Hydrogen and Natural gas in some particular percentages the emissions will drop significantly and it will be an efficient fuel for engines.

In this paper, performance and emission characteristics of a conventional twin-cylinder, water cooled, four stroke, spark-ignited (SI) Lombardini LGW523 engine that is running with methane-hydrogen blends (%100 CH₄, %10 H₂-%90 CH₄, %20 H₂-%80 CH₄ and %30 H₂-%70 CH₄) are investigated experimentally. In terms of engine performance, maximum torque and power values between mixtures are experienced in %20H₂ addition to Natural gas. By increasing hydrogen concentration in the mixture, CO and CO₂ decreased. NO_x increased because of the temperature in the combustion chamber.

Keywords: Natural Gas, Emissions, Hydrogen, Internal Combustion Engine, Engine performance

GİRİŞ

Büyük şehirlerde çevre kirliliğine sebep olan en önemli faktörlerden birisi binek ve ticari araç motorlarının çevreye saldığı egzoz gazlarıdır. Bu gazların içinde insan sağlığını tehdit eden CO, CO₂, NO_x ve is gibi gazlar da bulunmaktadır. Araçların egzozlarından çıkan siyah dumanın bileşisindeki bu gazlar, kanın oksijen taşıma yeteneğini azaltarak, doku, kemik ve sinir sistemlerine zarar vermektedir. Araçlar çalıştığında egzozlarından havaya yayılan gazlar kapalı ortamlarda zehirleyici, hatta öldürücü olabilmektedir.

Günümüzde kirlenmenin insan ve çevre üzerine verdiği zararın farkına varılmış ve bu zararları en aza indirmek için alternatif çözüm yolları aranmaya başlanmıştır. Bu noktada birçok firma ve bilim adamı karbondioksit emisyonlarını azaltarak çevreyi koruyan yenilenebilir enerji kaynakları üzerine çalışmalar yapmaya başlamıştır. Ayrıca fosil yakıt kaynaklarının tükenmeye başlamasıyla patlak veren enerji krizi de alternatif enerji kaynaklarının kullanılma çabası üzerinde etkili olmuştur. Ekolojik dengenin bozulmaya başlaması ve fosil kökenli yakıtların giderek tükenmesi nedeniyle laboratuvar ortamlarında çeşitli deneyler yapılmış ve araçlarda kullanılan yakıtlara (benzin, mazot vb.) karşı çevreyle uyumlu alternatif yakıtlar bulunmaya başlanmıştır.

Bir toplum, kalkınmak için enerji ihtiyaçlarını karşılayabilmelidir. Fakat sürdürülebilir kalkınma için sürdürülebilir enerji politikaları gereklidir. Oluşturulan politikalar sürdürülebilirliğin tanımını gereği, uzun vadeli bir bakış açısıyla ekonomik, teknik ve sosyal sorunlar yaratmadan tüm toplumun her türlü enerji ihtiyacını karşılayabilmek üzerine kurulmalıdır.

Tüm bu çalışmalar sonucu ortaya çıkan bu alternatif yakıtlar sürekli devam eden doğal süreçlerdeki var olan enerji akışından elde edilen yenilenebilir enerjidir.

Yenilenebilir enerji teknolojileriyle; güneş ışınlarının taşıdığı enerji, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji, bitkilerin kendi enerjileri ve daha bilinen veya bilinmeyen birçok enerji formu, insanların hayatlarını kolaylaştırmak için kullanılabilir enerji formlarına dönüştürülebilmektedir.

Enerji miktarı ve yeterliliği açısından bakıldığında günümüzde kullandığımız geleneksel enerji kaynaklarından çok daha ideal ve bol olan doğal enerji kaynaklarının halen yaygın olarak kullanılmadığı görülmektedir. Bunun nedenleri, her bir kaynak için aynı olmamakla beraber genellikle kaynakların süreksizliği, emre amade olmamaları, farklı bölgesel değişiklikler, dağınık olmaları gibi bazı önemli sorunlardır. Ancak tüm bu sorunlardan daha da önemli ve yenilenebilir enerjilerin dünya ölçeğinde bugüne kadar yaygınlaşamamalarına sebep olan temel sorun, tüm bu enerji kaynaklarının halen fosil yakıtlara göre ekonomik olamamalarıdır.

Petrol ve petrol ürünlerinin yakıt olarak kullanılması sonucu atmosfere atılan zehirli gazların küresel ısınmaya yol açması sonucu dünya ciddi bir tehdit altındadır. Zehirli gazlar atmosferde bir tabaka oluşturup dünyanın yüzeyine gelen ışınların yansarak dünyayı terk etmesine engel olmakta ve bu da dünyada aşırı bir ısınmaya yol açmaktadır.

Fosil yakıtları esas alan enerji kullanımı; yakıt konusunda dışa bağımlılık, yüksek ithalat giderleri ve çevre sorunları gibi birçok önemli olumsuzlukların yanında, dünya fosil yakıt rezervlerinin hızla tükenmesi de yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini arttırmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının, mevcut teknik ve ekonomik sorunlarının çözülmesi halinde 21. yüzyılın en önemli enerji kaynağı olacağı kabul edilmektedir.

Yenilenebilir bir yakıt olan Hidrojenin karayolu taşıtlarında enerji kaynağı olarak kullanımı günümüzde önem kazanmaktadır. Hidrojenin yakıt olarak kullanımında, fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak önemli avantajlar sağlamaktadır. Hidrojen-hava karışımlarının geniş tutuşma sınırlarına sahip olması özelliğinden yararlanılarak, motorun fakir karışım oranlarında çalıştırılması yüksek ısı verim elde edilmesini ve özellikle azot oksit (NOx) emisyonlarının istenilen düzeye düşürülmesini sağlamaktadır. Diğer taraftan Hidrojen motorlarında CO, CO₂, HC ve is emisyonu yoktur. Üretimi henüz pahalı olmakla beraber, elektroliz yoluyla sudan üretilebilmesi ve sınırsız bir kaynağa sahip olması önemli bir avantajdır.

Motor ve araç teknolojisinde kullanılacak olan alternatif bir yakıtın içten yanmalı motorun performansını düşürmeden, egzoz emisyonlarını azaltıcı özelliklerde olması istenir. Ayrıca bu yakıtın elde edilebilirliği, maliyetinin düşük olması, kullanılabilirliği, bulunabilirliği ve halihazırda var olan motorlarda fazla bir revizyon gerektirmeden kullanılması da büyük önem taşımaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanımında; araç üzerinde depolama, erken tutuşma ve emme manifoldu geri tutuşması, vuruntu, karterde Hidrojen gazı birikmesi, sızdırmazlık gibi sorunlar yaşanabilmektedir. Ancak çevre koşulları ve tükenme yolunda olan fosil yakıtlar, yenilenebilir enerjilerin bir an önce kullanılmaya başlanmasını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle, yenilenebilir enerjinin kullanımındaki tüm bu zorluklar teorik ve deneysel yöntemlerle aşılmalı ve yenilenebilir enerji kaynaklarından Hidrojenin üretim maliyetleri düşürülerek bu konudaki çalışmalar hızlandırılmalıdır.

Hidrojen, metanol, etanol, LPG, çeşitli bitkisel yağlar gibi alternatif yakıt türleri taşıtlarda kullanılmış ve bazılarının kullanımına halen devam edilmektedir. Ancak bu kaynakların kullanılmasında bazı olumsuzluklar yaşanmış ve bu olumsuzların giderilmesine yönelik çalışmalara devam edilmektedir. Örneğin, Hidrojenin yakıt olarak kullanılmasında depolama problemleri ortaya çıkmıştır. Hidrojenin basınçlı gaz olarak veya metal hidrid olarak depolanması için yüksek hacim problemi varken, sıvı olarak depolanması için de yüksek maliyet ve buharlaşma kayıpları gibi problemler söz konusu olmaktadır.

Benzin-hava karışımına %5 Hidrojen eklenince NOx emisyonu %30-40 azalma göstermektedir [1]. Ayrıca Hidrojen içeriğinde karbon ihtiva etmediği için kullanımından COx ve HC emisyonları da açığa çıkmayacaktır. Bu da çevre açısından önemli bir kazançtır. Nitekim son yıllarda çift yakıtlı motorlar, Hidrojen/benzin ve Hidrojen/Doğalgaz karışımı Otto çevrimli motorların kullanılmaya başlanmasının nedeni, karışımın fakirleştirilmesi ile özgül yakıt tüketiminin azaltılmasıdır. Bu sayede COx ve HC emisyonları da azalmaktadır. Çift yakıtlı motorların, günümüz klasik motorları ile Hidrojen motorları arasında bir geçiş aşaması oluşturması beklenmektedir [2].

Bu tez çalışmasında; farklı yüzde oranlarındaki Hidrojen-Metan karışımlarının kara araçlarında kullanılan içten yanmalı motorlarda alternatif bir yakıt olarak kullanılmasının motor performansına ve emisyonlarına etkileri, yakıtın avantajları ve kullanım zorlukları, motorlarda verimli olarak kullanılabilmesi için yapılması gereken modifikasyonlar anlatılmıştır.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Hidrojenin Özellikleri ve Diğer Yakıtlarla Karşılaştırılması

Hidrojenin doğada protiyum, döteryum ve trityum olmak üzere 3 izotopu bulunur. Bu izotoplardan protiyum, standart Hidrojen atomu olup bir proton ve bir elektronuyla doğadaki bilinen en basit elementtir. Hidrojen doğadaki en hafif gazdır ve bu özelliği ile helyum gibi kaldırıcı bir gaz olarak kullanılabilir. 1m^3 Hidrojenin 1,21 kg kaldırma gücü vardır (273 K ve 760 mmHg). Aynı hacimdeki havadan yaklaşık 14 - 15 kat daha hafiftir. Hidrojen renksiz, kokusuz, korozif olmayan, tatsız ve zehirli olmayan bir gazdır; 294 K sıcaklıktaki suda çözünürlüğü 1,62 mg/lt dolayındadır. Gözle temas halinde bile zehirli bir etkisi yoktur ancak sıvı Hidrojen çok düşük sıcaklıklarda bulunmasından dolayı ciltle teması lokal donmaya ve ciddi yanıklara yol açabilir. Kaynama noktası 20,23 K, erime noktası 13,8 K'dir (54 mmHg basıncında). Buradan da anlaşılacağı gibi, Hidrojen çok düşük sıcaklıklarda (yaklaşık 20,3 K) gaz fazına geçen ve oda sıcaklığında sıvılaştırılması için çok enerji harcanması gereken bir elementtir. Mutlak sıfır sıcaklığı olarak bilinen ve teorik olarak inilebilecek en düşük sıcaklık olan 0 K sıcaklığa çok yakın sıcaklıklarda Hidrojen ancak sıvı ve katı hale geçmektedir (atmosfer basıncında). Buharlaşma ısısı 20,23 K'de 0,9 kJ/mol'dür.

Hidrojenin düşük yoğunluğu ve düşük viskozitesi, içinde bulunduğu ortamın çeperlerindeki çok küçük çatlak veya açıklıklardan dışarı sızabilmesine olanak sağlar. Bu özelliğiyle metandan 2,8 kez, havadan 3,3 kez daha hızlı sızar. Hidrojenin kullanıldığı yerlerde sızma ihtimaline karşı ortama Hidrojen dedektörleri yerleştirilmelidir.

Hidrojen yanıcı ve patlayıcı bir gazdır. Hava ile hacmen %4-75 oranında karışması halinde yanabilir (Tablo 1.1). Bu kadar geniş bir yanma aralığı olması ise bazı avantajlar ve dezavantajlar oluşturur. Yanarken çıkan soluk mavi alev gözle görülmeyebilir.

Tablo 1.1. Yakıtların genel özelliklerinin karşılaştırılması [3]

	Benzin	Dizel	Propan	CNG	Hidrojen
Kimyasal formülü	C ₄ -C ₁₂	C ₃ -C ₂₅	C ₃ H ₈	CH ₄	H ₂
Molekül ağırlığı	100-105	200	44,1	16,04	2,02
Karbon oranı (ağırlıkça %)	85-88	84-87	82	75	0
Hidrojen oranı (ağırlıkça %)	12-15	33-16	18	25	100
Oksijen oranı (ağırlıkça %)	0	0	0	0	0
Otomatik ateşleme sıcaklığı (°C)	257	315	454-510	540	565-582
Tutuşma aralığı (havada hacmen %)	1,4-7,6	1-6	2,2-9,5	5,3-15	4,1-74
Üst ısıl değer (kJ/kg)	43725-47450	44650-46515	50240	54890	141870
Alt ısıl değer (kJ/kg)	41865-44190	41865-44190	46050	49540	119855

Hidrojen, bilinen tüm yakıtlar içinde birim kütle başına en yüksek enerjiye sahip yakıttır (Tablo 1.2). Örneğin üst ısıl değeri, 141,9 MJ/kg, benzininkinin üç katıdır ancak hacimsel olarak bakıldığında Hidrojenin çok düşük yoğunluğundan dolayı 11,89 MJ/m³ olmaktadır. Yani birim hacimde bulunan gazın üst ısıl değeri düşük olmaktadır. Bu özelliği Hidrojenin taşıt araçlarında yakıt olarak kullanılmasını en çok güçleştiren özelliğidir ve küçük hacimlerde fazla miktarlarda Hidrojenin depolanması için tüm dünyada çok yönlü araştırma ve geliştirme faaliyetleri sürdürülmektedir [4].

Tablo 1.2. Hidrojenin özellikleri [3]

Hidrojenin Özellikleri	
Yoğunluk	0,0838 kg/m ³
Üst ısı değeri	141,90 MJ/kg
	11,89 MJ/m ³
Alt ısı değeri	119,90 MJ/kg
	10,05 MJ/m ³
Kaynama noktası	20,3 K
Sıvı haldeki yoğunluk	70,8 kg/m ³
Kritik nokta sıcaklığı	32,94 K
Kritik nokta basıncı	12,84 bar
Kritik nokta yoğunluğu	31,40 kg/m ³
Kendi kendine tutuşma sıcaklığı	858 K
Yanma aralığı	%4 – 75 (hacimsel)
Havada stokiometrik karışımı	%29,53 (hacimsel)
Difüzyon katsayısı	0,000061 m ² /sn
Özgül ısı	14,89 kJ/(kg K)
Alev sıcaklığı	2318 K

Hidrojenin bir yakıt, daha doğrusu bir enerji taşıyıcı olarak kullanılmasında en çok dikkat edilmesi gereken yönü, Hidrojenin sağlayabileceği güvenlik kriterleridir. Bu açıdan baktığımızda mevcut enerji sistemiyle yani; benzin, kömür, Doğalgaz gibi yakıtlarla karşılaştırılması gereklidir. Tablo 1.3'te, Hidrojen güvenlik açısından benzin ve metan ile karşılaştırılmıştır. Tablo 1.4'te Hidrojenin, metanın ve benzinin toplam güvenlik katsayıları bulunmuştur. Hidrojen, yanma karakteristikleri bakımından diğer yakıtlara göre bazı farklılıklar gösterir. Havada yanmaya başlaması için gerekli enerji Doğalgaz ve diğer hidrokarbonlara oranla çok düşüktür. Tablodan da görüldüğü gibi Hidrojen Doğalgazdan yaklaşık 10 kat daha az bir enerji ile tutuşabilir. Fakat burada önemli olan yanma için gereken enerjinin miktarıdır. Çünkü gerçek hayatta bir kıvılcım bile hem benzinin, hem Doğalgazın, hem de Hidrojenin yanmaya başlamasında yeterli miktarda enerjiyi sağlar. Hidrojenin alev hızı, Doğalgazın alev hızından yaklaşık 10 kat daha fazladır. Hidrojenin yanmaya başlaması için gerekli olan ateşleme enerjisi hidrokarbonlara göre düşüktür ve dolayısıyla düşük sıcaklıklarda katalitik yanma başlatılıp sürdürülebilir. Özellikle Hidrojenin motorlarda kullanımında önem taşıyacak bir diğer özelliği, geniş bir karışım oranında yanabilmesidir. Doğalgazda ancak %5 ile %15 arasında Doğalgaz-

hava karışımı oluşturulması gerekirken bu oran Hidrojen için %4 ile %74 arasında olabilir.

Yanma ürünü olarak su oluşur. Dolayısıyla esasen Hidrojen tamamen temiz ve çevreye zarar vermeyen bir yakıttır ancak; yine diğer yanma olaylarında da olduğu gibi Hidrojen de yüksek sıcaklıkta yandığı zaman (yakıt pillerinde bu tip bir yanma yoktur) havadaki azot ve oksijenin ısınması sonucu azot oksitler (NOx) oluşur. Hidrojenin alev sıcaklığı, Tablo 1.3 'te görüldüğü gibi, Doğalgazinkinden yüksek ve benzininkinden düşüktür.

Tablo 1.3. H₂, CH₄ ve benzinin güvenlik açısından özelliklerinin karşılaştırılması [3]

Özellikler	Benzin	Metan	Hidrojen
Yoğunluk(kg/m ³)	4,4	0,65	0,084 (70,8 sıvı H ₂)
Özgül ısı (kJ/kg°K)	1,2	2,22	14,89
Havada difüzyon kat. (m ² /sn)	0,000005	0,000016	0,000061
Havada tutuşma aralığı (hacmen %)	1,0-7,6	5,3-15,0	4,0-75,0
Tutuşma enerjisi (mj)	0,24	0,29	0,02
Tutuşma sıcaklığı (K)	501-744	813	833
Alev sıcaklığı (K)	2470	2148	2318
Patlama aralığı (havada hacmen %)	1,1-3,3	6,3-14	18-59
Alev hızı (m/s)	0,34	0,3048	2,7
Alevden ısı yayılımı (%)	34-43	25-33	17-25
Stokiyometrik karışım için:			
Hava/yakıt (kütlesel)	14,7	17,2	34,32
Hava/yakıt (hacimsel)	45,79	9,53	2,38
Lambda (λ)	0,29-1,67	0,59-2	0,15-4,35
Patlama enerjisi	0,00025	0,00019	0,00017

Tablo 1.4. H₂, CH₄ ve benzinin güvenlik açısından karşılaştırılmaları [3]

Özellikler	Benzin	Metan	Hidrojen
Yakıtın zehirliliği	3	2	1
Yanma ürünlerinin zehirliliği	3	2	1
Yoğunluk(kg/m ³)	3	2	1
Sabit basınçta özgül ısı (kJ/kg°K)	3	2	1
Havada difüzyon kat. (cm ² /sn)	3	2	1
Havada tutuşma aralığı (hacmen %)	1	2	3
Tutuşma enerjisi (mj)	2	1	3
Tutuşma sıcaklığı (°C)	3	2	1
Alev sıcaklığı (°C)	3	1	2
Havada patlama aralığı (hacmen %)	3	2	1
Alevden ısı yayılımı (%)	3	2	1
Patlama enerjisi (gTNT/kj)	3	2	1
Toplam	33	22	17
Güvenlik Katsayısı	0,51	0,77	1

Not: 1, en güvenli; 3, en az güvenli

Hidrojenin havada patlama aralığı %18-59 arasındır. Yani Hidrojenin patlaması için havada hacmen en az %18 oranında birikmesi gereklidir. Bu miktar benzinde %1,1, propanda %1,1, Doğalgazda %6,3 gibi çok daha düşük seviyelerdedir. Yani Hidrojen, yoğun olarak evlerimizde kullanmakta sakınca görmediğimiz Doğalgazdan ve propandan ancak çok daha fazla miktarlarda sızması durumunda havayla patlayıcı karışım oluşturabilmektedir.

Hidrojen diğer yanıcı gaz ve sıvılara oranla daha tehlikeli olarak değerlendirilmektedir. 1930'lu yıllarda, zamanın teknolojisine göre bez torbalarda gaz halinde saklanmakta olan Hidrojenin neden olduğu Hindenberg faciası bu düşüncenin temelini oluşturmuştur. Ancak son yıllarda, özellikle uzay projeleri

kapsamında, gaz ve sıvı yakıtların özelliklerine ilişkin yürütülmekte olan yoğun araştırma çalışmaları bazı mevcut sorunlara çözüm getirmiştir. Günümüz teknolojisinde, Hidrojenin doymuş sıvı halinde, yüksek basınç altında yada yalıtılmış metal tanklarda depolanması mümkündür. Kriyojenik tanklarda 200 kPa basınçta depolanan Hidrojenin emniyet sorunları da oldukça azaltılmıştır. Sıvı haldeki Hidrojenin, hasara uğrayan yakıt deposundan diğer yakıtlarda olduğu gibi sıvı halde çevreye yayılması söz konusu değildir. Bu durumda Hidrojen derhal buharlaşmakta ve havadan çok daha hafif olduğundan atmosferde yükselerek yanıcı bir karışım oluşturma olasılığı azalmaktadır. Diğer taraftan, motorlarda yaygın olarak kullanılan benzin, depoda bir hasar olduğunda sıvı halde çevreye yayılarak daha fazla tehlike oluşturmaktadır. Havadan daha ağır olan LPG vb. yakıtlar da zemine çökerek ortamda yanıcı bir karışım oluşturarak tehlike yaratmaktadır. Hidrojenin kaza ile yanması durumunda çevreye olan ısı radyasyon miktarı, yayılan duman ve zehirli gazlar diğer yakıtlara göre daha azdır. Ancak kriyojenik Hidrojen depolarının ani olarak hasara uğraması halinde ortam sıcaklığı aşırı düşük değerlere ulaşmaktadır. Diğer taraftan Hidrojen alevinin rensiz olması da tehlike durumunda algılanmasını güçleştirmektedir. Hidrojen-hava karışımlarının geniş tutuşma sınırlarına sahip olması ve kolay tutuşabilmesi emniyet sorunları yaratmaktadır. Ancak diğer bütün yakıtlar gibi Hidrojen de bilinçli olarak ele alındığında, mevcut teknoloji içerisinde güvenli olarak kullanılabilir.

1958 yılında Arthur D. Little şirketinin 5 ile 20000 litre Hidrojen ile yaptığı patlama testlerinde Hidrojenin hiçbir çarpışma etkisiyle ve hatta Hidrojen tüpüne silahla ateş edildiğinde bile patlamadığı görülmüştür. Benzer sonuçlar Lockheed Aerospace şirketi tarafından 1950'lerde yapılan testlerde de elde edilmiştir ve Hidrojenin patlatılması zor bir yakıt olduğu ispatlanmıştır. Ayrıca bu iki şirket 1980 yılında NASA Lewis Research Center için paralel olarak Hidrojenin uçaklarda güvenlik durumunu araştırmak için yaptıkları testler vardır. Bu testlerde de 400 koltuklu bir yolcu uçağının düşmesi veya zorunlu iniş durumlarında yolcuların hayatta kalabilme ihtimalleri araştırılmıştır. Sonuç olarak sıvı Hidrojen jet yakıtından daha hızlı buharlaştığı, daha çabuk yandığı ve yanarken daha az ısı yaydığı (radyasyon ile ısı transferi hidrokarbon alevine göre çok daha az) için, Hidrojen yakıtlı uçakta da daha az hasar olması beklenebilir [5].

Hidrojenin difüzyon katsayısı çok yüksektir. Bu nedenle hava ile yakıtın hızlı ve homojen olarak karıştırılması mümkündür. Bu özellik dahili karışım hazırlama

yöntemlerinin kullanımında, homojen bir karışım elde edilmesi açısından büyük avantaj sağlamaktadır.

Laminar alev hızının yüksek olması benzin motorlarında performans açısından güç ve verim değerlerinde bir miktar azalmaya neden olur. Hidrojenin laminar alev hızı diğer alternatif yakıtlara göre daha yüksektir. Stokiyometrik karışım oranlarındaki Hidrojen hava karışımlarında yanma hızı, benzin-hava karışımlarındakinin yaklaşık 7 - 8 katına ulaşmakta ve bu durum yanma sürecinin kısılmasını ve ısı veriminin artırılmasını sağlamaktadır. Bu, Otto motorlarında ideale yakın yanma oluşturarak ısı verimini artırır. Ayrıca alev hızının yüksek olması, buji kıvılcımından sonra karışımın başka noktalardan tutuşma (detenasyon) ihtimalini azaltır. Bu durum sıkıştırma oranının artırılmasını sağlayacağından motorun gücü de artar. Araba kazalarında içi benzin dolu bir arabanın yanması 20-30 dakika sürerken aynı şartlarda Hidrojen ile dolu bir arabanın yanması 1-2 dakika sürer. Havadan çok hafif bir gaz olması nedeniyle Hidrojen, kaza anında yukarı doğru yükselir ancak hepimizin bildiği gibi benzin ve diğer petrol türevleri yere saçılır ve aracın altında yanmaya devam eder (Tablo 1.5).

Tablo 1.5. Farklı cins yakıtların yanma süreleri [3]

Yakıt	0,121 m³ yakıtın yanma süresi
Sıvı Hidrojen	27 saniye
Propan	4 dakika
Benzin	5 dakika
Jet yakıtı (JP-4)	7 dakika

Tutuşma sınırları, bir yakıtın içten yanmalı motorlarda kullanımında büyük öneme sahiptir. Tutuşma sınırları sayesinde bir yakıtın fakir karışımlarda ve zengin karışımlarda motorda kolaylıkla yanıp yanamayacağı sonucuna varılabilir. Yukarıdaki verilere göre Hidrojen gazının farklı hava yakıt karışım oranları için tutuşma sınırlarının çok geniş olduğu ve bunun da Hidrojenin motorlarda kullanılması durumunda yarar sağlayacak önemli bir özellik olduğu sonucuna varılabilir. Tutuşma sınırları bakımından alternatif yakıtları bir sıralamaya koyacak olursak;

1. Hidrojen
2. Metanol
3. Etanol
4. Doğalgaz
5. Benzin

Benzin motorlarında iyi bir yanma ve yüksek basınç elde edebilmek için karışımın sıkıştırılması ve sıkıştırıldıktan sonra ateşlenmesi gerekir. Sıkıştırılma anında meydana gelen ısı ve basınç, yakıt ve havayı daha iyi karıştırarak yanmanın düzgün ve kolay olmasını sağlar. Fakat benzin motorlarında sıkıştırma oranı istenildiği kadar arttırılamaz. Çünkü yükselen sıcaklık nedeni ile yakıt kendi kendine tutuşmaya başlayabilir. Bu bakımdan benzin motorlarında kullanılacak yakıtın kendi kendine tutuşma sıcaklığının ve oktan sayısının yüksek olması motorun sıkıştırma oranının arttırılması bakımından önem teşkil etmektedir. Kendi kendine tutuşma sıcaklığı en yüksek olan yakıt Doğalgazdır. Kendi kendine tutuşma sıcaklığı bakımından alternatif yakıtları bir sıralamaya (koyacak olursak);

1. Doğalgaz 2. Hidrojen 3. Metanol 4. Etanol 5. Benzin

Hidrojenin kendi kendine tutuşma sıcaklığı yüksek olmasına rağmen, Hidrojen-hava karışımlarının tutuşturulabilmesi için gerekli enerji miktarı düşüktür. Tutuşma aralığının geniş olması, Hidrojenin daha geniş karışım aralığında düzgün yanmasını sağlar ve yanma sonucunda daha az kirlenici oluşur. Benzin motorları ise stokiometrik orana daha yakın oranlarda ya da zengin karışım oranlarında çalıştırılmak zorunda olduklarından egzoz gazlarında önemli miktarda azot oksit (NO_x), karbonmonoksit (CO) ve yanmamış hidrokarbon (HC)'lar oluşur. Hidrojen motorları, maksimum yanma sıcaklığını azaltacak biçimde fakir karışım ile çalıştırılabilirler. Böylece daha az NO_x oluşurken, HC ve CO emisyonları oluşmaz. Çevre dostu bir uygulamadır ve küresel ısınmaya da neden olmaz.

Hidrojenin yüksek sıkıştırma oranlarında, fakir karışım ile yanabilmesi yakıt tüketimini azalttığı gibi, yanma sonucu oluşan maksimum sıcaklığı da azaltır. Yanma sonucu partikül madde oluşmadığından bujiler kirlenmez.

Alev parlaklığının düşük olması, diğer karbon esaslı yakıtlara göre radyasyon yolu ile olan ısı kaybını azaltacağından daha yüksek verim sağlar. Hidrojenin alt ısı değeri mevcut motor yakıtlarından daha yüksektir. (Hidrojen için 119,93 kJ/g, benzin için 43,4 kJ/g) Ancak hacimsel olarak değerlendirildiğinde, Hidrojenin alt ısı değeri daha düşük kalmaktadır (Hidrojen için 8,41 MJ/litre, metan için 20,8 MJ/litre, benzin için 31,8 MJ/litre). Bu durum belirli silindir hacmine sahip bir motordan alınacak en yüksek gücü kısıtlar. Ancak karışım oluşturma yöntemine bağlı olarak bu sorun giderilebilmektedir. Diğer taraftan, Hidrojenin yüksek oktan sayısına sahip olması

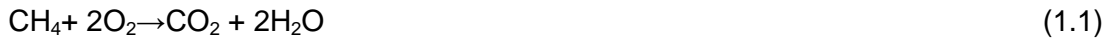
özelliğinden yararlanılarak vuruntu tehlikesi olmadan motorun sıkıştırma oranı artırılıp, ısı verimin ve maksimum gücün artırılması da sağlanabilir.

1.2. İçten Yanmalı Motorlarda Yanma

İçten yanmalı motorlar çoğunlukla enerjilerini hidrokarbon içeren yakıt ile havanın yanması sonucunda elde ederler. Yakıtın kimyasal enerjisi silindir içerisindeki gazın iç enerjisine dönüştürülür ve bu enerji ile mekanik enerji elde edilerek taşıtlar hareket ettirilir. Motorlarda yanma, karmaşık bir süreçtir ve yanma olayı üzerine etkili olan parametrelerden hangisinin daha etkin olduğu tam olarak anlaşılamamıştır. Karmaşık olaylar dizisi olan yanmayı tanımlayabilmek için basitleştirilmiş modeller kullanılmaktadır. Bu modeller yanma sürecini tam olarak açıklamaları da, yanma üzerine etkili olan önemli çalışma parametreleri (basınç, sıcaklık, türbülans şiddeti, vuruntu, motor hızı vs.) ile direkt ilişkili olduğu sonucunu vermektedir. Buji ateşlemeli motorlardaki yanma, dizel motorlarındaki yanmadan oldukça farklıdır ve bu motorlar için yanma olayı ayrı ayrı incelenmektedir [5].

1.2.1. Yanma olayı ve yanma çeşitleri

Bir motorda oluşan en önemli olay yanma olayıdır. En yaygın enerji açığa çıkarma reaksiyonu; yakıtın, havanın oksijeni tarafından oksitlenmesi ya da yanmasıdır. Reaksiyon sonucunda kimyasal yapıları farklı olan maddeler oluşur. Kimyasal reaksiyona giren maddelere bileşen, reaksiyon sonucu oluşan maddelere ürün adı verilir. Örneğin;



Denklemler ile verilen reaksiyonun bileşenleri metan ve oksijen, ürünleri ise karbondioksit ve sudur [6]. Yanma olayında oksidasyonun tamamlanıp tamamlanmamasına göre yanma dört kısma ayrılabilir [7].

Teorik Tam Yanma (TTY): Yakıt içerisinde bulunan bütün yanabilir bileşenler tam olarak oksitlenir ve ürün olarak CO₂, H₂O, SO₂ ve N₂'ye dönüşür. Bu yanmada minimum oksijen miktarı kullanılır, egzozda O₂ görülmez.

Tam Yanma (TY): Gerekli hava miktarı TTY halindeki kadar fazla olduğunda egzozda O₂, CO₂, H₂O, SO₂ ve N₂ görülen yanma şeklidir. Hava fazlalık katsayısı (HFK) 1'den büyüktür.

1.2.2.1. Birinci faz

Bujide kıvılcım çaktığı nokta (A) ile basıncın artmaya başladığı nokta (T) arasındaki zaman birinci faz (ilk tutuşma fazı, α_1) olarak kabul edilir. Basıncın artmaya başladığı nokta, p- α diyagramında basınç eğrisinin, yanmasız sıkıştırma eğrisinden ayrıldığı noktadır. Piston ÜÖN' ya gelmeden önce buji elektrotları arasında, çakan kıvılcımın enerjisi (30- 100 mJ) nedeniyle bu bölgedeki homojen karışımda belli bir tutuşma gecikmesi sonunda, ilk alev cephesi patlama şeklinde oluşmaktadır [8]. Tutuşma gecikmesi süresi;

- Buji kıvılcım enerjisine,
- Kıvılcımın uygulanma süresine,
- Buji elektrotları arasındaki ısınan bölgenin hacmine (buji tırnak aralığına),
- Karışım oranına (kimyasal reaksiyonların hızına),
- Buji önündeki akış hızına (ilk ısınan bölgenin hızlı taşınım sonucu enerji seviyesinin düşmesine) bağlıdır.

1.2.2.2. Ana faz

Bu faz, tutuşma gecikmesi sonunda, p- α diyagramında basıncın artmaya başlaması anında başlamakta ve ÜÖN' den sonra, maksimum basınç oluşuncaya kadar devam etmektedir (α_2). Ana fazın süresi 25-30° KMA civarındadır. Tutuşma gecikmesi süresi sonunda basınç, sıcaklık ve karışım oranının belirlendiği bir yanma hızı ile alev cephesi sürekli şekilde ilerler.

1.2.2.3. Son faz

Son faz maksimum basınç oluşmasından sonra başlamakta ve genişleme sırasında yakıtın tümü yanıncaya kadar devam etmektedir (α_3). Bu fazda gazların sıcaklığı maksimum basınçtan belli bir süre sonra maksimuma ulaşır [8]. Sonuç olarak normal yanma koşullarında yanma sırasında yakıtın toplam enerjisinin %70-75'i maksimum basınca ulaşıncaya kadar, %85-90 kadarı maksimum sıcaklığa ulaşıncaya kadar açığa çıkar. Kısmi yüklerde ise (gaz kelebeği kısılmış durumda, dolayısıyla basınç ve sıcaklıklar yüksek değil iken) yanma hızının düşük olması nedeniyle maksimum basınç noktasına kadar toplam yakıt enerjisinin ancak %50'si kullanılmış olur. Dolayısıyla yanma, genişleme zamanı süresince devam eder, çok kötü koşullarda genişleme süresinin sonunda da yanma sona ermemiş olabilir. Bu durumda ise motorun verimi ve dolayısıyla gücü azalır.

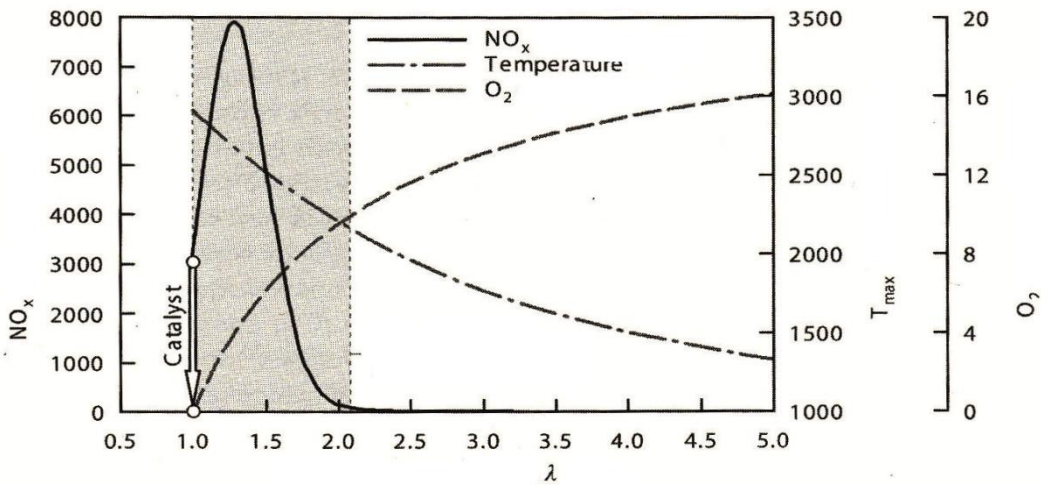
1.2.3. Hava fazlalık katsayısı (HFK)

Hava Fazlalık Katsayısı; silindir içine emilen havanın teorik tam yanma için gerekli olan hava miktarına oranı şeklinde tanımlanarak;

$$\text{HFK} = (\text{H}/\text{Y})_{\text{gerçek}} / (\text{H}/\text{Y})_{\text{teorik}} \quad (1.2)$$

şeklinde ifade edilir.

Eksik yanma enerji kaybı ile sonuçlandığından, pratikte yanmanın tam olarak gerçekleşmesi için teorik hava miktarından daha fazla hava kullanılır. Bu durumda HFK 1'den büyük olur. Buji ateşlemeli motorlarda HFK, 0,8 ile 1,2 arasında değişmektedir. HFK 1'in üzerine çıktıkça karışım fakirleşmekte, 1'in altına düştükçe karışım zenginleşmektedir. Hava fazlalık katsayısının tersi eşdeğerlik oranı olarak tanımlanır ve $(\phi=1/\text{HFK})$ şeklinde gösterilir. Hava Fazlalık Katsayısı yanma hızını, dolayısıyla açığa çıkan ısı miktarını, basıncın ve sıcaklığın değişimini etkiler. HFK 0,9 - 0,95 civarında olduğunda yanma hızı maksimumdur. HFK 0,7 gibi bir değer altına düştüğünde, şartlara bağlı olarak kolaylıkla tutuşma sınırı dışına çıkmaktadır. HFK'nın 0,8 - 0,9 gibi değerlerinde birinci ve ikinci safha süresi kısalmakta ve basınç artma hızı büyümektedir. Fakir karışımlarda (HFK= 1,1 - 1,2) ise, tutuşabilmenin üst sınırına yaklaşıldığından motorun yapısına bağlı olarak ateşleme ve yanma, çevrimden çevrime değişim gösterir. Karışım fakirleştikçe ateşlemenin sağlanamadığı çevrimlerin sayısı giderek artar [8]. Şekil 1.2'de görüldüğü gibi Hidrojen yakıtlı motorlarda HFK= 2 değerini geçtikten sonra O₂ konsantrasyonu artar, sıcaklık azalır ve NO_x minimuma düşer.



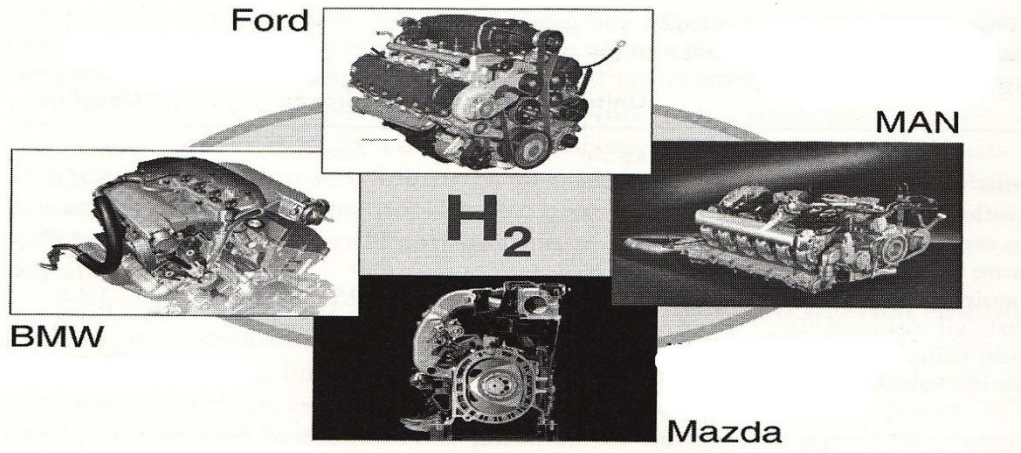
Şekil 1.2. NO_x emisyonlarından kaçınma stratejisi [9]

1.2.4. Ateşleme avansı

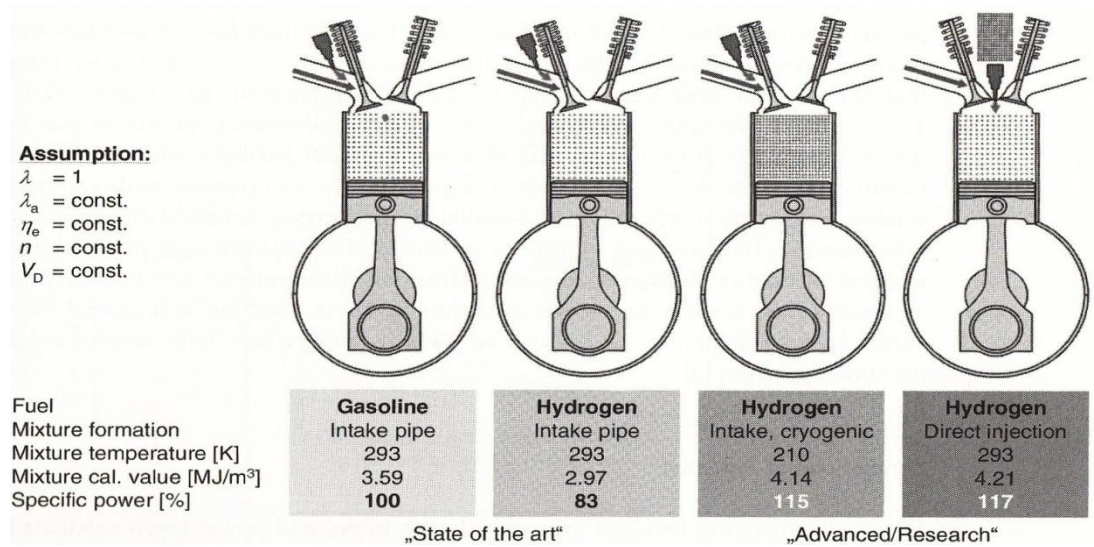
Yakıt enerjisinden en büyük verimi almak için en yüksek yanma basıncı oluştuğunda, piston üst ölü noktadan uzaklaşmamış olmalıdır. Yanma hızı sonsuz olmadığından, yakıtın tümünün yanabilmesi için belli bir zaman dilimi geçmesi gerekmektedir. Bu yönden yanmanın başlatılma zamanı çok önemli olmaktadır. Piston üst ölü noktaya geldiği anda yanma başlatılacak olursa özellikle yüksek hızlı motorlarda alev karışım içinde ilerlerken, piston üst ölü noktadan bir ölçüde uzaklaşmaktadır. Bu durumda yanma büyük bir hacimde tamamlanacağından, maksimum basınç düşer ve piston üzerine gelen kuvvet azalır. Bu da verimde düşüğe neden olur [8]. Yakıt enerjisinden yüksek verim alabilmek için, maksimum basıncın piston üst ölü noktayı 10-15 derece geçtikten sonra oluşacak şekilde ateşlemenin yapılması gerekir. Diğer bir pratik tanımlamaya göre ise piston üst ölü noktaya geldiğinde karışımın en az yarısı yanmış olmalıdır. Bu açıklamalardan ateşlemenin piston üst ölü noktaya gelmeden önce başlatılması gerektiği anlaşılmaktadır [8]. Ateşlemenin piston üst ölü noktaya gelmeden başlatılmasına ateşleme avansı adı verilmektedir. En uygun avans, en büyük işi verecek şekilde ayarlanmalıdır. Motor belli bir devir sayısında çalışırken ateşleme avansı artırılırsa, sıkıştırma strokunda yanma olayının basıncını artırma sürecinde daha önce başlamış olacaktır. Bu, ateşleme sonrası silindir basıncının erken ateşleme durumunda daha yüksek olmasıyla sonuçlanmaktadır. Erken ateşlemeye rağmen yaklaşık adyabatik bir sıkıştırma kabul edildiğinde aynı zamanda sıcaklık da artmaktadır. Bu iki artışın ortaklaşa etkisiyle motorun vurutuya direncini azaltmaktadır. Diğer yandan ateşlemenin olduğu andaki basıncın erken ateşleme durumunda daha düşük olması vurutu olayı üzerinde müspet bir etki yapmaktadır. Hava fazlalık katsayısının büyümesiyle motor gücünün düşmesinin nedeni, doğal yollarla silindirlere alınacak toplam karışımda benzin miktarında teorik olarak oluşan azalmadır. Bu durumda tam yanma elde edilebildiği halde, yanma sonucu salınan enerjinin azalması motor gücünün düşmesine neden olmaktadır. Hava fazlalık katsayısı 1,10'dan daha fazla artırılırsa yanma hızı azalmakta ve yanma süresi uzamaktadır. Bunun neticesinde ise yanma genişleme zamanına kadar sarktığı için ısı veriminde düşme olmaktadır. Yanmadaki sarkmayı önlemek için, ateşleme avansı arttırılmaktadır. Ancak avansın fazla arttırılması, diğer yönden vurutu eğilimini çoğaltmaktadır. Hava fazlalık katsayısı 0.6'dan daha fazla küçültüldüğünde ise karışım çok zenginleşmekte, oksijen eksikliğinden dolayı yanma hızı düşmektedir. Bunun sonucu olarak da hem ısı veriminde hem de motor gücünde azalma olmaktadır [7-8].

1.3. Yakıt Olarak İçten Yanmalı Motorlarda Hidrojen Kullanılması

Hidrojenin, içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılması konusunda birçok çalışma yapılmış ve halen de yapılmaktadır. Bu çalışmalarda çoğunlukla fosil yakıtlar için tasarlanmış motorlar kullanılmıştır. Bu motorlarda Hidrojen yakıtı kullanımına imkân sağlamak için bazı modifikasyonlar gerekmektedir. Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanım şekline ilişkin yapılan ilk incelemelerde sırasıyla aşağıdaki Şekil 1.3'deki markaların ürünleriyle ve Şekil 1.4'deki farklı Hidrojen besleme yöntemleri ile karşılaşılmıştır.



Şekil 1.3. Hidrojen yakıtlı motor çalışmaları [9]



Şekil 1.4. Hidrojen besleme yöntemleri [9]

Şekil 1.4'den de görüleceği gibi Hidrojen yanma odasına genellikle üç şekilde beslenmektedir.

- Gaz-hava karışımı olarak emme manifolduna besleme
- Sıvı Hidrojen-hava karışımı olarak emme manifolduna besleme
- Direkt yanma odasına basınçlı besleme

Besleme hattı dışında yapılması gereken değişiklikler de aşağıda sıralanmıştır:

- Yakıt hattı Doğalgaz ve Hidrojenin kullanımına uygun hale getirilmelidir. Hat üzerinde alevin geri kaçmasını önleyici alev tutucu ve fazla basıncı önleyici ekipmanlar bulundurulmalıdır.
- Buji ateşleme ve yakıt püskürtme zamanları ve süreleri ek elektronik parçalarla optimum şekilde ayarlanmalıdır.
- Kartere kaçıp yalıtın orada birikmesini önlemek için kartere havalandırma deliği açılması gerekmektedir.

Hidrojen yoğunluğundan dolayı yanma odasına kütleli olarak az miktarda gönderilir. Bu da stokiyometrik karışımda %20 güç kaybı meydana getirir. Bunu önlemek için Hidrojen'in sıkıştırma oranı yüksek olan motorlarda kullanılması önerilir.

Stokiyometrik çalışma şartlarında Hidrojen motorunda yüksek miktarda NO_x oluşur. Fakat silindirlere gönderilen karışım fakirleştirilerek NO_x oluşumu azaltılabilir.

Karbüratörlü motorlarda emme manifoldundaki alev geri kaçması önemli bir problemdir. Fakat, yakıtın basıncı ve miktarının azaltılması ile fakir karışım elde edilerek ve buji ateşleme zamanlarında ayarlama yapılarak bu problemin üstesinden gelinir.

Benzin motoruna Hidrojen takviyesi ile yanmamış hidrokarbon emisyonları azaltılarak ısı verim iyileştirilir. Hidrojen takviyesi yapılan Otto motorlarında küçük bir ön yanma odası mevcuttur. Yanma odası bujinin yerine yerleştirilmiştir. 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 karışım oranlarında düzgün bir şekilde yakılması sağlanır. Böylece ısı verim artırılarak, azot oksit emisyonları önemli derecede azaltılır [10].

Hidrojenin hava ile yanmasının sonucunda, yakıtta karbon bulunmaması nedeni ile yanma ürünleri arasında CO, CO₂, HC'ler mevcut olmayacak, sadece motorun yağlama yağının yanması ile oluşan HC'ler olacaktır. Ayrıca yüksek yanma

sıcaklıkları nedeniyle havanın kimyasal reaksiyonu sonucu azot oksitler oluşacaktır [11].

Hidrojenin yanma ürünü su buharıdır ve maksimum sıcaklıklardaki NOx emisyonları ihmal edilebilir. Nitekim Hidrojenle çalışan bir içten yanmalı motor, günümüz taşıt motorlarından çok daha az NOx emisyonuna neden olmaktadır [12].

1.4. Hidrojenin Emisyonlara Etkisi

Hidrojenin hava ile yanması sonucunda, yakıtta karbon bulunmaması nedeni ile yanma ürünleri arasında CO, CO₂ ve HC'lar mevcut olmayacak, sadece motorun yağlama yağının yanması nedeni ile çok az miktarda oluşan HC'lar egzoz gazları arasında bulunacaktır. Diğer yandan bu motorlarda, yüksek yanma sıcaklıkları nedeni ile havanın kimyasal reaksiyonu sonucu azot oksitler, NOx, bol miktarda üretilmektedir. Üretilen azotoksitlerin büyük kısmını oluşturan NO'ler egzoz sistemi içerisinde veya atmosfere çıktıktan sonra NO₂'ye dönüşmektedir. NOx genelde hava fazlalık katsayısının ve yanma odasının sıcaklığının bir fonksiyonu olarak üretilmektedir. Hidrojen yakıtlı motorların fakir karışımlarda çalışma özelliği bu konuda önemli yararlar sağlamaktadır.

Hidrojen yakıtlı motorlarda egzoz gazları içerisinde hava kirliliğini etkileyecek tek ürün olarak bulunan NOx'lerin miktarı, yanma odası sıcaklıklarının azaltılması, oksijen konsantrasyonunun azaltılması veya yanma süresinin kısaltılması sonucu düşürülebilmektedir.

Bu amaçla;

- Egzoz gazları resirkülasyonu
- Emme manifolduna su püskürtülmesi
- Ateşleme zamanının geciktirilmesi
- Hidrojenin direkt olarak yanma odasına püskürtülmesi gibi yöntemler kullanılmaktadır.

İnert egzoz gazlarının resirkülasyonu sonucu, özellikle fakir karışımlarda oksijen konsantrasyonu düşürüldüğü için etkin bir şekilde NOx azalmaktadır. Ancak bu durumda motorun gücü de bir miktar düşecektir. Motorun emme manifolduna su püskürtülmesi sonucunda karışım sıcaklığı düşmekte, yanma hızı azalmakta ve sonuç olarak NOx emisyonu da azalmaktadır. Ateşleme zamanının geciktirilmesi motorun termik verimini bir miktar azaltmasına rağmen, maksimum sıcaklıkları

düşürmekte ve dolayısı ile de NOx emisyonunu azaltmaktadır. Hidrojenin direkt olarak yanma odasına püskürtülmesi de NOx emisyonunu azaltıcı yönde etki etmektedir. Bu durumda püskürtme zamanının etkileri de önem kazanmaktadır.

Ayrıca yanma odası şekli ve motorun sıkıştırma oranı da hava hareketlerinin oluşturulması ve ulaşılan sıcaklıklar açısından NOx emisyonu üzerinde etkili olmaktadır [13].

1.5. Motorlarda Hidrojen Kullanımının Ortaya Çıkardığı İşletim Problemleri

Hidrojen yakıtlı motorlarda yanma açısından ortaya çıkan en önemli iki sorun, geri tepme ve erken yanma sonucu oluşan vuruntu olaylarıdır. Yanma odasına gönderilen yakıt hava karışımının silindire girmeden önce tutuşması sonucunda motorun emme manifoldu içinde geriye doğru alevin ilerlemesi geri tepme olarak tanımlanmaktadır. Bu olay emme sistemi elamanlarını tahrip etmekte ve emniyet açısından sorun oluşturmaktadır. Yanma odasına gönderilen karışımın bujide kıvılcım çakmadan önce sıcak noktalar tarafından tutuşturularak yanmayı istenilenden önce başlatması da erken tutuşma olarak tanımlanmaktadır. Erken tutuşma sonucunda ise vuruntu meydana gelir. Hidrojenin tutuşma enerjisinin düşük olması bu iki sorunu ortaya çıkarmaktadır [14]. Geri tutuşma hava fazlalık katsayısının (λ) 2 ile 3 arasında olduğu durumlarda oluşmaktadır. Hidrojenin yakıt olarak kullanılabilmesi için bu sorunların ortadan kaldırılması gerekir. Geri tepmenin sebeplerinden biri benzin ile kıyaslandığında Hidrojenin tutuşturulabilmesi 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 olduğu nokta çevrimden çevrime farklılık gösterir. Eğer buji kıvılcımı emme zamanında oluşursa, diğer bazı etkenlerle birlikte geri tepmeye sebep olur. Artık enerji oluşumunu önlemek için ateşleme sistemi modifiye edilmelidir [15]. Yük altında, yanma odasındaki sıcak noktalar karışımın erken ateşlenmesine sebep olur. Hidrojenin tutuşma 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, motor yağından gelen sıcak partiküller, yanmayı istenilenden önce başlatabilmektedir. 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 karışıma 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 [16]. 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 sistemi daha karmaşık hale getirir ve taşıt ağırlığını artırır. Bu sorunun çözümü için kullanılan yöntemlerden biri; taşıt üzerinde suyu elektroliz ederek, açığa çıkan Hidrojen ve oksijenin basınç altında depo edilmesidir [17]. Hidrojen-hava karışımı içindeki su buharı yanma sıcaklığını azaltacağından maksimum basıncın, dolayısıyla gücün azalmasına sebep olur. Bunun için karışım içindeki su buharı bir yoğuşturucudan geçirilerek su deposuna geri döndürülür. Yanma odası içinde bırakılan su buharı miktarı ayarlanarak yanma hızı ve vuruşu oluşumu kontrol edilebilir [18].

1.6. Motor Yakıtı Olarak Doğalgaz

Doğalgazın büyük bölümünü %80-86 CH₄ (metan) gazı oluşturmaktadır. Geri kalan bölümünü ise C₂H₆ (etan), C₃H₈ (propan), C₄H₁₀ (bütan), N₂ (azot), C₅H₁₂ (pentan) ve CO₂ (karbondioksit) oluşturmaktadır. Doğalgazın, Otto motorlarında yakıt olarak kullanılmasında yarar sağlayacak en önemli özelliği oktan sayısının yüksek oluşudur. Ayrıca ısıl değerinin benzin ve alkole göre yüksek olması da bir avantaj sağlamaktadır. Doğalgaz benzine oranla daha yüksek hava fazlalık katsayısı değerlerinde tutuşma olanağına sahiptir. Böylece motorun fakir karışımla çalıştırılıp, yakıt ekonomisi ve egzoz gazları emisyonu açısından yarar sağlanması da mümkün olmaktadır. Ancak stokiyometrik karışım içindeki yakıtın hacimsel oranının yüksek oluşu (benzin için %1,65, metan için %9,47) nedeniyle, motorun birim hacmindeki stokiyometrik karışımın ısıl değeri benzine göre %10 mertebesinde daha az olmaktadır. Ayrıca laminar alev hızının da benzin-hava karışımına göre düşük olması, benzin motorlarında, performans açısından olumsuz etkiler yaratmaktadır. Ancak Doğalgazın motor performansı üzerindeki bu olumsuz etkisi, sahip olduğu yüksek oktan sayısı avantajı kullanılarak motorun sıkıştırma oranının artırılması sonucunda giderilebilmektedir [19]. Doğalgazın difüzyon katsayısının benzine oranla iki kat fazla olması, hava ile daha kolay ve hızlı karışması, çift yakıtlı motorlarda kullanımı açısından yarar sağlamaktadır. Yüksek performansa ve düşük

emisyona sahip bir Doğalgaz motorunun yapımı doğru sıkıştırma oranının tespiti ile sağlanmaktadır. Bu oran her motor için değişebilir. Sıkıştırma oranının artırılmasını motor vurunusu sınırlamaktadır. Doğalgazın yüksek oktan sayısına sahip olması sıkıştırma oranının artırılabilmesini sağlamaktadır. Genel olarak benzin motorlu taşıtlarda sıkıştırma oran 8:1 ve benzin oktan sayısı 90'dır. Fakat ortalama olarak Doğalgaz motorunda sıkıştırma oranı 12:1 ve yakıtın araştırma oktan sayısı, ROS 130, motor oktan sayısı, MOS 105'dir. Oktan sayısı yakıtın kalitesine göre daha da az olabilmektedir. Yüksek oktan sayısı demek; vurununun ortadan kalkması, daha uzun buji ömrü, yağlama yağının daha fazla kullanımı ve soğuk havalarda iyi çalışma demektir. Doğalgaz motorlarında sıkıştırma oranının yüksek tutulması önemlidir. Sıkıştırma oranının artırılması daha fazla ısıl verim sağlar. Isıl verimin artması yakıt tüketiminde azalma demektir. Sıkıştırma oranında bir değişiklik yapılmadan Doğalgazın benzin motorlarında kullanılması durumunda güçte %7'lik kayıp meydana gelecektir. Sıkıştırma oranını artırılması ile motorda benzin yerine Doğalgaz yakılması sonucu oluşacak güç kayıplarının üstesinden gelinbilir. Doğalgaz daha hafif moleküler yapıya sahiptir ve silindire giren havanın %10'u teşkil etmektedir. Hava miktarının azaltılması genellikle güç kaybına neden olurken sıkıştırma oranının artırılması bu durumu azaltabilir. Ayrıca Doğalgazın yanması sonucu oluşan maksimum basınç ve sıcaklıklar benzin motorlarından daha düşük olduğundan, sıkıştırma oranının artırılması sonucu artacak olan basınç ve sıcaklıklar tehlikeli boyutlara ulaşmayıp, ancak benzin motorlarındaki değerlere gelecektir. Dizel motorlarının yüksek sıkıştırma oranlarında çalışması ve Doğalgazın oktan sayısının yüksek olması nedeni ile sıkıştırma oranının yüksek tutulabilmesinden dolayı, eğer dizel motorlarında uygun değişiklikler yapılırsa, Doğalgazın dizel motorlarında rahatlıkla kullanılabileceğine yaygın olarak inanılmaktadır [19-20]. Doğalgazın difüzyon katsayısının benzine oranla iki kat fazla olması, hava ile daha kolay ve hızlı karışması, çift yakıtlı motorlarda kullanımı açısından yarar sağlamaktadır. Dizel ilkesine göre çalışan motorlarda Doğalgaz, ortam içerisine yapılan pilot püskürtme yardımıyla tutuşturulabilmektedir. Bu özelliği nedeni ile Doğalgaz, benzin ve dizel motorlarında önemli değişiklik yapılmadan kullanılabilmektedir [20]. Doğalgazın korozif özellikleri yoktur. Fakat bazen dünyada değişik bölgelerde elde edilen Doğalgaz içerisinde nem olabilmekte; bu da motoru aşındırıcı etki göstermektedir. İçten yanmalı motorlarda, yakıt olarak Doğalgazın kullanılması durumunda yanma sonu sıcaklığında düşme olmaktadır. Yanma sonu sıcaklığın düşmesi NOx emisyonlarında azalma sağlayacaktır. Bunun yanında Doğalgazın kullanımı, motorlu taşıtların gürültü düzeyinde azalmalar temin edecektir

[21]. Doğalgazın yanması ile açığa çıkan CO₂, CO ve hidrokarbon (HC) emisyonları Hidrojen ilavesi ile azaltılabilir. Gerçekte, Doğalgaza Hidrojen ilavesi ile egzoz emisyonunda çok az miktarda HC, CO₂, CO ve NO_x oluşumu gözlenir. Hidrojen ve Doğalgaz bileşimi Hythane olarak isimlendirilir.

1.7. Doğalgazın Taşıtlarda Kullanımı

Doğalgaz taşıtlarda yakıt olarak iki şekilde depolanır ve kullanılır [22]:

1. Sıkıştırılmış Doğalgaz (Compressed Natural Gas - CNG): 200-250 bar basınçta sıkıştırılıp gaz tüplerinde depolanır. 250 barda atmosfer basınç ve sıcaklığındaki Doğalgaza oranla yaklaşık 1/200 hacim kaplar.
2. Sıvılaştırılmış Doğalgaz (Liquefied Natural Gas - LNG); Düşük basınç fakat kriyojenik olarak soğutulmuş tanklarda sıvı (boiling cryogen) olarak atmosfer basıncında –160°C sıcaklıkta çift duvarlı, vakum yalıtımlı tüplerde depolanır.

1.8. Doğalgazın Otto Motorlarında Kullanımı

Doğalgaz benzin motorlarında fazla bir değişiklik yapılmadan kullanılabilir. Benzin motorları istenildiği zaman benzinle, istenildiği zaman Doğalgazla çalıştırılabilir. Doğalgazı benzin motorlarında çok az miktarda kullanmamız mümkün olduğu gibi, tek yakıt olarak da kullanmamız mümkündür. Her iki durumda da egzoz emisyonlarında kirlilik azalmakta, özellikle karbon monoksit miktarında önemli azalmalar olmaktadır. Motorda her iki yakıtta Otto çevrimi ile çalışabilir. Elektrikli ateşleme sistemi aynen kullanılır. Doğalgazın benzin motorlarında kullanılması halinde pilot yakıt, ateşleme sistemi ile karışımın ateşlenmesi durumu mevcut olduğundan gerekmemektedir [23]. Bir benzin motoruna gaz/hava karbüratörünün ilavesi ve ateşleme sisteminin motora uygun olarak yeniden düzenlenmesi ile motorun Doğalgaz motoru olarak kullanılabilmesi mümkündür. Bunların dışında Doğalgazın depolanması ve depodan motora sevki için gerekli basınç regülatörü, emniyet supabı gibi elemanlar ile sistemin donatılması gerekmektedir [24]. Yüksek basınçta depolanan Doğalgazın basıncının regülatörlerle düşürülmesinden sonra gaz karbüratöründe hava ile karışım sağlanmaktadır. Gaz karbüratörlerinin karışımı homojen bir şekilde ve istenen yakıt/hava oranında hazırlanması, motor gücünü düşürmeyecek şekilde akış direncinin mümkün olduğu kadar az olması, motorun tüm çalışma şartlarında emniyetli çalışması, bütün silindirlere aynı yakıt/hava oranında karışım gönderilmesi ve kirlenici egzoz emisyonunu düşük seviyede

tutacak şekilde karışımın hazırlanması gerekmektedir. Doğalgaz sahip olduğu yüksek oktan sayısı nedeni ile Otto ilkesine göre çalışan motorlar için uygun bir yakıttır. Ancak, benzine oranla birim kütle sinin sahip olduğu enerji yoğunluğu daha fazla olduğu halde (benzin 43 MJ/kg, Doğalgaz 50-52 MJ/kg), stokiyometrik oranlarındaki karışım enerji yoğunluğu benzine oranla daha düşüktür. Bu nedenle aynı motordan alınacak güç, Doğalgaz kullanıldığında düşmektedir. Ayrıca yanma hızının da düşük olması, ısı verim açısından olumsuz etkiler yaratmaktadır. Ancak Doğalgazın tutuşma sınırının, fakir karışımlara doğru gidildikçe, benzine oranla daha geniş olması ısı veriminin bu şartlarda daha yüksek olmasına neden olmaktadır.

1.9. Test Öncesi Alınması Gereken Güvenlik Önlemleri

- Hidrojen tüpleri, test yapılan kapalı ortamda bulundurulmamalı, laboratuvarın dışında açık bir ortamda muhafaza edilmelidir. Hidrojen gazı, uygun bir boru hattı ile (S316 paslanmaz çelik veya teflon hortum) test motoruna beslenmelidir.
- Hidrojen tüplerinin bulunduğu alanın çevresi kapatılmalı ve tüplere ikaz levhaları asılmalıdır.
- Laboratuvar dışında bir gaz regülatörü bulunmalı ve gaz 5 bar civarına düşürülerek içeriye alınmalıdır.
- Test sistemini uzaktan kontrol edebilen, acil durumlarda gazı kesen ve motoru boşa alıp durdurabilecek elektronik bir sistem kurulmalıdır.
- Test yapılacak motorun mümkün olduğu kadar küçük hacimli olması güvenlik açısından tercih edilmelidir. Mümkünse tek veya iki silindirli bir motor tercih edilmelidir.
- Hidrojenin yağlama özelliği yoktur ve bu sebeple dizel ve benzinin motorda yaptığı yağlamayı yapamamaktadır. Bu da zamanla aşınmalara sebebiyet vermektedir. Aşınmanın daha az olması için yataklar az yağlama gerektiren malzemelerle kaplanmalıdır.
- Ufak bir kıvılcım bile Hidrojenin patlaması ile sonuçlanacağı için, test bölgesinde kesinlikle herhangi bir ısı ya da kıvılcım oluşturabilecek bir cisim bulundurulmamalıdır.

- Hidrojen tüpünün altında lastik ya da kauçuktan bir halka konmalıdır ve tüpü yere koyarken yavaşça koymak gereklidir. Aksi takdirde tüpün yere çok sert bırakılması halinde dahi tüpün patlama olasılığı vardır.
- Hattaki tüm bağlantılarda Hidrojen için özel ara bağlantı ekipmanları kullanılmadır. Hatta, basıncı dayanımı ve sızdırmazlık son derece önemlidir. Motor çalıştırılmadan önce hatta kaçak olup olmadığı köpük ve sensörlerle kontrol edilmelidir.
- Motorda olabilecek en tehlikeli durum geri tepmedir. Geri tepme, motordaki sıcak bir bölge yada karbüratörlü motorlarda sübap bindirmesi esnasında, artık gazlarla hava dolgusunun teması nedeniyle emme devam ederken tutuşmanın başlamasıdır. Bu durum hava fazlalık katsayısının 2 ile 3 arasında olduğu durumlarda gerçekleşir.  nlemek için fakir karışım oluşturulmalı ve sübap bindirme süresi kısaltılmalıdır. Ayrıca EGR sistemi ve giriş havasının Hidrojenle soğutulması bu sorunu engeller.
- Sızdırmazlıktan dolayı yağlama yağının yanma odasına kaçması, emisyonların artmasına ve erken tutuşma sorununa neden olmakta iken bu durum güvenlik açısından önemli bir sorun teşkil etmemektedir. Fakat, Hidrojenin karter bölgesine kaçması büyük tehlike arz edebilir. Karterde toplanan gaz bir süre sonra patlayarak motora ve da kötüsü çevredeki canlılara zarar verebilir. Bu nedenle sızdırmazlık iyi sağlanmalı ve kartere havalandırma delikleri ve bu deliklere havalandırma hortumları yerleştirilmelidir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Enerji; insanlığın temel ihtiyaçlarının karşılanmasında, insanın ortalama ömür süresinin uzatılması ve hayat standartlarının yükseltilmesinde birincil derecede bir gereksinim olarak kabul edilmektedir. Bununla beraber dünyada nüfus artışıyla birlikte, sanayileşmenin artması, teknolojinin gelişmesi ve küreselleşme sonucu artan ticari olanaklar, her geçen gün enerjiye olan ihtiyacı da artırıyor. Öte yandan bu talep artışının çok büyük bir kısmının dünyada sadece belirli bölgelerde bulunan fosil kaynaklardan sağlanıyor olması ise; enerjiyi sadece ulusal ölçekte değil, uluslararası alanda da politika ve stratejilerin belirlenmesinde önemli bir kilit noktası haline getiriyor. Tüm bunların ötesinde ise, enerjiye olan talep arttıkça ve karşılandıkça, iklim değişikliği ve küresel ısınma gibi dünyayı derinden tehdit eden gerçeklerle de karşı karşıya kalıyoruz [25].

Enerjinin dünyayı bu denli etkileyen önemli bir gündem maddesi haline gelmiş olması; enerji piyasalarının oluşturulması, yatırım ortamlarının geliştirilmesi ve gerekli teknolojinin sağlanması için karar vericiler bazında doğru politikaların uygulanması ve doğru stratejilerin belirlenmesini elzem kılıyor.

Aynı zamanda sektöre yön veren, yatırım yapan, Ar-Ge ve inovasyon çalışmalarıyla teknolojiyi geliştiren paydaşların da doğru hedeflere yönelmesi için oldukça dinamik bir yapıya sahip olan enerji piyasalarını reel bir perspektifte görebilmesi, bu bağlamda da doğru verilere ulaşması gerekiyor [25].

Dünyadaki hemen hemen tüm ülke yöneticileri de bu çalışmaları teşvik etmiştir ve teşvik etmektedir. Bunun yanında gelişen dünyamızda ulaşımda kullanılan araçların büyük çoğunluğu (%90) içten yanmalı motor tekniği ile çalışmaktadır. İçten yanmalı motorlarda (İYM) kullanılan yakıtlar ise petrol türevi yakıtlar olan benzin ve motorinden oluşmaktadır. İYM'da kullanılan yakıtlar kolay buharlaşabilme, hava ile kolay karışabilme, birim hacminden yüksek enerji sağlayabilme ve kolay tutuşabilirlik ile kolay bulunabilirlik gibi özellikleri taşımalıdır [26]. Benzin ve motorin bu özellikleri fazlasıyla taşımaktadır. Ayrıca konvansiyonel yakıtlar çok yaygın bir pazarlama ağıyla kullanıcılara sunulduklarından dolayı İYM icat edildiğinden beri bu yakıtların kullanımı tercih edilmektedir. Ancak yukarıda bahsedilen avantajlarına rağmen fosil yakıtların neden olduğu küresel ısınma ve sınırlı rezervler ve aşırı fiyat artışları

alternatif yakıt arayışlarının hız kesmeden devam etmesine neden olmaktadır. Bu nedenle akla gelebilen her yakıt denenmekte ve fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltmasına çalışılmaktadır [27].

Evans ve Blaszczyk [28], çalışmalarında buji ateşlemeli motorlarda Doğalgaz ve benzin kullanılmasının motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkilerini ayrıntılı olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar tam yükte ve farklı kısmi yüklerde hava yakıt oranının geniş bir aralığında yapılmıştır. Doğalgaz kullanılması durumunda, gaz keleşinin konumuna bağılı olarak motor çıkış gücünde benzin kullanılmasına göre yaklaşık %12 lik bir düşme tespit edilmiştir. Motora verilen enerji esas alındığı zaman her iki yakıtın tam yükte eşit ısı verim verdiği gözlenmiştir. Fakir hava yakıt oranlarında, Doğalgazın fakir yanma sınırının geniş olması sebebi ile verimde artış gözlenmiştir. Özgül yakıt tüketimleri dikkate alındığında Doğalgazın benzinden %7-12 daha düşük olduğu görülmüştür. Doğalgaz için toplam hidrokarbon (HC) emisyonları tüm motor devirlerinde (1000, 2000 ve 3000 d/d) ve tam yükte benzinden elde edilen emisyonlardan yaklaşık %50 daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Mirza Jamil [29], yüksek lisans tezinde %100 metan (CH_4) ve 80/20 CH_4/H_2 karışımlarını incelemiştir. Deneysel çalışmada Nissan marka 510 tip, 1952 cm^3 silindir hacmine sahip, maksimum 92 BG güç üreten ve maksimum devir sayısı 5200 d/d, 85:0 mm çapında, 86:0 mm strok mesafesinde, sıkıştırma oranı 8.5:1 olan 4 silindirli bir motor kullanılmıştır. Bu çalışmada farklı eşdeğerlik oranları için alev ön genişleme oranı ve ateşleme zamanını incelemiş ve 0,535 eşdeğerlik oranında deneylerini gerçekleştirmiştir. Mirza Jamil [30] doktora tezinde, deneysel olarak buji ateşlemeli içten yanmalı motorlarda Doğalgaza %20 Hidrojen ilavesinin etkisini ve fakir yanma üzerine motor modifikasyonlarını incelemiştir. Deneysel çalışmada ilk önce 1,6 litre Toyota dört silindirli motor kullanılmıştır. Deneysel çalışmada saf metan ile saf metan Hidrojen karışımlarının (Hythane) ısı verim ve emisyonlar üzerine etkisi karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Bütün deneysel sonuçlar hafif yüklerde kentsel araçlarınkine benzer davranış sergilediğini gözlemiştir. Daha sonra 1,6 litre ön yanma odalı, ön yanma odasız ve yarı küresel yanma odalı, Toyota dört silindirli motorda saf metan ile saf metan Hidrojen karışımlarının ısı verim ve emisyonlar üzerine etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu araştırma, hythane yakıtının ısı veriminde önemli artışa neden olduğunu ve daha düşük karbon monoksit ve yanmamış hidrokarbon emisyonlarının elde edildiğini göstermiştir.

Shrestha [31], doktora tezinde Doğalgaz, Hidrojen ve bu iki gazın karışımını buji ateşlemeli bir motorun performans parametrelerini belirlemede kullanmıştır. Deneysel sonuçlarını, iki bölgeli bir model kullanarak tahmin etmeye, vuruntu olayı ve çevrimsel farklılıkları sunmaya çalışmıştır. Oluşturduğu model sayesinde motor performans parametreleri, vuruntu, yakıt hava karışımındaki her bir seyreltici etkisinin tahmin edileceğini göstermiştir. Model ve deneysel sonuçların tatmin edici sonuçlar verdiğini gözlemlemiştir.

Das ve ark. [32], çalışmalarında buji ateşlemeli motorda Hidrojen ve Doğalgazı incelemiştir. Deneyler tek silindri, 4 zamanlı, buji ateşlemeli, enjeksiyonlu bir motorda 2000, 2200, 2400 ve 2600 d/d motor devirlerinde yapılmıştır. Enjeksiyonlu sistemde optimum performansın her iki yakıt türü için 2000 d/d'da olduğu ve Hidrojen yakıtının kullanıldığı deneylerde özgül yakıt tüketiminin daha düşük değerlerde olduğunu gözlemlemiştir.

Huang ve ark. [33], çalışmalarında Doğalgaz ve Hidrojen karışımlarının motor performansı ve emisyonlar üzerine etkisini deneysel olarak incelemiştir. Doğalgaza Hidrojen ilave edilmesinin motorun daha geniş hava yakıt oranlarında çalışmasına olanak sağladığını gözlemiştir. Hidrojen oranı belli bir değerden (%20) daha fazla olduğu zaman motor çıkış gücü ve ısıl verim değerlerinde artış gözlenmiştir. Doğalgaza Hidrojen ilavesi HC ve CO₂ emisyonlarını azaltmış bununla birlikte NO_x emisyonlarını artırmıştır. Çalışmalarında İYM da fakir karışimli Doğalgaz Hidrojen kullanılması durumunda daha yüksek ısıl verim ve daha düşük emisyonlar elde edildiğini bulmuşlardır.

Dülger [34], %80 CH₄ ve %20 H₂ karışım yanmasını buji ateşlemeli motorda sayısal olarak incelemiştir. Swain ve ark. [35], aynı karışımı (%20 H₂-%80 CH₄) farklı motorlarda deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında Hidrojen metan karışımını hythane olarak nitelendirmişlerdir. İlk deneylerini Nissan marka, 2 litre silindir hacmine sahip, dört silindri bir motorda metan ile hythane yakıtının alev ilerleme oranındaki artışı ölçmüşlerdir. İkinci deneylerinde Toyota marka 1,6 litre silindir hacmine sahip dört silindri bir motorda metan ve hythane yakıtının emisyonlarını ve ısıl verimdeki değişimleri ölçmüşlerdir. Üçüncü deneylerinde ise Toyota marka 1,6 litre silindir hacmine sahip dört silindri motorda yarı küresel yanma odasında ön yanma oluşturarak ve ön yanmasız durumda emisyonları ve ısıl verimleri incelemiştir. İkinci ve üçüncü grup deneyler motor modifikasyonu yerine yakıtın değiştirilmesinin yararlı olacağını göstermiştir. Wallace ve Cattelan [36],

deneylerini, 6 silindirli, 4 zamanlı, su soğutmalı, çapı 89 mm, stroku 84 mm ve sıkıştırma oranı 8,8:1 olan bir motorda gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde yakıt olarak Doğalgaz ve 85/15 CH₄/H₂ karışımlarını kullanmışlardır. Deneylerde Doğalgaz Hidrojen karışımının özgül yakıt tüketim değerlerinin Doğalgazdan daha az olduğunu tespit etmişlerdir. Doğalgazdan elde edilen yanmamış hidrokarbon değerleri Doğalgaz Hidrojen karışımında elde edilen HC emisyonlarından daha yüksek elde edilmiştir. Fakat 85/15 CH₄/H₂ karışımının NO_x emisyon değerleri Doğalgaz'dan daha yüksek elde edilmiştir. Katalitik konvertör kullanılması durumunda NO_x emisyon değerlerinde azalma olacağı görülmüştür. Hoekstra ve ark [37], gücü 17 HP olan buji ateşlemeli bir motorda 1700 d/d'da 100/0, 89/11, 80/20, 72/28 ve 64/36 CH₄/H₂ yüzde karışımlarında ve değişik eşdeğerlik oranlarında deneyler yapmışlardır. Deneylerde emisyon parametrelerinden NO_x ve HC emisyonlarını ölçmüşler; artan eşdeğerlik oranlarında NO_x'in arttığını ve HC'in azaldığını bulmuşlardır. En düşük NO_x emisyonlarını %28 ve %36 CH₄/H₂ karışımlarında $\phi=0,625$ değerinde elde etmişlerdir. Blarigan ve Keller [38], 100/0, 70/30 ve 0/100 CH₄/H₂ karışımlarını, modifiye edilmiş Onan 0,491 litre, tek silindirli bir dizel motorda gerçekleştirmişlerdir. Deneylerinde yüksek sıkıştırma oranı (14:1), düz silindirli bir yanma odası ve iki ateşleme noktası kullanmışlardır. HAD modellemesini Los Alamos ulusal laboratuvarında KIVA kodu kullanarak yapmışlardır. Deneyler sonucunda düşük emisyon ve yüksek ısı verim değerleri elde etmişlerdir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

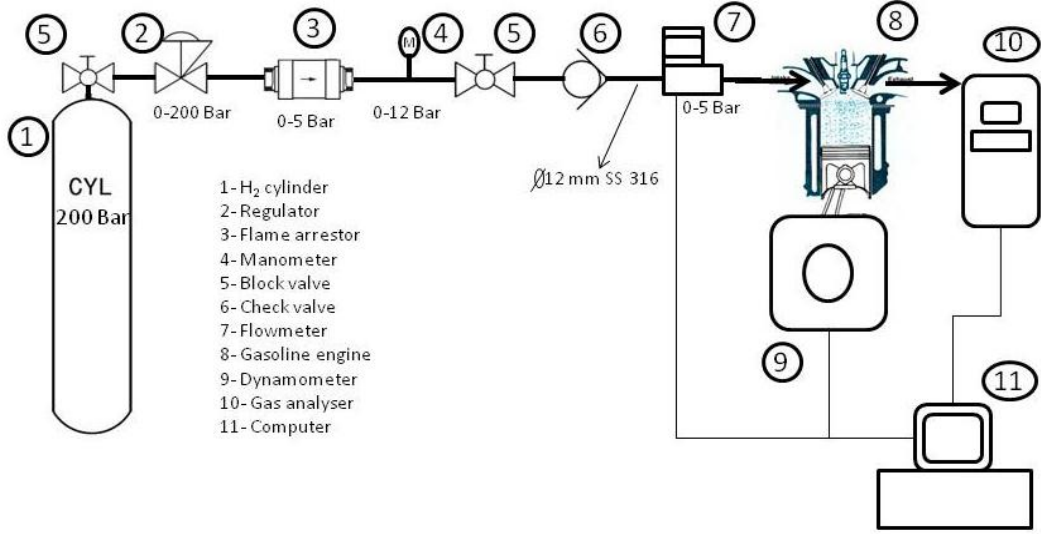
3.1. Deney Düzeneği ve Kullanılan Ölçü Aletleri

Deneylerde, motorun güç ve torkunu görmek için Baturalp - Tayland marka hydrokinetic dinamometre kullanılmıştır. Maksimum frenleme gücü 60 kW, maksimum devri 6000d/d 'dir. İçten yanmalı motorlara bağlanarak, motor gücünün ölçülmesinde kullanılır. Dinamometrenin yük ayarları değiştirilerek motor gücü hızla bağlı olarak çıkarılabilir. Emisyonların ölçümünde ise Sun MGA 1500 gaz analizörü kullanılmıştır.

Şekil 3.1'de deney düzeneği ve Şekil 3.2'de de düzeneğin şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 3.1. Deney düzeneği



1) Hidrojen tüpü; 2) Hidrojen regülatörü; 3) Alev tutucu; 4) Manometre; 5) Manuel küresel vana; 6) Emniyet vanası; 7) Kütleli debimetre; 8) Test motoru; 9) Dinamometre; 10) Gaz analizörü; 11) Bilgisayar

Şekil 3.2. Deney düzeneğinin şematik görünümü

3.2. Deney Motoru ve Modifikasyonlar

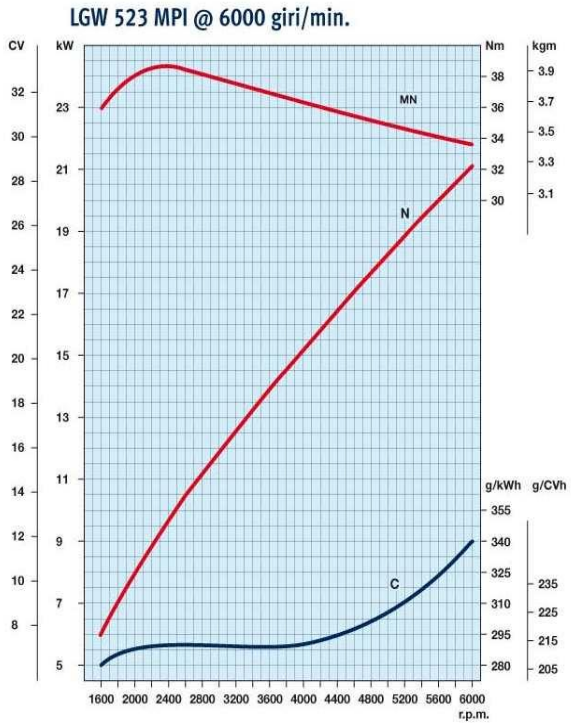
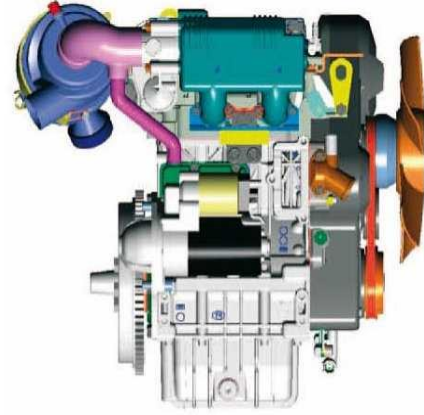
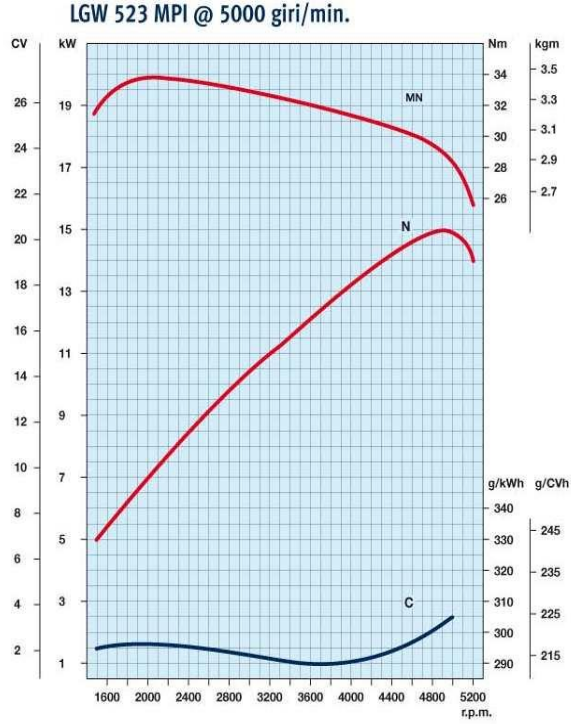
Deney Motoru iki silindirli, dört zamanlı, su soğutmalı, buji ateşlemeli Lombardini LGW 523 MPI model İtalyan menşeli bir motordur. Motorun teknik özellikleri Tablo 3.1'de, görüntüsü Şekil 3.3'de ve fabrika performans eğrileri de Şekil 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Motorun teknik özellikleri

Üretici firma	Lombardini LGW 523 MPI	
Silindir adedi	N.	2
Hacim	cm ³	505
Bore	mm	72
Stroke	mm	
Sıkıştırma oranı		10,7:1
Güç kW/HP @ 5000 N(80/1269/CEE)		15,0/20,4
Güç kW/HP @ 6000 N(80/1269/CEE)		21,0/28,5
Max. Tork 15kW	Nm	34,0@2150
Max. Tork 21kW	Nm	39,0@2200
Min. Hız	rpm	1100
Su ihtiyacı (5000 rpm)	l/min	75
Hava ihtiyacı (5000 rpm)	l/min	1100
Yağ kapasitesi	l	1,3
Motor bloğu ve pistonlar		Aluminyum
Homologasyonlar		EPA tier II,
Kuru ağırlık	kg	49



Şekil 3.3. Deney motoru



N	Power curve - 80/1269/CEE - ISO 1585 -
MN	Torque curve - (N curve)
C	Specific fuel consumption - (NB curve)

Şekil 3.4. Deney motoru fabrika performans eğrileri

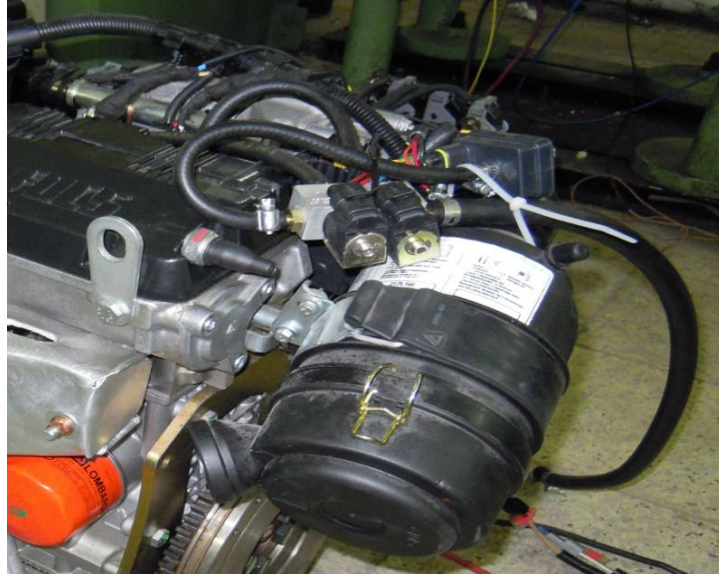
Lombardini motor, benzin yakıtı için özel olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu motorun Doğalgaz ve Hidrojen karışımları ile sorunsuzca çalışması için gaz besleme hattı ve motor kontrol ünitesinde bazı değişiklikler yapılması gerekmektedir. Şekil 3.5'de mekanik olarak yapılan değişiklikler görülmektedir. Yakıt kontrolü ve beslemesi ise sisteme NLP CNG gaz sistemleri dönüşüm kiti bağlanarak yapılmıştır.

Gaz gönderme zamanı ve süresi bu sistemin beyni üzerinden kontrol edilmiştir. NLP CNG gaz sistemleri dönüşüm kiti Şekil 3.6'da görülmektedir.



1) Orijinal yakıt hattı; 2) Benzin enjektörleri; 3) Gaz besleme hortumu; 4) Üç yollu pipo.

Şekil 3.5. Gaz ve benzin besleme hattı



Şekil 3.6. NLP CNG gaz sistemleri dönüşüm kiti

3.3. Egzoz Emisyon Cihazı

Egzoz emisyonlarının ölçümünde Sun MGA 1500 egzoz gaz analiz cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz CO, HC, NO, O₂, CO₂, gazlarını, AFR ve LAMBDA değerini infrared yöntemiyle ölçmekte ve yazıcısına aktarmaktadır. Cihazın girişinde cihaz koruma amaçlı iki yollu filtre bulunmakta ve filtreleri dolduğu veya hortumunun tıkanmış durumda az hava ikaz uyarısı vermektedir. Bu cihaz motorun egzozundan çıkan değişik gazların ölçümünü dijital olarak göstermektedir. Ölçüme başlanmadan önce cihaz açılarak hazır hale gelmesi beklenmelidir. Hazır hale geldikten sonra egzoz borusu çıkışına bir aparat yardımı ile cihazın egzoz girişi

bağlanmalıdır. Cihaz görünüşü Şekil 3.7 de, cihaz teknik özellikleri Tablo 3.2'de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.7. Sun MGA 1500 egzoz gaz analiz cihazı

Tablo 3.2. Sun MGA 1500 egzoz gaz analiz cihazı teknik özellikleri

PARAMETRE	ÖLÇME ARALIĞI	HASSASİYET
CO	0-15 %	0,001
HC	0-9999 ppm	1 ppm
NOx	0-5000 ppm	1 ppm
CO ₂	0-20 %	0,1 %
O ₂	0-25 %	0,01 %
LAMBDA	0,6-1,2	0,001

3.4. Kütleli Debimetre

Deneylerde, Doğalgaz ve Hidrojen gaz karışımlarının miktarını ölçmek için Doğalgaz ve karışımları için özel kalibre edilmiş IP65 standardına uygun Bronkhorst kütleli debimetre kullanılmıştır. Debimetre max 5 bar ve 1100 l/dak. gaz akışına kadar ROHS direktiflerine uygun olarak ölçüm yapabilmektedir. Debimetre için bir bilgisayar programı mevcut olup haberleşme RS232 ve standart 0-5 V ile yapılabilmektedir. Hattaki gaz akışını bilgisayar ekranından gerçek zamanlı olarak görmek mümkündür. Şekil 3.8'de debimetrenin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.8. Bronkhorst kütleli debimetre

3.5. Alev tutucu

Doğalgaz veya Hidrojen yakıt besleme hattı üzerinde güvenlik açısından olması gereken en önemli elemanlardan biri de alevin geri teperek tüplere ulaşmasını önleyen alev tutucu ve check valftir. Sistemde kullanılan alev tutucu Witt marka, max 5 bar'a kadar çalışabilen bir elemandır. Alev tutucunun görüntüsü Şekil 3.9'da görülmektedir.



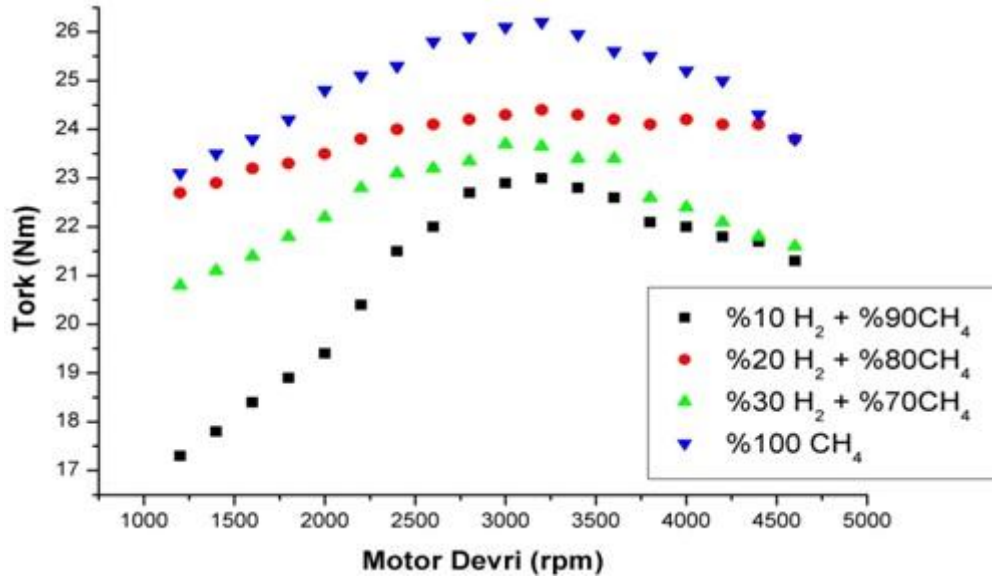
Şekil 3.9. Alev tutucu

4. BULGULAR

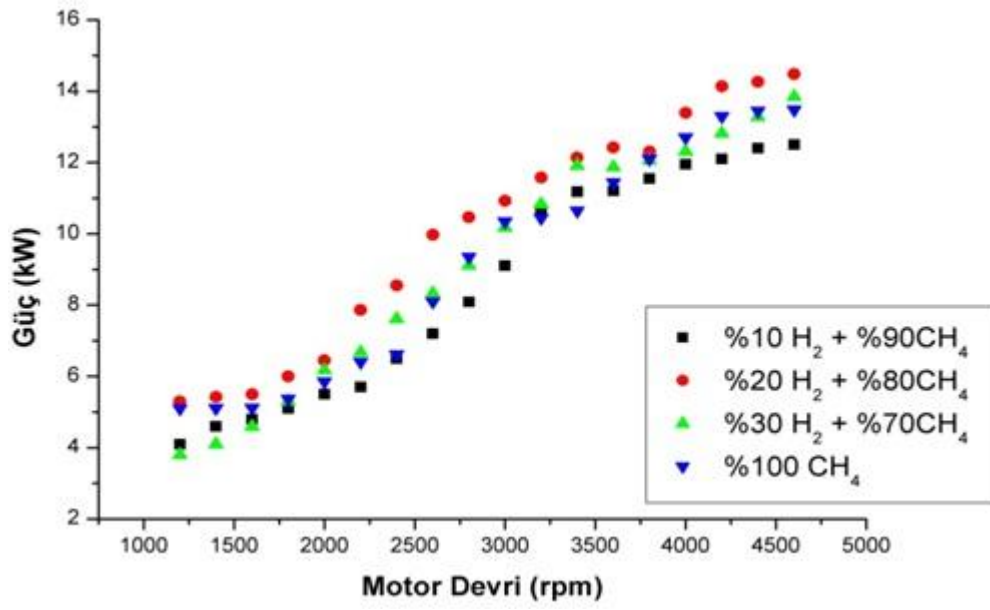
Deneyler %100 tam yükte, kelebek tam olarak açıkken gerçekleştirilmiştir. Lombardini LGW523 Motorun güç ve moment ve yakıt harcama eğrileri farklı oranlardaki Metan-Hidrojen karışımları (%100 CH₄, %10 H₂-%90 CH₄, %20 H₂-%80 CH₄ ve %30 H₂-%70 CH₄) ile elde edilmiştir. Emisyon grafikleri ise motor 2000 devirdeyken HFK'ya göre verilmiştir.

Deneyler sonucu elde edilen moment, güç ve yakıt eğrileri sırasıyla Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'de görülmektedir. Motor momenti artan devir sayısı ile artmış 3200 d/d maksimuma ulaştıktan sonra devir sayısının artması ile bir miktar azalma göstermiştir. Bunun sebebi motor devrinin artmasıyla sürtünmelerin artması ve emme supabının açık kalma süresinin azalması nedeniyle volumetrik verimin düşmesidir. Motor çıkış milinden alınan efektif gücü gösteren güç eğrisi, motor devri ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Motor devri arttıkça silindir içerisine alınan yakıt miktarının artması, efektif gücün artmasını sağlamaktadır. Moment ve güç eğrilerinden de görüleceği üzere Doğalgazın içine %20 Hidrojen ilavesi optimum moment ve güç alınmasını sağlamıştır.

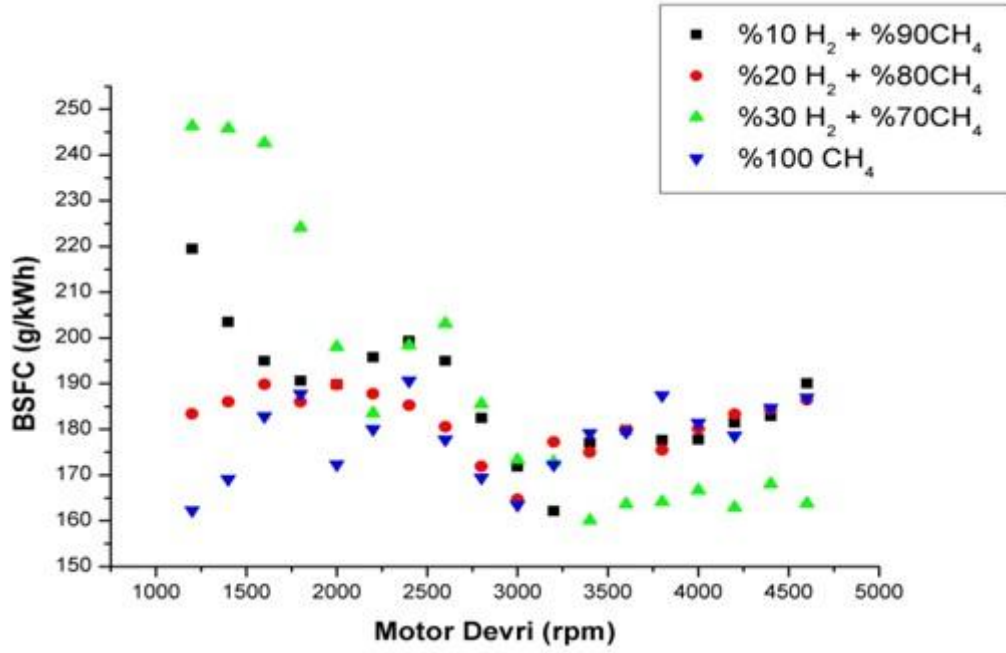
Yanma sonu elde edilen gücün bir bölümü egzoz gazlarına, bir bölümü soğutma sistemine ve ısı transferine harcanmasından dolayı yanma sonu elde edilen gücün tamamı kullanılamamaktadır.



Şekil 4.1. Motor momenti değişimi

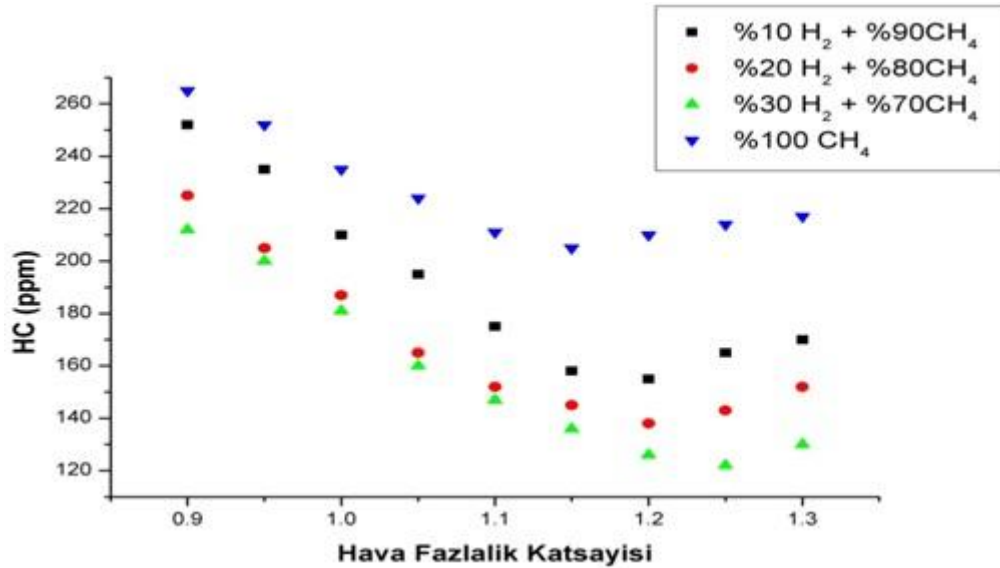


Şekil 4.2. Motor gücü değişimi



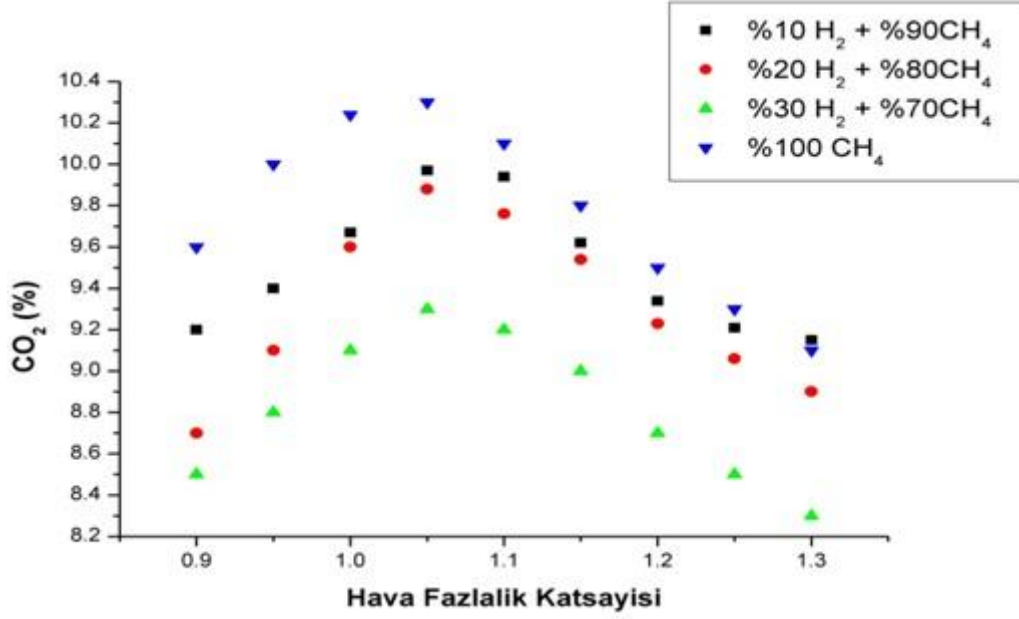
Şekil 4.3. Yakıt harcama grafiği

Şekil 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7'de, 2000d/d motor devrinde sırasıyla hava fazlalık katsayısına bağlı olarak HC, CO₂, CO ve NO_x emisyon değişimleri %100 CH₄, %10 H₂- %90 CH₄, %20 H₂- %80 CH₄ ve %30 H₂- %70 CH₄ karışımları için verilmiştir.



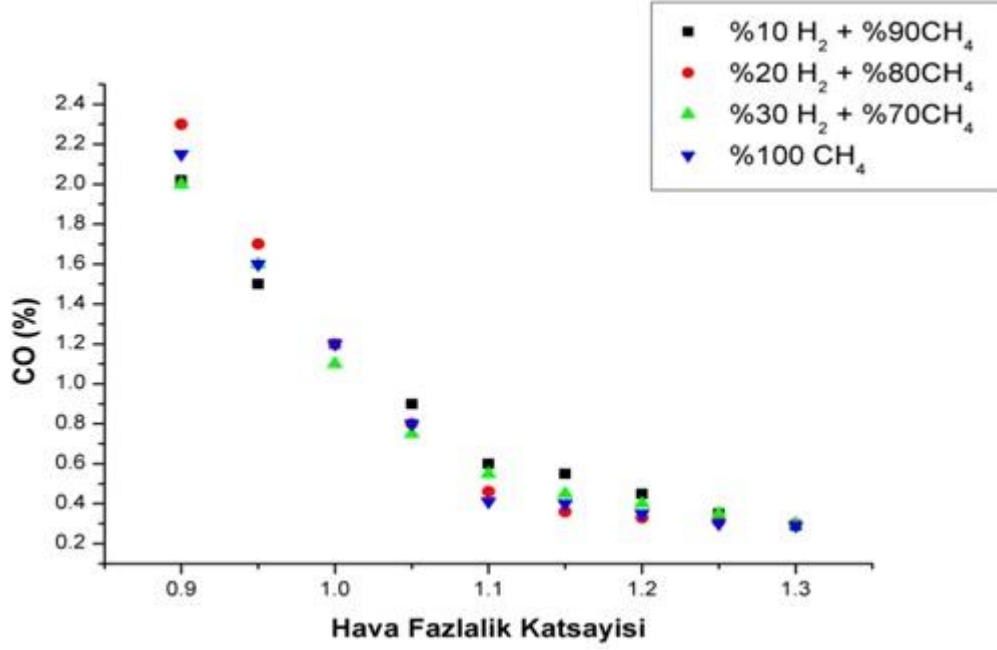
Şekil 4.4. HC emisyonlarının HFK'ya bağlı olarak değişimi

Şekil 4.4'de görüldüğü gibi; HC emisyonları, zengin karışımlarda tam yanma olamadığı için artmakta, karışımın fakirleştirilmesi ile de azalmaktadır. Ancak çok fakir karışımlarda yanma tekrar kötüleştiği için, motorun tasarımına da bağlı olarak belirli bir HFK değerinden sonra yanmamış HC'lar tekrar artış gösterebilmektedir.



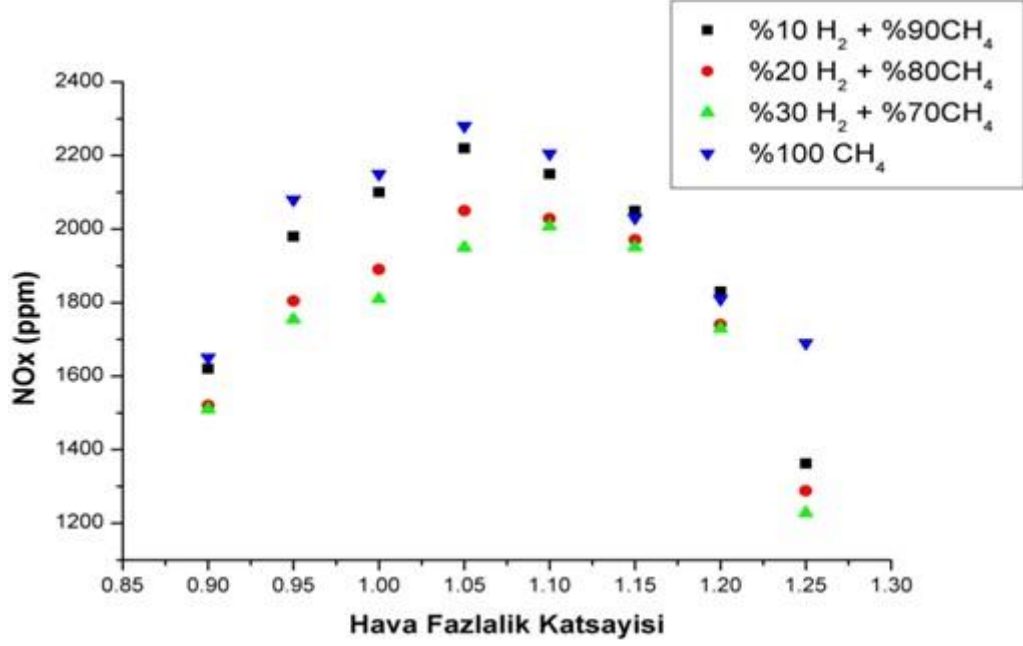
Şekil 4.5. CO₂ emisyonlarının HFK'ya bağlı olarak değişimi

Şekil 4.5'de görüldüğü gibi; CO₂ emisyonları HFK 0,95 ile 1,05 aralığına kadar artış göstermiş, 1,05 ile 1,1 aralığında maksimum noktaya ulaştıktan sonra HFK'nın artması ile azalma göstermiştir. Bunun nedeni, HFK=1 karışım bölgesi yakıtça zengin olup yeterli hava olmadığından CO₂ emisyon değerlerinde bir artışa neden olurken, hava fazlalık katsayısının artması ile yeterli oksijen miktarı sayesinde yanma tamamlanmakta ve CO₂ emisyon değerlerinde azalma görülmektedir. En yüksek CO₂ emisyonları %100 CH₄ yanmasında elde edilmiş Doğalgaza Hidrojen ilave edilmesi ile azalma göstermiştir. Bunun nedeni, Hidrojenin alev hızının ve ısı değerinin yüksek olması nedeni ile yanma olayının daha verimli olmasıdır.



Şekil 4.6. CO emisyonlarının HFK'ya bağlı olarak değişimi

Şekil 4.6'da görüldüğü gibi; tüm devirlerde aynı seyir izleyen CO emisyonları HFK 0,95 ile 1,1 aralığında azalma göstermiş, HFK 1,1'den sonra yaklaşık sabit kalmıştır. Bunun nedeni, yakıt hava karışımındaki hava fazlalığının tam yanma olayını etkilemesidir. Buna bağlı olarak fakir karışım olan bölgelerde CO emisyonunun mertebesi düşmektedir. CO emisyonunun ana nedeni, yanma sırasında yeterli havanın olmamasıdır. Az hava ile yanma durumunda yakıtın karbonunun tümü CO₂'ye dönüşmemekte ve CO olarak kalmaktadır. Motor devrinin artması ve Doğalgaza Hidrojen ilavesinin artması ile CO emisyon değerlerinde azalma görülmüştür. Doğalgaz ile Doğalgaza Hidrojen ilave edilmesi durumunda ise CO emisyonlarında azalma görülmüştür. Bunun nedeni, yanma reaksiyonun giren karbon miktarının azalması, Hidrojenin alev hızının ve ısıl değerinin yüksek olması nedeni ile yanma olayının daha iyi olmasıdır.



Şekil 4.7. NOx emisyonlarının HFK'ya bağlı olarak değişimi

Şekil 4.7'de görüldüğü gibi; NOx emisyonları HFK 0,9 ile 1,05 aralığına kadar artış göstermiş, 1,05 noktasında maksimuma ulaştıktan sonra HFK'nın artması ile azalma göstermiştir. HFK=1 karışım bölgesi, yakıtça zengin olup oksijence fakirdir bu da NOx emisyon değerlerinde bir artışa neden olmuştur. Hava fazlalık katsayısının artması ile yeterli oksijen miktarına ulaşılarak yanmanın daha verimli olması sağlanmış ve CO₂ emisyon değerlerinde azalma görülmüştür. En yüksek NOx miktarı %100 CH₄ yanması ile oluşmuştur. Bu miktar Metan içine Hidrojen ilave edilmesi ile azalma göstermiştir. Bunun nedeni, Hidrojenin alev hızının ve ısıl değerinin yüksek olması nedeni ile yanma olayının daha verimli ve tam olarak gerçekleşmesidir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında; farklı yüzde oranlarındaki Doğalgaz-Hidrojen karışımlarının içten yanmalı motorlarda alternatif bir yakıt olarak kullanılmasının motor performansına ve emisyonlarına etkileri, yakıtın avantajları ve kullanım zorlukları, motorlarda verimli olarak kullanılabilmesi için yapılması gereken modifikasyonlar anlatılmıştır. Tez çalışması dahilinde dört zamanlı, iki silindiri, su soğutmalı benzinli Lombardini LGW523 motoru, farklı oranlardaki Metan-Hidrojen karışımları (%100 CH₄, %10 H₂-%90 CH₄, %20 H₂-%80 CH₄ ve %30 H₂-%70 CH₄) ile tam yük altında test edilmiştir. Çalışmada güç, tork, yakıt harcama ve emisyon parametreleri (CO, CO₂ ve HC) deneysel olarak elde edilmiştir.

Çalışmada elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda verilmiştir:

- Deneysel çalışmada yapılan gözlemlerde, yüksek miktarda Hidrojen içeren yakıtta yanma işleminin daha kısa sürede gerçekleştiği ve bunun nedeni ise Hidrojenin alev hızının yüksek olması ve yanmayı hızlandırmasıdır.
- Doğalgaz-Hidrojen yakıt karışımındaki Hidrojen ilavesinin artması ile CO emisyonunun azaldığı ve NOx emisyonunun arttığı belirlenmiştir. Bunun nedeni Doğalgaz-Hidrojen karışimli yakıtın daha düşük karbon içermesinden dolayı saf metana göre daha az CO açığa çıkarmasıdır.
- Doğalgaz-Hidrojen yakıt karışımındaki Hidrojen ilavesinin artması ile CO₂ emisyonunun arttığı ve HC emisyonunun azaldığı belirlenmiştir.
- İçten yanmalı motorlarda, hacimsel olarak % 30 seviyelerinde Hidrojen içeren Doğalgaz-Hidrojen karışımlarının herhangi bir önemli değişikliğe ve düzenlemeye gerek kalmadan kullanılabileceği ve optimum Hidrojen miktarının da % 20 seviyelerinde olduğu belirlenmiştir.
- Doğalgaz-Hidrojen yakıt karışımı besleme basıncını arttırdığımızda motorda vuruntunun başladığı görülmüştür. Bunun sebebinin de basıncın artması ile birlikte zengin karışım oluşması ve alev hızının artmasıdır.

- Gelecek yıllarda yapılacak testlerde motor egzoz sıcaklığı ölçülerek motorun enerji analizleri yapılabilir.
- Motorun kendi ECU'su yerine ayarlanabilir bir ECU takılarak ateşleme ve püskürtme ayarlarında değişiklik yapılabilir. Böylece yanma daha da verimli hale getirilerek motordan alınan gücün artması sağlanabilir.
- Motor üzerinde vuruntu sensörü ve yanma odası içinde basınç sensörleri ile hidrojenin yanması grafiklere dökülerek gerektiğinde yanma odasında gerektiğinde ise enjeksiyonda değişiklikler yapılabilir. Bu değişikliklerin performansa etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Kahraman N., Akansu S. O., Otto Motorlarına LPG Dönüşümü Yapılmasının Ekonomik Analizi, *Niğde Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1997, **1**, 105-109.
- [2] Çeper B., Hidrojen-Doğalgaz Karışımlarının İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılması, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2009, 246124.
- [3] www.fuelcelltoday.com (Ziyaret tarihi: 15 Ekim 2011).
- [4] http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/alternatif_enerji/sudan_hidrojen_uretim_sektorü.htm (Ziyaret tarihi: 15 Ekim 2011).
- [5] Pulkrabek W. W., *Engineering Fundamentals of The Internal Combustion Engine*, Prentice Hall, New Jersey, 1997.
- [6] Büyüktür A. R., *Termodinamik Cilt 2*, Uludağ Üniversitesi Yayını, Bursa, 1991.
- [7] Borat O., Balcı M., Sürmen A., *Yanma Bilgisi*, TEKEV yayınları, İstanbul, 1992.
- [8] Çelik H. A., Motorlarda ve Motorlu Taşıtlarda Yakıt Ekonomisi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1987, 3063.
- [9] Detlef S., *Hydrogen and Fuel Cells Fundamentals, Technologies and Applications*, Wiley, Weinheim, 2010.
- [10] Bohacik T., Maria S. D., Travbridge C., Saman W., *Combustion Characteristic Of Electrolytically Produced Hydrogen-Oxygen Mixture*, SAE Papers, Warrendale, 1997.
- [11] Apostolescu N., Chiriac R., *A Study of Combustion of Hydrogen Enriched Gasoline In A Spark Ignition Engine*, SAE Papers, Warrendale, 1996.
- [12] Soruşbay C., Arslan E., Hidrojen yakıtlı içten yanmalı motorlarda yanma performansı, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 1988, **29**, 23-28.
- [13] Mirza J. Y., In cylinder flame front growth rate measurement of methane and hydrogen enriched methane fuel in a spark ignited internal combustion engine, Master Thesis, University of Miami, Miami, 1990.
- [14] Vorst V. W. D., Finegold J. G., Automotive Hydrogen Engines and Onboard Storage Methods, *Symposium on Hydrogen Energy Fundamentals*, Miami Beach, USA, 3-5 March 1975.

- [15] Glasson N., Lumsden G., Dingli R., Watson H., *Development of The Haji System For A Multi-Cylinder Spark Ignition Engine*, SAE Papers, Warrendale, 1995.
- [16] Kondo T., Lio S., Hiruma M., *A Study On The Mechanism Of Backfire in External Mixture Formation Hydrogen Engines*, SAE Papers, Warrendale, 1994.
- [17] Mirza J. Y., *Lean burn Natural Gas fueled engines: engine modification versus hydrogen blending*, Doctoral Thesis, University of Miami, Miami, 1993.
- [18] Hoekstra R. L., Collier K., Mulligan N., *Demonstration of hydrogen mixed gas vehicles*, *10th World Hydrogen Energy Conference*, Cocoa Beach, USA, 20-24 June 1994.
- [19] Ergeneman M., Soruşbay C., *Doğal Gazın İçten Yanmalı Motorlarda Kullanımı*, *Doğal Gaz Dergisi*, 1990, **6**, 17-22.
- [20] Özaktaş T., *Doğal Gaz ve Benzin Motorları Egzoz Emisyonları*, *Doğal Gaz Dergisi*, 1993, **28**, 90-95.
- [21] <http://www.westport.com/natural/Ing.php> (Ziyaret tarihi: 26 Aralık 2011).
- [22] Çetinkaya S., *Benzin ve Diesel Motorların Doğal Gaz Motoruna Dönüştürülmesi*, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 2004, **81**, 14-31.
- [23] Bayhan M., *Motorlu taşıtlarda yakıt olarak doğal gazın kullanılmasıyla egzost emisyonlarının azaltılması*, *Mühendis ve Makine dergisi*, 1992, **33**, 34-39.
- [24] Özaktaş T., Arslan E., Ergeneman M., Göktan A., Soruşbay C., *Doğal Gaz Motorları ve Otobüslerde Doğal Gaz Kullanımı*, *Termodinamik Dergisi*, 1994, **22**, 54-57.
- [25] *Sektörel Fuarcılık, Türkiye Enerji ajandası*, 2011.
- [26] Shudo T., Shimamura K., Nakajima Y., *Combustion and emissions in a methane DI stratified charge engine with hydrogen pre-mixing*. *JSAE Review*, 2000, **21**, 3-7.
- [27] Kahraman N., *Biodiesel ve Biodieselin Dizel Motorlarda Kullanılması*, *TMMOB Makine Mühendisleri Odası Kayseri Şubesi Makine Bülteni*, 2001, **24**, 38-41.
- [28] Evans R. L., Blaszczyk J., *A comparative study of the performance and exhaust emissions of a spark ignition engine fuelled by natural gas and gasoline*, *Sage Journals*, 1996, **211**, 39-47.
- [29] Mirza J. Y., *In cylinder flame front growth rate measurement of methane and hydrogen enriched methane fuel in a spark ignited internal combustion engine*, Master Thesis, University of Miami, Miami, 1990.
- [30] Mirza J. Y., *Lean burn Natural Gas fueled engines: engine modification versus hydrogen blending*, Doctoral Thesis, University of Miami, Miami, 1993.

- [31] Shrestha S. B., A predictive model for gas fueled spark ignition engine applications, Doctoral Thesis, University of Calgary, Calgary, 1999.
- [32] Das L. M., Gulati R., Gupta P. K., A comparative evaluation of the performance characteristics of a spark ignition engine using hydrogen and compressed natural gas as alternative fuels, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2000, **25**, 783-793.
- [33] Huang Z., Liu B., Zeng K., Huang Y., Jiang D., Wang X., Miao H., Experimental Study On Engine Performance and Emissions For An Engine Fueled With Natural Gas-Hydrogen Mixtures, *Energy and Fuels*, 2006, **20**, 2131-2136.
- [34] Dulger Z., Numerical modeling of heat release and flame propagation for methane fueled internal combustion engines with hydrogen addition, Doctoral Thesis, University of Miami, Miami, 1991.
- [35] Swain M. R., Yusuf M. J., Dulger Z., Swain M. N., *The effects of hydrogen addition on natural gas engine operation*, SAE Papers, Warrendale, 1993.
- [36] Wallace J. S., Cattelan A. I., Hythane and CNG fueled engine exhaust emission comparison, *10th World Hydrogen Energy Conference*, Cocoa Beach, USA, 20–24 June 1994.
- [37] Hoekstra R. L., Collier K., Mulligan N., Demonstration of hydrogen mixed gas vehicles, *10th World Hydrogen Energy Conference*, Cocoa Beach, USA, 20-24 June 1994.
- [38] Hoekstra R. L., Collier K., Mulligan N., Chew L., Experimental study of clean burning vehicle fuel, *International Journal of Hydrogen Energy*, 1995, **20**, 737–745.

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Gönen / Balıkesir’de Doğdu. İlk ve orta öğrenimini Gönen’de, liseyi Bursa Erkek Lisesi’nde tamamladı. 2006 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği’nden mezun oldu. 2007- 2009 arası Bursa Magneti Marelli MAKO fabrikasında Araç Farları ARGE mühendisi olarak görev yaptı. 2009’dan bu yana Birleşmiş Milletler Hidrojen Teknolojileri Araştırma Merkezi’nde proje mühendisi olarak görevine devam etmektedir.