



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİDROJENİN ÇİFT YAKIT MODUNDA İLAVESİNİN MOTOR PERFORMANS VE EMİSYON ÜZERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Hüseyin KÖSE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Eğitimi Anabilim Dalını

Ocak-2012
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

HİDROJENİN ÇİFT YAKIT MODUNDA İLAVESİNİN MOTOR PERFORMANS VE EMİSYON ÜZERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Hüseyin KÖSE

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Murat CİNİVİZ

2012, 81 Sayfa

Jüri
Doç. Dr. Hidayet OĞUZ
Doç. Dr. Ali KAHRAMAN
Yrd. Doç. Dr. Murat CİNİVİZ

İçten yanmalı motorlar özellikle taşıma ve tarım sektöründe günlük hayatımızın vazgeçilmez bir parçasıdır. Ancak mevcut petrol kaynaklarının azalması ve çevre sorunları alternatif enerji kaynaklarına eğilimi hızlandırmıştır. Bu bakımdan alternatif enerji kaynaklarından biri olan hidrojenin gelecekte bu problemleri çözebilecek enerji kaynağı olması beklenmektedir. Bu kapsamda sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda, tam yükte farklı motor devirlerinde ilave yakıt olarak hidrojen kullanımının motor performans parametreleri ve egzoz emisyonlarına etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla sıkıştırma oranı 17/1 olan 4 silindirli, 4 zamanlı, turbo şarjlı, motor hacmi 3.908 litre olan direk enjeksiyonlu bir sıkıştırma ile ateşlemeli (CI) motor kullanılmıştır. Dizel yakıt yanma odasına doğrudan enjekte edilirken, emme manifolduna %2.5, %5, %7.5 oranında hidrojen ilave edilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; tüm hidrojen ilave oranlarında motor momenti, motor gücü, motor termik verimi azot oksit ve egzoz gazı sıcaklıklarında artış meydana gelirken, hidrokarbon (HC), karbondioksit(CO) ve oksijen (O_2) miktarında ise azalma meydana gelmiştir. Motor moment değeri 1250 d/dk'deki %7.5 hidrojen ilave oranında standart dizel çalışmasına göre %8.3 artış gösterirken, motor gücü değeri 2250 d/dk'da %7.5 hidrojen ilave oranında % 17 oranında artış göstermiştir. Motor termik verimi %2,5 hidrojen ilave oranında %24 artış göstermiştir. En düşük CO, CO_2, HC ve NO_x emisyonları standart dizel çalışmasına göre sırasıyla 2250 d/dk'da %0.013 ile %2.5 hidrojen ilave oranında, 2500 d/dk'da % 7.46 ile %7.5 hidrojen ilave oranında, 1250 d/dk'da 10 ppm ile %2.5 hidrojen ilave oranında ve 1000 d/dk'da1092 ppm ile %7.5 hidrojen ilave oranında elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alternatif enerji kaynağı, emisyon, hidrojen, sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar,

ABSTRACT

MASTER THESIS

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF EFFECT ON ENGINE PERFORMANCE AND EMISSION OF ADDITION AT DUAL FUEL MODE OF HYDROGEN

Hüseyin KÖSE

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL EDUCATİON

Advisor: Assist. Prof. Murat CİNİVİZ

2012, 81 Pages

Jury
Assoc. Prof. Dr. Hidayet OĞUZ
Assoc. Prof. Dr. Ali KAHRAMAN
Assist .Prof. Dr. Murat CİNİVİZ

Internal combustion engines are an indispensable part of our daily life, particularly in transportation and agriculture sectors. However, the reduction of petroleum resources and environmental problems are leading to an increasing trend towards alternative energy sources. In this regard, hydrogen usage is expected to be a solution for previously mentioned problems as one of the renewable energy resources. In this concept, effects of hydrogen as an additional fuel used in a compression ignition engine at full load and different engine speeds an internal combustion engine performance and exhaust emissions parameters investigated. For this purpose, a compression ignition engine (CI) with 17/1 compression ratio, 4 cylinders, 4 stroke, turbocharger and 3.908 litter engine volume was used. While diesel fuel was injected directly to combustion chamber, hydrogen was added to inlet manifold at rates of 2.5%, 5% and 7.5% as the volume

As the results from this experimental study, an increase in engine torque, power, thermal efficiency, nitrogen oxides and exhaust gasses temperatures were acquired at every hydrogen addition ratios while a decrease in hydrocarbons (HC), carbon monoxide (CO) and oxygen (O_2) emissions were attained. While engine torque exhibited an increase at a rate of 8.3% comparing with standard diesel operation at 1250 min^{-1} and 7.5% hydrogen addition ratio, engine power increased 17% at 2250 min^{-1} engine speed and 7,5% hydrogen addition ratio. Engine thermal efficiency showed an increase at a rate of 24% at 2.5% hydrogen addition ratio. The lowest CO, CO_2, HC and NO_x emission values were obtained at 2250 min^{-1} engine speed and 2.5% hydrogen addition ratio as 0.013%, 2500 min^{-1} engine speed and 7.5% hydrogen addition ratio as 7.4%, 1250 min^{-1} engine speed and 2.5% hydrogen addition ratio as 10 ppm and 1000 min^{-1} engine speed and 7,5% hydrogen addition ratio as 1315 ppm respectively comparing with standard diesel operation.

Keywords: Alternative energy resource, compression ignition engine, emission, hydrogen,

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans çalışma konusunu seçmemde, yürütülmesinde, sonuçlandırılmasında ve sonuçlarının değerlendirilmesinde maddi ve manevi destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Murat CİNİVİZ'e sonsuz teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında yakın ilgi ve desteklerini gördüğüm ve bütün çalışmam süresince bilgilerinden istifade ettiğim çalışma arkadaşlarım, Arş. Gör. Soner ŞEN, Arş. Gör. Eyüb CANLI, Arş. Gör. Özgür SOLMAZ, Arş. Gör. Dr. A. Engin ÖZÇELİK, Arş. Gör. Cihat NAZİK, Arş. Gör. M. Turan DEMİRCİ, Öğr. Gör. Fatih AYDIN ve diğer tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim. Ayrıca labaratuvar çalışmalarımda yardımcı olan teknisyenler Eyüb UYSAL ve Hüseyin AKGÜL'e teşekkür ederim.

Maddi ve manevi olarak beni sürekli ve sabırla destekleyen, bugünlere gelmemi sağlayan annem Faika KÖSE'ye, kız kardeşim Leyla KÖSE'ye abim Murat KÖSE'ye teşekkür ederim. Ayrıca yaptığım bu tez çalışmasını hayat kaynağım ve bugünlere gelmemde öncü olan, trafik kazasında hayatını kaybeden ablam Aysel KÖSE' ye ithaf ediyorum.

Hüseyin KÖSE
KONYA–2012

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **ix**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Hidrojenin Genel Özellikleri 3
1.2. Hidrojenin Üretimi 4
1.2.1. Foto biyolojik yöntem kullanılarak hidrojen üretimi 6
1.2.2. Foto elektrokimyasal yöntem kullanılarak hidrojen üretimi 6
1.2.3. Termokimyasal yöntem kullanılarak hidrojen üretimi 6
1.2.4. Elektroliz ile hidrojen üretimi 7
1.2.5. Buhar yapılandırılma yöntemi kullanılarak hidrojen üretimi 8
1.3. Depolama Yöntemleri 8
1.3.1. Sıkıştırılmış gaz olarak depolama 9
1.3.2. Metal hidrit sistemi ile depolama 10
1.3.3. Nanotüplerde depolama 11
1.4. İçten Yanmalı Motorlarda Hidrojenin Yakıtı Olarak Kullanılması 14
1.4.1. Yakıt olarak hidrojenin yanma karakteristiği 14
1.4.2. Stokiyometrik hidrojen/hava karışımı için teorik hava yakıt oranı 16
1.4.3. Hidrojenin sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda direk yakıt olarak kullanılması 18
1.4.4. Hidrojenin sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda ikincil yakıt olarak kullanılması 19
1.4.5. Hidrojenin içten yanmalı motorlarda adaptasyon teknikleri 20
1.4.6. Hidrojenin içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılmasının avantajları ve dezavantajları 24
1.4.7. Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanımında karşılaşılan sorunlar 25
1.4.8. Hidrojenin emisyonlara etkisi 28
1.4.9. Hidrojen motorunda güç, volümetrik verim ve termik verim 29

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **31**

2.1. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda yapılan çalışmalar 31
2.2. Buji ile ateşlemeli motorlarda yapılan çalışmalar; 36

3. MATERYAL VE METOT **42**

3.3. Deney Düzeneğinde Kullanılan Cihaz ve Ekipmanlar 45
3.3.1. Hidrolik dinamometre ve motor yükünün ölçülmesi 45
3.3.2. Termal kütlesel akış ölçer ve entegre akış kontrolörü ile yakıt miktarının ölçülmesi 47
3.3.3. Egzoz emisyonlarının ölçülmesi 49

3.3.4. Hava ve yakıt miktarı ölçülme düzeneği 50
3.3.5. Hidrojen tüpü, alev geri tepme valfi, basınç regülâtörü 51
3.4.Motor Karakteristiklerinin Belirlenmesi 51
3.4.1. Motor momenti ve efektif güç 51
3.4.2. Özgül yakıt tüketimi 52
3.4.3. Volümetrik verim ve termik verimin hesaplanması 53
3.4.4. Hidrojen zenginleştirme oranının tayini 54
3.4.5. Hava fazlalık katsayısı (HFK) ve eşdeğerlik oranının hesaplanması 54
3.4.6. Hava debisinin ölçülmesi 55

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA 56

4.1. Motor Performansları 56
4.1.1. Motor tork değerlerinin karşılaştırılması 56
4.1.2. Motor gücü değerlerini karşılaştırılması 57
4.1.3. Motor özgül yakıt tüketiminin karşılaştırılması 58
4.1.4. Motor volümetrik verimin karşılaştırılması 59
4.1.5. Motor termik verimin karşılaştırılması 60
4.1.6. Hava fazlalık katsayısı ve eşdeğerlik oranının karşılaştırılması 62
4.2. Egzoz Emisyonları 63
4.2.1. Karbon monoksit emisyonları 63
4.2.2. Karbondioksit emisyonları 65
4.2.3. Hidrokarbon emisyonları 66
4.2.4. Azot oksit emisyonları 67
4.2.5. Egzoz gaz sıcaklığı 68
4.2.6. Oksijen emisyonu 69

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 71

5.1. Sonuçlar 71
5.2. Öneriler 75

KAYNAKLAR 76

ÖZGEÇMİŞ 81

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

B	:	Yakıt tüketimi(kg/saat)
b	:	Moment kol uzunluğu (m)
be	:	Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)
c	:	Temel katsayı
D	:	Orefiz öncesi çap (mm)
d	:	Orefiz çapı (mm)
E	:	Hız yaklaşım faktörü
H_u	:	Yakıtın alt ısıl değeri (MJ/kg)
h	:	Orefiz uçlarındaki basınç farkı mmH_2O
L	:	Silindire alınan hava miktarı (lt/dak.)
M_e	:	Moment (Nm)
m_y	:	Yakıtın kütlesel debisi (kg/s)
P	:	Ortamın mutlak basıncı (Paskal)
Q	:	Akışkanın debisi (lt/dak)
Z_R	:	Reynolds sayısı düzeltme faktörü
Z_D	:	Boru ölçüsü düzeltme faktörü
ΔV	:	Tüketilen yakıt miktarı (hacimsel)(ml)
w	:	Açısal hız (rad/s)
η_v	:	Volümetrik verim
η_t	:	Termik verim
ρ_y	:	Yakıtın yoğunluğu (kg/m^3)
μ	:	Mutlak viskozite, poise (g/cms)
ρ_h	:	Havanın yoğunluğu (kg/m^3)
ϵ	:	Genişleyebilme faktörü
φ	:	Eşdeğerlik Oranı

Kısaltmalar

ART	:	Katolitik kısmı oksidasyon
BSN	:	Bosch duman sayısı
CI	:	Sıkıştırma ile ateşlemeli motor
CO	:	Karbon monoksit
CO_2	:	Karbon dioksit
EGR	:	Ekzoz gaz resürkülasyonu
UV	:	Mor ötesi ışınlar
HFK	:	Hava fazlalık katsayısı
HPDI	:	Yüksek basınçlı direk enjeksiyon
GTDC	:	Üst ölü nokta gaz değişimi
KMA	:	Krank mili açısı
LPDI	:	Düşük basınçlı direk enjeksiyon
NO_x	:	Azot oksit
PO_x	:	Non-katolitik kısmı oksidasyon
SR	:	Katolitik buhar yapılandırma sistemi
ÜÖN	:	Üst ölü nokta
ÜÖNÖ	:	Üst ölü noktadan önce
H/Y	:	Hava/Yakıt

1. GİRİŞ

Enerji ihtiyacı, dünyada ekonomik gelişmeler ve artan nüfus nedeniyle günden güne artmaktadır. Bunun doğal sonucu olarak tüm dünyada enerji kaynaklarına olan ihtiyacı aynı oranda artmaktadır. Bu nedenle sanayileşmiş ve sanayileşmekte olan ülkeler enerji ihtiyaçlarını karşılamak amacı ile çevreyi en az etkileyen ve enerji ihtiyaçlarını karşılayabilecek yeni enerji kaynaklarına yönelmektedirler. Bununla birlikte, enerji ihtiyacı ülkelerin gelişmişliğine, yaşam standartlarına, teknolojik gelişmelerine, iklim şartlarına vb. ile bağlı olarak değişmektedir. Enerji üretiminde mümkün olduğu kadar yerel kaynakların kullanılması, bunun yanında ülkenin enerji gereksinimi karşılanırken çevre bilincinin korunmasına özen gösterilmesi, verimliliğin artırılması, kaynak çeşitliliğinin ve sürekliliğinin sağlanması da önem kazanmaktadır. Enerji politikalarında temel alınması gereken unsur; teknolojik ve sosyal gelişmeyi destekleyecek şekilde enerji ihtiyacını karşılayan, güvenilir, kaliteli, temiz, taşınması kolay ve yenilenebilir enerji kaynakları olarak anılan çevre dostu enerji türlerine yönelmektir (İçingür ve Yamık, 2003).

Son yüz-yüz elli yılı dikkate aldığımızda ise; kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil kökenli yakıtlar enerji ihtiyacına temel kaynak rolü üstlenmişlerdir. Fakat bu yakıtların aşırı kullanımı sonucu yakıtların kaynaklarının azalmasına ve çevreyi etkileyen zararlı atıkların ekolojik dengeyi bozmasına sebep olmuştur. Bu yüzden araştırmacılar, ekonomik, çevreye zarar vermeyen, ucuz, güvenli yakıtların kullanılması ve geliştirilmesi çalışmalarına yönlenmişlerdir (Batmaz, 2006). Bu anlamda bugüne kadar; güneş, rüzgâr, metanol, hidrojen, biyokütle, jeotermal ve okyanus termal enerjisi vb. gibi alternatif enerjilere yönelik bir eğilim oluşmaktadır. Bu yakıtların en büyük ortak özellikleri çevreyi kirletmeyen ve yenilenebilir özelliğe sahip olmalarıdır.

Çevre kirliliğine neden olan en büyük etkenlerin başında içten yanmalı motorlar gelmektedir. Yapılan araştırmalara göre, fosil yakıtların yanması sonucu açığa çıkan karbon monoksit, hidrokarbon ve azot bileşiklerinin yarısı, benzin ve dizel motorlarından kaynaklanmaktadır. Kükürt dioksit, kurşun, kurum gibi artıklar da yine motorlu taşıtların etrafa yaydığı zararlı maddelerdendir. Özellikle dizel motorları kükürt dioksit ve kurumun en başta gelen üreticisidir (Birsen, 2008). Bu egzoz emisyonlarını azaltmak için üç yollu katalitik konvektörler geliştirilmiştir. Ayrıca son yıllarda artan taşıt sayısı ile birlikte etkin hale gelen hava kirliliğini azaltmak amacıyla daha az kirletici emisyon çıkaran alternatif yakıtlara eğilimi artırmıştır. Özellikle motor ve araç

teknolojisi açısından alternatif olarak seçilen yakıtın içten yanmalı motorlarda kullanımı, depolanması, doğal dengenin korunması ve fosil yakıt türleri ile rekabet edebilir özelliğe sahip olması gerekir. Kullanılacak alternatif yakıtların, yenilenebilir kaynaklardan üretilmesi, mevcut teknolojide önemli bir yapısal değişiklik getirmeden doğrudan kullanılabilmesi, ucuz ve bol miktarlarda üretilebilmesi, ısıl değerlerinin yüksek olması, kolayca depolanabilmesi ve taşınabilmesi, yüksek sıkıştırma oranlarında çalışmaya olanak vermesi ve düşük düzeylerde egzoz emisyonu oluşturması büyük önem taşımaktadır (Çeper, 2009; Akansu, 2007). Bu bakımdan yakıt olarak hidrojen, düşük kirletici emisyon potansiyeli ve bol miktarda rezerve sahip olması nedeniyle günümüzde büyük önem kazanmanın yanında geleceğinde muhtemel yakıtı olacaktır. Ayrıca enerji politikası uzmanlarına göre; önümüzdeki yıllarda taşımacılık sektöründe hidrojenin içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanımı daha büyük bir olasıdır.

Hidrojenin bulunabilirliği, yüksek enerji bileşiğine sahip olması, minimum emisyon miktarı, kolay ve güvenli depolanması ve taşınması gibi avantajları ile içten yanmalı motor yakıtı olarak bazı temel kriterleri yerine getirmektedir. Hidrojenin yakıt olarak kullanılmasında fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak önemli avantajlar sağlamaktadır. Özellikle karbon esaslı olmayan hidrojen, yanma sonucunda yanma ürünü olarak su oluşturan ve çevre dostu olan yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Hidrojen-hava karışımının geniş alevlenme limitine sahip olması, motorun fakir karışım oranlarında, yüksek ısıl verimde ve düşük emisyon değerlerinde bir gaz kelebeği olmaksızın çalışmasını mümkün kılmaktadır. Bu durum, pompalama kayıplarının azalmasına ve motorun kısmi yüklerde çalışması durumunda, termik verimin artmasına neden olmaktadır. Hidrojenin yüksek yanma hızı, yanmanın neredeyse sabit hacimde tamamlanmasına sebep olmakta ki bu durum termodinamik açıdan iyi bir yanmayı temsil etmektedir. Hidrojenin kendi kendine tutuşma sıcaklığı oldukça yüksek olması, son gaz bölgesinde kendi kendine tutuşma olmaksızın, motorun kısmen yüksek sıkıştırma oranında çalışmasına olanak sağlamaktadır. Kısmen artırılabilen sıkıştırma oranı, motorun termik verimi ile gücünde bir artışa sebep olacaktır (Gürbüz, 2010). Ayrıca yakıt olarak hidrojeni kullanan motorlarda hidrokarbon ve karbon monoksit gibi egzoz emisyonları yok denecek kadar az düzeydedir. Çünkü hidrojen motorlarında tek karbon kaynağı yağlama yağı iken kirletici emisyon kaynağı ise yüksek sıcaklıklarda oluşan azot oksitlerdir.

Yapılan bu tez çalışmasında; yakıt olarak hidrojen-motorinin kullanıldığı dört silindirli, 4 zamanlı su soğutmalı, turbo şarjlı, direk enjeksiyonlu, 3.908 litre süpürme

hacmine sahip bir motor kullanılmıştır. Hidrojen % 2.5, %5, %7.5 oranlarında emme manifoltuna karbürasyon sistemi kullanılarak gönderilmiştir. İlave edilen hidrojen yakıtının motor gücüne, motor torkuna, özgül yakıt tüketimine, motor termik verimine, volümetrik verime ve azot oksit (NO_x), karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO_2), hidrokarbon (HC) gibi egzoz emisyonlarına etkisi incelenmiştir. Bu sonuçlar standart motorin yakıtı ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak grafikler halinde sunulmuştur.

1.1. Hidrojenin Genel Özellikleri

Doğadaki en hafif element olan hidrojen, 1766 yılında İngiliz bilim adamı Sir Cavendish tarafından keşfedilmiştir. Renksiz, kokusuz, tatsız ve saydam bir yapı sergileyen hidrojen periyodik tabloda "H" sembolü ile ifade edilir. Atom ağırlığı 1.00797 kg/kmol ve atom sayısı 1 olan elementtir. Hafif olması nedeniyle yeryüzünde serbest halde çok az bulunur. Görünmez ve kokusuz bir gaz olan hidrojene yeryüzünde diğer elementlerle bileşik yapmış halde rastlanır. 0 $^{\circ}$C'deki yoğunluğu 0,08987 kg/m^3 ve havaya göre özgül ağırlığı (Hava =1) 0,0695'dir. Hidrojenin yanma ısısı oldukça yüksektir ve zehirli etkisi yoktur. Yanma sonucunda ise sadece su buharı meydana gelir. Hidrojen sıvılaştırılması oldukça güç olan bir elementtir. Yaklaşık olarak 20 K sıcaklıkta ve 2 bar basınçta sıvı faza geçer. Oldukça iyi bir ısıl iletkendir (Birsen, 2008). Hidrojenle ilgili bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 1.1.'de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Hidrojenin genel özellikleri (Veziroğlu, 1998)

Özellikleri	**Değeri**	**Birim**
Molekül Ağırlığı	2.016	g/mol
Yoğunluğu(20 °C)	0.0838	kg/m^3
Üst Isıl Değer (Kütlesel)	141.9	MJ/kg
Üst Isıl Değer (Hacimsel)	11.89	Mj/m^3
Alt Isıl Değer (Kütlesel)	119.9	MJ/kg
Alt Isıl Değer (Hacimsel)	10.05	Mj/m^3
Kaynama Sıcaklığı	20.3	K
Sıvı Yoğunluğu	70.8	kg/m^3
Kritik Noktadaki Sıcaklık	32.94	K
Kritik Noktadaki Basınç	12.84	Bar
Kritik Noktadaki Yoğunluk	31.40	kg/m^3
Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı	858	K
Havada Tutuşma Limitleri	4-75	% Hacimsel
Havadaki Stokiometrik Karışım	34.3	% Hacimsel
Havadaki Alev Sıcaklığı	2318	K
Difüzyon Katsayısı	0.61	cm^2/s
Özgül Isısı	14.89	KJ/kgK
Minimum Ateşleme Enerjisi	0.02	mJ

Hidrojen yeryüzündeki saf halde bulunmayan diğer elementlerle karışım halinde bulunan kolay taşınabilen, tükenmez, yenilenebilir, depolanması mümkün olan, ekonomik şekilde üretilebilir, en az kirlilik oluşturan, birincil enerji kaynaklarına bağımlı olmayan bir elementtir. Hidrojenin doğada bulunan metan, kömür ve petrol gibi kaynakların içerisinde karbon elementi ile bileşik bir yapıda bulunmaktadır. Ayrıca hidrojen canlı ve büyümekte olan bitki türü maddelerde de bulunur. Hidrojenin yüksek alevlenme hızı ve geniş tutuşma aralığı, hafifliği ve yakıt olarak ideal özellikleri nedeniyle taşıtlar için iyi bir yakıttır. Hidrojenin motorlarda yakıt olarak kullanımında avantaj sağlayacak en önemli özelliklerden biride tutuşma sınırlarının çok geniş yakıt karışım oranlarına uzanmasıdır.

1.2. Hidrojenin Üretimi

Hidrojen sentetik bir yakıt olup, üretiminde tüm enerji kaynakları kullanılabilmektedir. Hidrojen kömür ve doğal gaz gibi sınırlı rezerve sahip olan fosil yakıtlardan, güneş enerjisi ve nükleer enerjiden, su, hava gibi kaynaklardan da elde edilebilir. Ancak, sayılan bu kaynaklardan kömür ve doğal gaz fosil yakıt olup, sınırlı bir rezerve sahiptir. Ayrıca fosil yakıtların giderek tükenmekte olması, hidrojen üretiminde geniş kaynaklara sahip olan suyun kullanımını daha avantajlı hale getirmektedir. Her türlü birincil enerji kaynağı yardımıyla üretilen hidrojen, günümüzde suni gübreden, nebati yağlara, oradan roket yakıtlarına kadar çeşitli alanlarda kullanılmakta ve şu anda dünyada her yıl yaklaşık 50 milyon ton (500 milyar m^3) hidrojen üretilmekte, depolanmakta, taşınmakta ve kullanılmaktadır. En büyük kullanıcı payına kimya sanayi, özellikle petrokimya sanayi sahiptir. Dünya genelinde bir yılda üretilen hidrojenin sektörlerde kullanım miktarları Çizelge 1.2.'de verilmiştir.

Çizelge 1.2. Dünya genelinde bir yılda üretilen hidrojenin sektörlerde kullanım miktarları (Anonim, 2011a)

Sektör	Yıllık kullanım miktarı (m^3)
Suni Gübre Sanayi	25,000
Bitkisel Yağ (margarin) Üretimi	16,000
Rafineriler	1,200
Petrokimya Endüstrisi	30,000
Hidrojen Hayvansal Yağ Üretimi	200-300
Gaz veya Sıvı Hidrojen Üretimi	6,000

Hidrojen üretimi oldukça geniş ve büyüyen bir endüstridir. Tüm dünyada, 2004 yılında üretilen toplam hidrojen 50 milyon tondur ve bu üretilen hidrojenin petrol cinsinden karşılığı 170 milyon tondur. Hidrojen üretimi için en uygun kaynaklar hidrokarbon içeren yakıtlar ve sudur. Günümüzde hidrojen üretiminin %48'i doğal gazdan, %30'u ham petrolden, %18'i kömürden ve %4'ü suyun elektroliz yolu ile ayrıştırılmasıyla üretilmektedir (Anonim, 2011b). Üretilen hidrojen ısıl, kimyasal ve biyolojik olmak üzere üç ana yöntem kullanılarak elde edilir. Çizelge 1.3.'de hidrojen üretim yöntemleri verilmiştir.

Çizelge 1.3. Hidrojen üretim yöntemleri (Apak ve ark., 2009)

Yöntem	Metot	Kaynak	Enerji	Emisyon
Isıl	Buharlı dönüşüm	Doğalgaz	Yüksek sıcaklıkta buhar	Karbondioksit, Karbon monoksit
	Termokimyasal su ayrışımı	Su	Nükleer reaktörlerden elde edilen yüksek sıcaklık	Yok
	Gazifikasyon	Kömür, biyo- kütle	Yüksek sıcaklık ve basınçta su buharı ve oksijen	Karbondioksit, Karbon monoksit
	Proliz	Biyo-kütle	Orta sıcaklıkta su buharı	Karbondioksit, Karbon monoksit
Elektro-Kimyasal	Elektroliz	Su	Elektrik (rüzgâr, güneş, nükleer)	Yok
	Elektroliz	Su	Elektrik (kömür, doğalgaz)	Elektrik üretiminden kaynaklanan emisyon
Biyolojik	Foto elektrokimyasal	Su	Güneş ışığı	Yok
	Foto biyolojik	Su ve alg bakterisi	Güneş ışığı	Yok
	Oksijensiz sindirim	Biyo-kütle	Yüksek ısı	Az
	Fermantatif mikro Organizmalar	Biyo-kütle	Yüksek ısı	Az

Bu üretim yöntemleri üzerinde çalışılan teknolojiler beş kategoriye ayrılabilir.

1. Foto biyolojik hidrojen üretimi
2. Foto elektrokimyasal hidrojen üretimi
3. Termokimyasal hidrojen üretimi
4. Elektroliz
5. Buhar yapılandırması 'dır.

1.2.1. Foto biyolojik yöntem kullanılarak hidrojen üretimi

Çoğu foto biyolojik sistemde, hidrojen üretimi için kullanılan bakteriler ve yeşil yosunlar, klorofil aracılığı ile güneş ışığını absorbe eder ve enzimler sayesinde hidrojenin ayrılması sağlanır. Foto biyolojik üretim teknolojisi uzun vadede hidrojen üretimi için oldukça ümit vericidir. Ancak iki önemli sınırlama mevcuttur. Birincisi; göreceli olarak düşük solar dönüşüm verimliliğine sahip olmasıdır. Güneş enerjisinin yaklaşık %5–6'sı hidrojen enerjisine dönüştürülebilir. İkincisi; suda hidrojeni ayıran enzimlerin hemen hemen tümü suyun ayrışmasının sonucu diğer ürün olan oksijenin de açığa çıkmasını sağladığından, hidrojenin saf olarak üretilmesine engel olmaktadır (Gül, 2006).

1.2.2. Foto elektrokimyasal yöntem kullanılarak hidrojen üretimi

Bu tür yapılarda ışık soğurucu yarı-iletkenin anot veya katodu, ya da her ikisi birden elektrokimyasal hücrenin içinde yer alabilirler. Bu teknoloji ile enerji dönüşüm verimliliği (bir enerjinin gidişine karşılık elde edilen enerji miktarı) 1974' de % 1'den daha az iken bugün %8'in üstüne yükselmesine rağmen hala gelişmesinin ilk aşamalarındadır. Bu yöntem ile suyu hidrojen ve oksijenlerine ayrıştırmak için, yüksek sıcaklık veya elektriğe gerek olmadan, doğrudan güneş enerjisinin mor ötesi (UV) bölgesini kullanmaktadır. Güneşten gelen UV ışınımları suyun doğrudan ayrıştırılması için yeterli enerjiye sahip olmakla birlikte, atmosferdeki ozon tabakası tarafından büyük miktarlarda tutulduklarından çok az bir kısmı dünyaya gelebilmektedir. Gerçekte tüm canlılar için oldukça zararlı olan UV ışınımlarının, incelen ozon tabakasından daha fazla miktarda geçmesi fotokimyasal yöntem için verimi artırıcı bir öğe olarak görülse de, dünyamız için ciddi bir tehlike oluşturmaktadır. Ancak fotokimyasal yöntem için bu ışınımların güçlendirilmesi veya su tarafından soğrulmasının arttırılması gerekmektedir. Bunun için, güneş ışınımını yoğunlaştırıcı bir takım düzenekler ile su içerisine bazı mineral ve metaller eklenerek UV etkisi arttırılmaktadır (Türkmen, 2006; Murcak, 2003).

1.2.3. Termokimyasal yöntem kullanılarak hidrojen üretimi

Kömür, şehir katı atıkları ve biyokütlelerin 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 dolaşmaktadır. Yenilenebilir hidrojen araştırmaları, bugün bir yakıt veya kimyasal gaz depolamada kullanmak için biyokütleden orta ısıl değerde gazlara odaklanmıştır. Biokütlenin gazifikasyonu için, ya çöpler yâda depolayıcı kabul edebilecek bir enerji kaynağı olarak özel olarak yetiştirilen otlar ve ağaçlar kullanılır. Diğer bir termokimyasal üretim teknolojisi de suyun doğrudan oksijenle hidrojene ayrıştırılmasını sağlayan kapalı çevrimli termokimyasal yöntemdir. Bu teknoloji diğer yöntemlere göre daha ayrıntılıdır ve verimi daha yüksektir. Termokimyasal işlem kısaca geliştirilen çeşitli bileşiklerin suyla doğrudan reaksiyon sonucu hidrojen ve oksijenin açığa çıkartılmasıdır. Hidrojeni ve oksijeni ayrıştırma işlemi 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. Bu işlem;

$H_2O + X \rightarrow XO + H_2$ (1.1)

$XO + ısı \rightarrow X + 1/2\ O_2$ (1.2)

şeklindedir.

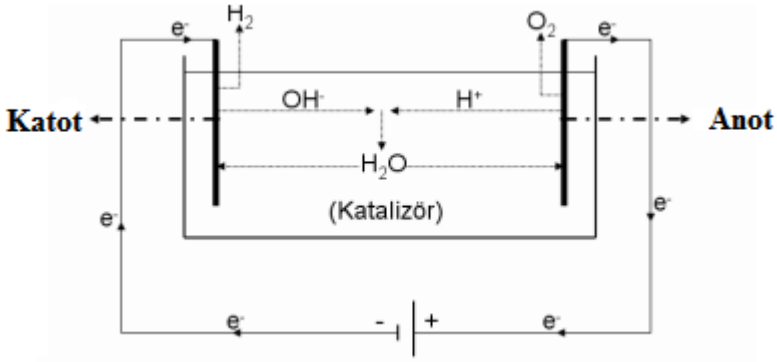
Burada "X" Al, Fe gibi su ile reaksiyona giren elementi ifade etmektedir (Gül, 2006).

1.2.4. Elektroliz ile hidrojen üretimi

Elektroliz; bir elektrolit içine iki elektrot daldırılması ve bu hücreye dışarıdan bir akım uygulayarak, elektrotlarda kimyasal reaksiyon meydana getirilmesi olayıdır. Suyun elektrolizi endotermik bir reaksiyon olup bu reaksiyon ile anotta oksijen ve katotta hidrojen açığa çıkarılır. Hidrojen üretimi için en basit yöntem olarak bilinmektedir.

Elektroliz olayında kaynak malzeme uygun bir çözücü içerisinde çözünür veya eritilir. Bu sayede bütünü oluşturan ve elektriğin iletimi sağlayacak iyonlar çözelti içerisinde yer alırlar. Suyun içerisine daldırılmış olan iki elektriksel iletkene elektriksel potansiyel fark uygulanır. Negatif yüklü iletkene katot, pozitif yüklü iletkene anot adı verilir. Her iletken zıt yüklü iyonları çekme eğilimdedir. O nedenle pozitif yüklü iyonlar katota doğru hareket ederken, negatif yüklü iyonlar anota doğru hareket etmektedir Diğer bir değişle elektrolit içindeki su, katottan çıkan hidrojen ve anottan çıkan oksijene ayrışacaktır. İyonları birbirinden ayırmak için gerekli enerji normal basınç ve sıcaklıkta, ideal olarak 1.23 volttur. Faraday kanunlarına göre, her bir amper saatte 0.037 g H_2 ve

0.298 g O_2 açığa çıkar. Şekil 1.1.'de elektroliz ile hidrojen üretimi döngüsü verilmiştir (Türkmen, 2006; Erman, 2007).



Şekil 1.1. Elektroliz ile hidrojen üretilmesi

1.2.5. Buhar yapılandırılma yöntemi kullanılarak hidrojen üretimi

Hidrojen üretim yöntemlerinden biri olan yeniden yapılandırma için üç değişik yöntem kullanılmaktadır.

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

Yapılandırma sistemlerinin verimi önemli oranda sistemin işletme sıcaklığına ve basıncına bağlıdır. Yapılandırma sisteminin sıcaklığı da kullanılacak yakıtın cinsine ve sistemin teknolojisine göre değişir.

Buna göre, buhar yapılandırma sistemi (SR) diğerlerine nazaran daha düşük sıcaklıklarda çalışabilmektedir. 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 düşük, metan biraz yüksek, etanol en yüksek yapılandırma sıcaklıklarına ihtiyaç duyarlar. Sonuç olarak metanol yakıt olarak yeniden yapılandırılması durumunda en verimli hidrojen üretimini sağlar (Gül, 2006).

1.3. Depolama Yöntemleri

Hidrojen, gaz halinde, sıvı halinde veya bir kimyasal bileşik yapılarak depolanabilir. Genellikle yüksek basınç altında gaz halinde saklanmaktadır. Hidrojen gaz formunda yoğunluğu düşük olduğu için oda sıcaklığı ve basıncında aynı eşdeğer

enerji miktarına sahip bir gazdan 3000 kat daha fazla yer kaplar. Bu nedenle de hidrojenin araçta kullanımı için basınçlı tanklarda ve tüplerde sıkıştırılarak sıvılaştırılması veya diğer tekniklerin kullanılması gereklidir. Bu durum göz önüne alındığında tank malzemeleri hafif olması ve güvenlik açılarından geliştirilmesi gerekmektedir. Fakat hidrojenin sıvılaştırılması için çok yüksek enerji (sıvılaştırılan hidrojenin enerji değerinin 1/3'ü kadar) gerekir. Katı şekilde hidrojen depolaması için metal hidritler kullanılmaktadır. Hidrojen gazı metal hidrit tarafından sünger gibi çekilerek gözenekleri içinde depolanır. Ancak metal hidritler çok ağırdır ve diğer yakıtlarla rekabet edebilmesi için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Diğer üretim yöntemi ise karbon absorpsiyonu yöntemidir. Ancak karbon adsorpsiyonu yöntemi henüz olgunlaşmış bir teknik değildir ve araştırma-geliştirme çalışmalarının sonunda hedefler gerçekleştirilirse uygulanabilir yöntem olarak görülmektedir. Hidrojenin son kullanımda depolama teknikleri her bir uygulama için farklıdır. Çizelge 1.4.'de hidrojenin değişik ortamlarda depolanma özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1.4. Hidrojenin değişik ortamlarda depolanma özellikleri (Ültanır, 1997)

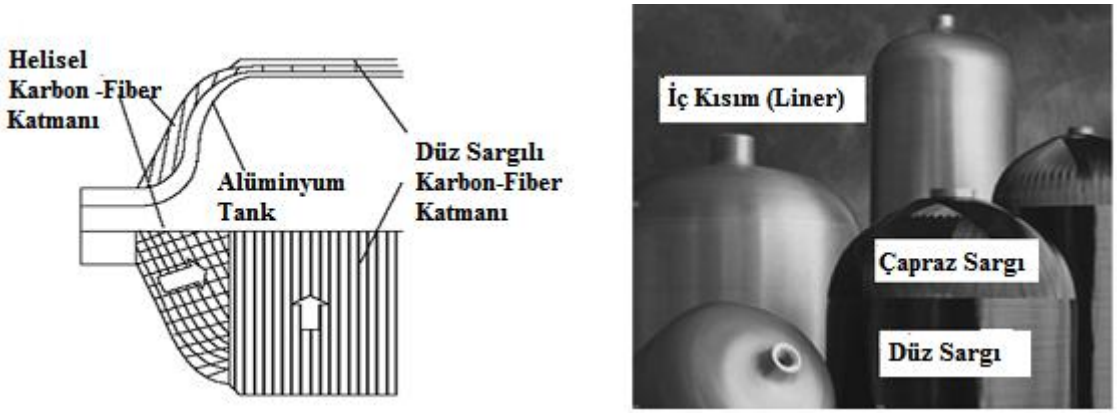
Depolama Ortamı	**Hidrojen Miktarı(ağ.%)**	**Hacimce Yoğunluk (H atomu l-1) (x1025)**	**Enerji Yoğunluğu**	
			MJ /kg	**MJ/ l**
Gaz halde H_2 (150 atm)	100.00	0.5	141.90	1.20
Sıvı H_2 (253^{o}C)	100.00	4.2	141.90	9.92
MgH_2	7.65	6.7	9.92	14.32
VH_2	2.10	11.4	-	-
Mg_2NiH_4	3.60	5.9	4.48	11.49
$TiFeH_{1.95}$	1.95	5.5	2.47	13.56
$LaNi_5H_{6.7}$	1.50	7.6	1.94	12.77
$NaAlH_4$	7.40	-	-	8.25
$NaBH_4$ (katı)	10.60	6.8	-	-
NaBH4-20 Sol.	4.40	-	44	-
NaBH4-35 Sol.	7.70	-	77	-
Benzin	-	-	47.27	6.6–9.9
Metanol			22.69	5.9–8.9

Bu değerlere tank ağırlığı dâhil edilmemiştir.

1.3.1. Sıkıştırılmış gaz olarak depolama

Hidrojeni gaz halinde basınçlı tanklarda depolama metodu en bilinen depolama yöntemlerinden biridir. Bu depolama oda sıcaklığında yüksek basınca dayanıklı tankta

yapılmaktadır. Hidrojen günümüzde genellikle 50 litrelik silindirik depolarda 200–250 barlık basınç altında depolanmaktadır. Fakat depolama basıncı 600–700 bar'a kadar çıkarılabilmektedir. Her ne kadar 50 litrelik tanklarda depolansalar bile hidrojen çok hafif olduğu için hacimsel enerji yoğunluğu çok düşüktür (Türkmen, 2006). Hacimsel enerji yoğunluğunu artırmanın yolu hidrojen gazının düşük sıcaklıklarda iyice soğutarak (-253 °C) sıvı olarak depolanmasıdır. Basınçlı depo malzemesi olarak ostenitik çelik ve bazı alüminyum alaşımları kullanılmaktadır. Fakat bu depoların en önemli dezavantajı çok ağır olmalarıdır. Yüksek basınca dayanıklı kompozit hidrojen tankının genel görünümü Şekil 1.2.'de verilmiştir.



Şekil 1.2. Yüksek basınca dayanıklı kompozit hidrojen tankının genel görünümü (Alnıak ve ark., 2008)

1.3.2. Metal hidrit sistemi ile depolama

Yeni bir yöntem olan bu teknikte hidrojen atomları metal hidrürler üzerine depolanmaktadır. Metal hidrürler önemli ölçüde hidrojen absorbe etmektedirler. Örneğin bir metal hidrür depo aynı hacimli bir sıkıştırılmış hidrojen deposuna göre 100 kat daha fazla hidrojen depolayabilmektedir. Bu alaşımlar genellikle kendi başına hidrojen absorbe eden bir A metal ile (La, Ti, Zr, Mg, Ca gibi nadir toprak elementleri) hidrojen absorbe edemeyen B metalinden (Fe, Ni, Mn, Co) oluşmaktadır. En çok kullanılan hidrür sistemleri Fe-Ti, La-Ni ve Mg hidrürleridir. Metal hidrür oluşumuna ait reaksiyonlar aşağıdaki gibi modellenebilir (Türkmen, 2006).

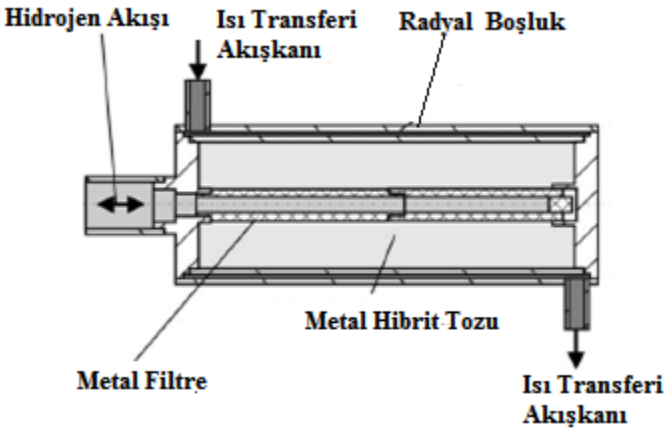
Absorpsiyon: $M + xH_2 \; MH_2x + ısı$ (1.3)

Desorpsiyon: $MH_2x + ısı \; M + xH_2$ (1.4)

şeklindedir. Burada M, metal, element veya metal alaşımını temsil etmektedir. Bu reaksiyon, basınca ve sıcaklığa bağlı olarak yön değiştirmekte ve metalin cinsine göre

reaksiyon endotermik veya ekzotermik olabilmektedir.

Metal hidritler, kafes yapısına sahip metal atomlarıyla bu kafes yapısı içinde ara yerlerde tutulmuş hidrojen atomlarından oluşmaktadırlar. Hidrojenin tutulduğu yerler bir boşluk veya kafeste bir çizgi hatası olabilir. Çizgi hatası olması durumunda bir dizi hidrojen atomu bu çizgiyi dolduracak şekilde yapıya geçer. Metal ve hidrojen genellikle iki ayrı form oluşturur. Bu formlardan biri hidrojen depolamaya müsait iken diğeri tam dolu formdadır. Doldurma aşamasında hidrojen tam dolu yüzeyden geçerek depolamaya müsait yüzeyi oluşturacak şekilde yayılır. Boşaltma sürecinde ise hidrojen tam dolu formdan depolamaya müsait formu oluşturacak dışarı difüze olarak H_2 moleküllerini oluşturur. Metal hidrid yatak kesiti Şekil 1.3.'de gösterildiği gibidir. Yatak iç içe geçmiş silindirlerden oluşmaktadır. İçteki silindir hidrojen akışını sağlamakta ve dış yüzeylerinde basınca dayanıklı parçacık filtresi bulunmaktadır. Silindir içerisinde metal filtre ile su ceketi arasına sıkıca yerleştirilmiş metal alaşımı tozları bulunmaktadır.



Şekil 1.3. Metal hidrid yatak kesit görünüşü (Kayfeci ve ark., 2009)

1.3.3. Nanotüplerde depolama

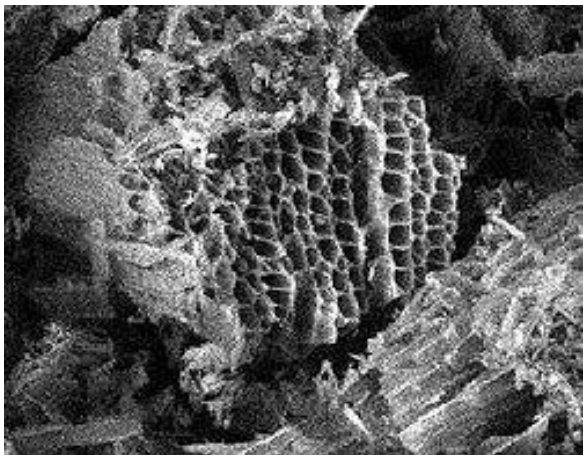
Hidrojen, gaz veya sıvı olarak saf halde uygun çelik tanklarda depolanabileceği gibi, fiziksel olarak karbon nanotüplerde de depolanabilmektedir. Karbon, özellikle yüksek oranda gözenekli çok küçük parçalar haline getirilebilmesi ve karbon atomları ve gaz molekülleri arasında oluşan çekim kuvveti nedeniyle gaz depolamaya en elverişli maddelerden biridir. Karbon nanotüpler, grafit tabakaların tüp şekline dönüşmüş halidir. Çapları birkaç nanometre veya 10–20 nanometre mertebesinde, boyları ise mikron seviyesindedir. Elastiklik modülleri çelikten 5 kat daha fazladır. Tek cidarlı, çok cidarlı ve içlerine alkali elementler yerleştirilen nanotüpler sırası ile %14, %7.7 ve %20 ağırlık

oranına kadar hidrojen depolayabilirler. 20 bar basınç altında yapılan deneylerde, bu oran %70'e kadar çıkarılmıştır (Anonim, 2011c).

Nanotüplerdeki absorbe işlemi, karbon atomlarının hidrojen moleküllerine uyguladığı Van Der Waal's kuvveti ile gerçekleşmektedir. Kimyasal bir olay değil, fiziksel bir olaydır. Ayrıca karbon nanotüplerin hidrojenin depolanması yanında hidrojen kullanılarak elde edilen enerji sistemlerinde de kullanımı vardır. Nanotüplerin en büyük dezavantajı maliyetlerinin oldukça yüksek olmasıdır. Eğer gelecekte ucuz üretim yöntemleri gelişirse, yaygın olarak kullanılabilecek hale gelebilirler.

1.3.3.1. Aktif karbonlarda hidrojen depolama

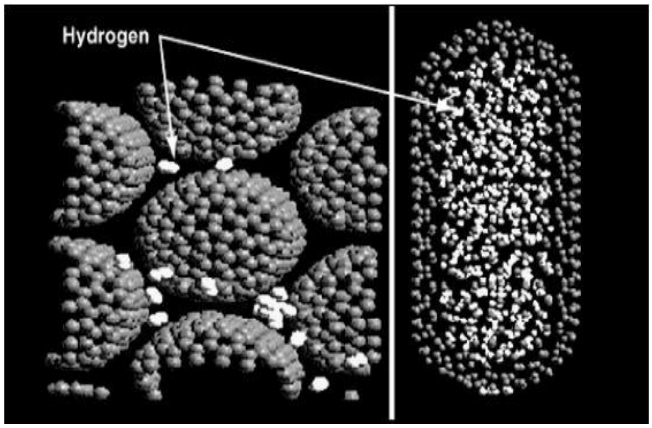
Aktif karbon herhangi bir kimyasal analiz ile karakterize edilemeyen veya yapısal formüle sahip olmayan, oldukça yüksek gözenek ve iç yüzey yapısına sahip karbonlu malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Aktif karbonun oldukça yüksek gözenek ve iç yüzey alanına sahip olması bu malzemelerin endüstride etkin bir absorban olarak kullanımını gündeme getirmektedir (Karatepe ve ark., 2006). Hidrojen bu yapının makroskopik gözenekleri arasında depolanmaktadır. Fakat bu gözeneklerin yalnızca az bir kısmı içine hidrojen atomu absorbe edilecek kadar küçüktür, genellikle depolama için dış basınç gereklidir. Çok düşük sıcaklıklarda ve 45–60 bar basıncında aktif karbon yapıya %5.2 kadar hidrojen depolanabilmektedir. Oda sıcaklığı ve 60 bar basınçta bu oran %0.5 düşmektedir. Aktif karbon depolama metodu şu anda pratik uygulamalarda kullanılması zor görünmektedir. Ayrıca deponun dizaynı, izolasyonu ve malzemenin çok pahalıya mal olması en önemli dezavantajdır (Türkmen, 2006). Şekil 1.4.'de aktif karbonun kesit görünüşü verilmiştir.



Şekil 1.4. Aktif karbon elektro mikroskop kesit görünüşü (Anonim, 2011)

1.3.3.2. Karbon nanotüplerde hidrojen depolama

Karbonun yüksek oranda gözeneklere sahip olması ve çok küçük parçacıklar haline getirilebilmesi ve karbon atomları ile gaz molekülleri arasında oluşan çekim kuvveti nedeniyle gaz depolamaya en elverişli maddelerden biridir. Karbon nano-tüpleri 1991'de Lijima tarafından keşfedilmiştir. Karbon nano-tüpler cidarların yapısına göre tek cidarlı ve çok cidarlı olmak üzere ikiye ayrılabilir. Tek cidarlı nano-tüpler çapı birkaç mikrometre, boyu birkaç mikrometreden oluşan grafit levhalardan oluşmuştur. Birçok nano yapı 10–100 paralel tüpün bir araya gelmesinden oluşan iplikçiklerdir. Hidrojen, nanotüplere zayıf "van der waals" etkileşimi ile fiziksel olarak depolandıktan sonra geri alınabilmekte ve sisteme tekrar aynı miktarda hidrojen yüklenebilmektedir. Şekil 1.5.'de karbon nano-tüpte hidrojen depolanması verilmiştir.

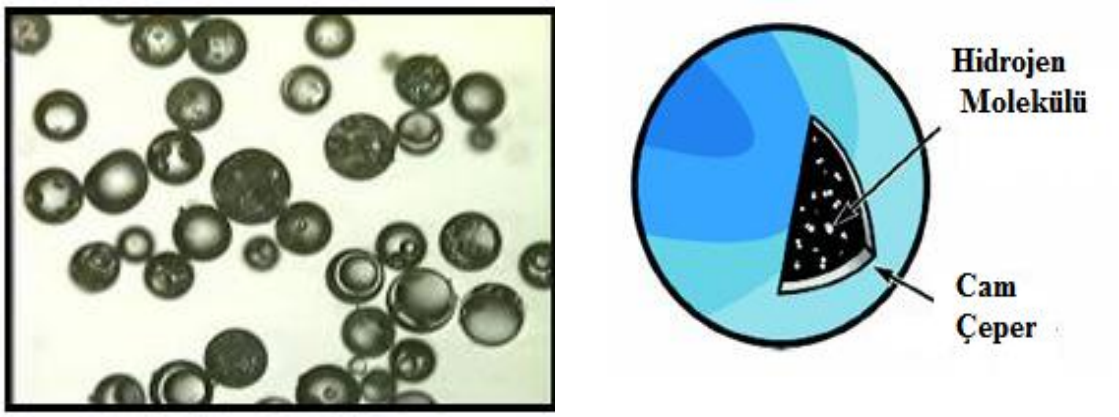


Şekil 1.5. Karbon nanotüpte hidrojen depolanması (Türkmen, 2006)

1.3.3.3. Cam mikro kürelerde hidrojen depolama

Küçük, içi boş, çapları 25 μm ile 500 μm arasında değişen bir tarafı açık ve duvar kalınlıkları ~1 μm olan cam küreler kullanılır. Bu mikro küreler 200–400 °C'de ve yüksek basınçta hidrojen gazı ile doldurulur. Yüksek sıcaklıkta cam duvarlar geçirgen hale gelir ve hidrojen gaz kürelerin içine dolar. Cam küreler oda sıcaklığına kadar soğutulduğunda, içeri giren hidrojen kürelerin içine hapsolur. Kullanılacağı zaman cam küreler tekrar ısıtılarak hidrojenin tekrar açığa çıkarması sağlanır (Anonim, 2011). Bu depolama yönteminin en büyük dezavantajı, cam küreciklerin yüksek basınç altında çatlamalarıdır. Cam kürelerin depolama kapasitesi 200–490 bar basınç

altında %5–6 civarındadır. Şekil 1.6.' de cam kürelerde hidrojen depolanmasının kesit görünüşü verilmiştir.



Şekil 1.6. Cam mikro kürelerde hidrojen depolama kesit görünüşü (Anonymous, 2011)

1.4. İçten Yanmalı Motorlarda Hidrojenin Yakıtı Olarak Kullanılması

1.4.1. Yakıt olarak hidrojenin yanma karakteristiği

Hidrojen atom ağırlığı 1 olan en basit ve hafif olan ayrıca doğada en çok bulunan elementtir. Hidrojen yoğunluğu (20 °C) 0.0838 kg/m^3'dür ve havadan daha hafif olduğundan atmosfer içerisine kolaylıkla yayılabilir. Görünmez ve kokusuz bir gaz olan hidrojen diğer elementlerle birleşik halde yeryüzünde bulunur. Hidrojenin yanma ısısı oldukça yüksektir ve zehirli etkisi yoktur. Yanma sonucunda ise sadece su buharı meydana gelir (İçingür ve ark., 2002). Hidrojen diğer yakıtlarla karşılaştırıldığında kütlesel ağırlık olarak en yüksek enerjiye sahiptir. Hidrojenin en yüksek ısıl değeri 141.9 MJ/kg'dır ve dizele göre yaklaşık üç kat daha yüksektir. Hidrojenin alev hızı 270 cm/s'dir. Bu durum silindir içerisindeki basıncın yüksek oranda artmasına sebep olabilir. Hidrojenin yayılma hızı 0.63 cm^2/s'dir. Hidrojenin kendiliğinden tutuşma sıcaklığı 858 K iken motorinin tutuşma sıcaklığı 530 K'dir. Hidrojenin sahip olduğu bu özellik yüksek sıkıştırma oranına sahip içten yanmalı motorlarda kullanımına olanak sağlar. Hidrojenin yanma özellikleri hidrokarbon içeren yakıtların yanma özelliklerinden temel olarak farklıdır. Motorin yakıtın alevlenme limiti hacimsel olarak % 0.7–5 iken hidrojenin hava içerisindeki hacimsel olarak alevlenme limiti %4–75 gibi bir aralığa sahiptir. Hidrojenin önemli avantajlarından biri de teorik olarak 0.1'e kadar azalabilen hava-yakıt karışım oranında motorun çalışabilmesidir. Hidrojen hava karışımını ateşleyebilmek için gerekli olan minimum enerji miktarı 0.02 mJ'dur. Bu

özellik motorun fakir karışımda çalışmasına ve ateşlemenin hızlı bir şekilde olmasına olanak sağlar (Saravanan ve Nagarajan, 2009). Hidrojenin diğer yakıtlarla enerji yoğunluklarının karşılaştırılması Çizelge 1.5.'de verilmiştir.

Çizelge 1.5. Hidrojenin diğer yakıtlarla enerji yoğunluklarının karşılaştırılması (Kellegöz, 2005)

YAKIT		ENERJİ YOĞUNLUĞU	
		MJ/kg	**MJ/m^3**
SIVI	Benzin	47.4	34.85
	Metanol	22.3	18.1
	Etanol	29.9	23.6
	LPG	48.8	24.4
	Hidrojen	141.9	10.2
	Motorin	42.5	37.7
GAZ	Doğal Gaz	~ 50,0	~ 0.040
	Hidrojen	141.9	0.013

Hidrojenin yakıt olarak kullanılmasında yarar sağlayacak en önemli özelliklerinden biri farklı hava/hidrokarbon karışım oranları için hava fazlalık katsayısının 0.3–1.7 değerleri arasında tutuşma sağlanabilmekte iken, hidrojen için bu sınır 0.15–4.35 değerlerine ulaşmaktadır (Gül, 2006). Hidrojenin 119.93 MJ/kg alt ısıl değeri mevcut motor yakıtlar ile karşılaştırıldığında daha yüksektir. Hidrojenin yakıt olarak bazı özellikleri, benzin ve motorin ile karşılaştırılması Çizelge 1.6.'da verilmiştir.

Çizelge 1.6. Hidrojen, benzin ve motorin yakıtların karşılaştırılması (Saravanan ve Nagarajan, 2010)

Özellik	**Motorin**	**Benzin**	**Hidrojen**
Formülü	$C_n H_{1.8n} (C_8\text{-}H_{20})$	$C_n H_{1.8n} (C_4\text{-}H_{12})$	H_2
Ateşleme sıcaklığı (K)	530	533–733	858
Minimum Ateşleme Enerjisi (mJ)	-	0.24	0.02
Hava İçerisinde Yanma Limiti (%)	0.7–5	1.4–7.6	4–75
Stokiyometrik Hava Yakıt Oranı	14.5	14.6	34.3
Yoğunluk 16 C° ve 1 barda(kg/m^3)	833–881	721–785	0.0838
Alt ısıl Değeri (MJ/kg)	42.5	43.9	119.93
Alev Hızı (cm/s)	30	37–43	265–325
Hava İçindeki Diffüzyonu (cm^2/s)	-	0.08	0.63
Setan Numarası	40–55	-	-
Oktan Sayısı	-	92–98	130

Ayrıca hidrojenin yüksek oktan sayısına sahip olması özelliğinden yararlanılarak vuruntu tehlikesi olmadan motorun sıkıştırma oranı arttırılıp, ısıl verimin ve maksimum gücün arttırılması da sağlanabilir. Ayrıca hidrojenin patlama için gerekli yakıt/hava

oranı %13–18 seviyesinde olup, yakıtlar içerisinde birim depolanan enerji başına en düşük patlama enerjisine sahiptir.

1.4.2. Stokiyometrik hidrojen/hava karışımı için teorik hava yakıt oranı

Hidrojen ve oksijen karışımının stokiyometrik yanma oranı (Cod-Module3, 2001)

$2H_2 + O_2 = 2H_2O$

Tam yanma için gerekli olan H_2 = 2 mol

Tam yanma için gerekli olan O_2 = 1 mol

Oksitleyici olarak oksijen yerine hava kullanılacağından hava içersindeki azotun hesaplamaya dâhil edilmesi gerekir;

Hava içersindeki N_2 molekülü = O_2 x (hava içersinde %78 N_2 ve %21 O_2)

= 1 mol O_2 x (%78 N_2 / %21 O_2)

= 3.714 mol N_2

Havanın mol sayısı = mol O_2 + mol N_2

= 1 + 3.714

= 4.714 mol hava

O_2'nin ağırlığı = 1 mol O_2 x 32 g/mol

= 32 g

N_2 nin ağırlığı = 3.714 mol N_2 x 28 g/mole

= 103.992 g

Havanın ağırlığı = O_2 + N (1)

= 32g + 103.992 g

= 135.992 g

H_2 nin ağırlığı = 2 mol H_2 x 2 g/mol

= 4 g

Hidrojen/hava karışımı için stokiyometrik hava/yakıt (H/Y) oranı:

Kütlesel H/Y oranı = hava kütlesi / yakıt kütlesi

= 135.992 g / 4 g

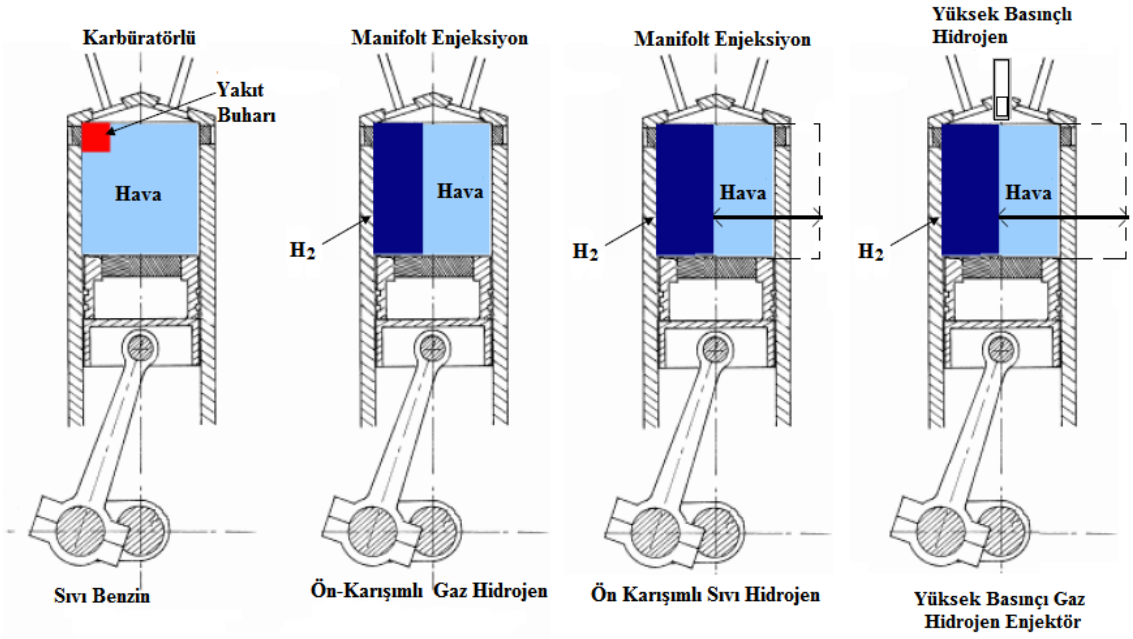
= 33.994:1

Hacimsel H/Y oranı = hava hacmi / yakıt hacmi

= 4.714/ 2

= 2.357:1

Yukarıdaki denklemler gösteriyor ki, havanın içerisinde hidrojenin tamamen yanması için hava/hidrojen oranı kütlesel olarak yaklaşık 34/1'dir. Başka bir ifadeyle tamamen yanma için 1 birim hidrojen karşılık 34 birim hava gerekmektedir. Bu oran motorin için gerekli olan 17/1 hava/ yakıt oranından ve 14/1 hava/yakıt oranına sahip benzinde de oldukça yüksektir. Stokiyometrik şartlarda hidrojen yaklaşık yanma odasının %30 kaplar iken bu oran benzinli motorlar için %1-2 arasındadır. Şekil 1.7.' de hidrojen motorları ve benzinli motorlar için enerji içerikleri ile hidrojenin kapladığı yanma odası hacimleri verilmiştir.



Yakıt hacmi [cm^3]	17	300	410	420
Hava hacmi [cm^3]	983	700	960	1000
Isıl değer [%]	100	83	114	119

Şekil 1.7. Hidrojen ve benzinli motorlar için enerji içerikleri ile hidrojenin kapladığı yanma odası hacimleri (Gül, 2006)

Hidrojen gaz halinde iken yanma odasında sıvı halden daha çok hacim kaplar. Sonuç olarak, gaz haldeki hidrojen miktarı artması ile birlikte hava miktarı o oranda azalır. Kullanılan metotlara bağlı olarak güç çıkışı benzinle karşılaştırıldığında %85 ile %120 arasında değişmektedir. Hidrojenin geniş alevlenebilme aralığına sahip olması hidrojen motorlarının stokiyometrik olarak 34/1 ile % 180/1 hava/yakıt oranı arasında çalışabilmesine imkân vermektedir. Hava/yakıt oranı eşdeğerlik oranı (φ) olarak ifade edilebilir. Eşdeğerlik oranı stokiyometrik hava yakıt oranının gerçek hava yakıt oranına bölünmesiyle elde edilir. Eşdeğerlik oranını değeri birden küçüktür. Örneğin φ oranı 0.5

olduğunda karışım için mevcut havanın yarısı ile az miktarda yakıt iyi bir yanma oluşturabilir (Cod-Module 3, 2001).

1.4.3. Hidrojenin sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda direk yakıt olarak kullanılması

Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda dizel yakıtı yerine alternatif olarak hidrojenin kullanılması yeni bir fikir değildir. Hidrojenin sahip olduğu yüksek kendiliğinden tutuşma sıcaklığı ve geniş tutuşma aralığı sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar için en uygun yakıt olma özelliğine sahiptir. Ayrıca yüksek alevlenme hızı vuruntunun meydana gelmesini engellemektedir (Antunes ve ark., 2009). Ancak depolama, taşıma ve eksik altyapı gibi sorunlar direk olarak hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanılmasının önündeki en büyük problemlerdir. Bunun yanı sıra, hidrojenin kendiliğinden tutuşma sıcaklığı 858 K olduğu için sıkıştırma ile ateşlemeli motorların sıkıştırma sonu sıcaklığı tutuşma için yeterli olmamaktadır. Bununla birlikte yakıt-hava karışım oranlarındaki farklılık sebebi ile değişiklik yapılmaksızın doğrudan hidrojen sistemine aktarılamadığından dolayı ateşleme bujisi veya buji olmaksızın direk olarak günümüz teknolojisiyle kullanılması zordur (Saravanan ve ark 2008; Birsen, 2008). Bu durum, hidrojenin dizel motorlarda tek yakıt olarak kullanıma uygun olmadığını göstermektedir. Ancak deneysel çalışmalar, hidrojenin çok düşük karışım oranında ($0{,}1 < \varphi < 0{,}3$) alevlenmesine rağmen, hızlı yanma karakteristikleri ve hızlı ısı açığa çıkarma oranından dolayı homojen dolgulu, sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda birincil yakıt olarak kullanılabileceğini öne sürmektedir (Gürbüz, 2010). Ayrıca hidrojen yandığı zaman yanma ürünü olarak sadece su ve yağlama yağından dolayı çok düşük miktarda karbon monoksit ile hidrokarbon oluşmaktadır (Saravanan ve ark., 2008c). Bunun yanısıra yüksek sıcaklıklar altında atmosferdeki nitrojenin oksidasyonunun oluşturduğu NO_x egzoz emisyonları ortaya çıkabilir (Altunes ve ark., 2008). Hidrojenin geniş alevlenme limiti ve yüksek yanma hızından dolayı termal verimde önemli bir artış meydana getirmektedir.

Kısa vadede hidrojenin sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda ikincil yakıt olarak kullanılması daha uygun görülmektedir. Hidrojenin tekil kullanımındaki avantajları ilave yakıt olarak kullanımında da elde edilmektedir. Hidrojenin tekil kullanımındaki karşılaşılan problemlerden biri olan depolama sorunu çift yakıt uygulamasında küçük kapasiteli depoların kullanılması ile aşılmaktadır (Akansu, 2007).

1.4.4. Hidrojenin sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda ikincil yakıt olarak kullanılması

Hidrojen yakıtı sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda motorin yakıtı ile CO, HC, duman ve sülfür vb. kirletici egzoz gazlarının azaltılması gibi nedenlerden dolayı bir ek yakıt olarak kullanılabilir. Hidrojenin sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda kullanılmasının en basit yolu hidrojen için ateşleme kaynağı olarak di-etil eter ya da ana yakıt kaynağı olan dizel yakıtı kullanılarak çift yakıt modunda çalıştırılmasıdır. Motor çift yakıt modunda çalıştırıldığında ana yakıt emme manifoldundaki emme havası içerisine ya enjekte edilerek yâda karbüratör sistemi kullanılarak gönderilir ve yanma dizel yakıtı tarafından başlatılır. Fakat bu metotta hidrojenin büyük bir miktarı kullanılmaz. Bunun sebebi hidrojenin, havayla yer değiştirmek suretiyle dizel yakıtının yanması için mevcut bulunan havayı azaltmasıdır. Ayrıca motorun düzgün, sarsıntısız ve herhangi bir geri tepme olmaksızın çalışması için eşdeğerlik oranının (φ) 0.4–0.8 arasında olması gerekmektedir (Das, 2002). Bu kullanımda elde edilen enerjinin büyük kısmı dizel yakıtından elde edilirken geriye kalan kısmı hidrojen tarafından sağlanmaktadır. Motor hidrojen ile çift yakıt modunda yakıt enjeksiyon yöntemi kullanılarak çalıştırıldığında küçük bir modifikasyonla sarsıntısız çalışmaya olanak vermektedir (Saravanan ve Nagarajan, 2010). İlave yakıt olarak motorun kısmı yüklerinde ve yüksüz durumlarda hidrojenin kullanılması fakir karışıma, yakıt tüketiminin azalması yolu ile termal verimin artmasına ve NO_x miktarının azalmasına olanak sağlar. Ayrıca dizel motorların oluşturduğu duman, karbondioksit (CO_2), hidrokarbon (HC) gibi zararlı emisyonların miktarında da önemli iyileşmeler sağlamaktadır. Motor çift yakıt modunda çalıştırıldığında hidrojen hacimsel olarak %38'e kadar önemsiz bir güç kaybı ve termal verimde azalma olmaksızın ilave edilebilir. Hidrojen oranı bu değerin üzerine çıktığında sürekli olarak motorda vuruntu meydana gelebilir (Saravanan ve ark., 2008b ; Gürbüz, 2010). Vuruntuyu önlemek için nitrojen, helyum yada su gibi bazı seyrelticiler kullanılmaktadır (Roy ve ark., 2010). Nitrojen ilavesi hacimce %30 kullanıldığında motorun vuruntusuz çalışması ile birlikte en yüksek termal verim ve güç çıkışı sağlamaktır (Das, 2002). Azot tutuşma gecikmesinin azaltılmasında ve alev boyunun kısaltılmasında oldukça etkilidir. Böylece yanma oranı karışım hazırlama oranından çok farklı değildir. Su ilavesi düşük sıcaklık ve basınç koşullarındaki yanmada, karışım oranının iyileştirilmesini sağlamakta ve böylece yanma verimliliğini yükseltmektedir. İlave olarak suyun kullanılması yakıtın

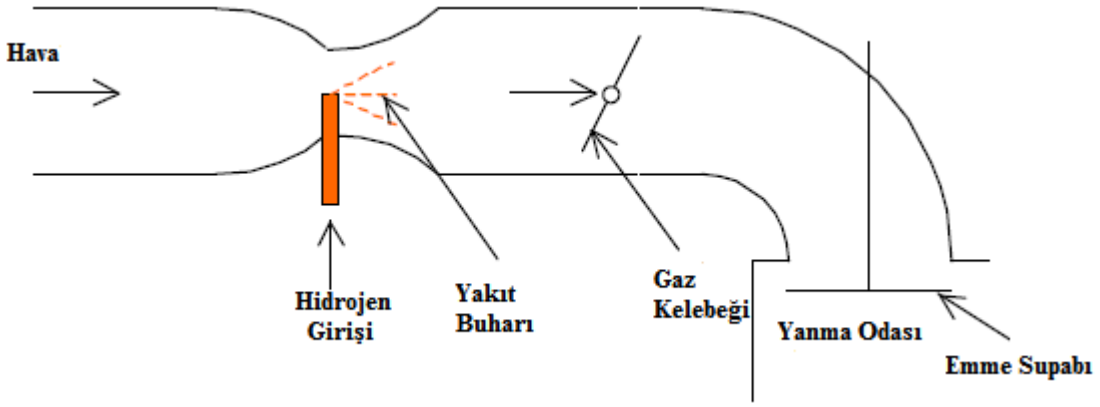
ekonomik kullanımı açısından da avantajlıdır. Su ilave edilmiş hidrojenin karakteristik yanma oranları ile tipik direkt püskürtmeli dizel motorlarındaki oranlar benzerdir (Murcak, 2003).

1.4.5. Hidrojenin içten yanmalı motorlarda adaptasyon teknikleri

İçten yanmalı motorda hidrojenin ek yakıt olarak kullanılmasında, performansa ve emisyonlara etkisinin belirlenmesinde, hidrojenin silindirlere alınma tekniği ve hassasiyeti çok önemli bir rol oynamaktadır (Das, 2002). Yakıtın silindirlere alınma teknikleri karbüratörden enjeksiyon, manifolddan enjeksiyon ve direkt enjeksiyon olmak üzere üç ana başlıkta incelenebilir. Bu geleneksel yakıt enjeksiyon metotları hidrojen gibi alternatif yakıtlar ile çalışan motorlar içinde uygulanabilir.

1.4.5.1. Karbürasyon Tekniği

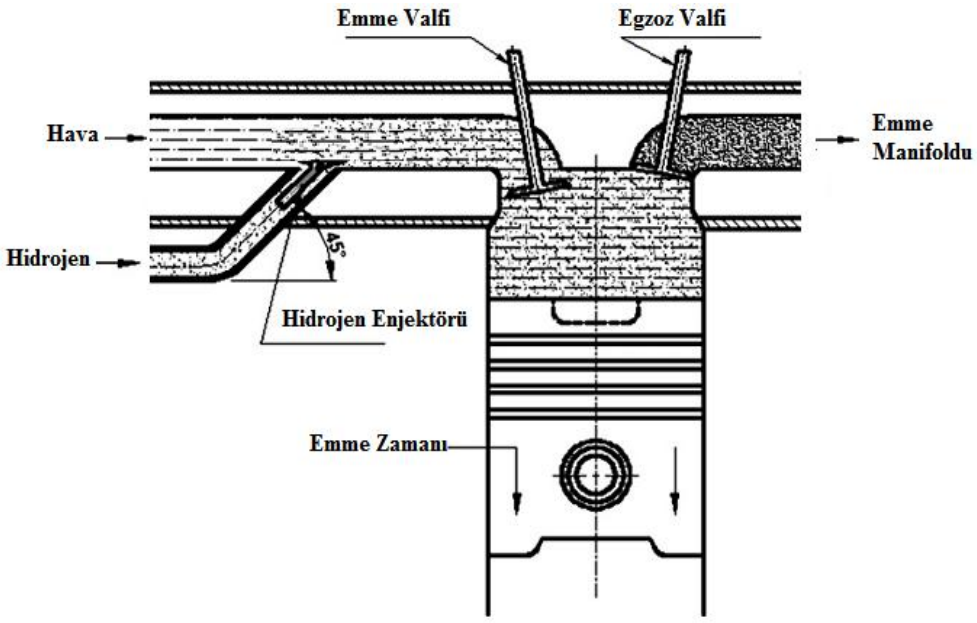
Şekil 1.8.'de hidrojen bir LPG karıştırıcısına benzer bir karıştırıcı kullanılarak emme manifolduna verilmiştir ve gaz kelebeği vasıtasıyla sildire giden hidrojen hava karışımı kontrolü bu şekilde sağlanmıştır. Harici karışım olarak isimlendirilen bu yöntem, hidrojenin motorlarda kullanılma potansiyelinin araştırıldığı ilk yıllarda bugünkü doğalgaz ve LPG karbüratörlerine benzer bir karbüratör ile emme kanalında yapılmaktadır (Gadallah ve ark., 2009; Akansu, 2007). Son yapılan bazı çalışmalarda ise hava ile hidrojenin karıştırılması için LPG karıştırıcısı sistemde kullanılmaktadır. Bu şekilde hava yakıt karışımı silindirin içerisine girmeden homojen bir şekilde karıştırılmaktadır. Bu sayede verimli bir yanma oluşturulması sağlanmaktadır. Ancak yakıt enjeksiyon miktarının kontrolü ve gaz kelebeği ile bağlantılı volümetrik kayıplar güç çıkışında %15 bir azalma meydana getirmektedir. Bunun yanı sıra karışımın teşkil zamanının kontrol edilememesinden dolayı erken ateşleme, geri tepme vuruntu gibi anormal yanma olaylarının meydana gelmektedir (Gadallah ve ark., 2009). Sistemde bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak ve özellikle yüksek hızlarda düzgün çalışmayı sağlamak için, hidrojen hava karışımına su ilave edilmesi gerekebilir (Birsen, 2008; Overend, 1999).



Şekil 1.8. Karbürasyon sistemini (Overend, 1999)

1.4.5.2. Manifold enjeksiyon tekniği

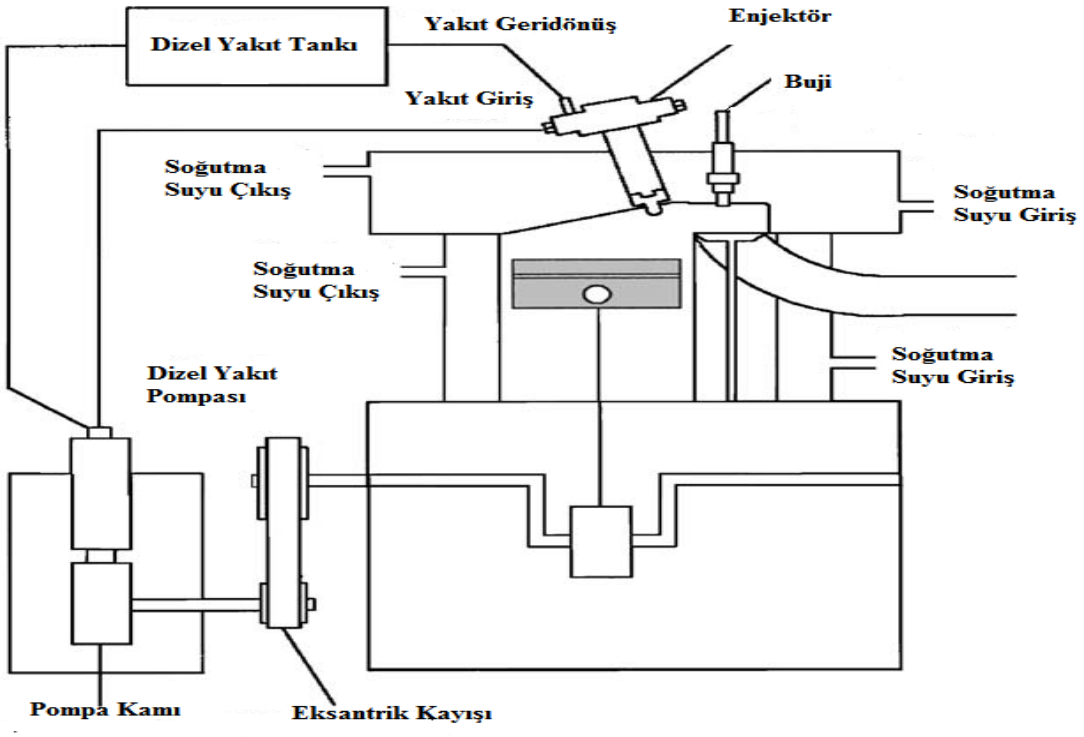
Hidrojenin emme manifoldundaki havanın içerisine mekanik yâda elektronik olarak çalışan enjektörler kullanılarak enjekte edilmesi tekniğidir. Elektronik olarak çalışan enjektörlerin yüksek hız koşullarında daha hızlı tepki verebilecek ve enjeksiyon zamanlamasını ile süresini kontrol edebilecek şekilde tasarlanması gerekmektedir. Ayrıca enjektörün manifold üzerindeki yeri iyi belirlenmelidir. Hidrojenin enjektörler kullanılarak emme manifolduna, enjeksiyon süresi ve zamanı kontrol edilerek enjekte edilmesi ile karbürasyon tekniğinde meydana gelen geri tepme ve ön ateşleme gibi problemler ortadan kaldırılmıştır. Şekil 1.9.'da manifold enjeksiyon sisteminin kesit görünüşü verilmiştir.



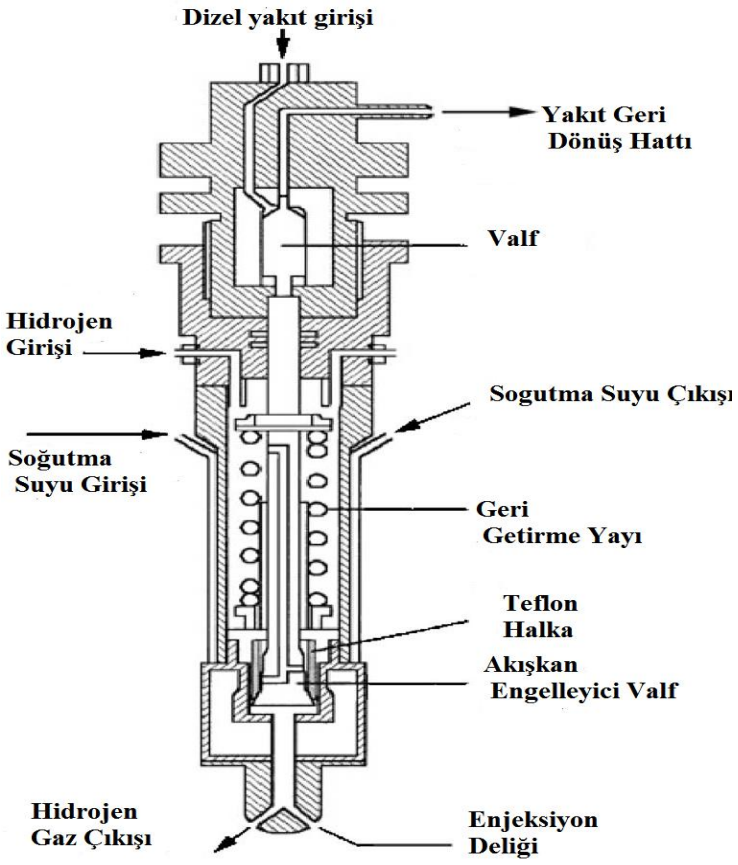
Şekil 1.9. Manifold enjeksiyon sistemi kesit görünüşü (Saravanan ve Nagarajan, 2009)

1.4.5.3. Direk enjeksiyon

Hidrojen içten yanmalı motorlarda direk enjeksiyon tekniği kullanılarak sıkıştırma sonunda direk yanma odası içerisine enjekte edilir. İçten yanmalı motorlarda hidrojen yanma odası içerisine direk enjekte edildiğinde ön karışımlı (karbüratör veya manifolddan enjeksiyon) metotla çalışan benzer bir motorun yaklaşık olarak iki kat fazla motor gücü sağlayabilmektedir. Aynı zamanda böyle bir motorun gücü, geleneksel yakıtlarla çalışan motorlardan daha yüksektir. Sadece rölanti veya kısmi yük durumuna sırasında motorun verimliliği biraz azalabilir. Ayrıca hidrojenin yüksek yanma hızı, kısa sönümleme mesafesi, yüksek ısıl değer ve yüksek difüzyon hızı gibi önemli avantajlara sahiptir. Bu yöntemde düşük basınçlı direk enjektör (LPDI) ve yüksek basınçlı direk enjektör (HPDI) olmak üzere iki tip enjektör kullanılmaktadır. Düşük basınçlı direk enjektör silindir içerisindeki basınç az olduğunda ve emme valfi kapanır kapanmaz yakıt enjekte eder iken yüksek basınçlı direk enjektör sıkıştırma zamanının sonunda yakıtı enjekte eder. Bunun sonucunda da güç çıkışında düşme, kısmı ve tam yük aralığında vuruntu ile emme manifoltunda geri tepme gibi problemler meydana gelmez. Bu açıdan diğer yöntemler ile karşılaştırıldığında en verimli olanıdır. Fakat hidrojenin hızlı yanması ile oluşan yüksek ısı kayıpları, direk enjeksiyonlu hidrojen motorunda, yeni nesil direkt enjeksiyonlu dizel motorlardaki kadar yüksek termik verimin elde edilmesine engel teşkil etmektedir (Gürbüz, 2010). Ayrıca direk enjeksiyonlu bir motorda hidrojenin yakıt olarak kullanımında, hidrojenin sahip olduğu yüksek kendi kendini ateşleme sıcaklığı, uzun tutuşma gecikmesi ve yüksek basınç artış oranı gibi özelliklerine bağlı olarak bazı zorluklar ortaya çıkmaktadır (Altunes ve ark., 2009; Saravanan ve Nagarajan, 2010). Diğer bir problem ise uzun süreli motor çalışmasında yanma odası çevresinde meydana gelen ısıya enjektörün dayanma zorunluluğu ve enjeksiyondan sonra hidrojen hava karışımı için gerekli olan zamanın ayarlanmasıdır (Das, 2002). Şekil 1.10.’ da ve Şekil 1.11.’de direk enjeksiyonlu bir hidrojen motorunun kesit görünüşü ile bu motorda kullanılan bir enjektörün kesit görünüşü verilmiştir.



Şekil 1.10. Direk enjeksiyonlu hidrojen motoru kesiti (Kim ve ark., 2005)



Şekil 1.11. Hidrojen Enjektörü (Kim ve ark., 2005)

1.4.6. Hidrojenin içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılmasının avantajları ve dezavantajları

Avantajları;

- Hidrojenin gaz hali mükemmel bir motor çalışması ve soğukta ilk hareket imkânı sağlamaktadır.
- Alev parlaklığının düşük olması, diğer karbon esaslı yakıtlara göre radyasyon yolu ile olan ısı kaybını azaltacağından daha yüksek verim sağlar.
- Hidrojenin yüksek sıkıştırma oranlarında, fakir karışım ile yanabilmesi yakıt tüketimini azalttığı gibi, yanma sonucu oluşan maksimum sıcaklığı da azaltır. Yanma sonucu partikül madde oluşturmaz.
- Yanma ısısı yüksektir ve zehirli etkisi yoktur. Yanma sonucu sadece su buharı meydana gelir. Sentetik yakıtlar (metanol, amonyak vb.) içinde en temiz olanıdır.
- 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 kirletici oluşur.
- Hidrojenin yüksek yanma hızından dolayı hidrojen motorları yüksek hızda çok uyumlu motor çalışmasını yerine getirebilmektedir.
- Hemen atmosfere yayılması nedeniyle hidrojeni yakıt olarak kullanan motorlar için yanma ve patlama riskini azaltmaktadır.
- Hidrojen seyreltici kullanımına müsaade eder. Bu durum düşük ısıl değere sahip yakıt karışımının daha iyi yanmasına müsaade eder.
- 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 yakıttır. Küresel ısınmaya da neden olmaz.
- Alev hızı yüksektir ve Otto motorlarında ideale yakın yanma oluşturarak ısıl verimi arttırır. Ayrıca alev hızının yüksek olması, buji kıvılcımından sonra karışımın başka noktalardan tutuşma (detenasyon) ihtimalini azaltır. Bu durum sıkıştırma oranının arttırılmasını sağlayacağından motorun gücü de artırır.
- Hidrojenin difüzyon katsayısı çok yüksektir. Bu nedenle hava ile yakıtın hızlı ve homojen olarak karıştırılması mümkündür. Bu özellik dâhili karışım hazırlama yöntemlerinin kullanımında, homojen bir karışım elde edilmesi açısından büyük avantaj sağlamaktadır (Gül, 2006; Gürbüz, 2010)

Dezavantajları;

- Hidrojenin tutuşma enerjisi düşüktür. Bunun sonucu olarak hidrojen kullanılan motorlarda, geri tutuşma ve erken ateşleme olayları meydana gelebilir. Bunun sonucunda motor parçaları zarar görebilir.
- Hidrojenin yüksek kendi kendine tutuşma sıcaklığı, sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda hidrojenin tek yakıt olarak kullanımını sınırlamaktadır. Bu nedenle, sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar, hidrojenin diğer hidrokarbon yakıtlara ilave yakıt olarak kullanımı için daha uygundur.
- Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanımında hidrojenin depolanması için kullanılan tank hacmi ve maliyeti oldukça yüksek olması önemli bir dezavantajdır.

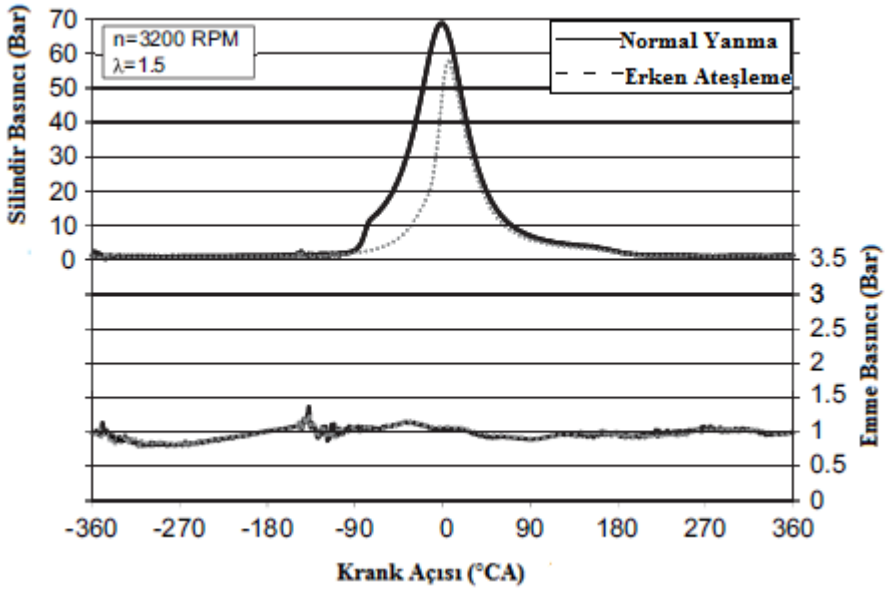
1.4.7. Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanımında karşılaşılan sorunlar

1.4.7.1. Hidrojen motorunda erken ateşleme

Hidrojen motorlarında meydana gelen en önemli problem erken ateşleme olayıdır. Tam anlamıyla erken ateşleme motorun sıkıştırma strokunda emme valfleri kapalı iken yanma odası yüzeydeki sıcak noktaların karışımı erken ateşlemesidir. Hidrojenin kendi kendine tutuşma sıcaklığı yüksektir, fakat ateşleme enerjisinin düşük olması nedeniyle; yanma odasındaki sıcak noktalar, supap bindirmesinde sıcak egzoz gazları, çok fakir karışımlarda yanma hızlarının düşük olmasıyla yanma süresinin artması sonucu yanan gazlarla yeni karışımın teması, motor yağından gelen sıcak partiküller, yanmayı istenilenden önce başlatabilmektedir (Gürbüz, 2010). Genellikle erken ateşleme sıkıştırma zamanı boyunca ve emme valflerinin kapalı olduğunda meydana gelir.

Şekil 1.12.'de tek silindirli bir hidrojen motorun 3200 devirde iken meydana gelen erken ateşleme olayı esnasında silindir ve emme basıncındaki değişimi verilmektedir. Genel olarak hem yüksek sıcaklık hem de artık gazlar erken ateşlemeye sebep olur. Bu amaçla yanma odası sıcaklığının düşürülmesi gerekmektedir. Bunun için karışımın bir miktar fakirleştirilmesi, egzoz gazı 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 (Çeper, 2009).



Şekil 1.12. Tek silindirli bir hidrojen motorunda geri tepme esnasında meydana gelen silindir ve emme basıncı değişimleri (Verhelst ve Wallner, 2009)

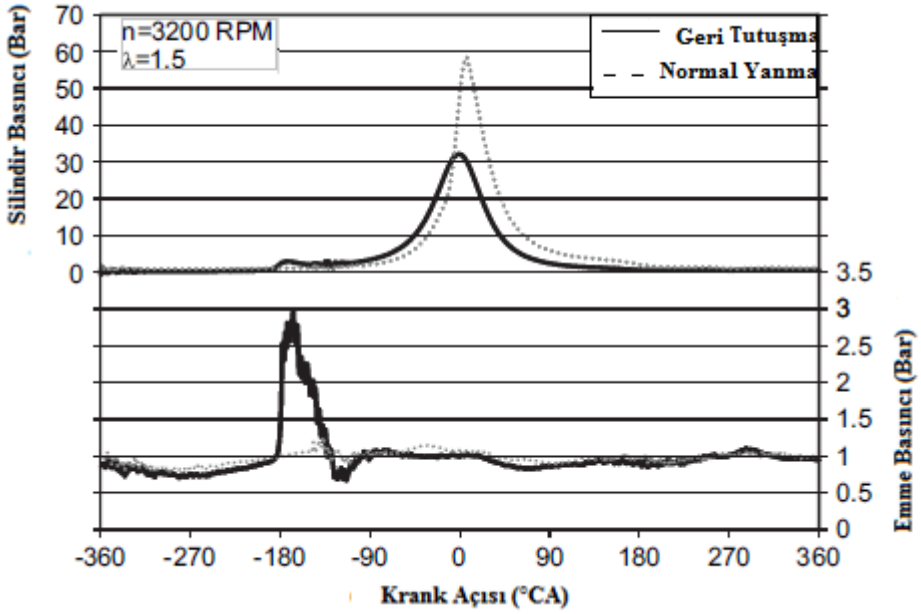
1.4.7.2. Hidrojen motorunda geri tutuşma

Manifoltdan yâda yanma odası içerisinde emme zamanı boyunca hidrojen hava karışımın yanması alev tepmesi veya geri tepme olarak tanımlanmaktadır. Hidrojen-hava karışımı sıcak silindirin veya silindirin sıcak bir bölgesinin veya emme kanalındaki sıcak bir parçanın etkisiyle emme devam ederken tutuşur ve emme manifoldu içerisinde basınç artışı meydana gelir. Basınç artışı genellikle bir gürültü yapar ve emme sistemindeki parçalara zarar verir. Şekil 1.13.'de tek silindirli bir hidrojen motorun 3200 devirde iken meydana gelen geri tepme olayı esnasında silindir ve emme basıncındaki değişimi verilmektedir.

Genellikle geri tutuşma emme supaplarının açılması ile meydana gelmektedir, Geri tutuşma hava fazlalık katsayısının (λ) 1.5 ile 3 arasında veya eşdeğerlik oranı (φ)'nin 0.65–1.05 değerleri arasında olduğu durumlarda meydana gelir. Eşdeğerlik oranı φ'nin 1.05'den büyük değerlerinde devamlı geri tutuşma oluşur. Bu olay, hidrojenin geniş yanma sınırları ve küçük tutuşma enerjisinin bir sonucudur (Birsen, 2008; Verhels ve Wallner, 2009).

Hidrojen motorunda geri tutuşma olayı, emme zamanında silindire alınan taze hava içersine hidrojenin püskürtülmesi ile kontrol edilebilir. Böylece hidrojenin, yanma

odası içersinde bir önceki çevrimden kalan sıcak yağ partikülleri ve sıcak noktalar ile teması veya bu etkenlerden dolayı ısınması minimize edilmiş olur (Gürbüz, 2010). Sonuç olarak geri tutuşma olayını önlemek için emme ve enjektör sistemi geliştirme çabaları devam etmektedir.

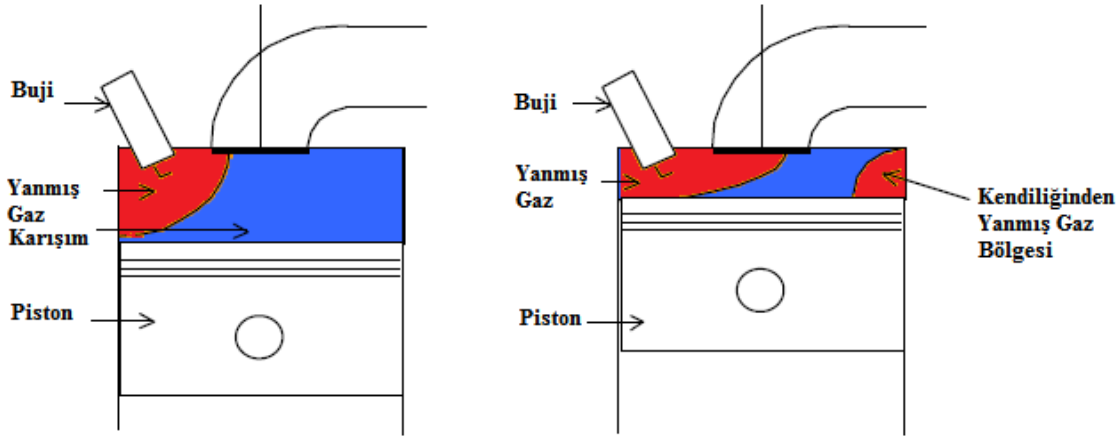


Şekil 1.13. Tek Silindirli bir hidrojen motorunda geri tepme esnasında meydana gelen silindir ve emme basıncı değişimleri(Verhelst ve Wallner, 2009)

1.4.7.3. Hidrojen motorunda vuruntu

Hidrojen motorunda vuruntu, sıkıştırma sonunda buji kıvılcımı ile oluşan alev cephesi dışında kalan ve hidrojen-hava karışımından oluşan son gaz bölgesinin kendi kendine tutuşması olarak tanımlanabilir. Bu tutuşma esnasında gazların enerjisinden dolayı hızlı bir basınç dalgası meydana gelir. Yanma süresince oluşan bu basınç dalgası insan kulağı tarafından algılanabilir bir vuruntu sesi meydana getirir. Bu basınç dalgası ısıl ve mekanik gerilmelerin artmasına ve motorun aksamlarının tahrip olmasına sebep olabilir. Şekil 1.14.'de vuruntu oluşumunu kesit görünüşü verilmiştir.

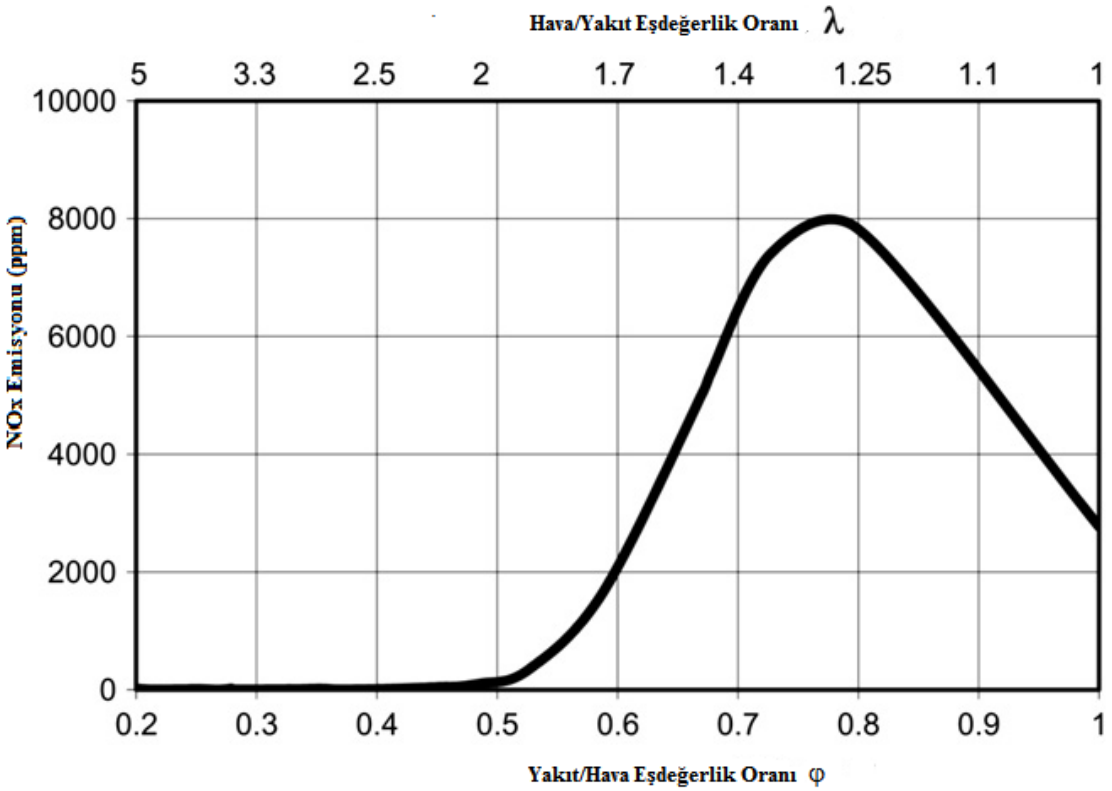
Motorda meydana gelen bu vuruntunun önlenmesi için sisteme nitrojen, su helyum dibi seyrelticiler belirli oranlarda verilmektedir. Bu seyrelticiler kullanılarak yapılan çalışmalarda, maksimum hidrojenin kullanılmasında bile vuruntunun önlendiği vurgulanmaktadır. Daha fazla hidrojenin gönderilmesi ve karışımın zenginleştirilmesi de vuruntu meylini azaltır. Fakat bu durumda egzozdan yanmamış hidrojen çıkısı olur (Verhelst ve Wallner, 2009; Das, 2002; Gürbüz, 2010).



Şekil 1.14. Vuruntu oluşumu kesit görünüşü (Overend, 1999)

1.4.8. Hidrojenin emisyonlara etkisi

Hidrojenin hava ile yanması sonucunda, yakıtta karbon bulunmaması nedeni ile yanma ürünleri arasında CO, CO_2 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 (NO_x) bol miktarda üretilmektedir. Üretilen azot oksitlerin büyük kısmını oluşturan NO'ler egzoz sistemi içerisinde veya atmosfere çıktıktan sonra NO_2'ye dönüşmektedir. NO_x genelde hava fazlalık katsayısının ve karışımın yerel sıcaklığının bir fonksiyonu olarak üretilmektedir. Bu nedenle zengin ($\lambda<0.9$) ve fakir ($\lambda>1.7$) karışımlarda NO_x emisyonu önemli ölçüde azalacaktır (Gül, 2006). Aynı şekilde NO_x emisyonu eşdeğerlik oranı artıkça artmaktadır ve eşdeğerlik oranı 0.7–0.9 arasında en yüksek seviyesine ulaşmaktadır (Saravanan, 2008b). Şekil 1.15.'de NO_x oluşumlarının hava fazlalık katsayısı (hava/yakıt) ve eşdeğerlik oranına göre değişimi verilmektedir. Ayrıca NO_x oluşumlarını azaltmak için EGR, su enjektörleri, çoklu enjektörler vb. metotlarda kullanılmaktadır. EGR sistemi bu metotlar arasında en fazla kullanılanıdır. EGR sistemi egzoz gazlarının belirli oranlarda emme manifoldu içerisine gönderilmesi prensibine göre çalışır. Bu sayede yanma odasına giren dolgu seyreltilerek yanma sıcaklığı azaltılır ve NO_x oluşumu doğal olarak azalır (Saravanan, 2008a). Ancak NO_x değeri azalırken yanma odasındaki oksijen miktarı azalacağı için partikül miktarı, yanmamış hidrokarbonlar (UHC), karbondioksit (CO_2) ve karbon monoksit (CO) gibi emisyonların miktarları hidrojenin çift yakıtlı uygulamalarında artacaktır (Korakianitis, 2010). Bu artış standart bir dizelin oluşturduğu emisyon değerleri kadar olmayacaktır.



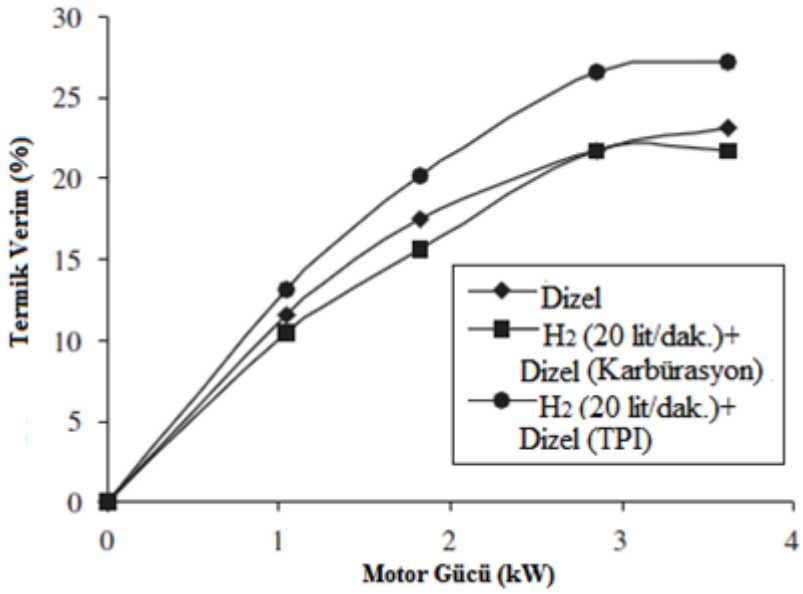
Şekil 1.15. NO_x emisyonlarının hava/yakıt oranı ile değişimi (Verhelst ve Walner, 2009)

1.4.9. Hidrojen motorunda güç, volümetrik verim ve termik verim

Hidrojen motorlarında teorik olarak maksimum güç çıkışı hava yakıt oranı, volümetrik verim, yakıt enerji yoğunluğu ve enjeksiyon tekniğine bağlı olarak değişmektedir. Ön karışımlı yada ön yakıt enjeksiyonlu sisteminde doğal olarak hidrojen hacimsel olarak havanın yerini alacağı için volümetrik verimde kayıp meydana gelmektedir. Örneğin stokiyometrik hava ve hidrojenin karışımının hacimsel olarak yaklaşık %30 hidrojenden oluşurken, tam olarak buharlaşmış stokiyometrik benzin hava karışımının hacimsel olarak %2 benzinden oluşturmaktadır. Güç yoğunluğu ile ilgili bu kayıp, kısmı olarak hidrojenin yüksek enerji kapasitesi ile dengelenir. Stokiyometrik olarak hava standart kg başına yanma ısısı hidrojen ve benzin için sırasıyla 3.37 MJ ve 2.83 MJ'dur. Ön karışımlı veya ön yakıt enjeksiyonlu içten yanmalı hidrojen motorlarının maksimum güç yoğunluğu, aynı motor çalışma şartlarında benzinle elde edilen güç yoğunluğunun yaklaşık %83'üne eşittir (White ve ark., 2006). Ön yakıt enjeksiyonlu içten yanmalı hidrojen motoru, yüksek motor yüklerinde düşük volümetrik verim sağlarken, düşük ve orta yük aralığında içten yanmalı motorlarda kısılmasız emme girişi, volümetrik verime katkı sağlayabilir. Burada avantaj, kısılma plakası ekseninde meydana gelen basınç düşmesinin oluşturduğu pompalama kayıplarının

ortadan kalkması ve yakıt veriminin artırılmasıdır. Hidrojenin hacimsel enerji yoğunluğunun çok düşük olmasından dolayı, hidrojenle çalışan motorlar bazı çalışma şartlarında düşük motor torku üretmektedir (Gürbüz, 2010).

Hidrojen, içten yanmalı bir motorda, yüksek termik verimin elde edilmesi için gerekli olan yüksek oktan sayısı ve düşük alevlenme limitine sahiptir. Hidrojenin alev parlaklığının düşük, alev hızının yüksek olması ise Otto motorlarında ideale yakın bir yanmanın oluşmasını sağlayarak, diğer karbon esaslı yakıtlara göre radyasyon yolu ile olan ısı kaybını azaltacağından ısıl verimi arttırır. Şekil 1.16.'da Saravanan ve arkadaşlarının (2008c) tek silindirli direk enjeksiyonlu bir motorda yaptıkları bir çalışmada, manifoltan enjeksiyon ve karbürasyon tekniğini kullanarak, hidrojenin ilavesinin motor gücüne bağlı olarak termik verimime etkisinin değişimi verilmiştir.



Şekil 1.16. Direk enjeksiyonlu bir dizel motorunda, hidrojen ve dizelin motor gücüne bağlı termik verimin değişimi (Saravanan, 2008c)

Şekil 1.16.'da tam yük şartlarında dizel ile %23.15 termik verim elde edilirken, zaman ayarlı manifold tekniği kullanılarak hidrojen enjekte edildiğinde %27.25 kadar termik verim elde edilmiştir. Karbürasyon yönteminde ise termik verim %21.79 değeri elde edilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde yakıt olarak fosil yakıtları ve hidrojeni kullanan içten yanmalı motorlar üzerine yapılan güncel deneysel ve teorik çalışmalar sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar ve buji ile ateşlemeli motorlar olmak üzere yıllara göre sıralanarak iki başlıkta incelenmiştir.

2.1. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda yapılan çalışmalar

Roy ve ark. (2010), tek silindirli, dört zamanlı, su soğutmalı,1000 devirli süperşarjlı bir dizel motorda sabit enjeksiyon basıncında, farklı hava-yakıt eşdeğerlik oranlarında ve farklı enjeksiyon oranlarında yakıt olarak hidrojen kullanımı sonucu oluşan motor performans ve emisyonlarını deneysel olarak incelemişlerdir.

Yaptıkları deneysel çalışmalarda;

- Eşdeğerlik oranı 0.3 olduğunda, maksimum ortalama efektif basıncın 908 kPa kadar, termal verimin ise %42 değere kadar artığını,
- CO emisyonunu 5 ppm, HC emisyonunun 15ppm kadar azaldığını, ancak NO_x emisyonunun 100–200 ppm kadar artığını,
- Nitrojen (N_2) kullanılarak NO_x emisyonunu %100 azalttıklarını ve bunun sonucunda vuruntusuz çalışma sağladıklarını ve ortalama efektif basıncın %13 oranında artığını tespit etmişlerdir.

Korakianitis ve ark. (2010), yapmış oldukları çalışmayı tek silindirli, dört zamanlı, su soğutmalı, 11 kW maksimum güç ve 1500 devirli bir dizel motorda %100 kanola metil ester, kanola metil ester-hidrojen, %5 su emülsiyon-hidrojen ve %10 su emülsiyon-hidrojen karışım oranlarının termal verim, özgül yakıt tüketimi, volümetrik verim, emisyonlara etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Yapılan deneylerde hidrojenin çift yakıtlı moda kullanılması ve tüm pilot yakıtlı testlerde NO_x miktarı artış gösterdiği, CO_2 miktarının, volümetrik verimin, özgül yakıt tüketiminin azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca kanola metil ester ile yapılan deneylerde HC, CO ve duman miktarının hidrojenin çift yakıtta kullanılmasıyla karşılaştırıldığında değişmediği, kanola metil esterin kullanıldığı ve emülsifiye pilot yakıtlar ile karşılaştırıldığı deneylerinde NO_x miktarının azaldığı, termal verimin artığı, HC, CO ve duman miktarının değişmediğini tespit etmişlerdir.

Bari ve Esmaeil (2010), dört silindirli, direk enjeksiyonlu, su soğutmalı 38 kW güce sahip 1500 devirli bir dizel motorunda su elektrolizi yoluyla hidrojen/oksijen eklenmesinin motor performansına, özgül yakıt tüketimine, termik verime ve emisyonlara etkisini deneysel olarak araştırmalardır.

Yapılan deneysel çalışmalarda;

- Toplam motorin yakıtının %6.1 oranında eşit miktarda H_2/O_2 karışımı eklendiğinde termik verimi 19 kW'lık güçte %2.6, 22 kW'lık güçte %2.9 ve 28 kW''lık güçte %1.6 artırdığını,
- Özgül yakıt tüketimi 19 kW'lık güçte %7.3, 22 kW'lık güçte %8.1 ve 28 kW'lık güçte %4.8 azaldığını,
- %5 H_2/O_2 eklendiğinde motor performansında bir değişme meydana getirmediğini,
- HC, CO ve CO_2 emisyon değerlerinin iyi bir yanma meydana geldiğinden dolayı azaldığını, ancak NO_x emisyonunun yüksek sıcaklıktan dolayı artığını tespit etmişlerdir.

Liew ve ark. (2010), 6 silindirli, turboşarjlı, 370 beygir güç üreten dizel motorlu ağır iş makinesine hidrojen eklenmesinin yanma sürecine etkisini deneysel olarak araştırmıştır. Yapılan araştırmaların sonucunda ağır iş makinesine hidrojen eklenmesinin yanma sürecine etkisi yük ve hidrojen miktarına bağlı olarak değiştiğini, az miktarda hidrojen eklendiğinde silindir basıncında ve yanma sürecinde önemli bir değişimin meydana getirmediğini tespit etmişlerdir. Ayrıca %70 yük altında büyük miktarda hidrojen eklenmesi ile silindir basıncında önemli bir artış meydana geldiğini, yanma süresinin azaldığını ve difüzyonlu yanma sürecinde ısı salınım oranının artığını, %30 yük altında silindir basıncında ve yanma sürecinde küçük bir artış meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

Saravanan ve Nagarajan (2010), tek silindirli, dört zamanlı, direk enjeksiyonlu, su soğutmalı, 3.48 kW ve 1500 devirli bir dizel motoru çift yakıtlı moda dönüştürerek, hidrojeni emme manifolduna, dizeli yanma odasına direk enjekte ederek deneysel bir çalışma yapmışlardır.

Yaptıkları deneysel çalışma sonucunda;

- Hidrojen için en ideal enjeksiyon zamanının üst ölü noktada gaz değişiminden 5° önce olduğunu, enjeksiyon süresinin ise 30° krank mili açısında olduğunu,
- Hidrojen için en ideal akış oranının motorun performans, yanma ve emisyon davranışlarına göre 7.5 litre dakika olduğunu,
- İdeal enjeksiyon zamanlamasında fren termal verimin dizele göre çift yakıtlı modda %17 oranında artığını,

- NO_x emisyonları hem çift yakıt modunda hemde dizel için %75 ve tam yükte benzer sonuçlar elde ettiklerini,
- Duman emisyonunun dizel ile karşılaştırıldığında %44 oranında azaldığını,
- CO ve HC emisyonları hem çift yakıt modunda hemde dizel için benzer sonuçlar elde ettiklerini tespit etmişlerdir.

Saravanan ve Nagarajan (2009), yaptıkları çalışmada elektronik kontrol ünitesi (ECU) kullanılarak enjeksiyon zamanı ve süresi kontrol ettiklerini belirmişler. Sonuç olarak ideal enjeksiyon zamanının üst ölü nokta gaz değişimi (GTDC) esnasında olduğunu, motorin ile mukayese edildiğinde verimin %15, NO_x %3 artığını, duman emisyonlarının ise %100 azaldığını, tam yükte dizelden %23.4 termal verim elde edilirken hidrojenin kullanılmasıyla verimin %25.3 olduğunu, %75 yükte NO_x emisyonlarının dizelde 17.92 g/kWh iken hidrojen kullanılmasıyla 20.20 g/kWh olarak bulduklarını, %75 yükte hidrojen ile çalışan motorda 1 Bosch duman numarası (BSN) iken dizelde 2.2 BSN olduğunu, en düşük CO miktarının enjeksiyon başlangıcının üst ölü nokta gaz değişiminde ve enjeksiyon zamanında 30^o açıda olduğunu ve HC emisyonlarını da dizelde 0.13 g/kWh iken hidrojende 0.12 g/Kwh olduğunu tespit etmişlerdir.

Bose ve Maji (2009), yapmış oldukları çalışmada dört zamanlı su soğutmalı tek silindirli, 5.2 kW çıkış gücüne ve 1500 d/dk'ya sahip bir dizel motor kullanarak motorun performans ve emisyon değerlerini belirlemişlerdir. Sonuç olarak 0.15 kg/h hidrojen verilerek EGR'siz durumda fren termal verimin % 12.9 oranında artığını, maksimum volümetrik verimin motorun dizel yakıt ile çalıştırılmasında elde ettiklerini, ancak EGR kullanılması ve hidrojenin eklenmesiyle volümetrik verimin azaldığını, enerji tüketiminin hidrojenle zenginleştirmede ve EGR'siz durumda dizelden daha az olduğunu, EGR'nin kullanılmasıyla hidrojenin egzoz gaz sıcaklığının düştüğünü, dizel ile karşılaştırıldığında hidrojenle zenginleştirmede ve EGR'siz durumda duman seviyesinin %42 azaldığını, motorun %80 yükünde CO_2 oranının %40.5, CO oranının %45.8, HC oranının %57.69 azaldığını ve motorun %80 yükünde NO_x değeri hidrojenle zenginleştirmede ve EGR'siz 1211 ppm iken %20 EGR de 710 ppm değerine düştüğünü belirlemişlerdir.

Saravanan ve ark (2008), tek silindirli, dört zamanlı, direk enjeksiyonlu, su soğutmalı, 3.48 kW ve 1500 devirli bir motorda hidrojenin manifoltdan enjeksiyonunun ve belirli oranlarda EGR kullanılmasının özgül yakıt tüketimi fren termal verimi ve emisyonlar üzerine etkisini deneysel olarak araştırmışlardır.

Yapılan deneysel çalışmalarda;

- 20 litre/dakika hidrojen kullanılarak ve EGR kullanılmaksızın termal verim dizel ile karşılaştırıldığında %6 artığını,
- 20 litre/dakika hidrojen kullanılarak ve EGR kullanılmaksızın özgül enerji tüketiminin fakir yanma şartlarından dolayı azaldığını,
- %25 oranında EGR kullanılması sonucunda yanmanın kötüleşerek yanma sıcaklığının azalması ile NO_x emisyon değerinin 464 ppm değerine kadar azaldığını,
- EGR kullanılmaksızın HC oranının dizele göre %58 oranında azaldığını,
- EGR kullanılmaksızın duman yoğunluğunun dizele göre %48 oranında azaldığını tespit etmişlerdir.

Saravanan ve Nagarajan (2008), yapmış oldukları çalışmayı dört zamanlı, su soğutmalı, tek silindirli, sıkıştırma ile ateşlemeli direk enjeksiyonlu 3.78 kw güç ve 1500 d/dk'lı bir motorda yapmışlardır. Sonuçta %30'luk hidrojen enjekte edildiğinde en iyi sonucu tam yükte vuruntusuz olarak %27.9 verim ile oluştuğunu ve %90 oranında hidrojen enjekte edildiğinde fren termal veriminin %29.1 olduğunu fakat vuruntu oluştuğunu, özgül enerji tüketiminin hidrojen oranının artmasıyla azaldığını, fakir karışım ile NO_x miktarının azaldığını, %90 hidrojen enjekte edildiği durumda partikul maddenin 4 g/kWh'den 1 g/kWh değerine düştüğünü ve hidrojen oranının artmasıyla duman yoğunluğunun önemli miktarda azaldığını tespit etmişlerdir.

Saravanan ve ark. (2008), yapmış oldukları çalışmada direk ateşlemeli (DI) dizel motorda ateşleme kaynağı olarak dizel ve dietil eter (DEE) kullanarak yanma analizini incelemişler. Hidrojen için en iyi enjeksiyon zamanı üst ölü nokta gaz değişiminden önce 5^o krank mili açısında (KMA) olduğunu ve DEE içinde üst ölü nokta gaz değişiminden sonra 40 ^{o}KMA olduğunu, dizel ile hidrojen karışımı sonuçları dizel ile karşılaştırıldığında fren termal veriminin %20 artığını, NO_x emisyonlarının da %13 artığını, NOx emisyon miktarında önemli bir azalmanın da motorun DEE ile hidrojen karışımında çalıştırılması ile elde edildiğini, ayrıca dizel ile karşılaştırıldığında; hidrojenin dizel ve DEE ile çalışmasıyla duman emisyonlarında önemli bir azalma sağlandığını, ancak yük artıkça hidrojenin anı yanmasından dolayı %75 yükte civarında motorun hidrojen ile DEE karışımda ciddi bir vuruntu meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

Saravanan ve ark. (2008), yapmış oldukları çalışmada dizel ile gaz halinde hidrojeni zamana bağlı port enjeksiyon tekniği (TPI) ve karbürasyon tekniğini ayrı ayrı kullanarak direk ateşlemeli dizel motorda emisyon karakteristikleri ve performanslarını

dizel ile karşılaştırmışlar. Sonuç olarak hidrojenin içeri alınmasında karbürasyon tekniği kullandığında, özgül enerji tüketiminin %6, NO_x emisyonlarının %8 ve egzoz gaz sıcaklıklarının %14 artığını, fren termal veriminin %5 duman seviyesinin %8 azaldığını, TPI tekniği kullanıldığında ise özgül enerji tüketiminin %15, egzoz gaz sıcaklığının %45 ve duman seviyesinin %18 azaldığını, ancak fren termal veriminin %17 ve NO_x emisyonunun %34 artığını klasik dizel ile karşılaştırarak tespit etmişler. Ayrıca HC, CO, CO_2 gibi emisyonların hem TPI tekniğinde hem de karbüratör tekniğinde dizele oranla çok düşük çıktığını tespit etmişlerdir.

Altunes ve ark. (2008) tek silindirli, dört zamanlı, doğal emişli hava soğutmalı bir dizel motorda hidrojenin direk enjeksiyon yakıt modunu kullanarak motor gücü ve egzoz emisyonlarına etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda maksimum gücün %14 artığını, NO_x emisyonun ise yaklaşık %20 azaldığını verimin ise dizel ile karşılaştırıldığında %28'den %43 kadar artığını tespit etmişler.

Antunes ve ark. (2008) yapmış oldukları çalışmayı dört zamanlı, tek silindirli, direk enjeksiyonlu, doğal emişli, hava soğutmalı 3000 rpm bir motorda yapmışlar. Motoru homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli modda çalışacak ve yakıt olarak hidrojeni kullanacak şekilde modifiye etmişler. Sonuç olarak dizel yakıtla çalışan motorla karşılaştırıldığında en yüksek silindir içi basıncı ve basınç artış oranın hidrojenin homojen dolgulu modunda çalıştırılması ile oluştuğunu, daha yüksek yakıt verimi elde ettiklerini, fakir karışımda bile verimin yükseldiğini ve motor emisyonlarının çok düşük olduğunu tespit etmişlerdir.

Shirk ve ark. (2008), 1.3 litre, 53 kW çıkış gücüne sahip, turboşarjlı, common rail sistemine sahip, direk enjeksiyonlu bir dizel motorunda %20 biyokökenli yakıt ile %80 dizel yakıtının karıştırarak oluşturulan karışıma ilaveten emme manifolduna belirli oranlarda hidrojen takviyesinin yakıt tüketimine, emisyonlara ve performansa etkisini deneysel olarak araştırmak için iki adet deney seti olulturmuşlar. Yaptıkları çalışma sonucunda %0, %5 ve %10 hidrojen eklenmesinin NO_x emisyonlarını az bir miktar azatlığını, egzoz sıcaklığını biraz artırdığını, verimde ise küçük bir değişim oluşturduğu tespit etmişlerdir. İkinci testleri ise 1.3 litre 66 kW'lik bir benzinli motoru şasi dinamometresine bağlayarak yapmışlar. Hidrojenin ilk testinde ki oranlarını kullanılmış ve ilk testteki sonuçlara benzer sonuçlar elde etmişlerdir.

Saravanan ve ark. (2007), yapmış oldukları çalışmada hidrojeni emme potu içerisine, dizel yakıtını ise direk olarak silindir içerisine enjekte etmişlerdir. Hidrojenin

enjeksiyon zamanı ve enjeksiyon süresi gibi parametreleri değişken olduğundan enjeksiyon zamanı dizel için üst ölü nokta (ÜÖN) enjeksiyon zamanından 23^o önce olduğunu, değişik yük şartlarında hidrojen akış oranını 101 litre/dk. olarak sabit tuttuklarını, maksimum fren termal verimin motor tam yükte iken enjeksiyon süresi krankın 90^o açısında ve enjeksiyon zamanı pistonun üst ölü noktada iken % 29.4 olduğunu, NO_x emisyonlarının 705 ppm değerine kadar azalma eğilimini tam yük şartlarında enjeksiyon süresi krankın 60^o açısında ve enjeksiyon zamanı pistonun üst ölü noktasında elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Kumar ve ark. (2003), yapmış oldukları çalışmada dört zamanlı su soğutmalı tek silindirli, 3.7 kW çıkış gücüne ve 1500 devire sahip bir dizel motorda hidrojen ve jatropha yağı kullanarak motorun performans ve emisyon değerlerini deneysel olarak araştırmışlardır.

Yapılan deneyler çalışmalarda;

- Tam yük şartlarında jatropha yağı ile hidrojen kullanılmaksızın fren termal verimin %27.3 kadar artar iken, %5 kütlesel hidrojen kullanıldığında %30.3 ile %32 değerine kadar artığını ancak motor gücünde azaldığını,
- Duman seviyesinin jatropha yağı kullanıldığında 4.7 den 3.7 BSU düşer iken, %7 hidrojen kullanıldığında 3.9' dan 2.2 BSU değerine kadar azaldığını,
- HC ve CO miktarının jatropha yağı ile 130'dan 100 ppm değerine kadar azaldığını,
- NO_x miktarının jatropha yağı ile 735 ppm'den 875 ppm'e kadar artığını tespit etmişlerdir.

Murcak (2003), tek silindirli, dört zamanlı, hava soğutmalı bir dizel motorda hidrojenin %0, %5, %10, %20 oranlarında karıştırılmasının motor performansı ve emisyonlar üzerine etkisini deneysel olarak araştırmıştır. Yapılan deneysel çalışmada maksimum moment değerinin % 5, % 15 ve % 20 hidrojende 1800 devirde olduğunu, %10 hidrojende 2200 devirde olduğunu, özgül yakıt tüketiminin en düşük değeri %20 hidrojen ilavesinde olduğunu, NO_x emisyonlarının en düşük seviyesinin %10 hidrojen ilavesiyle olduğunu, CO miktarının azaldığını, %20 hidrojen ilavesinde vuruntu meydana geldiğini ve volümetrik verimin kötüleştiğini tespit etmiştir.

2.2. Buji ile ateşlemeli motorlarda yapılan çalışmalar;

Gürbüz (2010), buji ateşlemeli bir motorda, farklı motor çalışma şartlarında yakıt olarak hidrojen kullanımının motor performans parametreleri ve yanma

parametrelerine etkisi deneysel olarak araştırmıştır. Bu amaçla; tek silindirli, hava soğutmalı, L tipi silindir kafasına sahip buji ateşlemeli bir motor, manifolddan hidrojen enjeksiyonlu ve elektronik kontrollü bir motor seklinde modifiye etmiştir. Deneysel çalışmaları iki aşamada gerçekleştirmiştir. Deneysel çalışmaların birinci asmasında; motor performans parametrelerinin belirlendiği bir optimizasyon çalışması yapmıştır. Optimizasyon çalışmasında, ateşleme avansı, sıkıştırma oranı, emme havası giriş sıcaklığı, motor devri ve karışım oranının motor parametrelerine olan etkisi araştırılarak tespit etmiştir. Deneysel çalışmaların ikinci aşamasında ise; birinci aşamada tespit edilen optimum performans parametreleri ve motor devri çalışma aralığı kullanılarak, swirl açısının motor performansı ve çevrimler arası farka etkisi deneysel olarak araştırmıştır. Son olarak aynı motor çalışma şartlarında, motorun benzin ve hidrojen ile çalıştırılması ile elde edilen motor performans parametreleri karsılaştırmıştır.

Yaptığı deneysel çalışmada ve teorik hesaplamalarda;

- Belirlen optimum ateşleme avansının motor performans parametrelerini artırdığı ve emisyon miktarını azalttığını,
- 30 °C'nin üzerindeki emme havası giriş sıcaklığının azalan volümetrik verimden dolayı, motor performans parametrelerini azalttığını,
- Hidrojenin yüksek tutuşma sıcaklığından dolayı, kısmen artırılan sıkıştırma oranının motor performans parametrelerini artırdığını,
- Değişen motor devirlerinde elde edilen sonuçlardan, buji ateşlemeli içten yanmalı motor yakıtı olarak hidrojenin, konvansiyonel hidrokarbon yakıtlarına benzer bir tam yük hız karakteristiği sunduğunu,
- φ=0.84'den daha fazla artırılan hidrojen miktarının, motor performans parametrelerindeki artışa bir katkısı olmadığı, daha yüksek karışım oranlarında, muhtemelen motor performansının azalacağını,
- φ= 0.6 olduğu fakir karışım motor çalışma şartlarında, 20° kadar artan swirl açısının motor performans parametrelerini artırdığı ve yanma süresini kısaltarak çevrimler arası farkı azalttığını,
- 20°'den daha fazla artırılan swirl açısının ise, silindir içi aşırı türbülans şiddetinin olumsuz etkisinden dolayı, motor performans parametrelerini azalttığı ve çevrimler arası farkı da artırdığını,
- Çalışılan motor devri ve karışım oranında artan swirl açısının egzoz NO_x emisyonunu azalttığını,

- Swirl açısı ile birlikte artan yanma hızından dolayı, toplam yanma süresinin kısaldığı ve bu kısalmanın büyük oranda alev gelişim açısında oluştuğunu,
- Silindir içi ortalama gaz sıcaklığı ve net ısı yayılım oranının artan swirl açısı ile birlikte, yanma performansındaki artısın bir sonucu olarak arttığını,
- φ= 0.6 karışım oranında 20° kadar artan swirl açısı ile birlikte, ortalama yanma odası duvar yüzeyi sıcaklığının azaldığını,
- Düşük motor yüklerinde, yüksek motor yüklerine oranla daha yüksek çevrimler arası farkın oluştuğu ve motor performans parametrelerini etkilediğini tespit emiştir.

Çeper (2009), farklı yüzde oranlarına sahip hidrojen doğal gaz karışımlarının yanma ve emisyon performans karakteristikleri deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Deneysel çalışmayı, dört zamanlı, dört silindirli, su soğutmalı, Ford 1,8 motorunda gerçekleştirilmiştir. %100 CH_4, %10 H_2-%90 CH_4, %20 H_2-%80 CH_4 ve %30 H_2-%70 CH_4 gaz karışımlı yakıtlar farklı devir ve farklı hava fazlalık katsayılarında test etmiştir. Deneysel çalışma sonucunda; karışımdaki hidrojen ve hava fazlalık katsayısının miktarının artması ile CO ve CO_2 azaldığını, NO_x miktarının ise artığını, silindir içerisindeki basıncın maksimum değerinin üst ölü noktadan 13-15° sonra elde edildiğini ve bu değerin %30 H_2- %70 CH_4 karışımlarında elde edildiği tespit etmiştir. Sayısal çalışmayı, 2000 d/dk motor devrinde %100 CH_4, %10 H_2-%90 CH_4, %20 H_2-%80 CH_4 ve %30 H_2-%70 CH_4 karışımları ve farklı hava fazlalık katsayılarını dikkate alarak oluşturulan model üzerinde incelenmiştir. Simülasyonda en yüksek sıcaklık değerine hidrojence zengin (%30 H_2- %70 CH_4) yakıtta ulaştığını, en düşük sıcaklık değeri ise saf metan yanmasında (%100 CH_4) olduğunu, yakıttaki hidrojen içeriğine bağlı olarak sıcaklık değerinin arttığını, sayısal çalışmada elde edilen tahmin sonuçlarının deneysel verilerle uyumlu olduğu belirlemiştir

Akansu (2007), sıkıştırma oranı 10.5 olan 4 zamanlı, 4 silindirli, 1.8 litrelik enjeksiyonlu, buji ile ateşlemeli yakıt olarak benzin ve hidrojen kullanan bir motorda motor gücü, torku, termik verim ve egzoz emisyonlarındaki değişimi yaptığı deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Çalışmanın deneysel kısmında, deney motorunu %100 CH_4, %90 CH_4-%10 H_2, %80 CH_4-% 20 H_2 ve %70 CH_4 -%30 H_2 karışımları ile deneyler gerçekleştirmiştir. Yaptığı çalışma sonucunda doğal gaza (CH_4) %20 H_2 ilave ettiğinde en yüksek verim değerlerine ulaştığını, %100 H_2 ile deneyler yapılırken geri tutuşma problemi ile karşılaştığını, doğal gaza %30'dan fazla hidrojen eklenemediğini, eşdeğerlik oranı 0.75'den küçük olduğu durumlarda NO emisyon değerlerinin azaldığını, hidrojenin ilavesi ve eşdeğerlik oranının artması ile NO değerinin artığını,

HC, CO ve CO_2 emisyon değerlerin H_2 yüzdesinin artması ile azaldığını tespit etmiştir. Ayrıca yapmış olduğu teorik çalışmada farklı ateşleme avansları ve farklı eşdeğerlik oranları kullanmıştır. Sonuç olarak metan hava yanması için eşdeğerlik oranı 0.7, 0.8 ve 1 değerlerinde ÜÖNÖ 40, 30 ve 15 KMA, hidrojen-hava yanmasında 0.4, 0.5, 0.7 ve 1 eşdeğerlerdik oranları için ÜÖNÖ 35, 15 ve 5 KMA da ateşleme avansının uygun olduğunu tespit etmiştir.

Erman (2007), 3 silindirli, su soğutmalı, direk enjeksiyonlu, dört zamanlı, 40,4 kW güce sahip maksimum 2500 devirli bir motorda belirli oranlarda hidrojen eklenmesinin motor torku, özgül yakıt tüketimi, motor verimi ve emisyonlara etkisini deneysel olarak araştırmıştır.

Yaptığı deneysel çalışmada;

- 4500 cm^3/dak.'lık hidrojenin hava karışımının motora verilmesi, motorun volumetrik verimini yaklaşık %8 oranında düşürdüğünü,
- 1500 cm^3/dak. ve üzerindeki miktarlarda hidrojenin hava karışımı motora verilmesi sonucunda, motorun güç ve tork değerlerinin artığını, özgül yakıt tüketimi değerlerinin ise azaldığını,
- 3500 cm^3/dak.'lık hidrojenin hava karışımının motora verilmesi ile özellikle motorun düşük çalışma devirlerinde duman koyuluğunu %18 oranında artırdığını,
- 3500 cm^3/dak.'lık hidrojenin dizel motorda ek yakıt olarak kullanılması NO_x emisyonlarında %6.4 artışa neden olduğunu,
- 3500 cm^3/dak'lık hidrojen katkısıyla THC emisyon değerlerinin diğer egzoz emisyonlarını %3.9 oranında artış gösterdiğini,
- 3500 cm^3/dak'lık hidrojenin motora verilmesi ile CO emisyonlarının %88.8 artığını tespit etmiştir.

Kahraman et al. (2007), 4 silindirli, 4 zamanlı, buji ateşlemeli, karbüratörlü bir araç motorunda, yakıt olarak benzin ve hidrojen kullanımı sonucu oluşan motor gücü, torku, termik verim ve egzoz emisyonlarındaki değişimi yaptıkları deneysel çalışmalarda karsılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarını motor yükünün değiştirilmesi ile sağlanan 2000–4000 d/dk aralığında değişen sabit motor devirlerinde atmosferik basınçta hidrojeni motora, karbüratörden karıştırıcı yardımıyla sürekli olarak verilmesi ve motora orijinal karbüratörlü yakıt sistemi ile benzin verilmesi şeklinde gerçekleştirmişlerdir. Yakıt olarak hidrojenin kullanıldığı deneysel çalışmalarda geri tepme ihtimalinin ortadan kaldırılması için emme manifolduna su püskürtmüşlerdir.

Yaptıkları deneysel çalışmalarda;

- Motorda hidrojen kullanımının düşük motor devirlerinde benzine oranla motor gücünün azaldığını, fakat yüksek devirlerde bu durumun hidrojen lehine değiştiğini,
- Motorun hidrojenle çalışması durumunda benzine oranla NOx emisyonlarının 10 kat daha düşük olduğunu,
- Hidrojenle çalışan motorda oluşan CO ve HC emisyonlarının motor yağlama yağından kaynaklandığını ve benzine oranla çok düşük seviyede olduklarını,
- Kısa süreli motorun hidrojenle çalışması durumunda, benzine oranla egzoz gaz sıcaklığının daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir.

Huan ve ark. (2007), direk enjeksiyonlu buji ile ateşlemeli bir motorda fakir karışım şartlarında ve farklı ateşleme zamanları altında doğal gaz-hidrojen karışımının yanma karakteristiklerine etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Deneysel çalışmalar sonucunda; ateşleme zamanının motor performansı, yanma ve emisyonlar üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu, ayrıca ateşlemenin başlaması ve yakıt enjeksiyonun sonlanmasına kadar geçen sürenin azalması ve hidrojen miktarının artması ile ortalama efektif basıncın ve termal verimin artığını, emisyonların ise azaldığını tespit etmişlerdir.

Masood ve ark. (2007), deneysel veriler ile hidrojen dizel karışımının sayısal olarak yanma ve emisyon analizini FLUENT ve GAMBIT yazılımını kullanarak, hidrojenin %20-%80 oranlarında yapmışlardır.

Yaptıkları analiz çalışmasında;

- Deneysel olarak direk enjeksiyon ile manifold enjeksiyon metodu karşılaştırıldığında fren termal verimin %19 oranında artığı,
- Yapılan analizde hidrojen miktarının artması ile her iki metotta da hidrojenin yanma hızının artığını,
- Yapılan analizde NO_x emisyonun direk enjeksiyon metoda ile karşılaştırıldığında manifold enjeksiyon metodunda daha yüksek olduğunu,
- Deneysel olarak basınç artışı ve ısı salınım oranı krankın her açısı için direk enjeksiyon metodu ile karşılaştırıldığında %17 civarında olduğunu tespit etmişlerdir.

Huang ve ark. (2006), direk enjeksiyonlu bir motorda farklı enjeksiyon zamanları altında doğal gaz-hidrojen karışımının yanma karakteristiklerini etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda ortalama efektif basıncın maksimum değerinin ÜÖNÖ 190 °KMA ve yakıt enjeksiyon zamanlamasında olduğunu, yakıt enjeksiyon zamanlamasının artması ile yanma süresinin azaldığını, NO_x ve CO_2 emisyonunun yakıt enjeksiyon zamanlamasının artması ile artığını, CO emisyonunun

farklı yakıt enjeksiyon zamanlamasıyla çok az miktarda değiştiğini tespit etmişlerdir.

Ma ve ark. (2003), hidrojen motorunun performansını tahmin etmek için kapsamlı bir bilgisayar simülasyonu geliştirerek motor performansı, ateşleme avansı, hava fazlalık parametreleri ve sıkıştırma oranı gibi motorun yapısını etkileyen parametreleri belirlemişlerdir. Yaptıkları analiz sonucunda hidrojen motorunun fakir karışımla çalıştırılabileceğini, hidrojen miktarın artması ile silindir basıncının ve termal verimin %35'den %50 kadar artabileceğini, silindir çapının en ideal 0.07 m ve 0.09 m olduğunu, ateşleme avans açısının motor performansına etkisinin olmadığını, sıkıştırma oranının artmasıyla termal verimin artığını tespit etmişlerdir.

Das (2002), hidrojen motorunun geliştirilmesi ve araştırılması üzerine bir çalışma yapmış. Sonuç olarak hem buji ile ateşlemeli hem sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda hidrojenin kullanılması için çeşitli ekipmanlar geliştirmiş. Uygun bir zamanlı manifold enjeksiyon sistemi ile geri tepme ve basınç artış hızı gibi arzu edilmeyen olayların üstesinden gelinebileceğini, mevcut motorlarda yapılan değişiklikler için önemli bir yazılıma gerek olmadığını ve NO_x emisyonlarının azaltılabileceğini belirlemiştir.

Yi ve ark. (2000), hidrojen yakıtlı motorlarda hem manifold enjeksiyon hem de direk enjeksiyon tip hidrojen yakıt besleme sistemlerini kullanmak ve karışımın performansa etkisini araştırmak için bir araştırma motoru tasarlamışlardır. Yaptıkları deneysel araştırmada manifold enjeksiyon sisteminin motorun düşük devirlerinde motorun termal verimini artırdığını ve düzgün çalışmasına olanak sağladığını, direk enjeksiyon siteminin ise yüksek devirlerde daha iyi bir çalışma sağladığını ve termal verimi artırdığını, en ideal motor çalışmasının çift enjeksiyon sistemi ve gaz kelebeği kontrolü ile sağlanabileceğini tespit etmişlerdir.

3. MATERYAL VE METOT

Deneysel çalışmalar, Selçuk Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi laboratuarında, sıkıştırma oranı 17:1 olan "4DT 39T/185B–217299 TUMOSAN" marka, 4 silindirli, 4 zamanlı, turbo şarjlı, motor hacmi 3.908 litre olan direk enjeksiyonlu bir sıkıştırma ile ateşlemeli (CI) modifiye edilmiş bir motorda gerçekleştirilmiştir. Deneyler hidrojen yakıtı ilavesi %0, %2.5, %5 ve %7.5 ile motorin yakıtı kullanılarak tam yük şartlarında ve farklı devirlerde yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlara dört aşamada ulaşılmıştır.

***Birinci aşamada*;** motorda yakıt olarak hidrojenin kullanılabilmesi için, motora ait manifolda bir karıştırıcı yerleştirilmiştir.

İkinci aşamada;

- Hidrolik dinamometre ile motorun yüklendiği ve devrinin kontrol edildiği,
- Load-cell yardımıyla efektif motor güç ve torkunun ölçüldüğü,
- Motora alınan hidrojen miktarının termal kütlesel debi ölçer ile ölçüldüğü,
- Motora alınan havanın orefiz plaka ve eğik manometre ile ölçüldüğü,
- Egzozdan çıkan emisyonların ve egzoz gaz sıcaklığının ölçüldüğü,
- Yakıt ölçer ile motorun harcadığı yakıtın ölçüldüğü, deney düzeneklerinin kurulumu gerçekleştirilmiştir.

Üçüncü aşamada; motor standart dizel ile çalıştırılarak farklı devirlerdeki sonuçlar elde edilmiş.

Dördüncü aşamada; motorun emme manifolduna belirli oranlarda hidrojen ilavesi edilerek farklı devirlerde ve tam yükte deney sonuçları elde edilmiştir.

3.1. Modifiye Edilen Motora Ait Teknik Özellikler

Bu çalışmada; 4 silindirli, 4 zamanlı, turbo şarjlı, motor hacmi 3.908 litre olan direk enjeksiyonlu, su soğutmalı, distribütör tip yakıt pompasına sahip bir sıkıştırma ile ateşlemeli (CI) motor kullanılmıştır. Çizelge 3.1.'de deney motorunun teknik özellikleri ve Şekil 3.1.'de deney motoru gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Motorun teknik özellikleri

Teknik Özellikler	Motora Ait Özellikler
Silindir Sayısı	4
Silindir Çapı	104 mm
Stroke	115 mm
Toplam Silindir Hacmi	3908 cm^3
Sıkıştırma Oranı	17:1
Maksimum Tork	295 Nm (at 1600 d/dk)
Maksimum Güç	62.5 kW (at 2500 d/dk)
Maksimum Hız	2700 d/dk
Soğutma Sistemi	Su Soğutmalı
Püskürtme Avansı	18 (KMA)
Püskürtme Basıncı	230 Bar
Yakıt Pompası	Bosch - Distribütör Tip

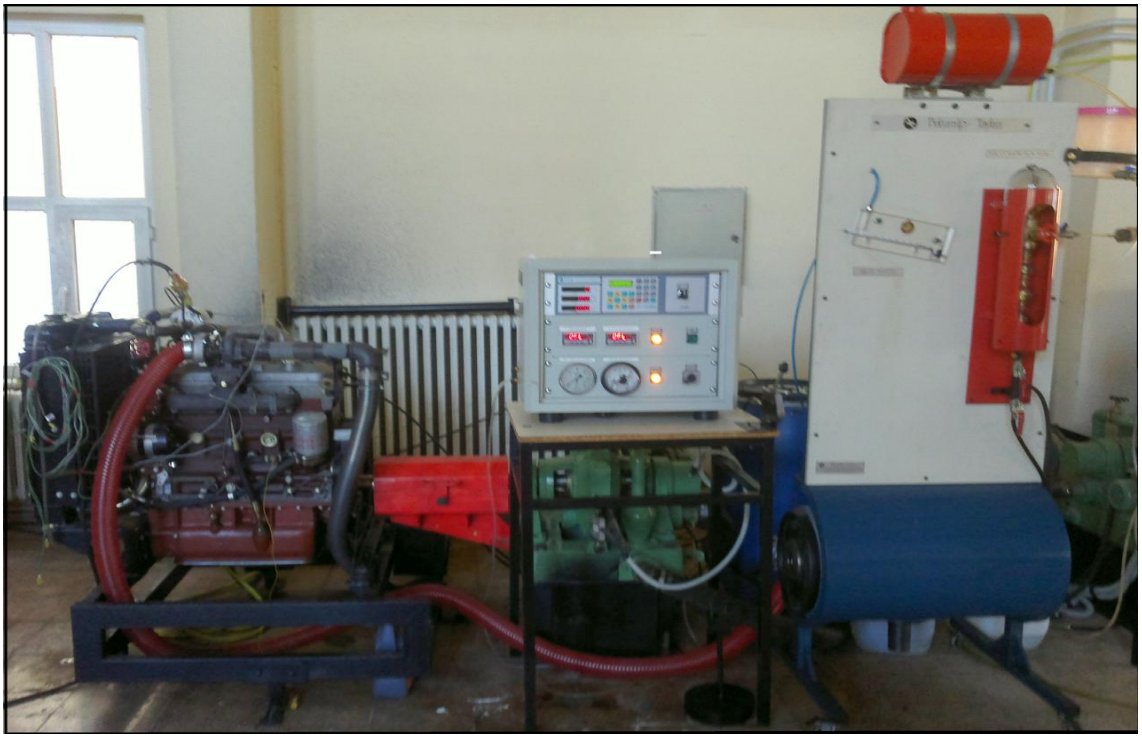


Şekil 3.1. Deney motoru

3.2. Deney Düzeneğinin Kurulumu

Deneyler için kullanılan motor, güç, tork ve devir parametrelerinin ayarlanıp ölçülebilmesi için hidrolik dinamometreye şaft ile bağlanmıştır. Ayrıca motor üzerinde bulunan 1.3 sıkıştırma oranına sahip turboşarj teknik arızalardan dolayı (turboşarjın yağ kaçırması) 1.7 sıkıştırma oranına sahip bir turboşarj ile değiştirilmiştir. Bunun sonucunda da motor teknik özelliklerinde değişmeler meydana gelmiştir. Maksimum motor torku değeri 1250 d/dk'da 318 Nm'ye, motor maksimum güç değeri 2250 d/dk'da 56 kW'ye gelmiştir. Bununla birlikte ortalama volümetrik verim değeri %13

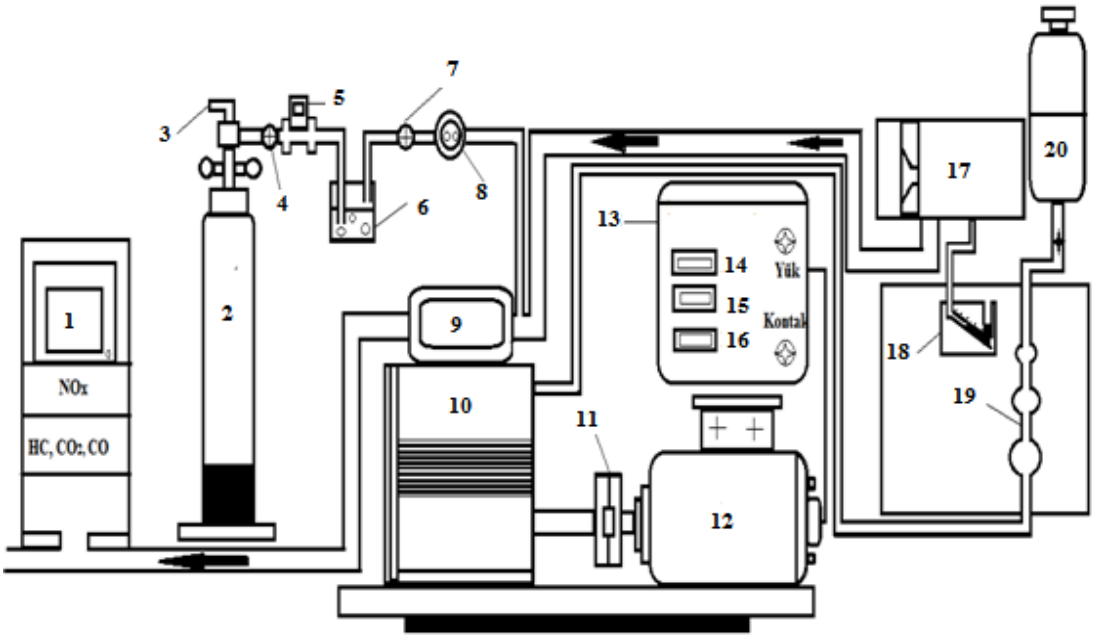
artmıştır. Bu işlemler yapıldıktan sonra motor emme manifolduna hidrojenin havayla karışması için LPG karıştırıcıya benzer bir karıştırıcı tasarlanıp yerleştirilmiştir. Daha sonra hidrojen düzeneği kurulmuştur. Bu düzenekte basınç düşürücü bir regülatör bağlantısı ile hidrojen tüpü içerisindeki basınç değeri motorun durumuna göre 1-4 bara kadar düşürülmüştür. Hidrojenin geriye dönüşünü önlemek için tek yönlü valf ve gönderilen hidrojen gazının debisinin ölçülmesi içinde termal kütlesel debi kullanılmıştır. Ayrıca alevin geri tepmesini önlemek için sulu güvenlik sitemi ve ayarlanabilir bir alev geri tepme valfi kullanılmıştır. Ancak sulu güvenlik sistemi gaz kaçağı sebebiyle sitemden çıkartılmıştır. Son olarak soğutma suyu bağlantıları, egzoz emisyon ölçüm cihazları ve duman ölçüm cihazı sistem üzerine bağlanmıştır. Yapılan bu çalışma ile ilgili deney düzeneği Şekil 3.2.'de ve deney şematik görünümü Şekil 3.3.'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Motor test ünitesi

Yapılan deneylerde, kontrol panelinden motor gücü, motor torku ve motor devri gözlemlenmiştir. Yakıt ölçer ile motorun saatlik yakıt tüketimi ölçülmüştür. Hava metre ile motorun saatlik hava tüketimi belirlenmiştir. Yukarıda ölçülen ve okunan değerler yardımı ile özgül yakıt tüketimi, efektif verim, fren termik verim, volümetrik verim, gibi değerler hesaplanmıştır. Bununla birlikte azot oksit (NO_x), karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO_2)**,** hidrokarbon (HC), duman vb. emisyonlar Bosch BEA 350

emisyon cihazı ile ölçülmüştür. Deney düzeneği kurulduktan sonra motor belirli bir süre çalıştırılıp 20 °C çalışma ortamında 80 °C'ye getirilmiştir. Daha sonra motorun katolog değerlerinin tespiti için ilk denemeler dizel yakıtı ile yapılmış ve daha sonra motorun farklı yüklerinde çift yakıtlı (motorin + hidrojen) denemelere geçilmiştir.



1. Emisyon Cihazı
2. Hidrojen Tüpü
3. Regülâtör
4.Tek Yönlü Valf
5.Kütlesel Debi Ölçer
6.Sulu Güvenlik
7. Alev Geri Tepme Valfi
8. Karıştırıcı
9. Turbo şarj
10. Deney Motoru
11. Kavrama
12. Hidrolik Dinamometre
13. Kontrol Paneli
14. Tork Göstergesi
15. Devir Göstergesi
16. Güç Göstergesi
17. Orefiz Plaka
18. Eğik Manometre
19. Yakıt Ölçme Ünitesi
20. Motorin Yakıt Deposu

Şekil 3.3. Deney şematik görünümü

3.3. Deney Düzeneğinde Kullanılan Cihaz ve Ekipmanlar

3.3.1. Hidrolik dinamometre ve motor yükünün ölçülmesi

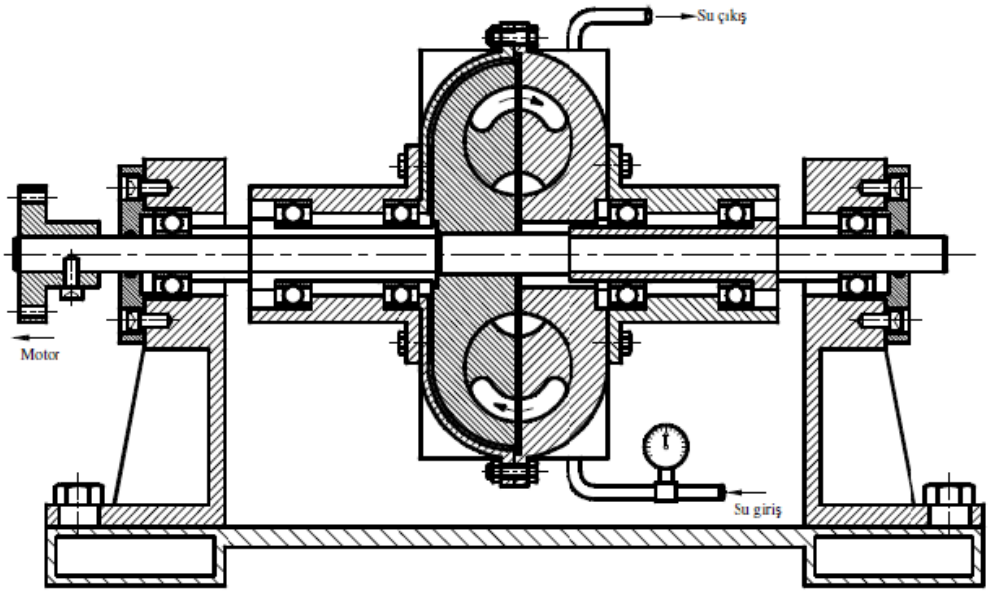
Deney düzeneğinde farklı motor yüklerinde motorun çalıştırılması, efektif motor torkunun ölçülerek motor gücünün hesaplanabilmesi için deney motoru çıkış miline kardan kavramalı şaft mili ile bağlanan hidrolik dinamometre kullanılmıştır. Kullanılan hidrolik dinamometrenin (su freni) kesit resmi Şekil 3.4.'de, teknik özellikleri ise Çizelge 3.2.'de verilmektedir.

Deneysel çalışmalarda efektif motor torku hidrolik dinamometre üzerine monte edilmiş Şekil 3.5.'deki Tedea marka 2000 N kapasiteli load cell kullanılmıştır. Bu load cell, piyasada S tipi olarak bilinen ve çekme-basma yönünde oluşan kuvveti elektriksel

sinyale dönüştürmektedir. Yük sensörü; gerilimi düzenlenmiş güç kaynağından voltaj alan ve uygulanan kuvvetle orantılı olarak düşük voltaj üreten bir kuvvet sensörüdür. Yük sensörü tarafından üretilen düşük voltaj sinyali, bir dijital dönüştürücü vasıtasıyla sayısal değere dönüştürülür.

Çizelge 3.2. Dinamometrenin karakteristik özellikleri

Teknik Özellikler	**Dinamometreye Ait Özellikler**
Max. Frenleme Gücü	160 HP
Max. Frenleme Momenti	750 Nm
Max. Devir	6000 d/dk
Gerekli Su Miktarı	2,4 m^3
Dönüş Yönü	Tek
Motor Bağlama Flanşı	Çift



Şekil 3.4. Hidrolik dinamometrenin kesit resmi (Gürbüz. 2010)



Şekil 3.5. S tipi load-cell

3.3.2. Termal kütlesel akış ölçer ve entegre akış kontrolörü ile yakıt miktarının ölçülmesi

Farklı motor çalışma şartlarında, silindir içine alınan hidrojen yakıtı miktarının ölçülmesinde 300 litre/dak. kapasiteye sahip SMART-TRAK marka C100L model termal kütlesel debi ölçer kullanılmıştır. Bu termal kütlesel debi ölçer tarafından ölçülen hidrojen debisi, cihaz üzerine kompakt yapıda bulunan dijital ekrandan litre/dak. olarak okunmuştur. Ayrıca debimetrenin hidrojen gazı çıkısında bulunan kontroller tarafından, motora giden hidrojen miktarının istenilen herhangi bir değere ayarlanması mümkün olmuştur. Şekil 3.6.'de hidrojen debisinin ölçülmesi için kullanılan Smart-Trak termal kütlesel debi ölçer ve entegre akış kontrolü ile Çizelge 3.3.'de termal kütlesel debi ölçerin karakteristik özellikleri verilmiştir.

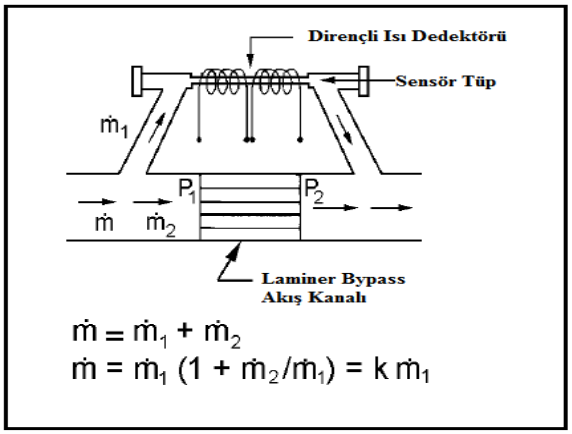


Şekil 3.6. Smart Trak Model C100L model termal kütlesel hidrojen debi ölçer ve entegre akış kontrolü

Çizelge 3.3. Termal kütlesel debi ölçerin karakteristik özellikleri

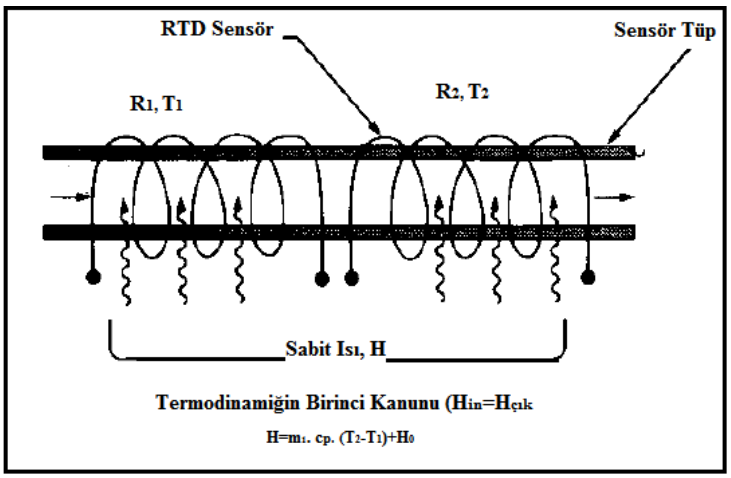
Teknik Özellikler	Cihaza Ait Özellikler
Model:	Smart-Trak C100L-NR-2-OV1-SV1-PV2-V3-S4-C10
Ölçüm sahası	0-300 (Normal litre/dakika)
Tipi	Hat tip termal kütlesel akış ölçer
Basıncı	0…4.5 bar(g)
Sıcaklığı	-5.....50 C°
Besleme	±24 VDC
Çıkış sinyali	0...10 VDC+ 4-20 mA
Seri haberleşme	RS232
Proses bağlantısı	1/4" sıkıştırmalı yüzük
Lokal gösterge	Var
Gövde malzemesi	AISI316 paslanmaz çelik

Smart-Trak 2 termal kütlesel debimetrenin çalışma prensibi ısı transferi ve termodinamiğin birinci kanununa ilkesine dayanır. Şekil 3.7.'da görüldüğü gibi debimetre ana akış kanalından geçen akışkanın bir kısmı sensör tüpü içerisine yönlendirilirken diğer kısmı laminer bypass akış kanalına yönlendirilir. Laminer bypass akış kanalında P_1-P_2 arasında toplam akışın küçük bir kısmı zorlanarak basınç düşmesi meydan getirilir.



Şekil 3.7. Debimetre akış kanalları ve çalışma prensibi

Debimetre içerisinde bulunan sensör tüpü içerisine yönlendirilen gaz buharına ise sensör tüpü etrafına sarılı iki adet rezistanslı sıcaklık dedektörü bobini tarafından sabit miktarda ısı gönderilir. Debimetre içersinden akış geçmeye başladığında, bypass tüpü içersinden geçen akış ısıyı T_1 sıcaklık ölçerden T_2 sıcaklık ölçere taşır ve T_2 sıcaklık ölçerin gösterdiği değer bir miktar artar. Sonuç olarak Smart Trak 2 mikroişlemci tarafından sıcaklık farkı ölçülür. Şekil 3.8.'de gaz akış ölçme prensibi verilmiştir.



Şekil 3.8. Akış ölçme kesiti

3.3.3. Egzoz emisyonlarının ölçülmesi

Emisyon seviyeleri azot oksitler (azot oksit NO, ve azot dioksit ki genellikle NO_x diye gruplandırılır), karbon monoksit (CO), yanmamış hidrokarbon (HC) ve partikül emisyon seviyeleri önemli motor çalışma karakteristikleridir. Motor egzoz gazlarındaki gaz emisyonlarının konsantrasyonları genellikle part per million, ppm ile yâda hacmin yüzdesi ile ölçülür. Deneylerde egzoz gazı emisyon ölçümleri BOSCH marka BEA 350 model emisyon ölçüm cihazı ile MRU AIR*tair* OPTIMA 7 çoklu gaz emisyon ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Bosch BEA 350 model benzinli ve dizel motorlarda emisyon testleri gerçekleştirmek için üretilen bir emisyon test cihazıdır. Dört gaz emisyon ölçümü, beş gaz emisyon ölçümü ve opasite ile is emisyonu ölçümü seçenekleri test cihazında bulunmaktadır. MRU AIR*tair* OPTIMA 7 altı gaz emisyon ölçümeye imkan tanımakta ve farklı yakıt seçenekleri bulunmaktadır. Şekil 3.9.'da egzoz emisyon cihazları ve Çizelge 3.4. ile 3.5.'de teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.4. Bosch BEA 350 egzoz emisyon cihazı teknik özellikleri

Bosch BEA 350	**Ölçüm Aralığı**	**Hassasiyet**
CO	0,000...10,00 (%) hacimsel	% 0,001 hacimsel
CO_2	0,00…18,00 (%) hacimsel	% 0,01 hacimsel
HC	0... 9999 ppm hacimsel	1 ppm hacimsel
NO_x	0..,5000 ppm	1 ppm hacimsel
O_2	0,00 ... 22,00 (%)hacimsel	% 0,01 hacimsel
Lamda	0,500 ... 9,999	0,001
Bulanıklık derecesi	0 - 100 (%)	0,1 %



Şekil 3.9. Egzoz emisyon cihazları

Çizelge 3.5. MRU AIR*tair* OPTIMA 7 egzoz emisyon cihazı teknik özellikleri

MRU AİR*tair*	**Ölçüm Aralığı**	**Hassasiyet**
CO	0….....4000 ppm	% 5
CO_2	0….....20,00 (%)	% 5
NO_2	0….....200 ppm	% 5
NO	0….....5000 ppm	% 5
O_2	0 ….. ..21,00 (%) hacimsel	% 0,2 hacimsel
SO_2	0.....2000 ppm	% 5
Gaz sıcaklığı (max.)	0….....650	± 2 °C

3.3.4. Hava ve yakıt miktarı ölçülme düzeneği

Deneyler esnasında, Şekil 3.10a.'da genel görünüşü verilen ve 0–80 mm H_2O aralığında ölçüm yapan bir eğik manometreye bağlanan bir hava metre kullanılmıştır. Deneylerde hava metre girişine 75 mm çaplı bir orifiz plaka takılmıştır. Ayrıca dizel yakıtının, yakıt tüketimi ölçmek için hacimsel yönteme göre çalışan 50–100 ml'lik bir yakıt tüketimi düzeneği kullanılmıştır. Yakıt tüketim ölçme düzeneği Şekil 3.10b.'de görülmektedir.



a. Hava metre



b. Yakıt ölçme düzeneği

Şekil 3.10. Hava metre ve yakıt ölçme düzeneği

3.3.5. Hidrojen tüpü, alev geri tepme valfi, basınç regülâtörü

Hidrojen yakıt hattı üzerindeki tüm bağlantı elamanlarında sızdırmazlığın sağlanabilmesi için, viton o-ring ve kare contalarla birlikte teflon bant kullanılmıştır. Sistemde motorun hacminin büyük olmasından dolayı yeterli hidrojeni sağlamak için bir adet 250 bar basınca sahip 8.3 m^3'lük hidrojen tüpü (Şekil 3.11a.) tercih edilmiştir. Sistemde meydana gelebilecek geri tepmeleri önlemek ve güvenliği sağlamak için maksimum 5 bar basınca kadar ayarlanabilen alev geri tepme valfleri (Şekil.11b.) ve yakıt hattındaki basıncı ayarlamak için 16 bara kadar ayarlanabilen bir basınç regülâtörü (Şekil3.11c.) kullanılmıştır.



a. Hidrojen tüpü **b.** Ayarlanabilir geri tepme valfleri **c.** Basınç regülatörü

Şekil 3.11. Yakıt hattı bağlantı ve güvenlik ekipmanları

3.4.Motor Karakteristiklerinin Belirlenmesi

3.4.1. Motor momenti ve efektif güç

Motor döndürme momentinin ölçülmesinde mekanik, hidrolik ve elektrikli dinamometre gibi değişik ölçüm yöntemleri olmasına rağmen bu çalışmada motorun büyüklüğüne uygun olarak hidrolik dinamometre kullanılmıştır. Moment ölçüm sistemi ve prensip şeması Şekil 3.12'de görülmektedir. Frenleme momenti doğrudan ölçülemediği için bu momente karşılık gelen kuvvet (F) ölçülerek moment kolu

uzunluğu (b) ile çarpılır. Moment kolu uzunluğu 0.50 m'dir. Yük hücresi donanımında ölçülen F (N) değeri ve b (m) moment kolu uzunluğuna bağlı olarak motorun ürettiği moment (M):

$$M = F.b \quad (3.1)$$

şeklindedir.

Kontrol panelinden okunan motor devri n (d/dk.) ise, motorun efektif gücü (P_e) eşitlik 3.2'deki formülle hesaplanır:

$$P_e = M.\ \omega \quad (3.2)$$

Burada ω, açısal hızdır ve birimi rad/s'dir.

$$\omega = \frac{2.\pi.n}{60} \quad (3.3)$$

yukarıdaki eşitliklerden

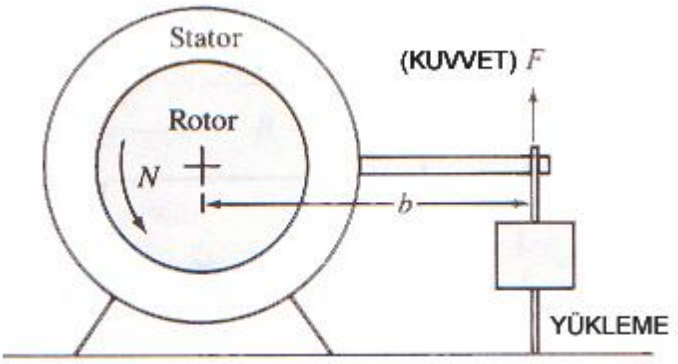
$$P_e = \frac{M.n}{9549} \text{ kW olarak elde edilir.} \quad (3.4)$$

Burada;

P_e= Motor gücü, kW

M=Motor momenti, Nm

N=Motor hızı, d/dk



Şekil 3.12. Moment ölçüm sistemi ve prensip şeması (Çeper,2009)

3.4.2. Özgül yakıt tüketimi

Deneysel çalışmalarda yakıt tüketimini ölçmek için hacimsel yöntem kullanılmıştır. Motorun deney setinin kalibre edilmiş yakıt ölçme borusundaki 50–100 ml yakıtı tüketme süresi kronometre ile tespit edilmiş daha sonra saatteki yakıt tüketimi yakıtın yoğunluğu ile çarpılarak kg cinsinden hesaplanmıştır. Motorun yakıt tüketim

oranı yüksek olduğunda daha geniş kalibre edilmiş hacim kullanılır. Özgül yakıt tüketimi eşitlik 3.5.'den oluşturulan ve eşitlik 3.6. kullanılarak hesaplanmıştır.

$$be = \frac{3600.\Delta V.\rho_y}{P_e.\Delta_t} \tag{3.5}$$

$$be = \frac{3600.\dot{m}_y}{P_e}(g/kWh) \tag{3.6}$$

be = Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)

ΔV= Tüketilen yakıt miktarı (cm^3)

ρ_y = Yakıtın yoğunluğu (g/cm^3)

m_y = Yakıtın kütlesel debisi (kg/h)

Δ_t = Zaman (dk)

3.4.3. Volümetrik verim ve termik verimin hesaplanması

Volümetrik verim, emme zamanında silindire alınan hava miktarının toplam kurs hacmine oranı olarak tanımlanır. Çalışmada, volümetrik verim 3.7. nolu eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$\eta_v = \frac{L}{30.\rho_h.V_h.n} \tag{3.7}$$

L = Silindire alınan hava miktarı (kg/h)

ρ_h = Havanın yoğunluğu (kg/m^3)

n= Motor devri(d/dk.)

V_h= Silindir hacmi (litre)

Termik verim; yakıtın yanması sonucunda oluşan ısı enerjisine karşılık, motorun bu enerjiyi faydalı iş haline dönüştürme oranıdır. Yanma sonunda oluşan ısı enerjisinin büyük bir kısmı soğutma ve yağlama sistemi ile yanmış egzoz gazları tarafından motordan uzaklaştırılır. Bu nedenle ancak geriye kalan ısı, güce dönüşebilir. Çalışmada; termik verim 3.8. nolu eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$\eta_{th} = \frac{Pe.3600}{m_y.H_u.1000} \tag{3.8}$$

H_u = Yakıtın alt ısıl değeri (MJ/kg)

m_y =Yakıtın kütlesel debisi (kg/h)

P_e= Güç (kW)

3.4.4. Hidrojen zenginleştirme oranının tayini

Deney motoruna giden emme havasındaki hidrojen miktarının hesaplanmasında motorun yaktığı yakıtın devirlere göre kütlesel olarak miktarı hesaplanmış ve hacimsel orana çevrilerek %2.5, %5, %7.5 oranlarında hidrojen gönderilmiştir. Çalışmada hidrojen miktarı 3.9. nolu eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$m_h = \frac{m_h}{m_h + m_y} \tag{3.9}$$

m_h= Hidrojenin kütlesel debisi(kg/h)

3.4.5. Hava fazlalık katsayısı (HFK) ve eşdeğerlik oranının hesaplanması

Yanma esnasında kullanılan gerçek hava miktarının yakıtın yanması için gerekli stokiometrik (teorik) hava miktarına olan oranı hava fazlalık katsayısı olarak tanımlanır. Çalışmada; termik verim 3.10. nolu eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$\mathrm{HFK} = \lambda = \frac{(\mathrm{H/Y})_{\text{gerçek}}}{(\mathrm{H/Y})_{\text{teorik}}} \tag{3.10}$$

Eşdeğerlik oranı gerçek yakıt hava miktarının teorik yakıt hava miktarına oranı olarak tanımlanır**.** Çalışmada; termik verim 3.11. nolu eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$\varphi = \frac{1}{\lambda} = \frac{(\mathrm{Y/H})_{\text{gerçek}}}{(\mathrm{Y/H})_{\text{teorik}}} \tag{3.11}$$

Hidrojen ve dizelin oksijen ile tam yanma reaksiyonu (teorik) aşağıdaki yanma denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır**.**

Dizel yakıtı teorik yanması;

$$C_{16}H_{34} + 24.5\ (O_2 + 3.76\ N_2) \rightarrow 16\ CO_2 + 17\ H_2O + 97.47\ N_2 \tag{3.12}$$

Buradan;

H / Y = 14.93 / 1 bulunur.

%2.5 hidrojen ilavesi için;

$$(C_{16}H_{34} + 2.825\ H_2) + 25.9125\ (O_2 + 3.76\ N_2) \rightarrow 16\ CO_2 + 19.825\ H_2O + 97.47\ N_2 \tag{3.13}$$

Buradan;

H / Y = 15.35 / 1 bulunur.

%5 hidrojen ilavesi için;

$$(C_{16}H_{34} + 2.825\ H_2) + 25.9125\ (O_2 + 3.76\ N_2) \rightarrow 16\ CO_2 + 19.825\ H_2O + 97.47\ N_2 \tag{3.14}$$

Buradan;

H / Y = 15.80 / 1 bulunur.

%7.5 hidrojen ilavesi için;

$(C_{16}H_{34} + 2.825\ H_2) + 25.9125\ (O_2 + 3.76\ N_2) \rightarrow 16\ CO_2 + 19.825\ H_2O + 97.47\ N_2$ (3.15)

Buradan;

H / Y = 16.23 / 1 bulunur.

3.4.6. Hava debisinin ölçülmesi

Hava debisinin ölçülmesi gerek motorun performansının gerekse emisyon karakteristiklerinin hesaplanmasında gerçekçi olması için önemlidir. Hava/yakıt oranı, hava fazlalık katsayısı, hacimsel verim ve yanma analizinin yapılması için hava debisi ölçülür (Türkcan, 2006). Deney sonuçlarının gerçekçi olması için hava miktarının hassas bir şekilde ölçülmesi gerekmektedir. Motorlarda hava akışının ölçülmesinde kullanılan kare kenarlı orefiz plaka İngiliz standardına göre düzenlenmiş olup 3.16–3.17–3.18–3.19 kullanılan eşitlikler ile hesaplanmıştır.

$$\text{Akışkanın debisi(Q)} = \frac{0.2087.c.Z_D.Z_R..\varepsilon.E^2.\sqrt{h}}{\sqrt{\rho}} \quad (3.16)$$

$$\text{Reynolds Sayısı}(\text{Re}) = 0{,}2124.\frac{Q.\rho}{\mu.d} \quad (3.17)$$

$$\text{Hız yaklaşım faktörü}\ (E) = \frac{1}{(1-m^2)^{0.5}} \quad (3.18)$$

$$\text{Alan oranı}\ (m) = \left[\frac{d}{D}\right]^2 \quad (3.19)$$

Havanın, hava metre içerisine çekilmesi dış ortamdan yapıldığı için orifis öncesi çap D=∞ alınır ve $m=(d/D)^2$ eşitliğinde hesaplamalar yapılmıştır.

d= Orifis çapı (mm)

c=Temel katsayı

h=Orifis uçlarındaki basınç farkı mmH_2O

E=Hız yaklaşım faktörü

Є=Genişleyebilme faktörü

Q= Akışkanın debisi (litre/dak)

μ=Mutlak viskozite, poise (g/cm.s)

ρ=Havanın yoğunluğu (kg/m^3)

P=Ortamın mutlak basıncı (Paskal)

Z_R=Reynolds sayısı düzeltme faktörü

Z_D= Boru ölçüsü düzeltme faktör

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA

Direk enjeksiyonlu bir dizel motorunda, emme havasına belirli oranlarda hidrojen ilavesinin motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkilerini belirlemek için deneyler yapışmış ve elde edilen sonuçlar standart motorin yakıtı ile elde edilen deney sonuçları ile hidrojen ilavesiyle elde edilen deney sonuçları belirlenerek grafikler halinde verilmiştir. Yapılan deneylerde, motor devrinin değişiminin sabit tutulması, motora bağlı hidrolik dinamometre yardımıyla motor yükünün kontrol edilmesi ile sağlanmıştır. Bu bakımdan yapılan bu deneyler literatürde tam gaz yük karakteristiği olarak tanımlanır. Deney sonuçları; motor performans ve egzoz emisyonları olmak üzere iki ana başlıkta incelenmiştir.

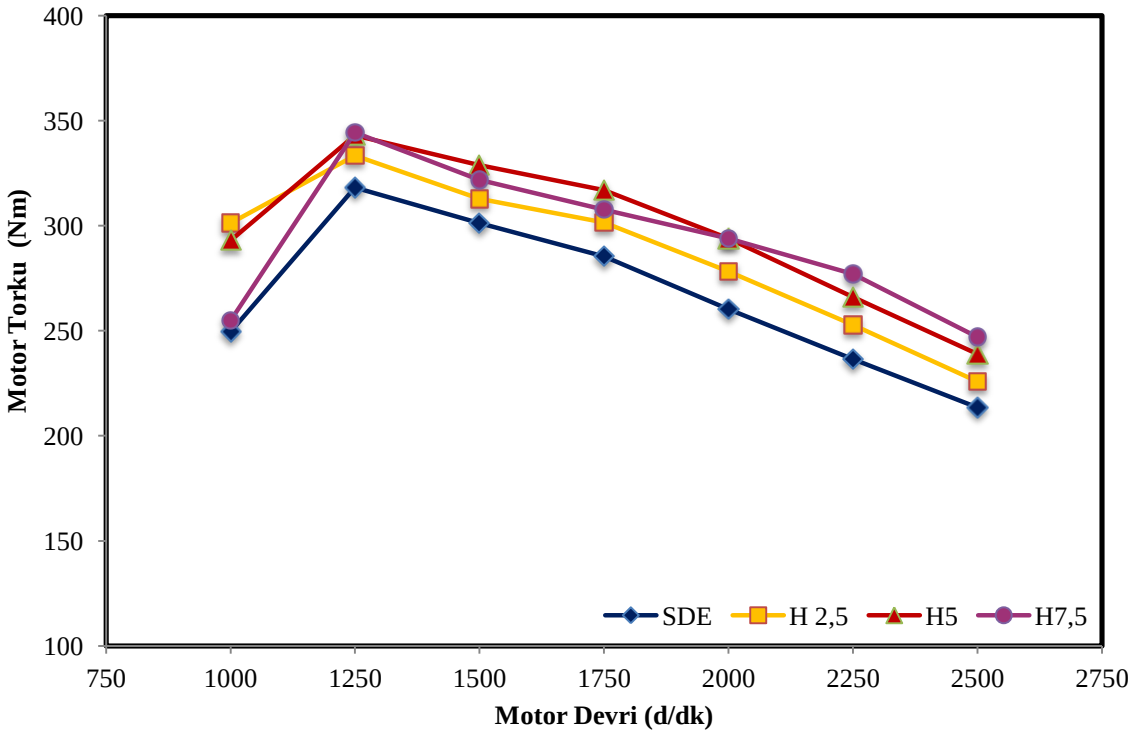
4.1. Motor Performansları

Motor performansları; motor torku, motor gücü, özgül yakıt tüketimi, termik verim ve volümetrik verim olmak üzere beş başlıkta incelenmiştir. Yapılan çalışmada, maksimum tork ve maksimum güç devrindeki değişimler göz önüne alınmıştır.

4.1.1. Motor tork değerlerinin karşılaştırılması

Tam yükte yapılan motor devrine bağlı olarak değişen standart diesel çalışması ve farklı hidrojen ilave oranlarda elde edilen motor torku değişimleri Şekil 4.1.'de görülmektedir. Motor torku 1250 d/dk'da %2.5, %5, %7.5 hidrojen ilavesinde standart diesel çalışmasına göre sırasıyla %4.8, %7.8, %8.3 artış görülmüştür. Bununla birlikte motorun tüm devirlerinde hidrojen yüzdesinin artmasıyla birlikte motor torkunda standart diesel çalışmasına göre artış meydana gelmiştir.

Sonuç olarak hidrojenin alt ısıl değerinin ve alevlenebilme özelliğinin yüksek olması ve dizel yanmasını geliştirme olasılığı motor torkunun artmasına olanak sağlamıştır. Ancak hidrojen miktarının artması ile birlikte emme manifoldu içerisinde hidrojenin kapladığı alanın artması ve Şekil 4.14.'de deki oksijen grafiğinde anlaşılacağı gibi oksijen miktarı azalması ile birlikte %7.5 hidrojen ilavesinde elde edilen motor torku %2.5 ve %5 hidrojen ilavesinde elde edilen motor torku değerleri kadar artış göstermemesine sebep olduğu sonucu çıkartılabilir. Yapılan bu çalışmadaki sonuçlar Erman (2007) ile Murcak (2003)'ün yaptıkları deneysel çalışmalarla benzerlik taşımaktadır.

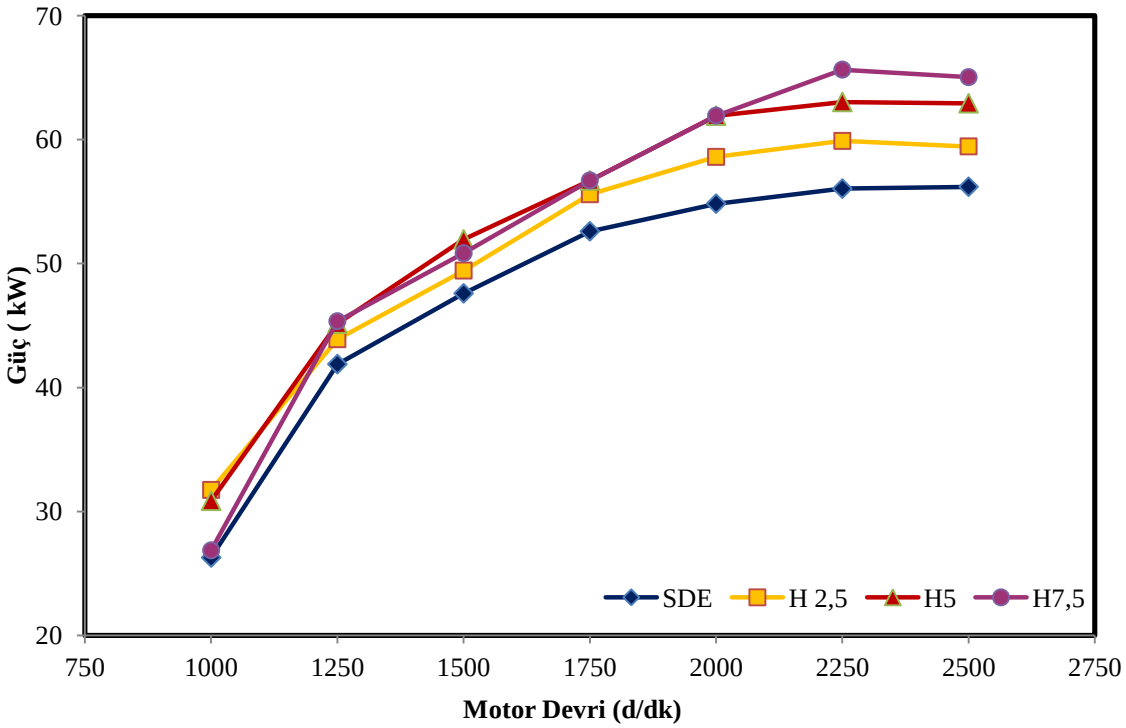


Şekil 4.1. Motor devrine bağlı olarak motor moment değişim grafiği

4.1.2. Motor gücü değerlerinin karşılaştırılması

Tam yükte yapılan motor devrine bağlı olarak değişen standart diesel çalışması ve farklı hidrojen ilave oranlarda elde edilen motor gücü değişimleri Şekil 4.2.'de görülmektedir. Grafik incelendiğinde 2250 d/dk maksimum motor gücü değerinde %2.5, %5, %7.5 hidrojen ilave oranında standart dizel çalışmasına göre sırasıyla %6.8, %12.4, %17 artış göstermiştir. Aynı şekilde tüm hidrojen yüzdelerinde de motor gücü standart dizel çalışması ile karşılaştırıldığında artış göstermiştir. Bu değerleri göz önüne aldığımızda en ideal motor gücü değeri % 5 hidrojen ilavesinde elde edilmiştir.

Sonuç olarak, motora ilave edilen hidrojenin yanma karakteristiğinden dolayı yanma hızının artması, motorda yanmanın iyileşmesi ile birlikte motor torkunun (Şekil 4.1.) ve motorun termik veriminin (Şekil 4.5.) artmasına bağlı olarak da motor gücünde bir artış meydana geldiği söylenebilir. Ancak bu artışın düşük devirlerde fazla olmaması motor üzerinde bulunan turboşarjın düşük devirlerde devreye girmemesinden dolayı yeterli miktarda havanın içeri alınamamasından kaynaklandığı söylenebilir. Bununla birlikte %7,5 hidrojen değerinde fazla artış meydana gelmemesi Şekil 4.14.'den de anlaşılacağı gibi oksijen miktarının azalması ve hidrojen miktarının artarak fazla hacim kaplamasından kaynaklanmaktadır. Yapılan bu çalışmadaki sonuçlar Erman (2007) ile Murcak (2003)'ün yaptıkları deneysel çalışmalarla benzerlik taşımaktadır.



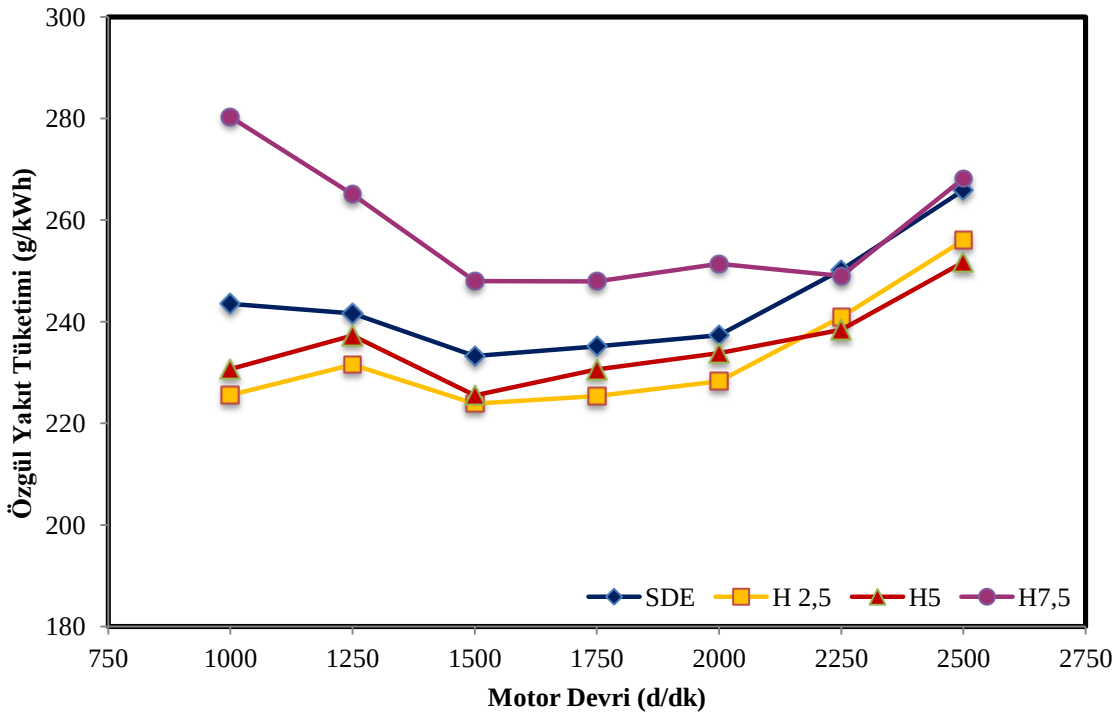
Şekil 4.2. Motor devrine bağlı olarak motor gücü değişim grafiği

4.1.3. Motor özgül yakıt tüketiminin karşılaştırılması

Tam yükte yapılan motor devrine bağlı olarak değişen standart diesel çalışması ve farklı hidrojen ilave oranlarda elde edilen motor gücü değişimleri Şekil 4.3.'de görülmektedir. Grafik incelendiğinde motor devrinin bütün değerleri için, hidrojen ilave oranları %2.5 %5 olduğu durumlarda özgül yakıt tüketimi ortalaması standart diesel çalışmasına göre sırasıyla %4, %3.5 azalırken, %7.5 hidrojen ilave oranında ise %6 artış göstermiştir. Ayrıca 1250 d/dk'da maksimum motor torku ve 2250 d/dk'da maksimum motor gücü değerinde %2.5, %5 hidrojen ilavesinde standart diesel çalışmasına göre sırasıyla %4, %2 ile %4, %5 azalış meydana gelirken, %7.5 hidrojen ilavesinde sırasıyla %10 ve %1 artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte en düşük özgül yakıt tüketiminin değeri 1000 d/dk'da 243.516 g/kWh standart diesel çalışmasında elde edilen değeriyle karşılaştırıldığında %2.5 hidrojen ilave oranında 192.785 g/kWh ile elde edilmiştir. Bu değerleri göz önüne aldığımızda en ideal özgül yakıt tüketimi değeri % 2.5 hidrojen ilavesinde elde edilmiştir.

Sonuç olarak standart diesel çalışmasına göre %2.5 ile %5 hidrojen ilavesinde özgül yakıt tüketimi miktarının azalmasının sebebi, yanma veriminin yüksek olması ve buna bağlı olarak yanma sonu basıncının yükselmesi ve yakıt miktarının biraz artmasıyla daha fazla güç elde edilmesinden kaynaklandığı söylenebilir. Buna rağmen % 7.5 hidrojen ilavesinde özgül yakıt tüketiminin artmasının sebebi Şekil 4.1. ve

4.2.'deki motor momenti ve gücü grafiğinden de anlaşılacağı gibi bu değerlerdeki azalma ve Şekil 4.7.'deki HFK grafiğinde de görüldüğü gibi hidrojen miktarının artması ile karışımın zenginleşmesi olarak ifade edilebilir.



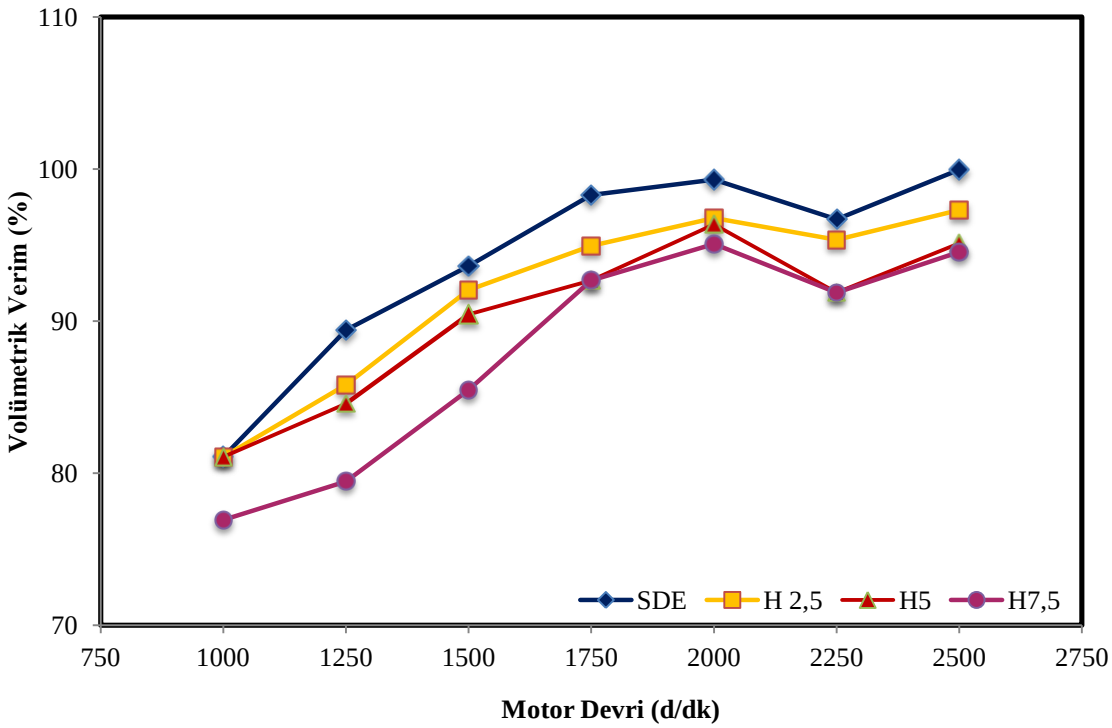
Şekil 4.3. Motor devrine bağlı olarak özgül yakıt tüketimi değişim grafiği

4.1.4. Motor volümetrik verimin karşılaştırılması

Tam yükte yapılan motor devrine bağlı olarak değişen standart diesel çalışması ve farklı hidrojen ilave oranlarda hesaplanan motor volümetrik verim değişimleri Şekil 4.4.'de görülmektedir. Grafik incelendiğinde motor devrinin bütün değerleri için, hidrojen ilave oranları %2.5 %5 %7.5 olduğu durumlarda volümetrik verim ortalaması standart diesel çalışmasına göre sırasıyla %2, %4, %6 azalma göstermiştir. Ayrıca 1250 d/dk'da maksimum motor torku ve 2250 d/dk'da maksimum motor gücü değerinde %2.5, %5, %7.5 hidrojen ilavesinde standart diesel çalışmasına göre sırasıyla %4, % 5, %11 ile %2.7, %4.8, %5.4 azalma meydana gelmiştir. Şekil 4.4'e göre maksimum volümetrik verim 2500 d/dk'da %99.95 standart dizel çalışmasında elde edilen değeriyle karşılaştırıldığında %2.5, %5, %7.5 hidrojen ilavesinde sırasıyla %97.29, %95 %94.5 ile elde edilmiştir. Bu değerleri göz önüne aldığımızda en ideal volümetrik verim değeri standart dizel çalışmasından sonra % 2.5 hidrojen ilavesinde elde edilmiştir.

Sonuç olarak standart diesel çalışmasına göre %2.5 %5, %7.5 hidrojen ilavesinde volümetrik verimin azalmasının sebebi, hidrojen miktarının artmasıyla

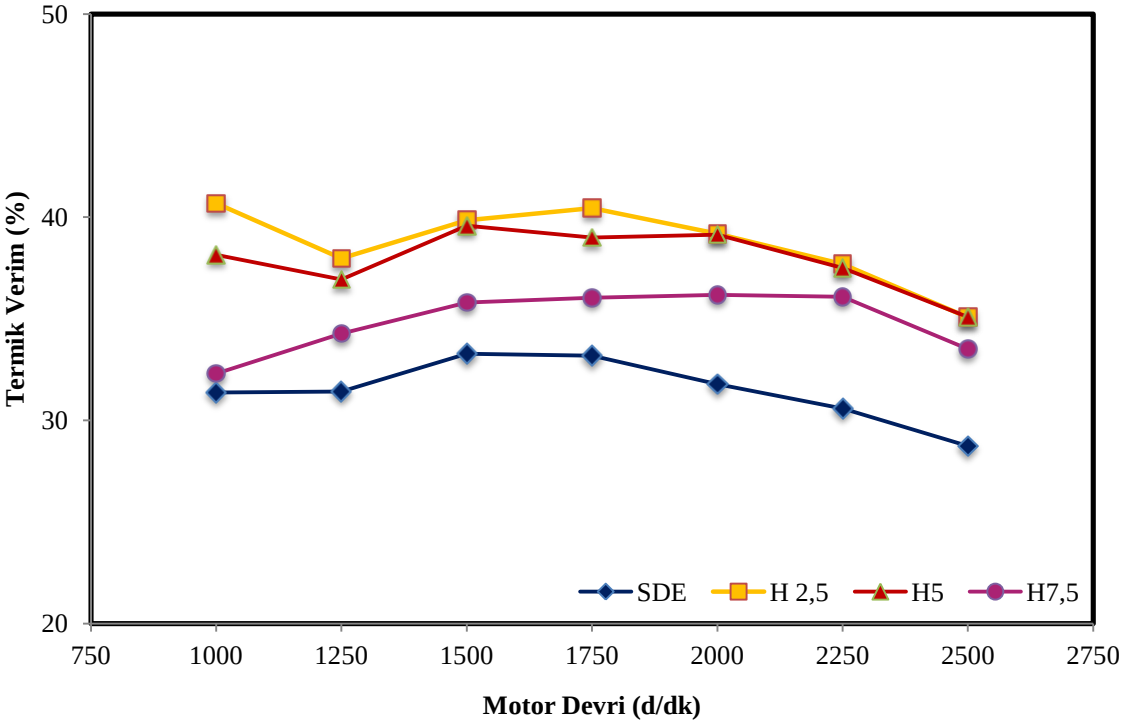
birlikte hidrojenin yoğunluğundan dolayı silindir içerisindeki kapladığı alanın artması sonucunda silindir içerisindeki hava miktarının azalmasından kaynaklandığı tahmin edilmektedir.



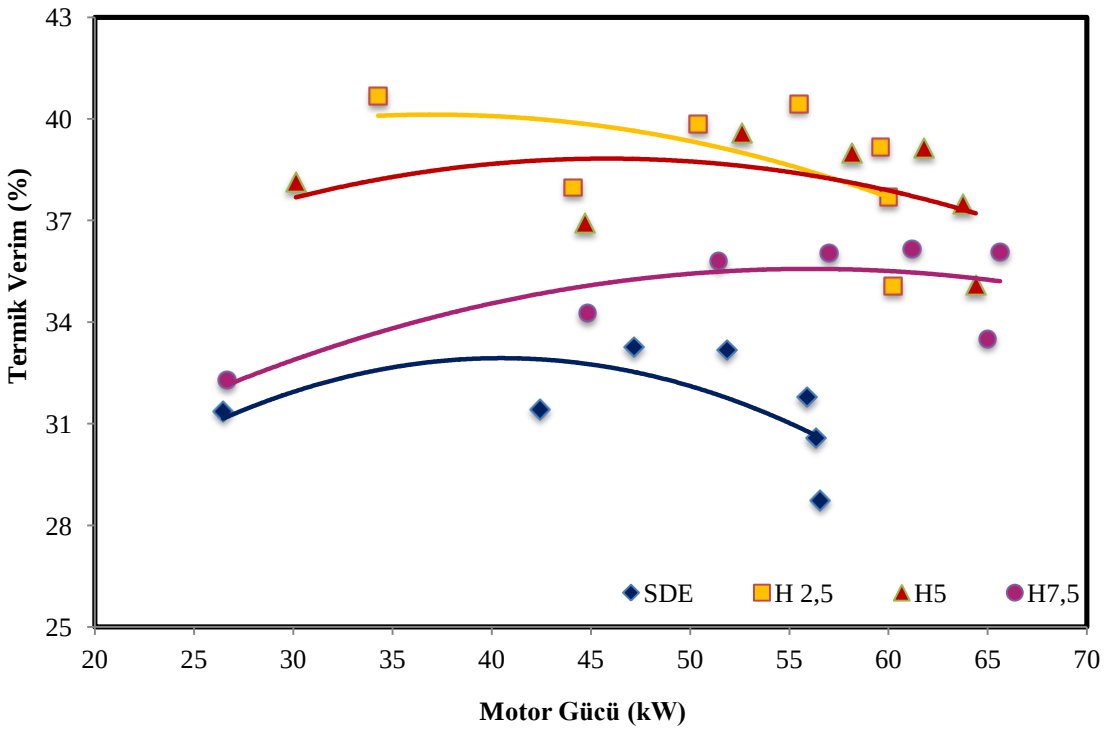
Şekil 4.4. Motor devrine bağlı olarak volümetrik verim değişim grafiği

4.1.5. Motor termik verimin karşılaştırılması

Tam yükte yapılan motor devrine bağlı olarak değişen standart diesel çalışması ve farklı hidrojen ilave oranlarda hesaplanan motor termik verim değişimleri Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'da görülmektedir. Grafikler incelendiğinde motor devrinin bütün değerleri için, hidrojen ilave oranları %2.5 %5 %7.5 olduğu durumlarda termik verim ortalaması standart diesel çalışmasına göre sırasıyla %23 %20, %10.8 artış göstermiştir. Ayrıca 1250 d/dk'da maksimum motor torku ve 2250 d/dk'da maksimum motor gücü değerinde %2.5, %5, %7.5 hidrojen ilavesinde standart diesel çalışmasına göre sırasıyla %20.8, % 17.5, %9 ile %22, %22, % 16.5 artış meydana gelmiştir. Şekil 4.5'de göre maksimum termik verim 1750 d/dk'da değerinde %33 standart dizel çalışmasında elde edilen değeriyle karşılaştırıldığında %2.5, hidrojen ilavesinde %40.4 ile elde edilmiştir. Bu değerleri göz önüne aldığımızda %2.5 ile %5 hidrojen ilave oranının birbirine yakın değişim gösterdiği ve ideal termik verimin %2.5 ilave oranlarında elde edildiği görülmüştür.



Şekil 4.5. Motor devrine bağlı olarak termik verim değişim grafiği



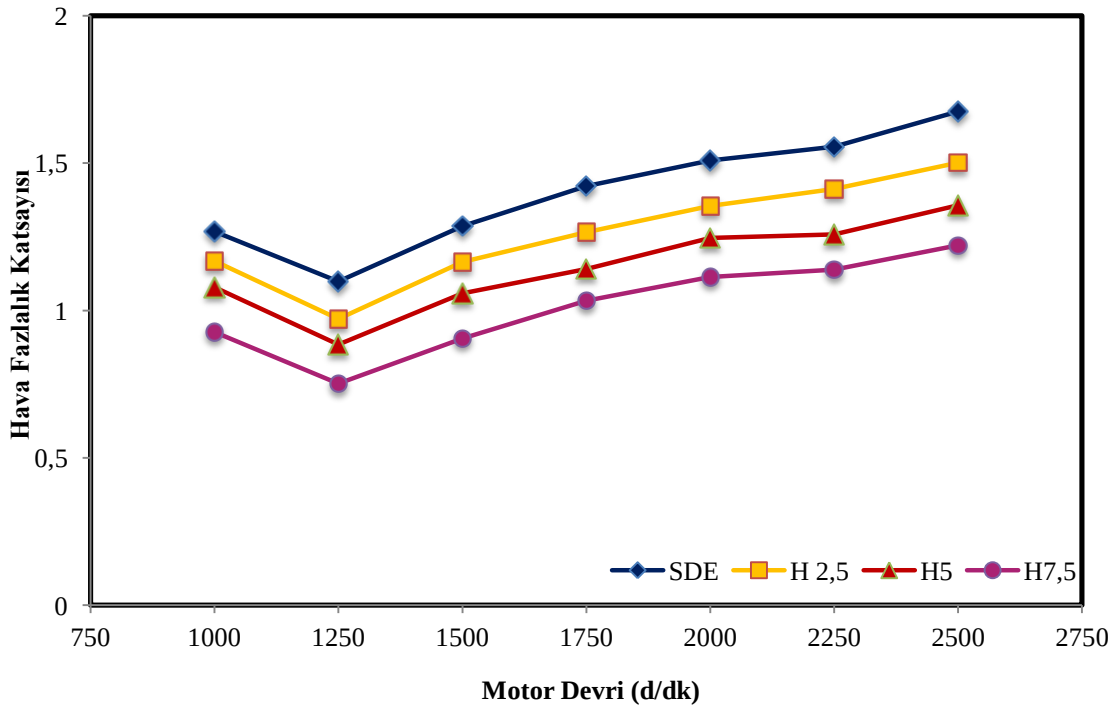
Şekil 4.6. Motor gücüne bağlı olarak termik verim değişim grafiği

Sonuç olarak, termik verimin bu değerlerde standart dizel çalışmasına göre yüksek çıkmasının sebebi, hidrojenin alt ısıl değerinin motorine göre yüksek olmasından ve silindir içerisinde gerçekleşen yanmanın iyileşmesinden kaynaklandığı söylenebilir. Bunun yanı sıra % 7.5 hidrojen ilave oranda motor termik veriminin diğer hidrojen ilave oranlarına göre düşmeye başlamasının sebebi; Şekil 4.14.'de ve Şekil

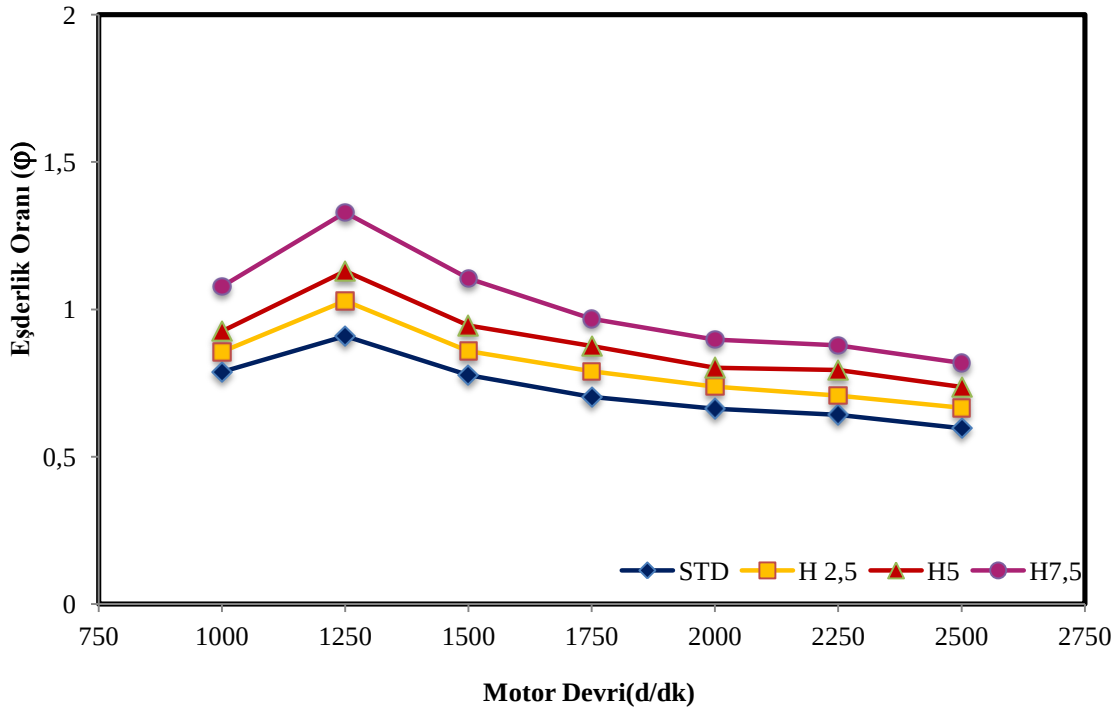
4.2.'deki oksijen ve güç değişim grafiğinden de anlaşılacağı gibi silindir içerisindeki hidrojen miktarının fazla yer kaplamasından dolayı oksijen miktarındaki ve gönderilen yakıt miktarına karşılık gelen güç değerindeki azalama olduğu söylenebilir. Yapılan bu çalışmadaki sonuçlar Saravanan ve ark. (2008b) ile Bose ve Maji (2009)'nin yaptıkları deneysel çalışmalarla benzerlik taşımaktadır.

4.1.6. Hava fazlalık katsayısı ve eşdeğerlik oranının karşılaştırılması

Tam yükte yapılan motor devrine bağlı olarak değişen standart diesel çalışması ve farklı hidrojen ilave oranlarda hesaplanan hava fazlalık katsayısı (HFK) ve eşdeğerlik oranı (φ) Şekil 4.7.'de ve Şekil 4.8.'de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde motor devrinin bütün değerleri için, hidrojen ilave oranları %2.5, %5 ve %7.5 olduğu durumlarda HFK ortalaması standart dizele göre sırasıyla %10, %18 ve %27.7 oranında azaldığı ve buna paralel olarak eşdeğerlik oranının %11, %22 ve %39 artığı görülmektedir. Ayrıca 1250 d/dk'da maksimum motor torku ve 2250 d/dk'da maksimum motor gücü değerinde %2.5, %5, 7.5 hidrojen ilavesinde 1.09 ile 1.55 standart diesel HFK çalışmasına göre sırasıyla, 0.97, 0.88, 0.75 ile 1.41, 1.25, 1.13 HFK değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.7.'de maksimum HFK maksimum gücün olduğu devirde elde edilmiştir. Bu değerleri göz önüne aldığımızda en ideal HFK değeri standart dizel çalışmasından sonra % 2.5 hidrojen ilavesinde elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Motor devrine bağlı olarak hava fazlalık katsayısı değişim grafiği



Şekil 4.8. Motor devrine bağlı olarak eşdeğerlik oranı değişim grafiği

Sonuç olarak, HFK'nın bu değerlerde standart dizel çalışmasına göre azalmasının sebebi, Şekil 4.14.'de ve Şekil 4.4.'deki oksijen ve volümetrik verim grafiklerinden de anlaşılacağı gibi, artan karışım oranı ile birlikte hem oksijen miktarının azaldığı hem de volümetrik verimde azalma olduğu, bunun sonucunda da HFK'nda azalma meydana geldiği sonucu çıkartılabilir. Ayrıca eşdeğerlik oranı HFK ile ters orantılı olduğundan, eşdeğerlik oranının artmasına neden oluştur.

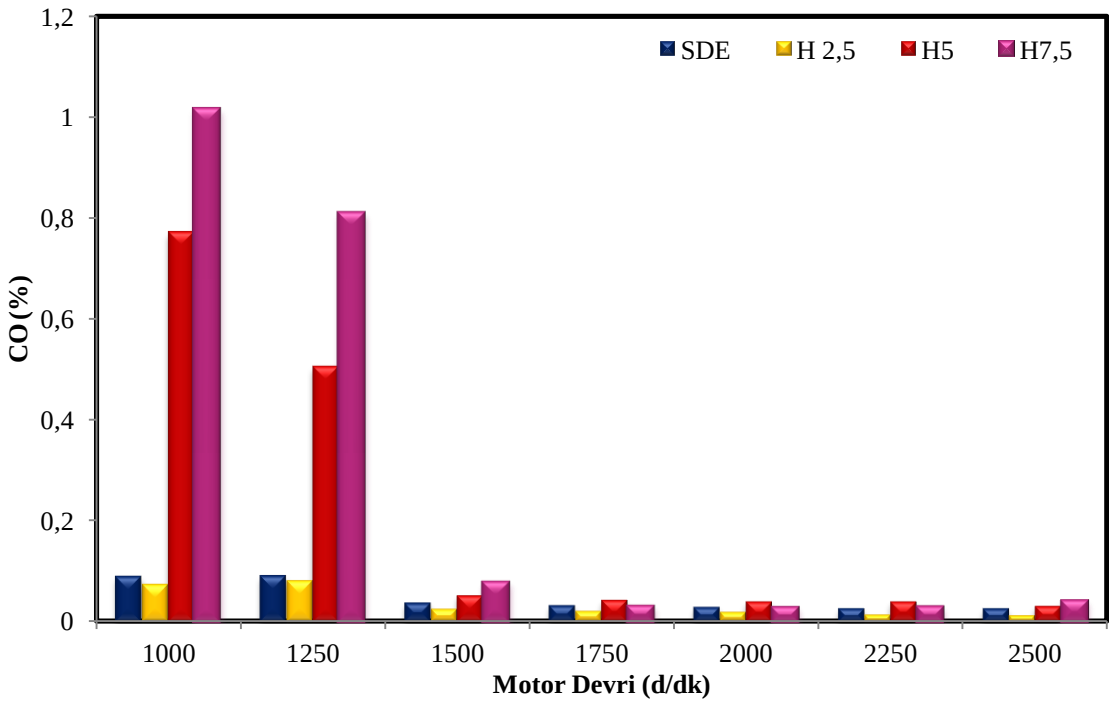
4.2. Egzoz Emisyonları

Egzoz emisyonları, karbon monoksit, karbondioksit, hidrokarbon, azot oksitler, oksijen ve egzoz sıcaklığı olmak üzere altı başlıkta incelenmiştir.

4.2.1. Karbon monoksit emisyonları

Dizel motorları genellikle fakir karışım oranlarında çalışmaktadır. Bu da silindir içerisindeki karışım oranın fakir olmasına ve karbon monoksit (CO) emisyonlarının düşük olmasına neden olmaktadır. CO emisyonları yakıt içerisindeki karbonun tamamen yanmaması sonucu oluşan renksiz kokusuz ve zehirli bir gazdır. CO oluşumu karbon ve hidrojen ihtiva eden yakıtların oksijenle oksidasyonundan kaynaklanır. Çıkan ürünlerin parçalanması ile CO oluşmaktadır. CO emisyonlarının oluşumunu etkileyen en önemli faktör HFK' dır (Küleri, 2011).

Şekil 4.9.'da tam yükte farklı hidrojen ilave oranlarındaki CO değişimi sırasıyla motor devrine bağlı olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde motor devrinin bütün değerleri için, hidrojen ilave oranları %5 ve %7.5 olduğu durumlarda CO emisyonların ortalaması standart dizele göre artış gösterirken %2.5 hidrojen ilave oranında CO emisyonları azalma göstermektedir. Ayrıca 1250 d/dk'da maksimum motor torku ve 2250 d/dk'da maksimum motor gücü değerinde %2.5, %5, 7.5 hidrojen ilavesinde %0.089 ile %0.026 standart diesel CO emisyon değerine göre sırasıyla, %0.079, %0.505, %0.81 ile %0.014, %0.042, %0.030 CO emisyon değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.9.'da minimum CO maksimum gücün olduğu devirde %0.014 değeriyle %2.5 hidrojen ilavesinde elde edilmiştir. Bu değerleri göz önüne aldığımızda standart dizel çalışmasına göre en iyi CO emisyonu %2.5 hidrojen ilave oranı değerinde elde edilmiştir.



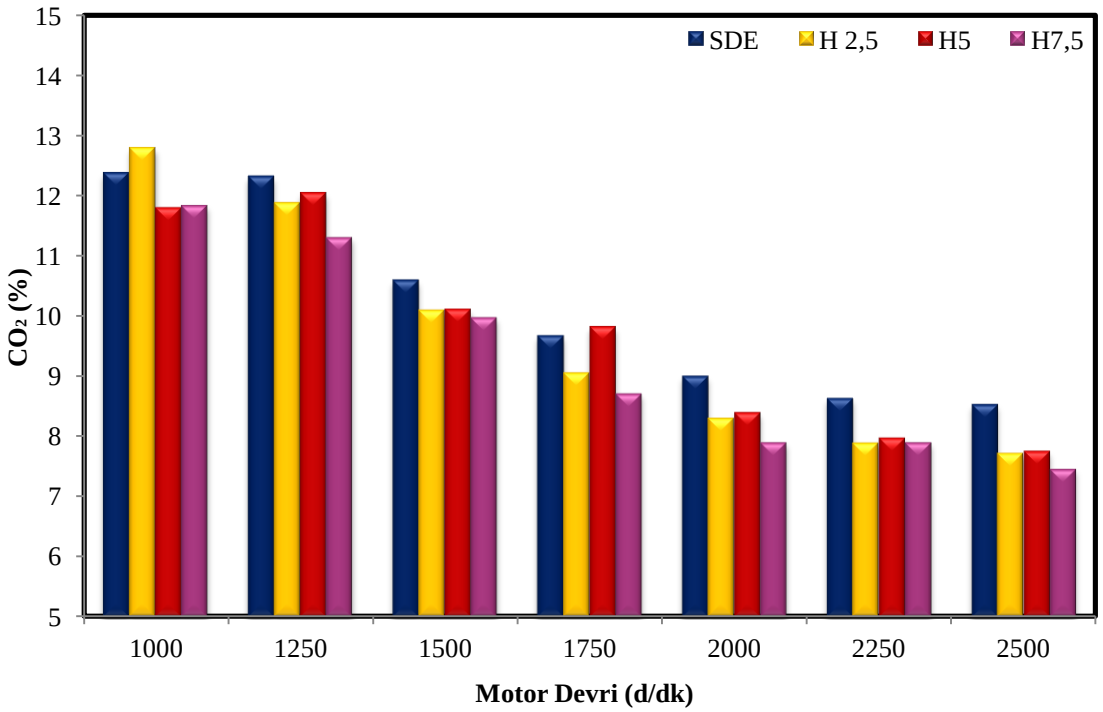
Şekil 4.9. Motor devrine bağlı olarak CO değişim grafiği

Sonuç olarak, standart dizel çalışmasına göre %5 ve %7.5 hidrojen ilave oranlarında CO miktarındaki artışın sebepleri, hidrojenin düşük yoğunluğundan dolayı emme havasının yerini alması, artan yakıt miktarı ile birlikte yakıt hava karışımı için yeterli sürenin olmaması ve karışımdaki yakıt miktarındaki artışın sonucunda yakıt içerisindeki karbonun tamamı CO_2 şeklinde yakacak oksijen bulamasından kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Ayrıca şekil 4.7.'deki HFK ve şekil 4.14.'deki oksijen grafikleri incelendiğinde, hidrojen miktarının artması ile birlikte HFK ve oksijende azalma meydana geldiği bunun sonucunda da CO emisyonlarının artığı

söylenebilir. %2.5 hidrojen ilave oranındaki azalma ise hem yeterli miktarda oksijenin olduğu hem de karışım için yeterli süre olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Yapılan bu çalışmadaki sonuçlar litaratürde Saravanan ve Nagarajan (2010) ile Erman (2007)'nin yaptıkları deneysel çalışmalarla benzerlik taşımaktadır.

4.2.2. Karbondioksit emisyonları

Renksiz ve yanmayan bir gaz olan karbondioksit (CO_2) karbon içerikli yakıtların tam olarak yanmasıyla ortaya çıkar. Bu nedenle CO_2 egzoz emisyonları için önemli bir parametredir. Şekil 410.'da tam yükte farklı hidrojen ilave oranlarındaki CO_2 değişimi sırasıyla motor devrine bağlı olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde motor devrinin bütün değerleri için, hidrojen ilave oranları %2.5 %5 ve %7.5 olduğu durumlarda CO_2 emisyonların ortalaması standart dizele göre sırasıyla %4.1, %5.6 ve %8.4 azalma meydana gelmiştir. Ayrıca 1250 d/dk'da maksimum motor torku ve 2250 d/dk'da maksimum motor gücü değerinde %2.5, %5, %7.5 hidrojen ilavesinde standart diesel çalışmasına göre sırasıyla %3.5, % 2.2 %6 ile %9.5, %9, %12.5 azalma meydana gelmiştir. Şekil 4.10.'da minimum CO_2 emisyonu maksimum gücün olduğu devirde %8.5 standart diesel çalışmasına göre göre %7.5 hidrojen ilave oranında %7.4 ile elde edilmiştir. Bu değerleri göz önüne aldığımızda standart dizel çalışmasına göre en iyi CO_2 emisyonu %7.5 hidrojen ilave oranı değerinde elde edilmiştir.



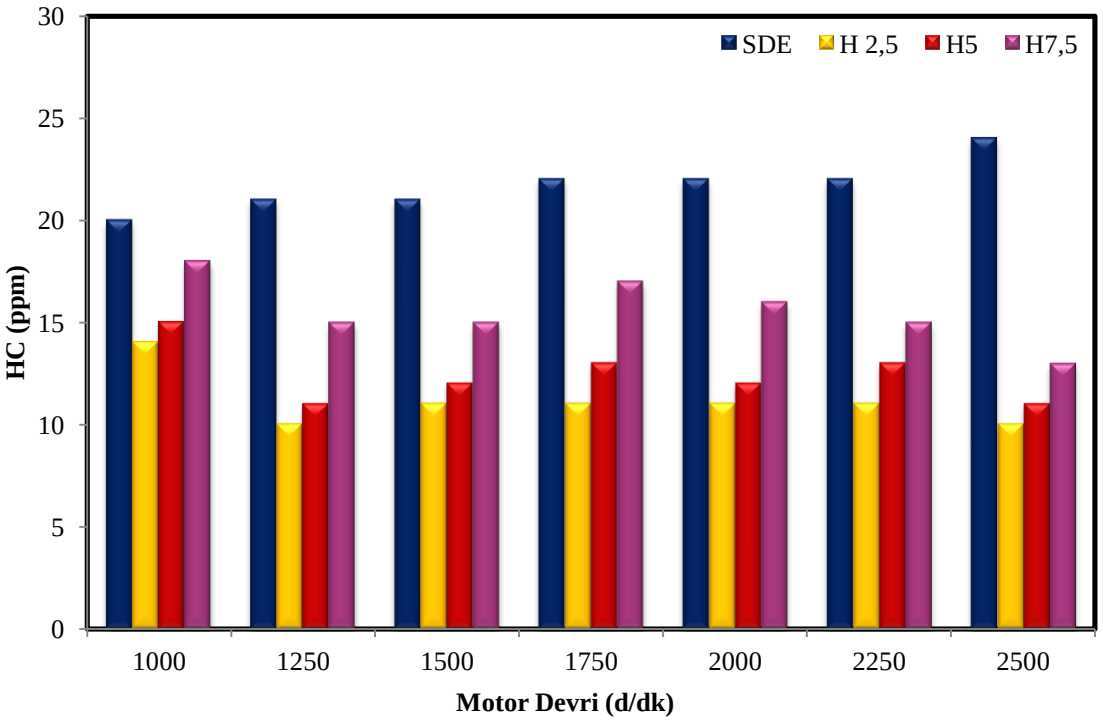
Şekil 4.10. Motor devrine bağlı olarak CO_2 değişim grafiği

Sonuç olarak, standart dizel çalışmasına göre %2.5, %5 ve %7.5 hidrojen ilave oranlarında CO_2 miktarındaki azalması, hidrojenin içerisinde karbon atomunun bulunmamasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca karışım zenginleştikçe yakıtın içerisinde bulunan karbon (C) atomunun yakacak oksijen bulamamasından dolayı CO_2 emisyonu azalmasına, Şekil 4.9.'deki CO emisyon grafiğinden de anlaşılacağı gibi CO emisyonlarının artmasına neden olduğu söylenebilir. Yapılan bu çalışmadaki sonuçlar litaratürde Saravanan ve ark. (2008[c]), Bose ve Maji (2009) ve Saravanan ve Nagarajan (2009)'nin yaptıkları deneysel çalışmalarla benzerlik taşımaktadır.

4.2.3. Hidrokarbon emisyonları

Hidrokarbonlar (HC) hidrokarbon içeren yakıtların tamamen yanmaması sonucu oluşan emisyonlardır ve yaklaşık olarak motora giren yakıt miktarının %1–1.5'ini oluştururlar. Şekil 4.11'de tam yükte farklı hidrojen ilave oranlarındaki HC değişimi sırasıyla motor devrine bağlı olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde motor devrinin bütün değerleri için, hidrojen ilave oranları %2.5 %5 ve %7.5 olduğu durumlarda HC emisyonların ortalaması standart dizele göre sırasıyla %48.6, %42.8, %28 azalış göstermiştir. Ayrıca 1250 d/dk'da maksimum motor torku ve 2250 d/dk'da maksimum motor gücü değerinde %2.5, %5, %7.5 hidrojen ilavesinde standart diesel çalışmasına göre sırasıyla %52, %%47.6, %28.5 ile %58, %54, %46 oranında HC emisyonunda azalma meydana gelmiştir. Şekil 4.11.'de en düşük HC emisyonu maksimum torkun olduğu devirde 21 ppm standart diesel çalışmasına göre göre %2.5 hidrojen ilave oranında 10 ppm ile elde edilmiştir. Bu değerleri göz önüne aldığımızda standart dizel çalışmasına göre en iyi HC emisyonu %2.5 hidrojen ilave oranı değerinde elde edilmiştir.

Sonuç olarak standart dizel çalışmasına göre %2.5, %5 ve %7.5 hidrojen ilave oranlarında HC miktarındaki azalması, hidrojenin içerisinde karbon atomunun bulunmaması ve hidrojenin yüksek yanma hızından dolayı dizel yanmasını geliştirmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca karışım zenginleştikçe karışımda bulunan oksijen miktarı azaltması sonucunda yanma kötüleşmekte ve HC emisyonları bir miktar artmaktadır. Yapılan bu çalışmadaki sonuçlar litaratürde Saravanan ve ark. (2007), Bose ve Maji (2009) ve Saravanan ve Nagarajan (2008c)'nin yaptıkları deneysel çalışmalarla benzerlik taşımaktadır.



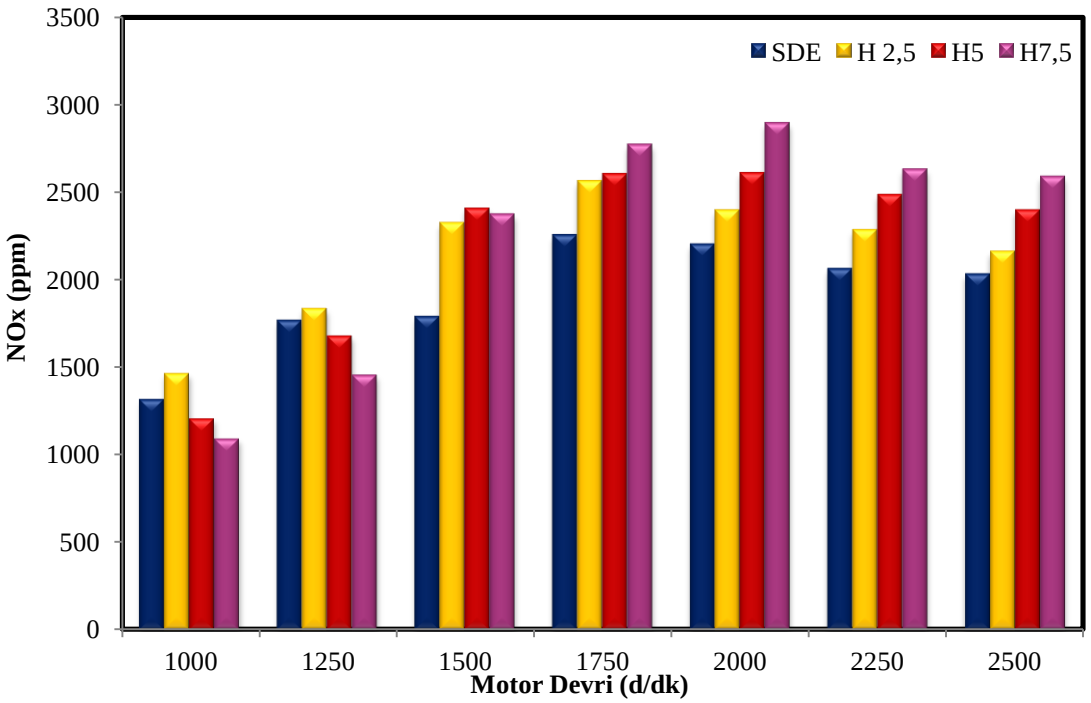
Şekil 4.11. Motor devrine bağlı olarak HC değişim grafiği

4.2.4. Azot oksit emisyonları

Azot ve oksijen gazlarının değişik moleküllerinin birleşmesi ile NO, NO_2, N_2O, N_2O_3 vb. gibi çeşitli gazlar ortaya çıkar ki bunların hepsine birden "Azot oksitler" (NO_x) denir (Küleri, 2011). Hava-yakıt karışımı içindeki NO_x, yanma odası sıcaklığı yaklaşık 1800 °C'ye yükseldiğinde N_2 ve O_2'nin birleşmesiyle oluşur. Eğer sıcaklık 1800 °C üstüne yükselmez ise, N_2 ve O_2, NO gazını meydana getirmeden egzoz sisteminden dışarı atılır. Şekil 4.12.'de tam yükte farklı hidrojen ilave oranlarındaki NO_x değişimi sırasıyla motor devrine bağlı olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde motor devrinin bütün değerleri için, hidrojen ilave oranları %2.5 %5 ve %7.5 olduğu durumlarda NO_x emisyonların ortalaması standart dizele göre sırasıyla %11.8, %14.8, %17.8 artış göstermektedir. Şekil 4.12.'de en düşük NO_x emisyonu 1000 d/dk'da 1315 ppm standart dizel çalışmasına göre %7.5 hidrojen ilave oranında 1092 ppm ile elde edilirken maksimum NO_x emisyonu 2000 d/dk'da 2200 ppm standart dizel çalışmasına göre %7.5 hidrojen ilave oranında 2894 ppm ile elde edilmiştir. Bu değerleri göz önüne aldığımızda standart dizel çalışmasından sonra en iyi NO_x emisyonu %2.5 hidrojen ilave oranı değerinde elde edilmiştir.

Sonuç olarak standart dizel çalışmasına göre %2.5, %5 ve %7.5 hidrojen ilave oranlarında NO_x miktarının artmasının sebebi, Şekil 4.13.'deki egzoz gazı çıkış sıcaklığında göz önüne alındığında yanma sıcaklığının NO_x oluşum sıcaklığını

aşmasından dolayı NO_x emisyon değerinin artmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca hidrojenin ilave edilmesiyle yanmanın iyileşmesi sonucu silindir içi sıcaklığın artarak NO_x oluşumunu artırmasından kaynaklandığı da söylenebilir. Yapılan bu çalışmadaki sonuçlar litaratürde Küleri (2011), Bose ve Maji (2009) ve Saravanan ve ark. (2008c)'nin yaptıkları deneysel çalışmalarla benzerlik taşımaktadır.

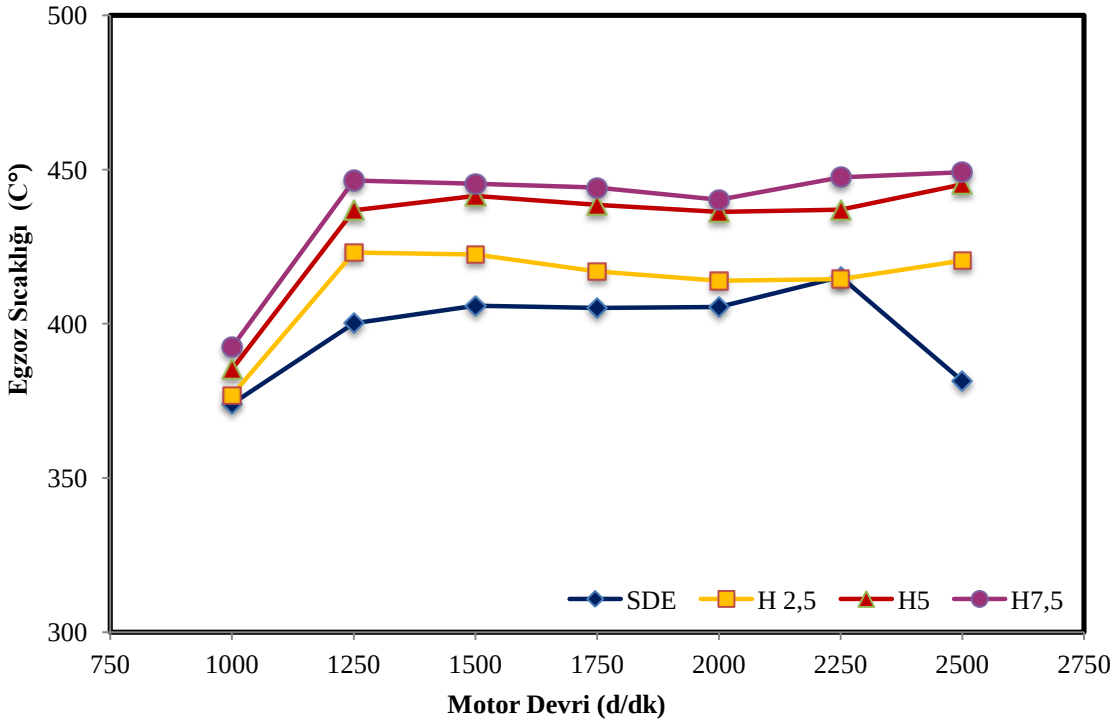


Şekil 4.12. Motor devrine bağlı olarak NO_x değişim grafiği

4.2.5. Egzoz gaz sıcaklığı

Şekil 4.13'de tam yükte farklı hidrojen ilave oranlarındaki egzoz gaz sıcaklık değişimi sırasıyla motor devrine bağlı olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde motor devrinin bütün değerleri için, hidrojen ilave oranları %2.5 %5 ve %7.5 olduğu durumlarda egzoz gaz sıcaklığı ortalaması standart dizele göre sırasıyla %4, %8.3 %9.4 artış göstermektedir. Ayrıca 1250 d/dk'da maksimum motor torku ve 2250 d/dk'da maksimum motor gücü değerinde %2.5, %5, %7.5 hidrojen ilavesinde 400 °C ile 381 °C standart diesel çalışmasına göre sırasıyla 423 °C, 437 °C, 446 °C ile 420 °C, 445 °C, 449 °C egzoz sıcaklıkları elde edilmiştir. Şekil 4.13.'de en düşük egzoz gazı sıcaklığı 1000 d/dk'da 374 °C standart dizel çalışmasına göre %2.5 hidrojen ilave oranında 376,8 °C ile elde edilirken maksimum egzoz sıcaklığı 2500 d/dk'da 381.5 °C standart dizel çalışmasına göre %7,5 hidrojen ilave oranında 449.1 °C ile elde edilmiştir.

Sonuç olarak, standart dizel çalışmasına göre %2.5, %5 ve %7.5 hidrojen ilave oranlarında egzoz gaz sıcaklığının artmasının sebebi, hidrojenin yanması ile birlikte yanma odası çevresindeki sıcaklığın artmasından kaynaklanmaktadır. Yapılan çalışma literatürdeki Saravanan ve Nagarajanın (2010) yaptığı çalışma ile benzerlik göstermektedir.



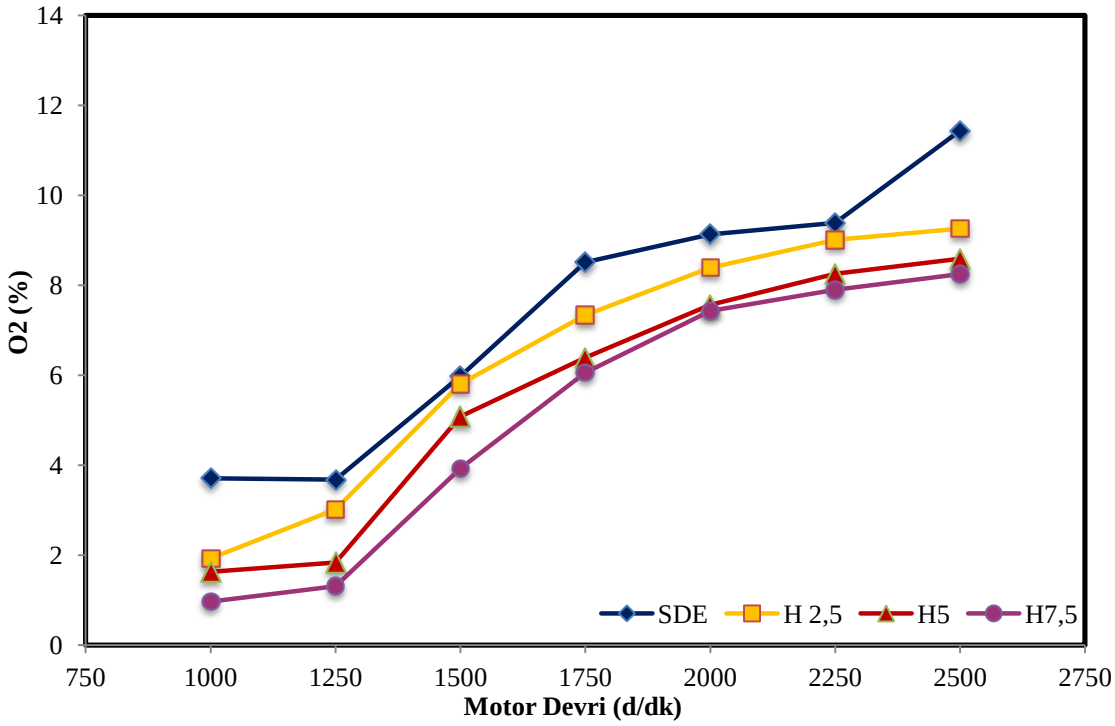
Şekil 4.13. Motor devrine bağlı olarak egzoz gaz sıcaklığı değişim grafiği

4.2.6. Oksijen emisyonu

Oksijen miktarı içten yanmalı motorlarda yanmanın gerçekleştirilmesi için önemli bir parametredir. Oksijen miktarının fazla olması hava yakıt oranını da önemli ölçüde etkilemektedir. Oksijen miktarının artması ile yanma iyileşmekte ve motor performansı artmaktadır. Şekil 4.14.'de tam yükte farklı hidrojen ilave oranlarındaki oksijen miktarı değişimi sırasıyla motor devrine bağlı olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde motor devrinin bütün değerleri için, hidrojen ilave oranları %2.5 %5 ve %7.5 olduğu durumlarda oksijen miktarı ortalaması standart dizele göre sırasıyla %13,6, %24, %30.8 azalma meydana gelmektedir. Ayrıca 1250 d/dk'da maksimum motor torku ve 2250 d/dk'da maksimum motor gücü değerinde %2.5, %5, %7.5 hidrojen ilavesinde standart diesel çalışmasına göre sırasıyla %16, %27, %34 ile %19, %26, %30 oranında O_2 miktarında azalma meydana gelmiştir. Şekil 4.14.'de en düşük O_2 miktarı 1000 d/dk'da %3.7 standart dizel çalışmasına göre %7.5 hidrojen ilave oranında 0.97 ile elde

edilirken, maksimum O_2 miktarı 2500 d/dk'da %11.4 standart dizel çalışmasına göre %2.5, %5, %7.5 hidrojen ilave oranında sırasıyla %9, %8.6 ve %8 ile elde edilmiştir.

Sonuç olarak, standart dizel çalışmasına göre %2.5, %5 ve %7.5 hidrojen ilave oranlarında O_2 miktarının azalmasının sebebi, hidrojenin yoğunluğunun düşük olmasından dolayı yanma odasında daha fazla yer kaplaması ve giren hava miktarının azalmasından kaynaklandığı söylenebilir. Ayrıca motor devrinin artması ile birlikte yeterli miktarda oksijenin silindir içerisine alınabilmesi için gerekli olan zamanın olmamasından kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 4.14. Farklı motor devirlerinde ve farklı hidrojen oranlarında oksijen miktarı değişim grafiği

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Günümüzde hızla artan enerji talebine karşılık bu talebi karşılayacak mevcut enerji kaynakları hızla tükenmekte olup, petrole bağlı olarak gelişen içten yanmalı motorlar için, ekonomik, çevreye zarar vermeyen alternatif yakıtların araştırılması önem kazanmıştır. Araştırılacak alternatif yakıtlar için, içten yanmalı motorun performansını fazla düşürmemesi, motorda değişiklik getirmeden doğrudan kullanılabilmesi, bol miktarda bulunması, düşük maliyet gibi özellikler önem taşımaktadır. Bu bakımdan yakıt olarak hidrojen, yenilenebilir ve çok düşük emisyon potansiyeline sahip olması ve birçok kaynaktan üretilebilmesi nedeniyle içten yanmalı motor yakıtı olarak iyi bir potansiyele sahiptir.

Yapılan bu tez çalışmasında; yakıt olarak hidrojen-motorinin kullanıldığı dört silindirli, 4 zamanlı su soğutmalı, turbo şarjlı, direk enjeksiyonlu, 3.908 litre süpürme hacmine sahip bir motor kullanılmıştır. Hidrojenin % 2.5, %5, %7.5 ilave oranlarında emme manifolduna farklı devirlerde ilavesi yapılmıştır. Sonuç olarak ilave edilen hidrojen yakıtının motor gücüne, motor torkuna, özgül yakıt tüketimine, efektif verime, termik verimine, volümetrik verime ve azot oksit (NO_x), karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO_2), hidrokarbon (HC) gibi egzoz emisyonlarına etkisi incelenmiştir. Bu sonuçlar standart motorin yakıtı ile elde edilen veriler ile karşılaştırılarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Motor moment değerleri incelendiğinde, motor momenti 1250 d/dk değerinde %2.5, %5, %7.5 hidrojen ilavesinde standart dizel çalışmasına göre sırasıyla %4.8, %7.8, %8.3 artış görülmüştür. Ayrıca motorun tüm devirlerdeki farklı hidrojen ilave oranlarında da artış meydana gelmiştir. En iyi sonuç % 2.5 ve %5 hidrojen ilave oranlarında elde edilirken, hidrojen ilave oranının %7,5 seviyesine ulaşması ile birlikte hidrojenin silindir içerisinde fazla yer kaplaması ve oksijen miktarının azalmasından dolayı moment düşmeye başlamıştır.

Motor gücü değerleri incelendiğinde, 2250 d/dk'da motorun maksimum güç değerinde %2.5, %5, %7.5 hidrojen ilave oranında standart dizel çalışmasına göre sırasıyla %6.8, %12.4, %17 artış göstermiştir. Bu artış motora ilave edilen hidrojenin yanma karakteristiğinden dolayı yanma hızının artırarak yanmayı iyileştirmesi ve motorun termik veriminin artmasına bağlı olarak motor gücünde de bir artışı meydana getirmiştir. En iyi sonuç %5 hidrojen ilave oranında elde edilmiştir.

Motor özgül yakıt tüketimi değerleri incelendiğinde, özgül yakıt tüketiminin en düşük değeri 1000 d/dk ’da 243.516 g/kWh standart dizel çalışmasında elde edilen değeriyle karşılaştırıldığında %2.5 hidrojen ilave oranında 192.785 g/kWh ile elde edilmiştir. % 7.5 hidrojen ilave oranında yakıt miktarının artması ve oksijen miktarının azalması sonucunda özgül yakıt tüketimi değeri artmıştır. En iyi sonuç %2.5 ve %5 hidrojen ilave oranlarında elde edilmiştir.

Motor volümetrik verim değerleri incelendiğinde, motor devrinin bütün değerleri için, hidrojen ilave oranları %2.5 %5 %7.5 olduğu durumlarda volümetrik verim ortalaması standart diesel çalışmasına göre sırasıyla %2, %4, %6 azalma göstermiştir Ayrıca 1250 d/dk maksimum motor torku ve 2250 d/dk’daki maksimum motor gücü değerinde %2.5, %5, %7.5 hidrojen ilavesinde standart diesel çalışmasına göre sırasıyla %4, % 5, %11 ile %2.7, %4.8, %5.4 azalma meydana gelmiştir. Maksimum volümetrik verim 2500 d/dk değerinde %99.95 standart dizel çalışmasında elde edilen değeriyle karşılaştırıldığında 2.5, %5, %7.5 hidrojen ilave oranlarında sırasıyla %97.29, %95 %94.5 ile elde edilmiştir. Dizel çalışmasına göre en iyi sonuç %2.5 hidrojen ilave oranlarında elde edilmiştir.

Motor termik verim değerleri incelendiğinde, motor devrinin bütün değerleri için, hidrojen ilave oranları %2.5, %5 ve %7.5 olduğu durumlarda motor termik veriminin ortalaması standart diesel çalışmasına göre sırasıyla %23, %20 ve %10.8 artış meydana gelmiştir. Ayrıca 1250 d/dk’da maksimum motor torku ve 2250 d/dk’da maksimum motor gücü değerinde %2.5, %5, %7.5 hidrojen ilavesinde standart diesel çalışmasına göre sırasıyla %20.8, % 17.5, %9 ile %22 %22 % 16.5 artış elde edilmiştir. Maksimum termik verim 1750 d/dk değerinde %33 standart dizel çalışmasında elde edilen değeriyle karşılaştırıldığında %2.5, hidrojen ilavesinde %40.4 ile elde edilmiştir Dizel çalışmasına göre en iyi sonuç %2.5 hidrojen ilave oranlarında elde edilmiştir. Bu durum hidrojenin alt ısıl değerinin motorine göre yüksek olmasından ve silindir içerisinde daha iyi yanmanın sağlanmasından kaynaklanmaktadır.

Motor HFK ve eşdeğerlik oranı incelendiğinde, motor devrinin bütün değerleri için, hidrojen ilave oranları %2.5, %5 ve %7.5 olduğu durumlarda HFK ortalaması standart dizele göre sırasıyla %10, %18 ve %27.7 oranında azaldığı ve buna paralel olarak eşdeğerlik oranının %11, %22 ve %39 artığı görülmüştür. Ayrıca 1250 d/dk’da maksimum motor torku ve 2250 d/dk’da maksimum motor gücü değerinde %2.5, %5, 7.5 hidrojen ilavesinde 1.09 ile 1.55 standart diesel HFK çalışmasına göre sırasıyla, 0.97, 0.88, 0.75 ile 1.41, 1.25, 1.13 HFK değerleri elde edilmiştir. En ideal HFK değeri standart dizel çalışmasından sonra %2.5 hidrojen ilavesinde elde edilmiştir HFK

sayısındaki bu azalmanın, artan karışım oranı ile birlikte azalan silindir içi oksijen-hidrojen yüzdesinden kaynaklanmaktadır.

Motor CO emisyonları incelendiğinde, motor devrinin bütün değerleri için, hidrojen ilave oranları %5 ve %7.5 olduğu durumlarda CO emisyonların ortalaması standart dizele göre artış gösterirken %2,5 hidrojen ilave oranında CO emisyonları azalma göstermiştir. Ayrıca 1250 d/dk'da maksimum motor torku ve 2250 d/dk'da maksimum motor gücü değerinde %2.5, %5, %7.5 hidrojen ilavesinde %0,089 ile %0.026 standart diesel CO emisyon değerine göre sırasıyla, %0.079, %0.505, %0.81 ile %0.014, %0.041, %0.03 CO emisyon değerleri elde edilmiştir. CO emisyonlarının en düşük değeri 2500 d/dk'da %0.026 standart dizel çalışmasına göre %0.014 ile %2.5 hidrojen ilave oranında elde edilmiştir. Hidrojenin düşük yoğunluğundan dolayı emme havasının yerini alması, artan yakıt miktarı ile birlikte yakıt hava karışımı için yeterli sürenin olmaması ve karışımdaki yakıt miktarındaki artışın sonucunda yakıt içerisindeki karbonun tamamı CO_2 şeklinde yakacak oksijen bulamasından kaynaklanmaktadır.

Motor CO_2 emisyonları incelendiğinde, motor devrinin bütün değerleri için, hidrojen ilave oranları %2.5 %5 ve %7.5 olduğu durumlarda CO_2 emisyonların ortalaması standart dizele göre sırasıyla %4.1, %5.6 ve %8.4 azalma göstermiştir. Ayrıca 1250 d/dk'da maksimum motor torku ve 2250 d/dk'da maksimum motor gücü değerinde %2.5, %5, %7.5 hidrojen ilavesinde standart diesel çalışmasına göre sırasıyla %3.5, % 2.2 %6 ile %9.5, %9, %12,5 azalma meydana gelmiştir. En düşük CO_2 emisyonu 2500 d/dk 'da %8.5 standart dizel çalışmasına göre %7.5 hidrojen ilave oranında %7,4 ile elde edilmiştir. Standart dizel çalışmasına göre %2.5, %5 ve %7.5 hidrojen ilave oranlarında CO_2 miktarındaki azalması, hidrojenin içerisinde karbon atomunun bulunmaması kaynaklanmaktadır.

Motor HC emisyonları incelendiğinde, motor devrinin bütün değerleri için, hidrojen ilave oranları %2.5 %5 ve %7.5 olduğu durumlarda HC emisyonların ortalaması standart dizele göre sırasıyla %48.6, %42.8, %28 azalış göstermiştir. Ayrıca 1250 d/dk'da maksimum motor torku ve 2250 d/dk'da maksimum motor gücü değerinde %2.5, %5, %7.5 hidrojen ilavesinde standart diesel çalışmasına göre sırasıyla %52, %%47.6, %28.5 ile %58, %54, %46 oranında HC emisyonunda azalma meydana gelmiştir. En düşük HC emisyonu 1250 d/dk'da maksimum tork devrinde 21 ppm standart dizel çalışmasına göre %2,5 hidrojen ilave oranında sırasıyla, 10 ppm ile elde edilmiştir. Standart dizel çalışmasına göre %2.5, %5 ve %7.5 hidrojen ilave oranlarında HC miktarındaki azalması, hidrojenin içerisinde karbon atomunun bulunmaması ve

hidrojenin yüksek yanma hızından dolayı dizel yanmasını geliştirmesinden kaynaklanmaktadır.

Motor NO_x emisyonları incelendiğinde, motor devrinin bütün değerleri için, hidrojen ilave oranları %2.5 %5 ve %7.5 olduğu durumlarda NO_x emisyonların ortalaması standart dizele göre sırasıyla %11.8, %14.8, %17.8 artış göstermiştir. Ayrıca 1250 d/dk'da maksimum motor torku ve 2250 d/dk'da maksimum motor gücü değerinde %2.5, %5, 7.5 hidrojen ilavesinde 1765 ppm ile 2030 standart diesel NO_x emisyon değerine göre sırasıyla, 1831 ppm, 1679 ppm, 1456 ile 2157 ppm, 2399 ppm, 2588 ppm NO_x emisyon değerleri elde edilmiştir. En düşük NO_x emisyonu 1000 d/dk'da 1315 ppm standart dizel çalışmasına göre %7.5 hidrojen ilave oranında 1092 ppm ile elde edilirken maksimum NO_x emisyonu 2000 d/dk'da 2200 ppm standart dizel çalışmasına göre %7.5 hidrojen ilave oranında 2894 ppm ile elde edilmiştir. NO_x oluşumu hidrojenin ilave edilmesiyle yanmanın iyileşmesi sonucu silindir içi sıcaklığın artarak NO_x oluşma sıcaklığına ulaşmasından kaynaklanmaktadır şeklinde ifade edilebilir.

Motor egzoz gazı sıcaklıkları incelendiğinde, motor devrinin bütün değerleri için, hidrojen ilave oranları %2.5 %5 ve %7.5 olduğu durumlarda egzoz gaz sıcaklığı ortalaması standart dizele göre sırasıyla %4, %8.3 %9.4 artış göstermektedir. Ayrıca en düşük egzoz sıcaklığı 1000 d/dk'da 374 °C standart dizel çalışmasına göre %2.5 hidrojen ilave oranında 376.8 °C ile elde edilirken maksimum egzoz sıcaklığı 2500 d/dk'da 381.5 °C standart dizel çalışmasına göre %7.5 hidrojen ilave oranında 449.1 °C ile elde edilmiştir. Standart dizel çalışmasına göre %2.5, %5 ve %7.5 hidrojen ilave oranlarında egzoz gaz sıcaklığının artmasının sebebi, hidrojenin yanması ile birlikte yanma odası çevresindeki sıcaklığın artmasından kaynaklanmaktadır.

Motora giren oksijen miktarı incelendiğinde, motor devrinin bütün değerleri için, hidrojen ilave oranları %2.5 %5 ve %7.5 olduğu durumlarda oksijen miktarı ortalaması standart dizel çalışmasına göre sırasıyla %13.6, %24, %30, azalma meydana gelmiştir. En düşük O_2 miktarı 1000 d/dk'da % 3.7 standart dizel çalışmasına göre %7.5 hidrojen ilave oranında 0.97 ile elde edilirken, maksimum O_2 miktarı 2500 d/dk'da %11.4 standart dizel çalışmasına göre %2.5, %5, %7.5 hidrojen ilave oranında sırasıyla %9, %8,6 ve %8 ile elde edilmiştir. Standart dizel çalışmasına göre %2,5, %5 ve %7,5 hidrojen ilave oranlarında O_2 miktarının azalmasının sebebi, hidrojenin yoğunluğunun düşük olmasından dolayı yanma odasında daha fazla yer kaplaması ve giren hava miktarının azalmasından kaynaklanmaktadır.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre hidrojen, sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda fazla bir değişik yapılmadan ek yakıt olarak kullanılabileceği görülmüştür. Fakat mevcut araçlar üzerinde hidrojenin yakıt olarak kullanılabilmesi için üretim ve depolama maliyetlerinin düşürülmesi ile güvenlik önlemleri gibi konularda çalışmalar yapılması gerekmektedir. Bununla birlikte soğutma, yağlama ateşleme gibi sistemlerinde uzun süreli kullanımlarda herhangi bir probleme neden olmayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bu zorluklara rağmen yenilenebilir olması, emisyonları azaltması ve motor performansını artırması hidrojeni diğer alternatif yakıtlardan daha önemli hale getirmektedir.

Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar ve bilgiler ışığında, sıkıştırma ile ateşlemeli motorlara hidrojen ilave ile ilgili ileride yapılacak çalışmalarda aşağıda belirtilen durumların dikkate alınmasının yararlı olacağı düşünülmektedir.

- Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlara hidrojen ilavesinin silindir içerisindeki yanma olayına etkisinin gözlenebilmesi için silindir içi basıncının ölçülmesi,
- Hidrojen ilavesine bağlı olarak NO_x değerlerini azaltmak için su püskürtme veya egzoz gazı geri çevrimi (EGR) yöntemlerinin denenmesi ve emisyonlar açısından değerlendirilmesi,
- Hidrojenin daha yüksek oranlarda gönderilebilmesi için direk yanma odasına enjekte edebilecek bir enjektörün geliştirilmesi önerilebilir.

KAYNAKLAR

Akansu, O.S., 2007, Hidrojen yakıtının içten yanmalı motorlarda uygulanması, Tübitak Proje No: 104M413, 40-47

Alnıak, O. M., Oğur A., Karakaya Ç., Ertürk M., Güneş İ., Yüksek basınca dayanıklı kompozit hidrojen tankı imalatının incelenmesi, VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, 2008, İstanbul, 543-554

Anonim, 2011a, Hidrojen [Online], Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpages&b=hidrojenenerjisi&bn=225&hn=225&nm=384&id=389http, [Ziyaret Tarihi: [02.03.2011]

Anonim, 2011b, Hidrojen depolama [Online], Vikipedi, http://tr.wikipedia.org/wiki/Hidrojen_depolama#Karbon_Nanot.C3.BCpler, [Ziyaret Tarihi: [02.03.2011]

Anonim, 2011c, Hidrojen enerjisi [Online], http://www.meliksahtekin.com/?&Bid=672804, [Ziyaret Tarihi: [02.03.2011]

Anonymous, 2011, Glass Microsphere [Online], Hydrogen Storage, http://aefc.itu.edu.tr/hydrogen%20storage.html#Glass%20Microsphere, [Ziyaret Tarihi: [02.03.2011]

Antunes, Gomes M. J., Mikalsen, R., Roskilly, P.A., 2008, An investigation of hydrogen-fuelled HCCI engine performance and operation, International Journal of Hydrogen Energy 33, 5823–5828.

Antunes, Gomes, M. J,. Mikalsen R., Roskilly A P.., 2008, An experimental study of a direct injection compression ignition hydrogen engine, International Journal of Hydrogen Energy 34, 6516-6522

Apak, S., Tuncer, G., Atay, E., Global problemlere inovatif bir çözüm: Karadeniz hidrojen enerjisi, IV. Ulusal hidrojen enerji kongresi ve sergisi 2009, Kocaeli, 45-51

Aydemir, S., 1998, Enerji Kaynağı Olarak Hidrojen Üretim Yöntemlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne

Bari, S., Esmaeil Mohammad M., 2010, Effect of H_2/O_2 addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine, Fuel 89, 378-383

Batmaz, İ., 2006, Buji ateşlemeli motorlarda yakıta hidrojen ilavesinin motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisinin deneysel analizi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 22, No 1, 137-147

Birsen, E. B., 2008, Hidrojen yakıtının içten yanmalı motorlarda kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 1-5

Bose, Kumar Probir, Maji Dines, 2009, An experimental investigation on engine performance and emissions of a single cylinder diesel engine using hydrogen as inducted fuel and diesel as injected fuel with exhaust gas recirculation, International Journal of Hydrogen Energy 34, 4847-4854

COD (College of the Desert), 2001, Hydrogen fuel cell engines and related technologies course manual, Module 3: Hydrogen use in internal combustion engines, 1-29.

Çeper, A. B., 2009 Hidrojen-doğal gaz karışımlarının içten yanmalı motorlarda kullanılması, Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri,1-30

Das, M. L., 2002, Hydrogen engine: research and development (R&D) programmers in Indian Institute of Technology (IIT), Delhi, International Journal of Hydrogen Energy 27, 953-965

Erman, C., 2007, Hidrojenin ek yakıt olarak kullanılmasının dizel motora etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-5

Gadallah, H. A., Elshenawy A. E. , Elzahaby, M. A., El-Salmawy, A. H., Bawady, H. A., 2009, Effect of direct water injection on performance and emissions of a hydrogen fuelled direct injection engine, Ecologic Vehicles and Renewable Energies, Monaco, 178-191

Gürbüz, H., 2010, Tek silindirli buji ateşlemeli hidrojen motorunda yanma optimizasyonu, Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta,1-163

Gül, E. E., 2006, Hidrojenin içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılması ve performansa etkileri, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-40

Huang, Zuohua , Wang, Jinhua, Liu, Bing, Zeng, Ke, Yu, Jinrong, Jia, Deming, 2007, Combustion characteristics of a direct-injection engine fueled with natural gas–hydrogen blends under different ignition timings, Fuel 86, 381-387

Huang, Zuohua, Wang, Jinhua, Liu, Bing, Zeng, Ke, Yu Jinrong, Jiang, Deming, 2006, Combustion characteristics of a direct-injection engine fueled with natural gas-hydrogen blends under various injection timings, Energy & Fuels 20, 1498-1504

İçingür, Y., Batmaz İ., Murcak, A., 2002, Hidrojenin içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılma olanaklarının incelenmesi, 7. Uluslararası yanma sempozyumu Ankara, 148-159

İçingür, Y., Yamık, H., 2003, "Metil ve Etil Esterlerin Dizel Yakıtı olarak Kullanılma İmkanlarının Deneysel Olarak Araştırılması", Politeknik Dergisi, 2 459-464.

Kahraman, E,. Özcanlı, S. Cihangir, Özerdem B., 2007, An experimental study on performance and emission characteristics of a hydrogen fuelled spark ignition engine, International Journal of Hydrogen Energy, 32, 2066-2072

Karatepe, N., Özyuguran A.,Yavuz, R., Karbon yapılı malzemelerin hidrojen depolanmasında kullanımı, Türkiye 10. Enerji Kongresi 2006, İstanbul, 407-416

Kayfeci, M., Kurt, H., Bedir, F., Metal hidrid esaslı ısı pompasının iklimlendirmede kullanımının araştırılması, IV. Ulusal hidrojen enerji kongresi ve sergisi 2009, Kocaeli, 57-64

Kellegöz, M., Farklı özelliklerdeki proton değişim zarlı yakıt hücresi tasarımı ve ölçümleri, Doktora Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 22-40

Kim, Y.Y., Lee T. J., Choi, H. G., 2005, An investigation on the causes of cycle variation in direct injection hydrogen fueled engines, International Journal of Hydrogen Energy 30, 69-76

Kim, Y.Y., Lee T. J., Choic H. G., 2005, An investigation on the causes of cycle variation in direct injection hydrogen fueled engines, International Journal of Hydrogen Energy 30, 69-76

Korakianitis, T., Namasivayam M. A., Crookes J. R., 2010, Hydrogen dual fuelling of compression ignition engines with emulsified biodiesel as pilot fuel, International Journal O F Hydrogen Energy 35, 13329-13344

Kumar, Senthil, M., Ramesh, A., Nagalingam ,B., 2003, Use of hydrogen to enhance the performance of a vegetable oil fuelled compression ignition engine, International Journal of Hydrogen Energy 28, 1143-1154

Küleri, K.A., 2011, Fakir Yanmalı buji ateşlemeli motorlarda hidrojen ilavesinin çevrimsel farklar ve egzoz emisyonları üzerindeki etkileri, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 45-55

Liew, C., Li, H., Nuszkowski, J., Liu, S., Gatts, T., Atkinson, R., Clark, N., 2010, An experimental investigation of the combustion process of a heavy-duty diesel engine enriched with H_2, Internal Journal of Hydrogen Energy 35, 11357-11365

Ma, Jie, Su, Yongkang, Zhou, Yucheng, Zhang, Zhongli, 2003, Simulation and prediction on the performance of a vehicle's hydrogen engine, International Journal of Hydrogen Energy 28, 77-83

Masood, M., Ishrat, M.M., Reddy, S. A, 2007, Computational combustion and emission analysis of hydrogen–diesel blends with experimental verification, International Journal of Hydrogen Energy 32, 2539-2547

Murcak, A., 2003, dizel motorlarında hidrojenin yakıt olarak kullanılmasının motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisinin deneysel analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Ankara, 30-50

Overend, E., 1999, Hydrogen combustion engines, The University of Edinburgh School Of Mechanical Engineering, 30-37

Roy, M. M., Tomita, E., Kawahara, N, Harada, Y., Sakane, A., 2010, An experimental investigation on engine performance and emissions of a supercharged H2-diesel dual-fuel engine, International Journal Of Hydrogen Energy 35, 844-853

Saravanan, N., Nagarajan G., Sanjay, G., Dhanasekaran, C., Kalaiselvan, K.M., 2007, Experimental investigation of hydrogen port fuel injection in DI diesel engine, International Journal of Hydrogen Energy 32, 4071-4080

Saravanan, N., Nagarajan, G., 2008, An experimental investigation of hydrogen-enriched air induction in a diesel engine system, International Journal Of Hydrogen Energy 33, 1769-1775

Saravanan, N., Nagarajan, G., Sanjay G., Dhanasekaran, C., Kalaiselvan, K.M., 2008a, An experimental investigation on hydrogen as a dual fuel for diesel engine system with exhaust gas recirculation technique, Renewable Energy 33, 422-427

Saravanan, N., Nagarajan, G., Sanjay, G., Dhanasekaran, C., Kalaiselvan, K.M., 2008b, Combustion analysis on a DI diesel engine with hydrogen in dual fuel mode, Fuel 87, 3591-3599

Saravanan, N., Nagarajan, G., Narayanasamy, S., 2008c, An experimental investigation on DI diesel engine with hydrogen fuel, Renewable Energy 33, 415-421

Saravanan, N., Nagarajan, G., 2009, Performance and emission study in manifold hydrogen injection with diesel as an ignition source for different start of injection, Renewable Energy 34, 328-334

Saravanan, N., Nagarajan, G., 2010, Performance and emission studies on port injection of hydrogen with varied flow rates with diesel as an ignition source, Applied Energy 87, 2218-2229

Shirk, G. Matthew, McGuire, Thomas P., Neal, L. Gary, Haworth, C. Daniel, 2008, Investigation of a hydrogen-assisted combustion system for a light-duty diesel vehicle, International Journal Hydrogen Energy 33, 7237-7244

Türkcan, A., 2006, Bir dizel motorun performans parametrelerinin deneysel tespiti, Y. Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Kocaeli, 53-60

Türkmen, Ü., 2006, Değişik elektrotların (Fe, Fe/Ni, Fe/Ni-Zn, Fe/Ni-Al) hidrojen gazı eldesine etkilerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Adana, 20-25

Ültanır, M.Ö., 1997, Temiz enerji olarak hidrojen yakıtı ve teknolojisi, 7. Enerji Kongresi, Teknik Oturum Tebliğleri Cilt 3, Ankara

Veziroğlu, T., Nejat ve Barbir, Frano, 1998, Hydrogen energy technologies, United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) ,1400 Vienne, Austria,

Verhelst S., ve Wallner T., 2009, Hydrogen-fueled internal combustion engines, Progress in Energy and Combustion Science 35, 490-527

White, C.M., Steeper, R. R., Lutz, A.E., 2006, The hydrogen-fuelled internal combustion engine: a technical review, International Journal Hydrogen Energy 31, 1292-1305

Yia, S. H., Minb, K., Kimb, S. E., 2000, The optimised mixture formation for hydrogen fuelled engines, International Journal of Hydrogen Energy 25, 685-690

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Hüseyin KÖSE
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Çarşamba / 01.09.1981
Telefon : 0332-223-33-39
Faks : 0332-241-21-79
e-mail : huseyin@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	Çarşamba Anadolu E.M. ve Teknik Lisesi / Samsun	1999
Üniversite	:	Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi / Ankara	2007
Yüksek Lisans	:	Selçuk Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi	2012
Doktora	:		

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2010- Halen	Selçuk Üniversitesi	Arş. Gör.

YABANCI DİLLER

İngilizce