



**DEĞİŞKEN PİLOT PÜSKÜRTMELİ BİR DİZEL MOTORDA ALTERNATİF
GAZ YAKITLI ZENGİNLEŞTİRMENİN MOTOR PERFORMANS VE
EMİSYONLARA ETKİSİ**

Mikail HOCAOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2021

Mikail HOCAOĞLU tarafından hazırlanan “DEĞİŞKEN PİLOT PÜSKÜRTMELİ BİR DİZEL MOTORDA ALTERNATİF GAZ YAKITLI ZENGİNLEŞTİRMENİN MOTOR PERFORMANS VE EMİSYONLARA ETKİSİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Hüseyin Turan ARAT

Termodinamik Anabilim Dalı, Sinop Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....
.....

Başkan: Doç. Dr. M. Kaan BALTACIOĞLU

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....
.....

Üye: Doç. Dr. Gökhan TÜCCAR

Otomotiv Anabilim Dalı, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....
.....

Tez Savunma Tarihi: 01/07/2021

Jüri tarafından oy birliği ile kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ☒ Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- ☒ Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ☒ Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ☒ Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- ☒ Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ☒ Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza

Mikail HOCAOĞLU

01/07/2021

DEĞİŞKEN PİLOT PÜSKÜRTMELİ BİR DİZEL MOTORDA ALTERNATİF GAZ YAKITLI ZENGİNLEŞTİRMENİN MOTOR PERFORMANS VE EMİSYONLARA ETKİSİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Mikail HOCAOĞLU

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2021

ÖZET

Giderek kısıtlanan emisyon normları ve enerji verimliliği üzerine yenilenen yaklaşımlar, içten yanmalı motorlar için alternatif yakıtlar ve yanma stratejileri geliştirilmesi hususunda yeni çalışmaların yapılmasını sağlamıştır. Hidrojen ve doğalgazın motorlarda alternatif yakıt olarak kullanımı, motor performansı ve egzoz gaz emisyonlarının iyileştirmesinde tercih edilebilen bir yakıt karışımı olarak ele alınmaktadır. Alternatif gaz yakıtların dizel motorlarda kullanımında hem maliyetli olan hem de tekrar dizel prensibinde çalışılma ile sonuçlanan modifikasyonlar yerine bu çalışmada da kullanılan, pilot dizel püskürtme yöntemi ile çift-yakıt sistemine göre çalıştırılması tercih sebebidir. Bu projenin amacı, yapısal değişiklik yapılmamış ve pilot dizel püskürtmeli dizel motorda, hidroksi gaz -sıkıştırılmış doğalgaz yakıt karışımlarının performans ve emisyonlara etkilerinin detaylı biçimde incelenmesidir.

%25 hacimsel oranlara sahip HHO-CNG yakıt karışımlarının etkileri incelenerek HHOCNG farklılıkları karşılaştırılmalı olarak grafiklendirilmiştir. Çalışma parametresi olarak, HHOCNG karışımı biodizel yakıtlarla da ön çalışma olarak denenerek sonuçlar kısmına eklenmiştir. Ayrıca mikro-maliyet analizi yapılmış ve açıklanmıştır. Sonuç olarak, bu çalışmada, yapısal değişiklik yapılmamış bir dizel motorda, pilot dizel püskürtme metodu ile HHO-CNG yakıt karışımlarının kullanılabilirliği test edilmiş ve sonuçlar bu yakıt karışımlarının motor performansını artırıp, egzoz emisyonlarının azaltılmasında kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler : Dizel motorlar, Pilot püskürtme, Alternatif gaz yakıtlar

Sayfa Adedi : 40

Danışman : Doç. Dr. Hüseyin Turan ARAT

EFFECTS OF ALTERNATIVE GASEOUS FUELS ENRICHMENT ON ENGINE
PERFORMANCE AND EMISSIONS IN VARIABLE PILOT INJECTION DIESEL
ENGINE

(M. Sc. Thesis)

Mikail HOCAOĞLU

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

June 2021

ABSTRACT

The increasingly restricted emission norms and renewed approaches to energy efficiency have led to new studies on alternative fuels and combustion strategies for internal combustion engines. The use of hydrogen and natural gas as alternative fuels in engines is considered as a fuel mixture that can be preferred in improving engine performance and exhaust gas emissions. In the use of alternative gas fuels in diesel engines, it is preferable to run it according to the dual-fuel system with the pilot diesel injection method, which is also used in this study, instead of modifications that are both costly and result in working on the diesel principle again. The aim of this project is to examine in detail the effects of hydroxy gas-compressed natural gas fuel mixtures on performance and emissions in a pilot diesel-injected diesel engine with no structural changes.

By examining the effects of HHO-CNG fuel mixtures with 25% volumetric ratios, HHOCNG differences were plotted comparatively. As a working parameter, the HHOCNG mixture was tested with biodiesel fuels as a preliminary study and added to the results section. In addition, micro-cost analysis has been made and explained. As a result, in this study, the usability of HHO-CNG fuel mixtures was tested with the pilot diesel injection method in a diesel engine without structural changes and the results showed that these fuel mixtures can be used to increase engine performance and reduce exhaust emissions.

Key words : Diesel engine, Pilot injection, Alternative gaseous fuels
Page number : 40
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Hüseyin Turan ARAT

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada bana verdiği desteği her zaman hissettiren başta Doç. Dr. Hüseyin Turan ARAT ve Doç. Dr. Mustafa Kaan BALTACIOĞLU olmak üzere İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ mensubu tüm değerli hocalarıma teşekkür ederim.

Deneylerin yapılması aşamasında desteklerini esirgemeyen tüm Çukurova Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü hocalarına ve yardımcılara teşekkür ederim. Ayrıca deney seti, daha önce TÜBİTAK desteği kapsamında, 114M798 nolu proje ile finanse edildiğinden; burada TÜBİTAK'a da şükranlarımı sunarım.

Yaptığım çalışma süresince yanımda olan aileme, arkadaşlarıma ve tüm yanımda olan herkese teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	6
2.1. Sıkıştırılmış Doğalgazın (CNG) Dizel Motorlarda Kullanımı.....	6
2.2. Hidrojenin (H ₂) dizel motorlarda kullanımı	8
2.3. Hidrojen ile zenginleştirilmiş doğalgazın (HCNG) dizel motorlarda kullanımı	10
3. MATERYAL VE METOD	16
3.1. Test Motoru ve Düzenegi	16
3.2. Pilot Püskürtme Uygulaması	19
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	21
4.1. Motor Performans Sonuçları.....	22
4.2. Motor Emisyon Sonuçları.....	28
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	32
KAYNAKLAR	36
DİZİN	40

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Test motoru ve dinamometrenin teknik özellikleri	16



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. 2021 yılı araç satış sayıları (ODD 2021 verileri).....	1
Şekil 1.2. 1990-2019 TÜİK kişi başı sera gazı emisyon grafiği (30 Mart 2021)	3
Şekil 2.1. HCNG yakıtının emisyon potansiyeli.....	11
Şekil 2.2. Sıfır emisyonlu motor sistemi.....	12
Şekil 3.1. Deney motoru ve aparatlarının görüntüsü	16
Şekil 3.2. Hidroksi gaz jeneratörü.....	17
Şekil 3. 3. Emme manifoldu gaz karışım odacığı	18
Şekil 3.4. Mekanik yakıt pompası ve plancır görüntüsü.....	19
Şekil 3.5. Motor yakıt pompası.....	20
Şekil 4.1. Dizel ve 25HHOCNG farklı kısılmaları için Tork-Devir grafiği	23
Şekil 4.2. Dizel ve 25HHOCNG farklı kısılmaları için Güç-Devir grafiği	25
Şekil 4.3. Dizel ve 25HHOCNG farklı kısılmaları için ÖYT-Devir grafiği.....	27
Şekil 4.4. Dizel ve 25HHOCNG farklı kısılmaları için NO _x -Devir grafiği.....	29
Şekil 4.5. Dizel ve 25HHOCNG farklı kısılmaları için CO ₂ -Devir grafiği	31

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

g	Gram
kg	Kilogram
min	Dakika
mm	Milimetre

Kısaltmalar

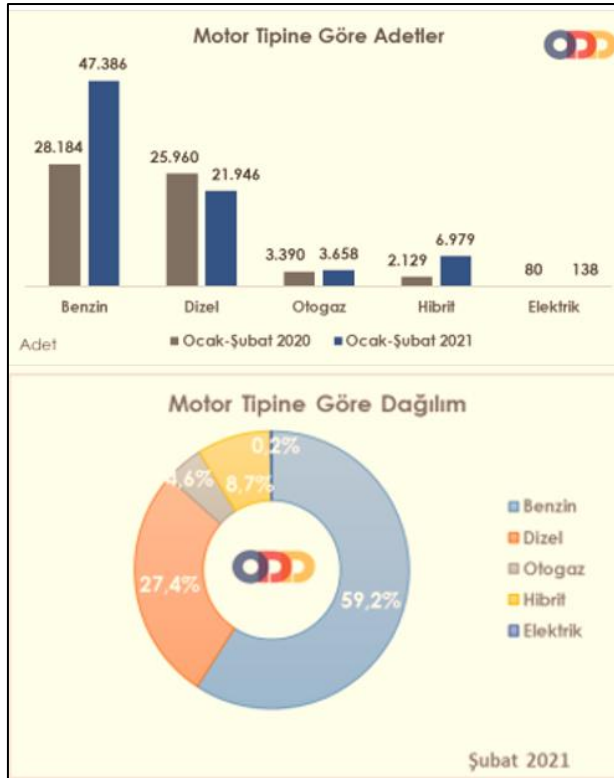
Kısaltmalar	Açıklamalar
BSFC/ÖYT	Özgül Yakıt Tüketimi
C	Karbon
CNG	Sıkıştırılmış Doğal Gaz
CO	Karbon monoksit
CO₂	Karbon dioksit
HC	Hidrokarbon
HCNG	Hythane gaz yakıtı
HHO	Hidroksi gaz
HHOCNG	Hidroksi ve Sıkıştırılmış Doğalgaz Yakıt Karışımı
İEA	International Energy Agency
LPG	Likit Petrol Gazı
LPM	Liter per Minute / dakikada litre
NO_x	Azot oksit
PM	Partikül Madde
ppm	Milyonda bir partikül

1. GİRİŞ

Günümüzde enerjiye duyulan ihtiyaç, ülkelerin gelişimiyle birlikte hızla artış göstermektedir. Enerjinin çeşitli kaynaklardan elde edilebilmesi mümkündür. Bu kaynaklardan birisi de fosil yakıtlardan elde edilen enerjidir. Son yüzyıllarda fosil yakıtların çoğu enerji sektörünün önemli alanlarında kullanılmıştır. Ancak birincil enerji kaynağı ailesine mensup olan fosil yakıtlar, geri dönüştürülemeyen ve yenilenemeyen enerji kaynaklarındandır. Fosil yakıt kaynaklarının sınırlılığı ve sektördeki arz-talep dengesizliği, bu tür yakıtların azalmasına ve bu azalmaya oranla fiyatlarının artmasına neden olmuştur.

Artan nüfus yoğunluğu ve taşıma endüstrisinde artan enerji talebini giderebilmek için, üreticiler gerek motor teknolojisinde gerekse yakıt teknolojilerinde çalışmalar yapmaktadır. Bunun yanında fosil yakıtların kimyasal enerjiyi hareket enerjisine dönüştürürken, yanma reaksiyonu sonucu ortaya çıkardığı emisyonlar açığa çıkmaktadır. Sera gazı emisyonları hem çevreye hem de insan sağlığına zararlı olan yanma reaksiyon çıktılarıdır. Bu emisyonlar kontrol altına alınmalı ve en aza indirilmelidir. Bu sebepten hem ülkemizde hem de Dünya ülkelerinde Egzoz Emisyonlar normları bulunmaktadır.

Ülkemizde 2021 yılına ait araç satışları Şekil 1.1’de resmedilmiştir.



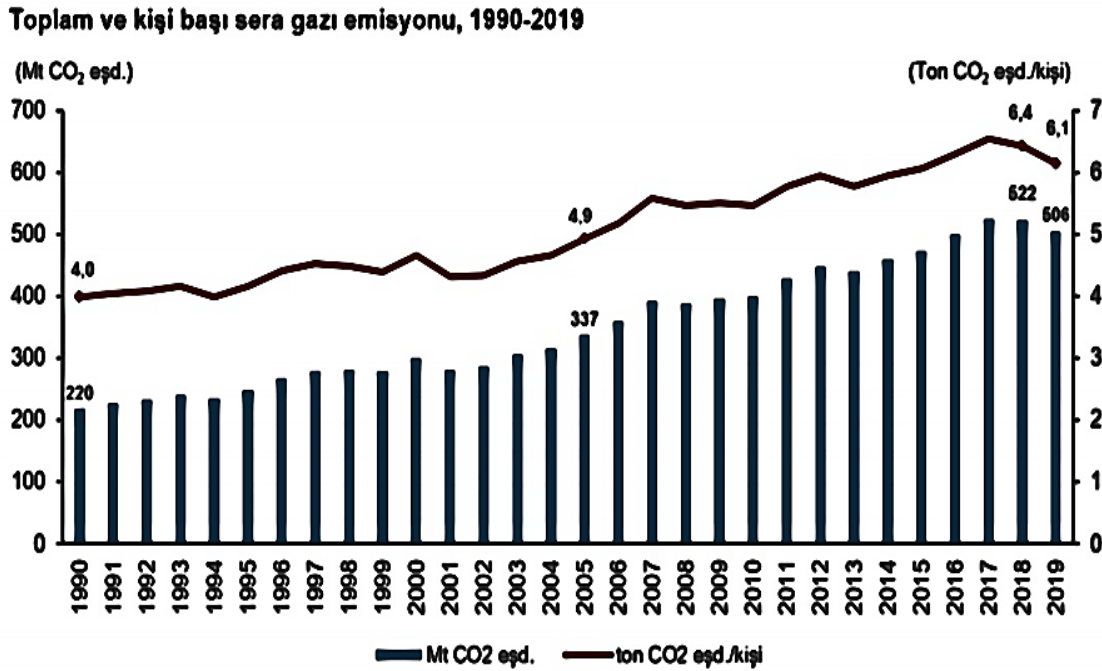
Şekil 1.1. 2021 yılı araç satış sayıları (ODD 2021 verileri) [1]

Şekilden de görüldüğü üzere, yoğun talep benzinli ve dizel araçlarda yoğunlaşmaktadır. Egzoz emisyonları ve sınırlı kaynağı nedeniyle fosil yakıtlı araçlara yeni alternatiflerde geliştirilmesi gerekmektedir. Bu yüzden araştırmacılar ve üreticiler, kaynağı azalmakta olan ve fiyatı gün geçtikçe artış gösteren bu yakıtları; alternatif yakıtlarla birlikte kullanarak hem daha ekonomik hale getirmeye hem de çevreye olan etkilerini azaltmaya çalışmaktadırlar. Alternatif enerji kaynaklarına geçişteki en önemli neden fosil yakıtların sınırlı olması yanında, çevreye verdikleri telafisi güç zararlardır. Fosil yakıtların kullanımı ile birlikte yerkürenin ortalama sıcaklığı 500 bin yılın en yüksek seviyesine ulaşmıştır. Bu ise son yıllarda yoğun hava kirliliği, sel, fırtına ve doğal afetlerin artısında etkili olmakta, yükselen yerküre ortalama sıcaklığı ile beraber buzullarda erimeler meydana gelmektedir. Yani çevresel faktörler de alternatif yakıtları gündeme taşımaktadır.

Alternatif enerji kaynaklarının içerisinde alternatif gaz yakıtlar önemli bir yer tutmaktadır. Bu gaz yakıtların başlıcaları, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), sıkıştırılmış doğal gaz (CNG), biyogaz, hidrojen ve hidrojenin türevleridir. İçten yanmalı motorlarda CNG'nin kullanımı NO_x emisyonu dışındaki diğer zararlı egzoz emisyonlarını ve sera etkisi oluşturan CO₂ emisyonunu önemli derecede azaltmaktadır. CNG aynı zamanda diğer petrol kökenli yakıtlara göre çok daha ekonomiktir. Hidrojenin, elektroliz ile sudan elde edilebilmesi, fiziksel ve kimyasal özellikleri ile fosil yakıtlara göre motordan daha yüksek güç elde etme imkânı sağlaması ve çevreye olumlu etkileri nedeniyle önemli bir alternatif yakıt konumuna gelmiştir. Motor yakıtı olarak hidrojen kullanımı 1920'li yıllarda başlamış ve günümüze kadar yapılan çalışmalarla hidrojenin motor yakıtı olarak kullanılabilirliği ortaya konulmuştur. Uygulamanın yaygınlaştırılmasının önündeki engeller; ekonomik faktörler ve mevcut enerji sistemleri ile geleneksel motorların demode olmasının getirebileceği sakıncalardır. Ancak petrol kaynaklarının hızla tüketilmesi ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri hidrojen kullanımının yaygınlaştırılmasını zorunlu kılmaktadır.

Hidrojenin enerji kaynağı olarak kullanılmasının ilk adımları 1977 yılında IEA (International Energy Agency-Uluslararası Enerji Ajansı) tarafından atılmıştır. Hidrojenin üretilmesi, depolanması, taşınması ve kullanımı konusunda ilk programlar başlatılmış ve teknolojik gelişimler sonucunda hızla önemi artarak devam etmiştir. Bununla birlikte 1974 yılında International Association for Hydrogen Energy (Uluslararası Hidrojen Enerjisi Birliği)'de kurulmuş ve günümüzde de aktif olarak görevini sürdürmektedir.

Kullanıldığı alanlarda fosil yakıtların yakılması, atmosferdeki karbondioksit oranının artmasındaki ana sorumlularından birisidir. TÜİK Sera gazı Emisyon İstatistikleri incelendiğinde; toplam sera gazı emisyonu 2019 yılında 506,1 Mt CO₂ eşdeğeri olduğu Şekil 1.2’ den görülmektedir.



Şekil 1.2. 1990-2019 TÜİK kişi başı sera gazı emisyon grafiği [2]

Gün boyu hizmet vermeyi sürdüren toplu taşıma araçlarının tersine, otomobilin günün büyük bir bölümünde yoğunlukla kent merkezi gibi alan kısıtlılığı bulunan yerlerde kullanılmadan beklediği de gözden kaçırılmamalıdır.

İstatistik sonuçlarına göre ulaşımında en çok yol yapan araçlar otomobiller, en çok yolcu taşıyan araçlar ise otobüslerdir. Otomobiller çok yol yapmalarına karşın taşıdıkları yolcu sayısı diğerlerine nazaran daha azdır. Bu nedenle otomobillerde yolcu-km ‘ye düşen yakıt tüketimi ve meydana gelen hava kirliliği diğer karayolu araçlarından daha fazladır. Karayolu araçlarında düşük miktarda dizel, daha çok miktarda ise benzinli taşıt kullanılmaktadır.

Herhangi bir çevre koruma önlemi alınmamış dizel motorun çevreye saldırdığı benzinli ve dizel motorlardan kaynaklanan başlıca egzoz emisyonları karbon monoksit (CO), azot oksit (NO_x), hidrokarbon (HC), partikül madde (PM), kükürt oksit (SO_x) ve kurşun gibi zararlı gaz emisyonlarıdır.

Sudan elektroliz yolu ile üretilen hidrojenin yanması sonucu oluşan ana yanma ürünlerinden biri tekrar su olmaktadır. Böylece "yenilenebilir" yakıt türü oluşturan hidrojen sonsuz denecek kadar fazla kaynağa sahiptir. Ayrıca fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle, karışım hazırlama yöntemine bağlı olarak belirli bir motordan, benzine göre, daha yüksek güç alma olanağı da sağlamaktadır. Ancak hidrojenin motorda yakıt olarak kullanımının sağlayacağı en önemli yararlarından biri hava kirliliği bakımından getirdiği üstünlüklerdir. Hidrojen yakıtında karbon bulunmaması nedeniyle, yanma ürünleri arasında CO, CO₂, HC ve SO₂ gibi çevreyi kirlletici bileşenlerde bulunmayacaktır. Egzoz gazları arasında bulunan tek kirlletici bileşen olan azot oksitler ise çeşitli yöntemlerle azaltılabilmektedir [3]. H₂'nin yakıt olarak otomobillerde kullanılması, alternatif enerjiler arasında en uygunudur. H₂'nin kütleli ağırlığı baz alınarak, aynı ısı değeri için benzinle karşılaştırıldığında, benzinin yalnızca 0.37' si ağırlığındadır. Ancak, H₂ hacimsel olarak ele alındığında ise, aynı ısı değeri için benzinin 3000 katı kadar yer kaplar. H₂'nin ön karışımli olarak kullanılmasıyla benzinden elde edilen gücün 0.85' i kadar güç elde edilebilir. Bu da Otto çevrimine göre çalışan ön karışımli motorlarda H₂ kullanılmasıyla, benzine oranla %15 daha az güç elde edileceğini gösterir. H₂'nin oldukça düşük tutuşma enerjisine ve geniş tutuşabilirlik sınırlarına sahip olmasına rağmen, yüksek kendi kendine tutuşma sıcaklığından dolayı Dizel çevrimine göre çalışan taşıtlarda doğrudan kullanılmaları güçtür [4]. Lakin zenginleştirme suretiyle kullanımı olanaklıdır.

H₂ mükemmel yanma ve emisyon karakteristiklerine sahip olan ve bu açıdan içten yanmalı motorlarda kullanılması yararlı olan bir yakıttır. H₂'nin Otto çevrimi ile çalışan motorlarda ek yakıt olarak kullanılması daha fakir karışımlarda çalışmasına imkân sağlar, alev cephesinin yayılma hızı artar, termik verim artar ve CO, HC, CO₂ ve çok fakir karışımlarda NO_x emisyonlarında iyileşme gözlemlenir. Elektrik gibi H₂ de mükemmel bir enerji taşıyıcısıdır. Otto motorlar H₂ dönüşümü için oldukça uygun olmakla beraber, dizel motorları da birtakım modifikasyonlarla H₂ ile çalıştırılabilirler. H₂'nin kendi kendine tutuşma sıcaklığının yüksek olmasından dolayı (585 °C), Dizel motorlarda H₂ kullanılmasında bazı yardımcı ekipmanlar kullanılmalıdır. Kızdırma bujileri ve pilot püskürtme kullanılarak, ateşleme sorununun üstesinden gelinebilir. H₂'nin içten yanmalı motorlarda yanması sonucu, bir miktar yağlama yağının da yanmasından dolayı, çok az miktarda HC, CO, CO₂ gibi emisyonlar açığa çıkar. H₂ karbon atomu içermez, bu da karbon türevi emisyonların azalmasını sağlar.

Dizel motorlarında H_2 kullanılmasında, pilot yakıt olarak püskürtülen motorin ve yağlama yağı yanması sebebiyle çok az bir miktar CO açığa çıkar. Yine aynı sebepten dolayı, çok az bir miktar HC ve is açığa çıkar [4]. CNG' nin de H_2 gibi ekonomiklik ve çevresel etkileri düşünülünce, araştırmacılar çalışmalarını hidrojen ile zenginleştirilmiş doğalgaz (HCNG) yakıtı üzerine yoğunlaştırmışlardır.

Genel kanı; hidrojen ve doğalgazın tekli kullanımları halinde yanma prosesinde gösterdikleri dezavantajları beraber kullanıldıklarında birbirlerinin avantajlarına dönüştürdükleri yönündedir. Özellikle hidrojenin kendi kendine tutuşma sıcaklığının ve yanma hızının yüksekliği, doğalgazın düşük yanma hızı ile optimize edilerek dizel motorlarda kullanılabilir hale gelmektedir. Diğer yandan tek başına kullanılan hidrojen de NO_x salınımı artımının önüne doğalgaz kullanılarak geçilebilmektedir. Bunlarla birlikte doğalgazın tek başına kullanılması motor performansında ciddi düşüslere sebebiyet verirken; bu gaz yakıtların birlikte kullanılması bu durumu en aza indirecek şekilde lehimize döndürmektedir. Hal böyleyken HCNG yakıtının özellikle dizel motorlarda birlikte kullanımı hem performans hem de emisyon değerleri açısından daha iyi neticeler verdiği literatürde saptanmıştır.

Bu tez çalışmasında ise hidroksi gaz ve CNG yakıt karışımı, yapısal değişiklik yapılmamış bir dizel motorda pilot dizel püskürtme yöntemiyle irdelenmiş; yakıt karışımının motor performans ve emisyonuna etkileri detaylı biçimde incelenmiştir. Belirli bir oranda hacimsel karışıma sahip karışımla deney yapılmış ve optimum oran olan %25 hacimsel oranlarda HHO-CNG yakıt karışımının etkileri incelenmiştir. Özellikle pilot püskürtme yöntemi üzerinde durulan bu tezde, common-rail (ortak borulu) püskürtme sistemine sahip olmayan göreceli daha eski dizel motorlarda; yakıt miktarının olabildiğince düşürülerek, yerine emme manifoldundan hava karışımı ile beslenen alternatif gaz yakıt karışımı ile çalışmalar yapılmıştır. Özellikle pilot püskürtme yöntemi, yakıt pompası plancırı vasıtasıyla belli oranlarda kısılarak, yakıt minimizasyonu sağlanmış ve bu düşölme için ayrı ayrı performans ve emisyon değerleri ölçölmüştür.

Sonuç olarak, bu çalışmada, yapısal değişiklik yapılmamış bir dizel motorda, pilot dizel püskürtme metodu ile 25 HHO-CNG yakıt karışımlarının kullanılabilirliği test edilmiş ve sonuçlar bu yakıt karışımlarının egzoz emisyonlarının azaltılmasında kullanılabileceğini göstermiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Dünyada artan nüfus ve şehirleşme ile birlikte kişi başına düşen enerji tüketimi hızla artmaktadır. Bu ise enerji ihtiyacını büyük oranda fosil enerji kaynaklarından temin eden dünyanın başlıca iki sorununa neden olmaktadır. Bu sorunlardan birincisini, sınırlı olan petrol rezervleri ve bu rezervlerin dünyada dengeli dağılmamış olması oluşturmaktadır. Bu da petrole aşırı bağımlı ülkelerle petrol üreticisi ülkeler arasında ekonomik ve siyasi çatışmalara ve hatta ülkelerin işgaline varan gelişmelere neden olmaktadır. Dünya üzerinde ulaşımda kullanılan araçların büyük çoğunluğu (%90) içten yanmalı motor tekniği ile çalışmaktadır. İçten yanmalı motorlarda (İYM) kullanılan yakıtlar ise petrol türevi yakıtlar olan benzin ve motorinden oluşmaktadır. İYM’da kullanılan yakıtlar kolay buharlaşabilme, hava ile kolay karışabilme, birim hacminden yüksek enerji sağlayabilme ve kolay tutuşabilirlik ile kolay bulunabilirlik gibi özellikleri taşımaktadır. Ancak hem benzin hem de dizel yakıtların yukarıda bahsedilen kullanım avantajlarına sahip olmalarına rağmen fosil yakıt ailesine mensup olan bu yakıtların neden olduğu emisyon kirliliği, küresel ısınma, sınırlı rezervler ve aşırı fiyat artışları alternatif yakıt arayışlarının hız kesmeden devam etmesine neden olmaktadır. Bu nedenle akla gelebilen her yakıt denenmekte ve fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılmasına çalışılmaktadır.

Literatürde bulunan ve konu ile ilgisi olan bu çalışmaların alt başlıklar altında izah edilmesi, konu bütünlüğü ve anlaşılabilirlik açısından önem ihtiva etmektedir. Literatür özeti bölümü 3 alt başlık altında incelenecektir. Birinci başlıkta dizel motorlarda yalnızca CNG kullanımı ile ilgili geçmiş çalışmalara değinilecek; ikinci bölümde dizel motorlarda yalnızca H₂ kullanımı ele alınacak; üçüncü bölümde HCNG yakıtının dizel motorlara olan etkileri önceki çalışmalardan analiz edilip aktarılacaktır. Ayrıca bu Son bölümde ise Hidroksi (HHO) yakıtının dizel ve benzinli motorlara etkilerinden bahsedilecektir. Son alt başlığın sadece dizel motorlarla sınırlandırılmamasının nedeni literatürde dizel+HHO çalışmalarının çok az olduğundandır.

2.1. Sıkıştırılmış Doğalgazın (CNG) Dizel Motorlarda Kullanımı

Birçok batı ülkesinde doğal gazın araçlarda kullanımıyla ilgili çalışmalar ve araştırmalar büyük bir hızla devam etmektedir. Bu konuda, dünyada en fazla kara nakil aracı kullanılan ABD’yi incelemek gerekir. Dünyada mevcut 1,4 milyar otomobil ve kamyonun 276 milyonu bu ülkededir. Hava kirliliğinin ortalama %50’sinin bu araçların egzozlarından ortaya çıktığı ABD’de, CNG’ li araçların üretildiği ve mevcut araçların bir kısmının da CNG’ ye

dönüştürüldüğü bilinmektedir. Ülkemizde de İstanbul, Ankara, Adana, Sakarya, Bursa, Afyon, Bolu ve Eskişehir’de belediye otobüslerinin egzoz gazlarının neden olduğu hava kirliliğini azaltmak için birtakım projeler geliştirilmekte olup doğal gaza dönüşümleri tamamlanan otobüslerin kullanımına başlanmıştır. Yeni Zelanda’daki NGV Global firmasının 2019 yılı verilerine göre; dünyada doğal gazla çalışan araçların sayısı 28540819, dolum istasyonu sayısı 33382’ dir. Literatürde, doğal gazın hem buji ile ateşlemeli hem de sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda önemli dönüşümleri gerektirmeksizin ve dikkate değer performans kaybına yol açmaksızın kullanılabileceği ifade edilmektedir [5].

Ulusal ve uluslararası kaynaklardan bazıları şu şekilde sıralanabilmektedir. [6] tarafından, Hindistan’ın başkenti ve hava kirliliği açısından dünyanın en önde gelen şehirlerinden Delhi’de yapılan bir çalışmada; 2001–2003 yılları arasında on binlerce motorlu taşıtın CNG’ ye dönüştürülmesinin hava kalitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Delhi’de yapılan bu çalışmada, CNG’ ye dönüşümün; CO, SO₂, PM ve NO_x emisyonlarında kayda değer bir düşüş sağladığı tespit edilmiştir.

[7] Tarafından yapılan deneysel bir çalışmada; gaz yakıt kullanarak motor performansını optimize etmek için, bir dizel motor CNG’ye dönüştürülmüştür. Farklı sıkıştırma oranlarında ve farklı motor devir sayılarında; motor performans parametreleri ve emisyon değerleri ölçülerek, içten yanmalı motorların değerlendirilmesinde iki temel kriter olan performans ve emisyon arasında bir optimizasyon sağlanmaya çalışılmıştır.

[8] Tek silindir, direkt enjeksiyonlu dizel motorda belli modifikasyonlar yaparak çift yakıt sistemi (CNG+dizel) kullanarak çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Güçte hafif bir azalma amma velakin emisyonlarda kayda değer düşüşler elde etmişlerdir.

[9] Pilot püskürtme yönteminde seçilecek pilot yakıtı üzerinde araştırmalarını yoğunlaştırmıştır. Bu seçimde dikkat edilecek parametreleri özetleye yazar, ana yakıt olarak dizel motorda CNG yakıtını optimum yakıt olarak belirlemiştir.

[10] Sıkıştırılmış doğalgazın dizel motorlarda kullanımını yapısal değişiklik gerçekleştirilmeden pilot püskürtme yöntemi ile denemiştir. Yine literatürle uyumlu olarak, emisyon değerlerinde ciddi düşüşler elde etmişlerdir.

[11] Yapmış oldukları deney ve modellemelerde; doğalgazın pilot püskürtme ile yanmasını çalışmalarıdır. Simülasyon ve deneysel çalışmalarının örtüştüğünü belirlemiş, 60Mpa

basınçta çoklu sayıda enjektör deliklerinin doğalgaz yanmasını iyileştirdiğini ve emisyonların azaltılmasında katkı sağladığını literatüre eklemişlerdir.

Yukarıda verilen bazı kaynak çalışmalarının ışığında, genel kanı olarak CNG'nin emisyon azalmasında hayli etkili olduğu, motor performansı açısından ise hafif düşümlere neden olduğu ortaya konulmuştur. Ekonomiklik olarak dizel ile karşılaştırılmasında ise hem rezerv bakımından hem birim fiyat bakımından hayli avantajlı olduğu gözler önüne serilmiştir.

2.2. Hidrojenin (H₂) Dizel Motorlarda Kullanımı

Hidrojen temiz, verimli ve yenilenebilir olmasından dolayı gelişmiş teknoloji ile donatılmış içten yanmalı motorlar için, cazip bir alternatif yakıt olarak görülmektedir. Hidrokarbon yakıt fiyatlarının artması ve sıkı emisyon kuralları hidrojen üretimindeki ve hidrojenin endüstrideki kullanımı ile ilgili problemlerin çözümü için gerekli ilgiyi sağlayabilir. Literatür incelendiğinde, hidrojenin içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılmasına dair birçok farklı araştırma bulunmaktadır. Hidrojen içten yanmalı motorlarda saf olarak kullanıldığı gibi diğer yakıtlar ile birlikte de kullanılabilir [12].

Hidrojenin tek basına dizel motorlarda kullanılması durumunda, silindir içine bir tutuşturma kaynağı yerleştirilir veya farklı teknikler kullanılarak (pilot püskürtme gibi) yakıtın tutuşması sağlanır. Hidrojenin dizel motorlarda kullanılmasına dair çok sayıda araştırma bulunmaktadır. Hidrojenin dizel motorlarda saf olarak kullanılmasıyla ilgili Antunes ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, direkt püskürtmeli bir dizel motorda hidrojen direkt püskürtülerek tek yakıt olarak kullanılmıştır. Motora emilen hava ısıtılarak hidrojen yakıtlı motorda yanma için gerekli olan ısı bu yolla elde edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, geleneksel dizel yakıtı ve hidrojen karşılaştırılmış ve hidrojen kullanımında motor ağırlık oranına göre daha yüksek güç ürettiği belirlenmiştir. Dizel yakıtının aksine hidrojen kullanıldığında, önemli bir verim artışı bulunmuştur. Hidrojen yakıtlı motor ile 43% verim elde edilirken, bu değer dizel yakıtlı motor için 28% olarak bulunmaktadır. Bunun yanı sıra, hidrojen ile çalışma durumunda NO_x emisyonlarında 20% azalma görüldüğü belirtilmiştir [12].

Hidrojenin dizel motorlarda kullanılmasına dair yapılan diğer bir çalışmada ise, direkt enjeksiyonlu çift yakıtlı bir dizel motorunda hidrojen ve dizel yakıt olarak birlikte kullanılmıştır. Hidrojen, emme manifolduna bir enjektör aracılığı ile püskürtülmüştür. Püskürtme zamanı ve püskürtme süresi, elektronik kontrol ünitesi (ECU) tarafından kontrol

edilmiştir. Yapılan deneylerde, saf dizele nazaran hidrojen ile çalışma durumunda verim %15 artarken NO_x emisyonlarında da %3, is emisyonu %100 azalmış ve bunun yanı sıra karbon emisyonlarında da ciddi azalmalar görülmüştür [12].

Yapılan diğer bir çalışmada ise, hidrojen ve dietil eter (DEE) birlikte çift yakıt olarak kullanılmıştır. Hidrojen emme manifolduna püskürtülürken, DEE direkt olarak silindir içine püskürtülerek tutuşturma kaynağı olarak kullanılmıştır. Hidrojen ve DEE için püskürtme zamanı, performans, yanma ve emme karakteristiklerine göre ayarlanmıştır. Hidrojen için püskürtme zamanı emme supabının açılmasından 5° KA (krank açısı) önce ve DEE için emme supabının kapanmasından 40° KA sonra olarak ayarlanmıştır. Hidrojen-DEE birlikte kullanılması durumunda, dizel ile çalışma durumuna göre verimde %30 artış gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra, NO_x emisyonlarında da ciddi azalmalar görülmüştür [12].

[13] Yapmış oldukları derleme çalışmalarında, hidrojenin önemli mühendislik özelliklerinden bahsetmişler ve kullanım açısından zorluklarına da değinmişlerdir.

[14] Yapmış oldukları deneysel çalışmada, tek silindirli bir dizel motorda sabit 1500 dev/dak devirde hidrojen takviyesinin emme manifoldundan yapmışlardır. Pilot püskürtme deney aşamasını bu tezde olduğu gibi, dizel yakıtını kısarak sağlamaya çalışmışlar ve %10-90'a kadar hacimsel dizel kısılmasını denemişlerdir. Hidrojence zenginleştirilmiş yakıt karışımının özellikle performansta etkili olduğu ve %25-30 arası hacimsel hidrojen karışımının sistemi olumlu etkilediğini belirtmişlerdir.

[15] Yapmış oldukları çalışmalarında; dört silindirli bir dizel motorda hidrojen zenginleştirmesinin performans ve emisyonlarına olan etkilerini incelemişlerdir. Özellikle kesintisiz hidrojen akışında performans ve emisyonlarda iyileşme görüldüğünden bahsetmişlerdir. 7,5 litre/dak hacimsel debideki hidrojen akışında; özgül yakıt tüketiminin %20 azaldığı, fren ısı veriminin %8-9 arttığı; CO, CO₂ ve HC salınımında değişiklik görülmediği lakin NO_x seviyesinin arttığını bildirmişlerdir.

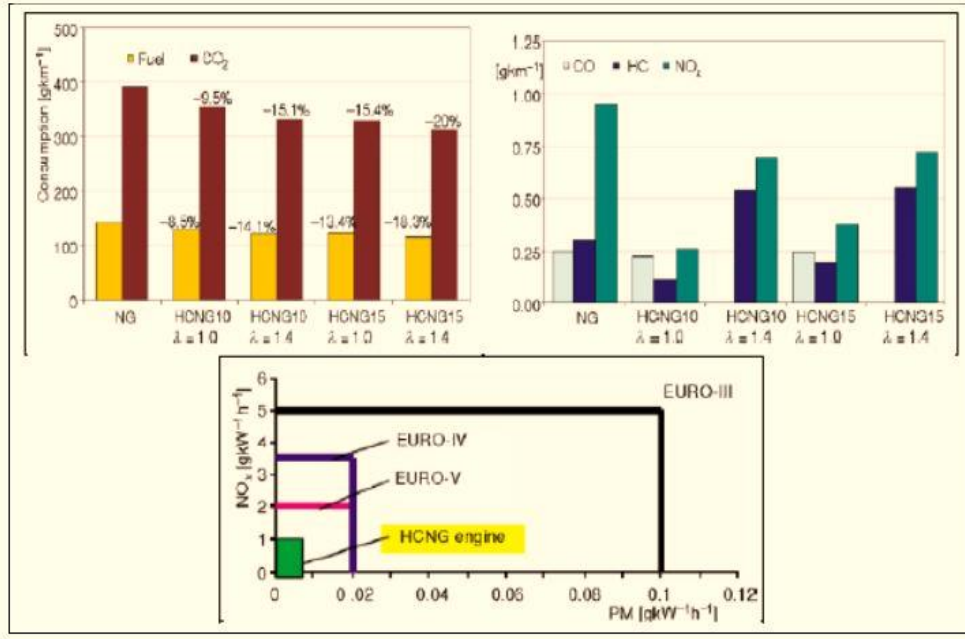
[16] İçten yanmalı motorlarda hidrojen yakıtı isimli geniş kapsamlı bir derleme ortaya koymuşlardır. Temel bilgilerden, konu üzerindeki detay çalışmalara kadar ileriki çalışmalarda ılık tutabilecek bir konu yelpazesinde bir derleme sunmuşlardır.

Genel literatürde olduğu gibi performans için kesinlikle seçilmesi uygun olan hidrojenin, yanma sırasındaki NO_x salınımı için önlem alınması gerektiğine dikkat çekmişlerdir.

2.3. Hidrojen ile Zenginleştirilmiş Doğalgazın (HCNG) Dizel Motorlarda Kullanımı

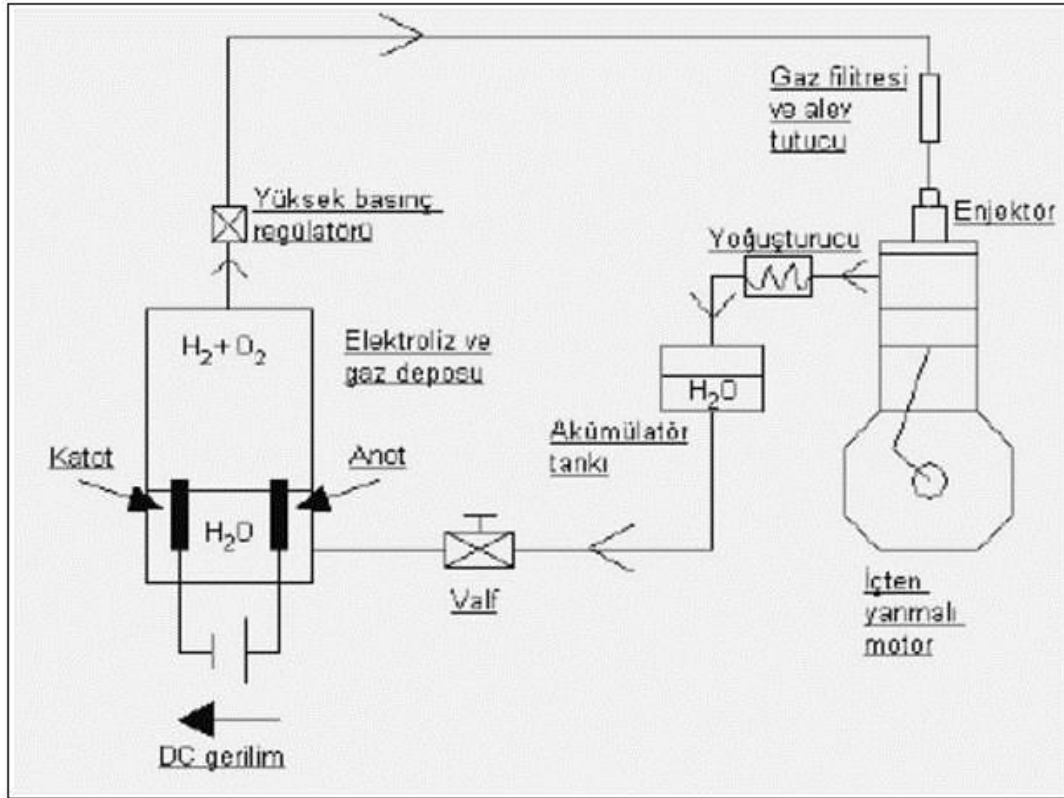
Doğalgazın dizel motorlarda kullanımındaki handikapların başında gelen performans düşümü, hidrojenin performans verilerindeki arttırıcılığı ile birleşince; bu gaz yakıtların birlikte kullanılmasından doğacak sonuçlar araştırmacıları bu konu üzerinde mesai harcamaya itmiştir. Diğer taraftan doğalgazın ve hidrojenin yanma sonucu ortaya çıkan emisyon salınımları dizel yanmasından daha düşük olduğundan ve doğalgazdaki CO artışını hidrojen engellediğinden; hidrojendeki NO_x salınımını doğalgaz indirgediğinden, bu yakıtların belli oranlarda karışımı HCNG yakıtının içten yanmalı motorlarda tercih edilmesini sağlamıştır.

Konu ile ilgili literatürde yoğun çalışmalar son on senelerde artmıştır. Gaz yakıtların dizel motorlarda yanma olgusu benzinli motorlara nazaran daha zor olduğundan bu çalışmaların büyük bir çoğunluğu benzinli motorlar üzerinde yoğunlaşmıştır. Dizel motorlarda ise; [17] bu konu üzerinde hazırladıkları derlemede bazı önemli noktalara değinmişlerdir. Hidrojen ile doğal gazın mühendislikseel özellikleri yanma süreçlerinde motor performansı ve emisyonlara etkileri açısından bu gaz yakıtların kullanımını yaygınlaştırmıştır. İçten yanmalı motorlarda hidrojenin ve doğal gazın birlikte yakıt karışımı olarak kullanılmaları araştırmacılar tarafından ilgi odağı olmuştur. Yazarlar, HCNG' nin yakıt özellikleri, dizel motor performansı ve emisyonlara etkileri, kullanım aşamaları, avantaj ve zorlukları hakkında detaylı bilgiler vermişlerdir. Bazı araştırmacılar da; HCNG yakıtının içten yanmalı motorlarda kullanımı üzerinde çalışmalarını sunmuşlar; genel kanı olarak hidrojen ve doğalgazın tekli kullanımları halinde yanma prosesinde gösterdikleri dezavantajları beraber kullandıklarında birbirlerinin avantajlarına dönüştürdükleri yönündedir. Özellikle hidrojenin kendi kendine tutuşma sıcaklığının ve yanma hızının yüksekliği, doğalgazın düşük yanma hızı ile optimize edilerek dizel motorlarda kullanılabilir hale gelmektedir. Diğer yandan tek başına kullanılan hidrojen de NO_x salınımı artımının önüne doğalgaz kullanılarak geçilebilmektedir. Bunlarla birlikte doğalgazın tek başına kullanılması motor performansında ciddi düşüslere sebebiyet verirken; bu gaz yakıtların birlikte kullanılması bu durumu en aza indirecek şekilde lehimize döndürmektedir. Hal böyleyken HCNG yakıtının özellikle dizel motorlarda birlikte kullanımı hem performans hem de emisyon değerleri açısından daha iyi neticeler verdiği literatürde saptanmıştır. Özellikle yeni emisyon normlarını karşılama konusunda oldukça iyi neticeler veren HCNG yakıtı, ileriki yıllarda bu alanda kullanılacak alternatif yakıtların başında gelmektedir. Şekil 2.1 'de HCNG yakıtının emisyon potansiyeli resmedilmiştir.



Şekil 2.1. HCNG yakıtının emisyon potansiyeli [17]

Suyun elektrolizi ile hidrojen üretimi, tüm dünyadaki hidrojen üretim metotlarının %13'lük bölümünü oluşturmaktadır [18]. Elektroliz yoluyla hidrojen ve oksijen atomlarına ayrılan su, bu elektroliz yöntemiyle elde edilen gaz karışımı ile motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılabilir. Özellikle HHO veya Hidroksi gaz olarak tabir edilen ve bulunuşu 1910'lara dayansa da motorlarda kullanımı yeni olabilecek bir yakıt indikatörüdür. Hidrojenin motorlarda kullanımında, yüksek yük altında, yanma odasındaki sıcak noktalar karışımın erken ateşlenmesine sebep olur. Hidrojen yakıtlı motorlarda hava-yakıt oranı 0,8 olduğunda egzoz gazları içindeki NO_x miktarı maksimum olur. NO_x oluşumunu azaltmak için hidrojene saf oksijen ilave edilmelidir. Bu durum ise sistemi daha karmaşık hale getirir ve taşıt ağırlığını arttırır. Bu sorunun çözümü için kullanılan yöntemlerden biri; taşıt üzerinde suyu elektroliz ederek, açığa çıkan hidrojen ve oksijenin basınç altında depo edilmesidir. Buna örnek olarak Şekil 2.2'de sıfır emisyonlu motor sistemi gösterilebilir [19].



Şekil 2.2. Sıfır emisyonlu motor sistemi [19]

Hidroksi gaz, mühendislik özellikleri olarak hidrojene yakın parametrelere sahip olsa da; oluşumunda oksijen atomunun da bulunması bazı değerlerinin değişmesine neden olmaktadır. Lakin bu olgu bilimsel safhada hala tam olarak netlik kazanmış değildir. Öyle ki soğuk kaynak uygulamalarında (kernell gaz), mücevherat uygulamalarında ve yeni alternatif yakıt olarak kullanımından ötürü, elektroliz yoluyla sudan elde edilen gazın daha çok çalışmayla özelliklerinin belirlenmesi ileriki yıllarda araştırmacıların ilgilenecekleri bir konu konumundadır.

Literatürde Brown gaz, hidroksi, HHO, oksijenleştirilmiş hidrojen, oxi-hidrojen, kernell gaz, aquagen gaz olarak değişik isimlere sahip olan bu gaz formu, motorlarda 1920'lerde prototip olarak kullanılmış, her nedense 2000'li yıllara kadar kullanımına pek nadir rastlanmıştır. Suyu yakıt olarak kullanmak algısının bu konuda ilerlemeyi etkilediği açıktır. Son yirmi yıldır üzerine tekrar çalışılmaya başlanan bu olgu, araştırmacılar tarafından araçlarda kullanılmaya ve denemeye başlamıştır. Özellikle tekil olarak kullanılacak hidrojen tüpünden daha ziyade daha rahat uygulama ve artı oksijen atomunun getireceği faydalar, suyun elektrolizi ile HHO eldesini ve kullanımını cazip hale getirmektedir. Özellikle ara etkileyici katalizör seçimi ile (KOH, NaOH, NaCl, vb.) araç aküsünden alınan elektrik enerjisi ile amperaj farklılıkları ve değişik çalışma koşullarında bu gazın motorlarda ek yakıt olarak

kullanımını artırmaktadır. Yüksek hacimlerde elde edilmediği (<10 litre/dak) ve uygun şartlarda ve sayıda plaka kullanıldığında hidroksi elde etmek için kullanılan enerji, araçtan elde edilen toplam enerjinin %1,5 i kadardır. Yine uygulama kolaylığı bakımından hidroksi gaz daha çok benzinli motorlarda denenmiştir.

Literatürde bulunan az sayıdaki dizel motor çalışmalarından bazıları şu şekilde sıralanabilir. [20] Yapmış olduğu yüksek lisans çalışmasında, bu projede kullanılan motor test düzeneğine benzer motorda, kendi üretimini yaptığı hidroksi gaz jeneratöründen elde ettiği 5 litre/dak sabit HHO gazını emme manifoldundan motora vermiş ve zenginleştirme yapmıştır. Performans ve özgül yakıt tüketimi açısından olumlu bir yaklaşım sergileyen hidroksi gaz; emisyon bakımından normal dizele göre az da olsa artış göstermiştir.

[21] Yapmış oldukları teorik çalışmalarını AVL programı ile uygulamışlardır. 3,8 litrelik, 4 silindirli bir dizel motora hidroksi gaz eklemesi yapmışlar ve fren ısı veriminde ve silindir içi basınçta yükselmelere; is yoğunluğu ve CO emisyonlarında iyileşmeye rastlamışlardır. Lakin NO_x değerinde artım saptamışlardır.

[22] Yapmış oldukları çalışmada H₂ / O₂ eklemesini tek silindirli bir dizel motorun emme manifoldundan gerçekleştirmişlerdir. Farklı yüklerde yapmış oldukları çalışmalarda; ısı veriminin %1-4 arasında arttığı; özgül yakıt tüketiminin de %4-8 arasında azaldığını bildirmişlerdir.

[23] İki farklı hacimsel debideki hidroksi gazı (0,3 ve 1,6 litre/dak) 1,8 L dizel motor da denemişlerdir. %75 yükten sonra hidroksi gazın kullanılmasında performans ve emisyon değerleri bakımından az bir değişikliğin olduğunu bildirmişlerdir.

[24] Tek silindirli bir dizel motorda, sabit 1500 dev/dak ve 5,3 bar yükte 2,8 litre/dak sabit hidroksi gaz zenginleştirmesini çalışmışlardır. %5,5 yakıt ekonomisi ve yine bu düzeylerde CO₂ emisyon salınım azaltımı sağlanmış; ayrıca silindir içerisindeki yanma olgusunun iyileştiğinden bahsedilmiştir.

[25] Tek silindirli 5,4 kW gücündeki dizel motorda yapmış oldukları çalışmalarda; kuru ve sulu hücre tipli HHO jeneratörünün performans ve emisyonlara etkilerini araştırmışlardır. 0,5 ve 0,75 LPM hidroksi kullanılan deneysel çalışmada, termal verimliliğin %16-20 geliştiği; CO ve HC emisyonlarında düşüş sağladığı ama NO_x te bariz artışların olduğuna dikkat çekmişlerdir.

[26] Tek silindirli bir motor düzeneğinde %5 biodizelli bir dizel motorlarda HHO beslemesi yapmışlardır. Hidroksi eklemesinin özellikle tork ve güçte pozitif etkilerinin olduğunu ve emisyonlarda iyileşmeler gösterdiğine değinmişlerdir.

[27] Yapmış oldukları çalışmasında, termoelektrikli yani bir hidroksi jeneratör denemesini benzinli bir motorda deneysel olarak denemişlerdir. Rölanti durumlarında az bir HHO nun kullanımının verimli olduğuna değindikleri çalışmalarında özellikle CO emisyonlarının hatırı sayılır derece de azaldığından bahsetmişlerdir. Deneysel çalışmalarına ek olarak AVL programı ile de modelleme yapmışlar, sonuçların tutarlı olduklarını belirtmişlerdir.

[28] 1,33 LPM hidroksi gazını 5 farklı aracın rölanti değerlerinde ölçüm yaparak karşılaştırmışlardır. 3 benzinli ve 2 dizel binek araç için yapılan testlerde; CO ve HC emisyonlarının düşüm sağladığı saptanmıştır. Yapmış oldukları karşılaştırmalı deneylerde; dizel araçlarda NO_x değerleri artarken, benzinli araçlarda bu değer azalmıştır.

[29] Yapmış oldukları çalışmalarında; 6-36 LPM arasında hidroksi ve hidrojen yakıtının farklı değerlerle emme manifoldundan girişle birlikte dizel motor performans ve emisyonlarına etkilerini incelemişlerdir. Yüklenmemiş durumda dizel motorun enerji paylaşımı açısından HHO ve hidrojenden destek aldığını; HC ve CO₂ emisyonlarının düştüğünü, NO_x emisyonlarının artış gösterdiğini belirtmişlerdir.

[30] Yapmış oldukları çalışmada; HHO ek yakıtının araç sürüş ve üzeri kullanımlarında ne kadar enerjitik olduğunu teorik olarak ortaya koymuşlardır. Özellikle bu konu ile alakalı yayınların çıktıklarından yararlanarak, bu sistemin motor performans ve emisyonlarına nasıl ve ne kadar etkili olduğunu teorik bir yolla ortaya koymuşlardır. Sonuçlarında ise; belli bir HHO katkısının küçük motorlarda (<2L) daha enerjitik olduğuna değinmişlerdir.

[31] Yapmış oldukları çalışmalarda ikili yakıt sistemi ile çalışan dizel motora hidroksi eklenmesi ile enerji, ekserji ve emisyon sonuçları üzerine sonuçlar elde etmişlerdir. Diğer literatürle benzer sonuçlar bulan araştırmacılar, ısı transferi üzerine de pozitif bulgular elde etmişlerdir.

[32] Susümbülü ile biodizel üretmişler ve bunu hidroksi yakıtı ile birlikte dizel motorlarda kullanmışlardır. Özellikle termal verimlilikte %12, yakıt tasarrufunda %14 iyileştirmeler sunmuşlardır. Ayrıca CO ve HC da ciddi düşüşler elde etmelerine nazaran NO_x te ciddi artışlar (%41) gözlemlemişlerdir. Yanma karakteristiklerine de pozitif şekilde fayda sağladıklarını belirtmişlerdir.

[33] Yapmış oldukları çalışmalarında, çiftli yakıt sisteminde dizel bir motorda dizel ve HHO kullanmışlar ve bunu hem deneysel hem teorik hesaplamalarla gerçekleştirmişlerdir. Hibrit entropi ve VIKOR yaklaşımını da denedikleri çalışmalarında, literatürle benzer şekilde, emisyonlarda düşüş olduğunu belirtmişlerdir.

[34] Yapmış oldukları çalışmada hem HHO jeneratörünün kavramsal tasarım konusunda yeni çalışmalarını ortaya koymuşlar hem de bunu motor performans ve emisyonlara etkilerini incelemişlerdir. Dikdörtgen, altıgen ve yatık yamuk olarak en fazla kullanılan 3 farklı jeneratörü karşılaştırmışlar bundan elde edilen HHO'yu da motor da denemişlerdir. Sonuçlarında dikdörtgen şekilli HHO jeneratörünün tercih sebebi olabileceğini ve daha çevreci bir ulaşım için hidrojen ve hidroksi kullanımının elzem olacağına değinmişlerdir.

[35] Karanja yağı ile biodizel eldesi ile dizel motorda HHO ile kullanılması çalışmalarını yapmışlardır. 0,73 LPM HHO emme manifoldundan beslenmek suretiyle zenginleştirme yapılmıştır. NO_x emisyonlarında %20,7 arttığı saptanmış; termal verimlilik %2,3 artmıştır. Yanmamış hidrokarbonlar ise %33 oranında düşmüştür.

[36] Yapmış oldukları çalışmada, Hint yağı biodizeli ile çalışan dizel motorlarda HHO ve hidrojen zenginleştirmesini yaparak motor performans ve emisyonlarına odaklanmışlardır. Egzoz emisyonlarında hidrojenli karışımın, performans değerlerinde ise HHO karışımının daha iyi sonuçlar verdiğini söylemişlerdir.

[37] Yapmış olduğu çalışmada; mikro alglerden elde edilen biodizel yakıtı ile hidrojen ve HHO eklemeleri yaparak dizel motor performans ve emisyonlarını irdelemiştir. Özellikle HHO ve hidrojenin güç, tork, CO ve CO_2 değerlerinde pozitif iyileştirmeler sunduğunu göstermiştir.

Tüm literatürde genel kanı olarak, HHO nun performans değerlerini artırıcı, emisyonlarda da NO_x hariç iyileştirmeler yaptığı ortadır. Bu yan etkininde CNG karışımı ile giderilmesi mümkün olduğundan, bu çalışmada HHOCNG yakıt karışımı kullanılmış ve sonuçları ile tartışılarak tez oluşturulmuştur.

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Test Motoru ve Düzeneği

Bu deneysel tez çalışması; Çukurova Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan, 3.6 L, 4 zamanlı, 4 silindirli, hava soğutmalı, mekanik yakıt pompasına sahip olan, Mitsubishi marka dizel motorda gerçekleştirilmiştir. Netfren marka hidrolik dinamometre yüklenmesi, tork ve güç verilerinin alınmasında kullanılmıştır. Egzoz emisyon ölçümleri ise MRU Delta 1600 V markalı egzoz gaz analiz cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Motor ve dinamometre teknik özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Deney motorunun görseli Şekil 3.1’ de gösterilmiştir.



1) Motor 2) Dinamometre 3) Egzoz gazı analizörü 4) Veri kaydedici 5) CNG hattı 6) Hidrojen tankı 7) Yakıt pompası pistonu üzerinde step motor 8) Step motor sürücüsü 9) CNG regülatörü 10) Gaz debimetreleri 11) İğne kanatları 12) Gaz yakıt hatları 13) Karışım haznesi 14) Hava filtresi 15) HHO sistemi 16) Sıvı Yakıt Debimetresi 17) Dinamometre Kontrol Ünitesi 18) Ana Bilgisayar

Şekil 3.1. Deney motoru ve aparatlarının görüntüsü [38]

Çizelge 3.1 Test motoru ve dinamometrenin teknik özellikleri [38]

Test motoru özellikleri		Dinamo metre özellikleri	
Marka	Mitsubishi Canter	Marka	Netfren hidrolik dinamometre
Model	4D	Tork aralığı	0 – 1700 Nm
Tip	Kızdırma bujili direk püskürtmeli dizel	Hız aralığı	0 – 7500 d/dak
Yer değiştirme	3567cc	Gövde ağırlığı	45 kgf
Çap/strok	104mm/105mm	Toplam ağırlık	110 kgf
Tork	225Nm @ 1800d/d	Gövde çapı	350 mm
Güç	80kW @ 3500d/d	Tork kolu uzunluğu	350 mm

Tezde kullanılmış olan yakıt; sıkıştırılmış doğalgaz ile birlikte hidroksi gazdır. CNG (sıkıştırılmış doğalgaz) yakıt ikmali 200 bar basınca sahip kriyojenik tanklardan sağlanmıştır. Hidroksi gaz ise “hidroksi gaz jeneratörü” olarak tabir ettiğimiz sistem tarafından motor emme manifolduna gönderilmiştir. Hidroksi gaz jeneratörü Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Hidroksi gaz sistemi temel olarak hidrojen jeneratörüyle suyun elektrolizi sayesinde sudan hidroksi gaz elde edilmesidir. Anot ve katotların birleşimiyle elektroliz sonucu elde edilecek olan hidroksi gazı daha düşük miktarda enerji vererek üretebilmek için suya farklı katalizörler (NaOH, KOH veya NaCl) ilave edilerek sudaki hidrojen bağı zayıflatılmaktadır. Deneylerimizde kullanılan katalizör KOH olarak seçilmiştir. 1 litre suya 300 gr KOH katalizörü eklenerek deneyler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2 Hidroksi gaz jeneratörü

Şekilde görülen sistem birbirine paralel bağlı 14 hücre plakası, geri tepmeyi önleyici su rezervuarı, kabarcık ve damla önleyici bubbler, sinyal genişlik modülasyonu ile elektronik kontrol, röle ve tesisat aparatlarından oluşmaktadır. Sistem enerjisini motor aküsünden almaktadır ve 24 V ile çalışır vaziyette kurulmuştur. Harici bir kaynaktan enerji almadığı için ve araç çalışır vaziyette iken sistem aktif olduğundan, hidroksi gaz elde edilebilmesi için gerekli enerji miktarı aküden alınmaktadır. Bir diğer avantajı ise, akünün motor çalıştıkça tekrar şarj edilmesidir ki; bu hidroksi jeneratörünün elektroliz için harcayacağı enerjiyi kendini daima şarj eden bir sistemden almasını sağlar. Hidroksi gaz jeneratörü yurt dışından sipariş edilmiş olup, ara yazılım ve elektronik modülasyonu hazır olarak gelmiştir. PWM modülasyonu sayesinde, jeneratör istenilen genlik, amperaj ve akımda çalıştırılabilmektedir. Amperaj değerinin artırılması ile jeneratörden maksimum 8-9 litre/dak HHO gazı elde edilebilmektedir.

Şekil 3.2’de CNG regülatörü, iğne vanalar ve akış ölçerler görülmektedir. Öncelikle hem CNG hem de hidroksi jeneratörü çıkış ağzlarına emniyet unsurlarını sağlaması için geri tepme valfleri ve basınç düşürücüleri yerleştirilmiştir. Daha sonra, 200 bardaki CNG, iki basamaklı regülatör (Lovato CNG kit) yardımıyla atmosferik basınca düşürülmektedir. Gaz yakıtların sabit oranda motora verilebilmeleri için sistemde hidroksi ve CNG için ayrı ayrı iğne vanalar (Maxtor marka) ve akış-ölçerler (Alicat marka) kullanılmıştır. Motorun hava filtresi ve emme manifoldu arasında uygun yerde konuşlandırılmış gaz yakıt karışım odacığında (Şekil 3.3) sabit oranda gaz yakıt karışımının sağlanması öncelikle iğne vanalardan gazın kontrolü daha sonra akış ölçerlerden gazın ölçümü ile kontrol edilmektedir. Akış ölçerlerden alınan veriler motordan alınan diğer verilerle beraber anlık olarak Elimko PR100 (data logger) üzerinden bilgisayara aktarılmış ve analizler buna göre yapılmıştır. Ölçüm cihazlarının tedariki ve sisteme montajı tamamlandıktan sonra sistemin verimli çalışması kontrol edilmiştir. Hidroksi sisteminin çalışır halde amperaj optimizasyonu yapılmış ve sistem hazır hale getirilmiştir. Aküple ve montaj işlemleri çalışır hale getirilince deney setinin bir diğer önemli bölümü olan pilot püskürtme işlem safhasına geçilmiştir. Testlerden elde edilen emisyon değerleri ise MRU Delta 1600 V egzoz gaz analizörü tarafından ölçülmüştür. Bu cihaz CO ve CO₂ emisyonlarını NDIR mekanizasyonuna göre NO_x emisyonunu ise CLD mekanizasyonuna göre ölçmektedir. Cihazın bu emisyonlar için standardı OIML-class 1 sınıfındadır.



Şekil 3. 3. Emme manifoldu gaz karışım odacığı

3.2. Pilot Püskürtme Uygulaması

Dizel yakıt kısılması ve pilot püskürtme benzerliği Dizel motorlarda gaz yakıtların kullanılabilmesi için iki yöntem bulunmaktadır. İlk yöntem motor ve silindirlerde yapısal değişiklik yaparak, dizel motoru benzinli versiyona dönüştürüp, gaz yakıtları yakmaktır. Bu yöntemde dizel motor, tekrar dizel yakıtı ile çalıştırılmazken (hem enjektör değişimi hem de sıkıştırma oranı değişikliği nedeniyle), ek maliyetleri de yanında getirmektedir. Bu yöntem hem ekonomik hem motor ömrü bakımından normal motor yapısını ve çalışma şartlarını olumsuz etkilemektedir. İkinci yöntem ise, motorda herhangi bir yapısal değişiklik yapmaksızın, sıvı yakıtın (dizel) %10-30 mertebesinde azaltılarak püskürtülmesiyle elde edilmektedir. Bu yöntemde; gaz yakıtlar emme manifoldundan hava ile birlikte emdirildiklerinden, hava/yakıt oranını artırıp, eşdeğerlik oranını 0,6-0,8 dolaylarına kadar çekmektedirler. Bu olayda gaz yakıtı veya gaz yakıt karışımlarını kullanan bir dizel motoru fakir yanma ölçeklerine çekmektedir. Hava ile karışarak silindir içerisine giren gaz yakıtlar, sıkıştırma strokunda yüksek basınçla birlikte tutuşturacak kadar sıvı yakıt ile yanabilmektedirler.

Literatürde bu püskürtme tipi pilot püskürtme yöntemi olarak adlandırılmakta ve gaz yakıt kullanılacak dizel motorlarda yapısal değişikliği engelleyecek biçimde çalışma şartları oluşturmaktadır. Son yıllarda üretilen yeni dizel motorlarda bu yöntemden elde edilebilecek sıvı yakıt kısılması %2-10 mertebesine kadar indirilmiştir. Bu indirgemedede elektronik kontrol ünitesinin ve common-rail püskürtme sisteminin yüksek basınç çalışma aralıklarının etkili olduğu söylenebilir.



Şekil 3.4. Mekanik yakıt pompası ve plancır görüntüsü

Bu tezde, pilot püskürtme yöntemine benzetilen dizel yakıt kısılması, motorun ihtiyaç duyduğu dizel yakıtın olabildiğince düşürülerek, silindir içerisindeki gaz yakıt karışımını tutuşturmasına yetecek kadar miktara düşürülmesiyle elde edilmiştir.



Şekil 3.5. Motor yakıt pompası ve test düzeneği

Öncelikle motor yakıt pompası Bosch enjektör yetkili servisine (Adana) götürülerek normal şartlar altında çalışma parametreleri ve ortalamaları incelenmiştir. Kalibrasyonu yaptırılmış yakıt pompası, deneylerde ilk başta yakıt pompası plancırı üzerine monte edilen mikrometre vasıtasıyla kontrol edilmiştir. Plancır üzerindeki ayar vidası adımlaması; vida adımına göre kısılarak ve açılarak dereceler belirlenmiştir. Bunlar bir sonraki bölümde rahat isimlendirilebilmeleri için açıları ile isimlendirilmişlerdir. 720, 900 ve 1080 derece açılarla beraber nitelendirilmiş vida pozisyonlarına göre dizel yakıt tüketimi düşürülmeye çalışarak her tur için ayrıca deneyler tekrarlanmış ve veriler analiz edilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, materyal ve metot bölümünde detayları izah edilen dizel motorda, yapısal değişiklik olmadan, 25HHOCNG yakıt karışımının, emme manifoldundan hava ile zenginleştirilmesi sayesinde motor performans ve emisyonlarına nasıl etki ettiğinin sonuçları irdelenecektir.

Alternatif gaz yakıtının hacimsel verimliliklerinin ve optimizasyonunu [17] tarafından detaylıca irdelenmiş ve en optimum yakıt karışımının 25HHOCNG olduğu belirlenmiştir. Burada zikredilen karışım sayısal ve volümetrik olarak 5,1 LPM HHO; 15.3 LPM CNG karışımıdır. %25 oranında karışım olduğu için “25HHOCNG” olarak isimlendirilmiştir.

Deneyle normal oda sıcaklığı şartlarında üçer defa gerçekleştirilmiş; her bir deney verisi bu üçünün ortalaması alınarak elde edilmiştir.

Motor performansı açısından değerlendirildiğinde; deneylerde kullanılan değerler; Tork, Güç ve Özgül yakıt tüketimi olarak sonuçlandırılmış ve buna göre normal dizel operasyonu ile karşılaştırılmıştır.

Egzoz emisyonu olarak, dizel motorlarda önemli bir yere sahip olan NO_x ve CO_2 değerlerinde ölçümler gaz analizöründen alınmış ve yine normal dizel operasyonu ile karşılaştırılmıştır.

Bu deneysel çalışmanın, diğerlerinden farkı; görece eski dizel motorlarda kullanılan mekanik yakıt pompası ile kısılması gerçekleştirilen ve plancıra bağlı “dizel yakıt püskürtmesini” azaltarak; pilot dizel püskürtmesi gerçekleştirilmesini sağlamaktır.

Pilot dizel püskürtmesinin dizel yakıtının ne kadar düşürülebileceğinin saptanmasında önemli bir çalışma olarak yapılan bu deneysel sette; plancır vidası adımlarla belirlenerek isimlendirilmiştir. 720, 900 ve 1080 dereceleri; döndürülme dereceleri olarak isimlendirilmiştir. 720; iki tur, 900; iki buçuk tur, 1080 ise üç tur adımlama olarak hesaplanmıştır.

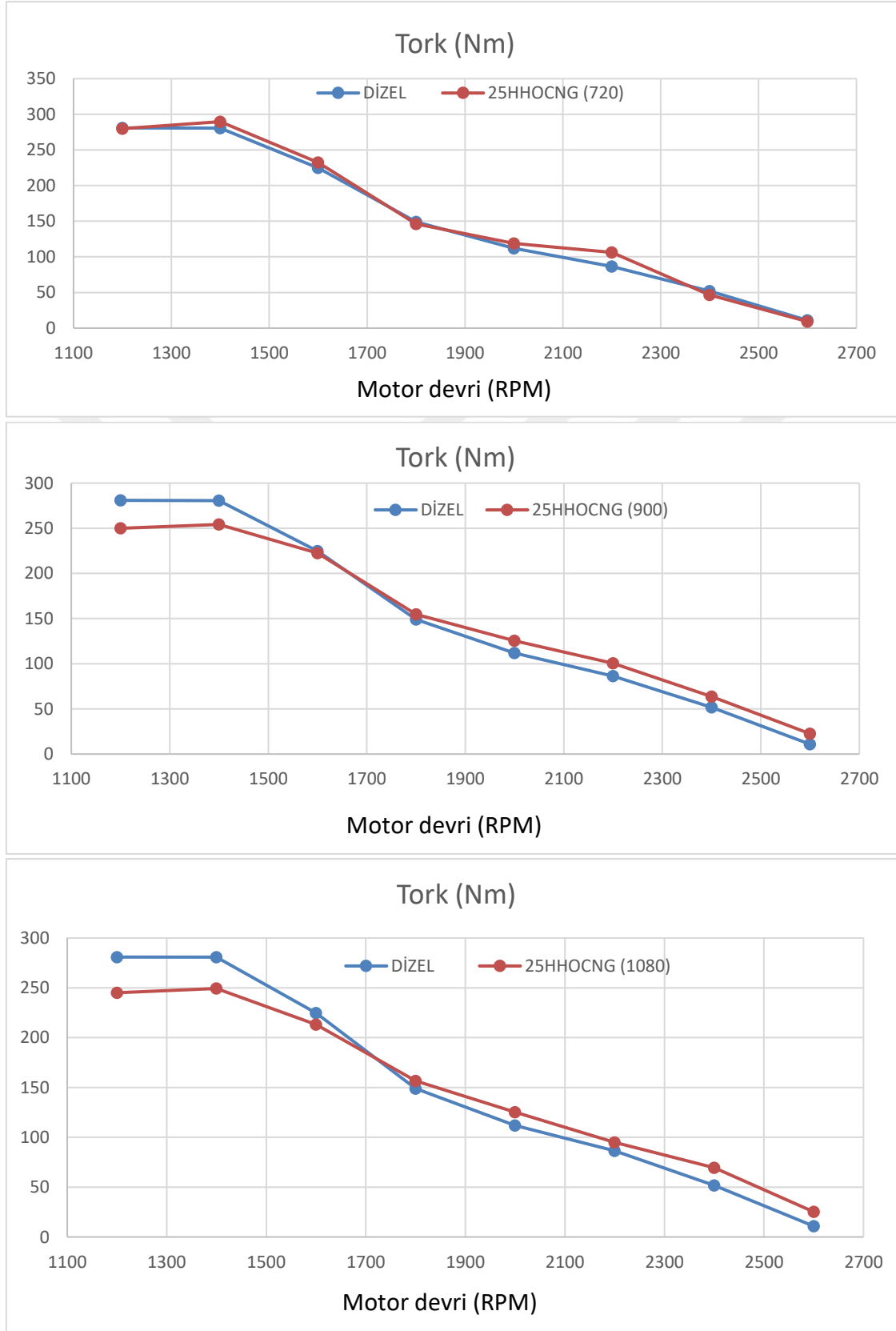
Bu aşamadan sonra her 3 derece için ayrı ayrı güç, tork, özgül yakıt tüketimi, NO_x ve CO_2 değerleri alınmış, bunlar normal dizel verileri ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Alt bölümlere ayrılarak ele alınacak ve izahları grafiklerle yapılacaktır.

4.1. Motor Performans Sonuçları

Bu bölümde deney motorundan elde edilen performans sonuçları grafiklendirilip, izah edilecektir. Performans sonuçları; Tork, Güç ve Özgül Yakıt Tüketimi olarak sınıflandırılmıştır. Bu veriler oluşturulurken, ana dizel operasyonu ile 25HHOCNG yakıt karışımının zenginleştirilmesi ile dizel yakıtının daha az püskürtülmesi için uygulanan pilot püskürtme benzeri kısılma işlemi sırasıyla 720, 900 ve 1080 dereceler için değerlendirilmiştir. Grafiklerde görülecek olan alt eksen motor devrine göre (1200-2600 rpm) resmedilmiştir. Burada karşılaştırmanın daha net görülebilmesi amacı ile Tork verileri Motor devrine göre çizilmiş ve 720, 900 ve 1080 için ayrı ayrı verilmiştir.

Şekil 4.1’de Dizel ve 25HHOCNG farklı kısılmaları için Tork-Devir grafiği resmedilmiştir. Şekilde 720, 900 ve 1080 derece kısılma pilot dizel verileri alt alta verilmiştir. 720 kısılmaya sahip olan pilot püskürtmeli 25HHOCNG (720) yakıt zenginleştirilmesi, dizel yakıtı oranla; tork değerinde %1,02 oranında iyileştirme sağlamıştır. Burada hem hidroksi gazın yanmaya ve tutuşmaya pozitif etkisi hem karışım içindeki CNG nin karbon oranı ve diğer kısılmalara görece daha fazla dizel yakıt gönderimi; torkun çok az miktarda artmasına olanak sağlamıştır. Bu iki torkun ortalama değeri (1200-2600 motor devri için); 25HHOCNG (720) için 153,6 Nm iken, Dizel için 149,5 Nm olmuştur. Ayrıca veriler analiz edildiğinde; maksimum tork 1400 rpm de; 25HHOCNG (720) için 289,6 Nm; yine aynı devirde Dizel için 280,7 Nm’dir.

Şekil 4.1’de ortadaki şekilde 900 derece kısılmaya sahip olan pilot püskürtmeli 25HHOCNG (900) yakıt zenginleştirilmesi, dizel yakıtı oranla; tork değerinde %0,9 oranında düşüş göstermiştir. Burada hidroksi gazın yanmaya ve tutuşmaya pozitif etkisi görülse de (özellikle orta ve yüksek devirlerde); hem karışım içindeki CNG nin karbon oranı hem de daha dizel yakıt gönderimi ile fakir yanma etkisinin hissedilmesi; torkun çok az miktarda düşmesine sebebiyet vermiştir. Bu iki torkun ortalama değeri, 25HHOCNG (900) için 149,1 Nm iken, Dizel için 149,5 Nm olmuştur. Ayrıca veriler analiz edildiğinde; maksimum tork 1400 rpm de; 25HHOCNG (900) için 254,6 Nm; yine aynı devirde Dizel için 280,7 Nm’dir. Şekil 4.1’de en alttaki şekilde 1080 derece kısılmaya sahip olan pilot püskürtmeli 25HHOCNG (1080) yakıt zenginleştirilmesi, dizel yakıtı oranla; tork değerinde %1,4 oranında düşüş göstermiştir. Burada dizel yakıt gönderiminin minimum hali ile fakir yanma etkisinin iyiden iyiye hissedilmesi; torkun düşmesine sebebiyet vermiştir. Ayrıca veriler analiz edildiğinde; maksimum tork 1400 rpm de; 25HHOCNG (1080) için 249,6 Nm; yine aynı devirde Dizel için 280,7 Nm’dir.



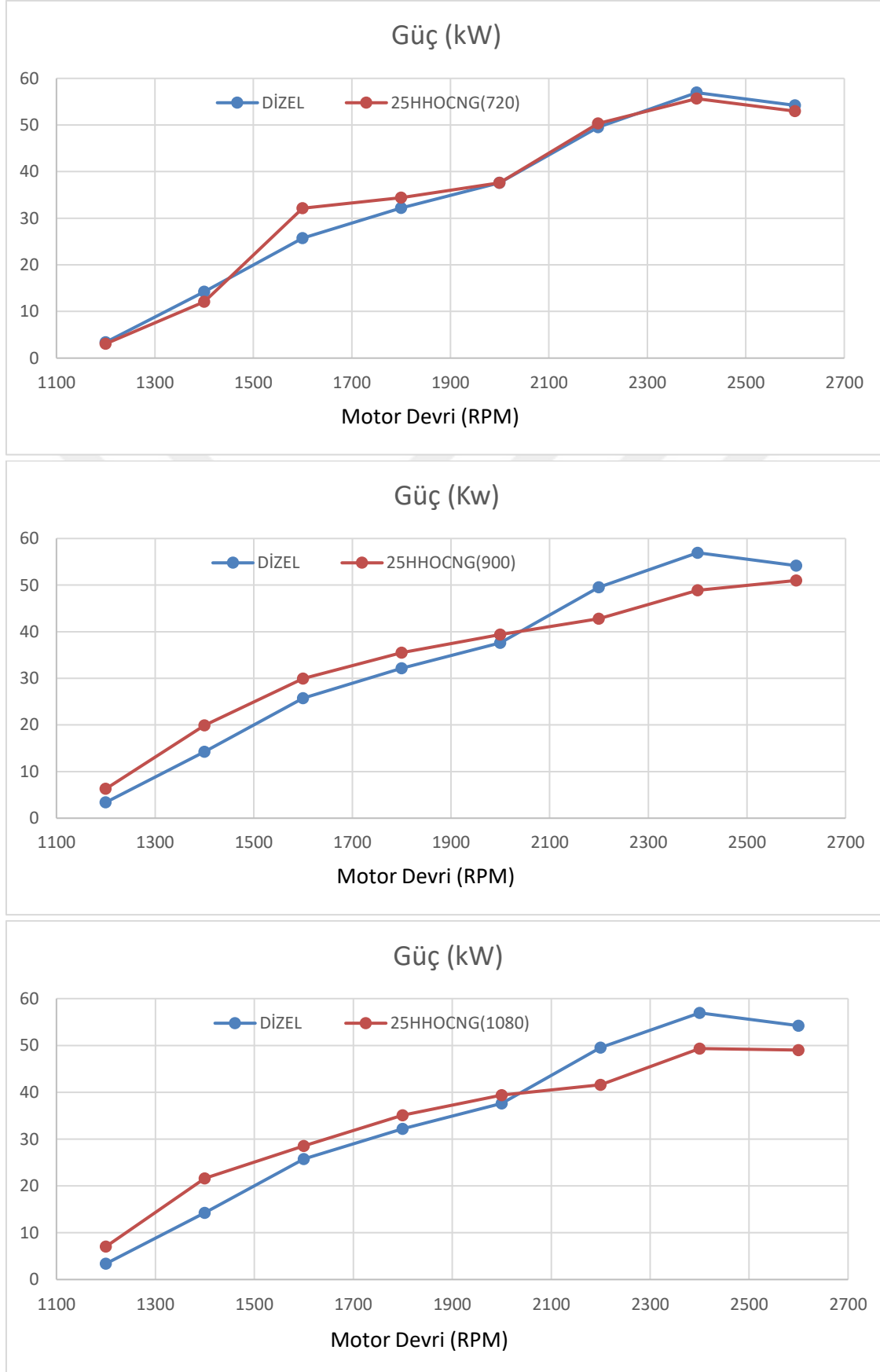
Şekil 4.1. Dizel ve 25HHOCNG farklı kısılmaları için Tork-Devir grafiği

Güç-Devir verileri oluşturulurken yine ana dizel operasyonu ile 25HHOCNG yakıt karışımının zenginleştirilmesi ile dizel yakıtının daha az püskürtülmesi için uygulanan pilot püskürtme benzeri kısılma işlemi sırasıyla 720, 900 ve 1080 dereceler için değerlendirilmiştir. Grafiklerde görülecek olan alt eksen motor devrine göre (1200-2600 rpm) resmedilmiştir. Burada karşılaştırmanın daha net görülebilmesi amacı ile Güç verileri Motor devrine göre çizilmiş ve 720, 900 ve 1080 için ayrı ayrı verilmiştir.

Şekil 4.2’de Dizel ve 25HHOCNG farklı kısılmaları için Güç-Devir grafiği resmedilmiştir. Şekilde 720, 900 ve 1080 derece kısılma pilot dizel verileri alt alta verilmiştir. 720 kısılmaya sahip olan pilot püskürtmeli 25HHOCNG (720) yakıt zenginleştirilmesi, dizel yakıt oranla; güç değerinde %1,01 oranında iyileştirme sağlamıştır. Burada hem hidroksi gazın yanmaya ve tutuşmaya pozitif etkisi hem karışım içindeki CNG nin karbon oranı ve diğer kısılmalara görece daha fazla dizel yakıt gönderimi; torkta olduğu gibi gücünde çok az miktarda artmasına olanak sağlamıştır. Bu iki gücün ortalama değeri (1200-2600 motor devri için); 25HHOCNG (720) için 47,6 kW iken, Dizel için 46,8 kW olmuştur. Ayrıca veriler analiz edildiğinde; maksimum güç 2400 rpm de; 25HHOCNG (720) için 76,2 kW; yine aynı devirde Dizel için 78,01 kW’tır.

Şekil 4.2’de ortadaki şekilde 900 derece kısılmaya sahip olan pilot püskürtmeli 25HHOCNG (900) yakıt zenginleştirilmesi, dizel yakıt oranla; güç değerinde %2 oranında düşüş göstermiştir. Burada hidroksi gazın yanmaya ve tutuşmaya pozitif etkisi görülse de (özellikle düşük ve orta devirlerde); hem karışım içindeki CNG nin karbon oranı hem de daha dizel yakıt gönderimi ile fakir yanma etkisinin hissedilmesi; gücün çok az miktarda düşmesine sebebiyet vermiştir. Bu iki gücün ortalama değeri, 25HHOCNG (900) için 46,87 kW iken, Dizel için 46,8 kW olmuştur. Ayrıca veriler analiz edildiğinde; maksimum güç 2400 rpm de; 25HHOCNG (900) için 66,9 kW; yine aynı devirde Dizel için 78,01 kW’tır.

Şekil 4.2’de en alttaki şekilde 1080 derece kısılmaya sahip olan pilot püskürtmeli 25HHOCNG (1080) yakıt zenginleştirilmesi, dizel yakıt oranla; güç değerinde %4 oranında hissedilir bir düşüş göstermiştir. Burada dizel yakıt gönderiminin minimum hali ile fakir yanma etkisinin iyiden iyiye hissedilmesi; gücün düşmesine sebebiyet vermiştir. Ayrıca veriler analiz edildiğinde; maksimum güç 2400 rpm de; 25HHOCNG (1080) için 67,5 kW; yine aynı devirde Dizel için 78,01 kW’tır.



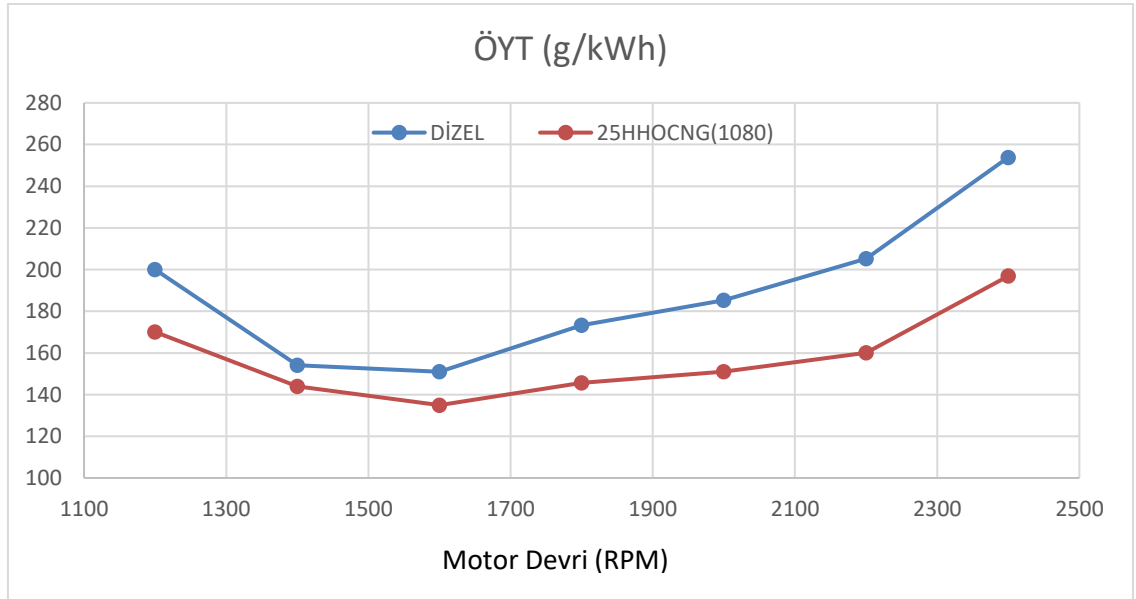
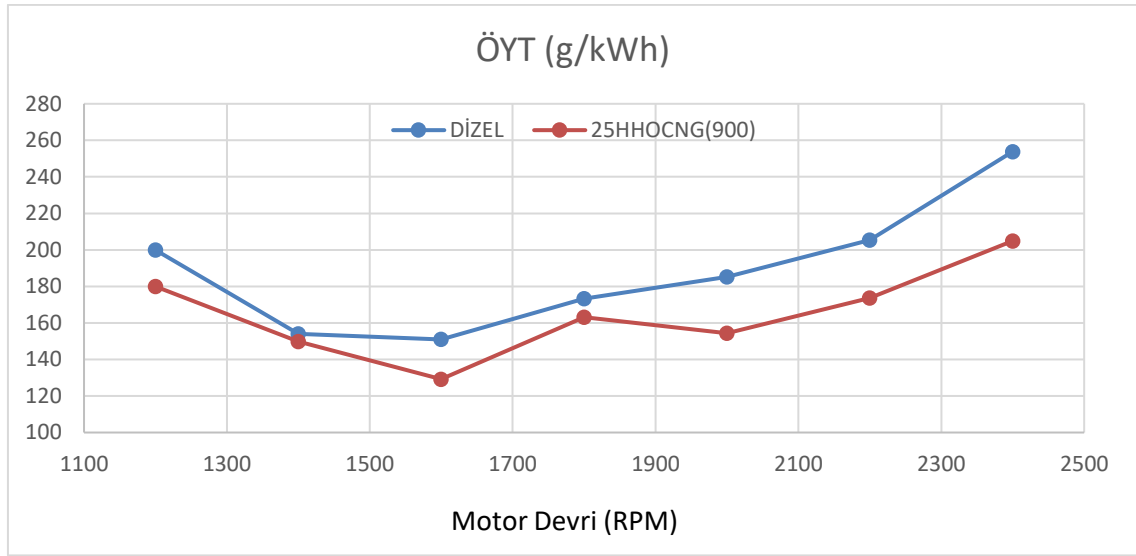
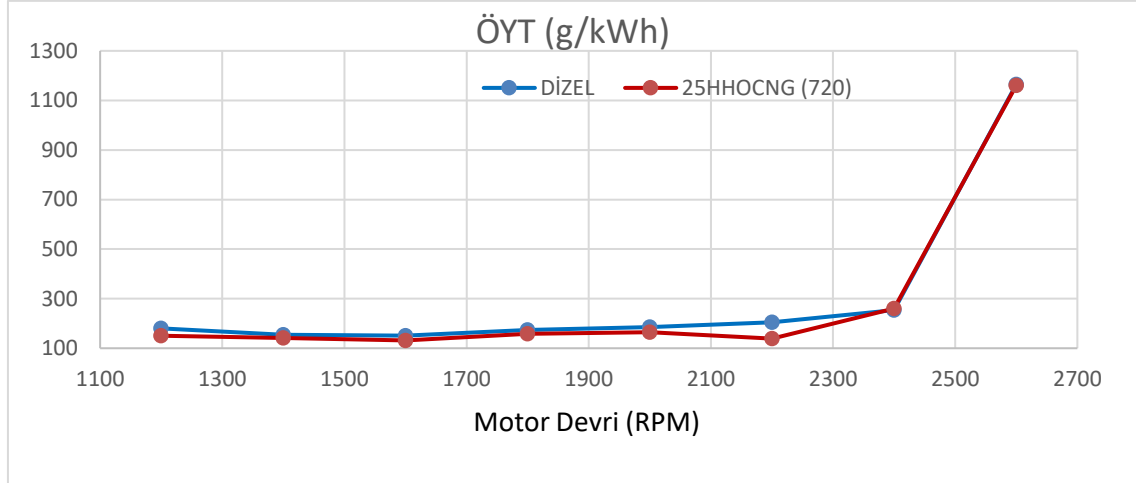
Şekil 4.2. Dizel ve 25HHOCNG farklı kısılmaları için Güç-Devir grafiği

Özgül Yakıt Tüketimi (ÖYT)-Devir verileri oluşturulurken yine ana dizel operasyonu ile 25HHOCNG yakıt karışımının zenginleştirilmesi ile dizel yakıtının daha az püskürtülmesi için uygulanan pilot püskürtme benzeri kısılma işlemi sırasıyla 720, 900 ve 1080 dereceler için değerlendirilmiştir. Grafiklerde görülecek olan alt eksen motor devrine göre (1200-2400 rpm) resmedilmiştir. Burada karşılaştırmanın daha net görülebilmesi amacı ile ÖYT verileri Motor devrine göre çizilmiş ve 720, 900 ve 1080 için ayrı ayrı verilmiştir. Burada önemli bir not düşülmelidir ki; hesaplanan ÖYT verileri dizel (sıvı yakıt) için çizdirilmiştir. Hesaplamaya alternatif gaz yakıtların, tüm deney boyunca aynı olan tüketimleri dahil edilmemiştir.

Şekil 4.3’de Dizel ve 25HHOCNG farklı kısılmaları için ÖYT-Devir grafiği resmedilmiştir. Şekilde 720, 900 ve 1080 derece kısılma pilot dizel verileri alt alta verilmiştir. 720 kısılmaya sahip olan pilot püskürtmeli 25HHOCNG (720) yakıt zenginleştirmesinde, dizel yakıtı oranla; ÖYT değerinde plancıdan pilot püskürtme ile kısılan dizel püskürtmesi %18 oranında düşürülmüştür. 2 tur döndürme sonucunda mekanik yakıt pompasından daha az gönderilen dizel yakıt, tork ve güç eğrilerinden de anlaşılacağı üzere performansı pek negatif etkilememiştir. Burada gaz yakıtların enerjilerinin bu değer kadar verimli oldukları ve bu yakıt kısılmasını karşıladıkları söylenebilmektedir. Bu iki ÖYT’ni ortalama değeri (1200-2400 motor devri için); 25HHOCNG (720) için 169,3 g/kWh iken, Dizel için 188,9 g/kWh olmuştur. Ayrıca veriler analiz edildiğinde; en düşük yakıt sarfıyatı 1600 rpm de; 25HHOCNG (720) için 131 g/kWh; yine aynı devirde Dizel için 150 g/kWh’tir.

Şekil 4.3’de ortadaki şekilde 900 derece kısılmaya sahip olan pilot püskürtmeli 25HHOCNG (900) yakıt zenginleştirmesi, dizel yakıtı oranla; ÖYT değerinde %20 oranında düşüş göstermiştir. İki tam bir yarım döndürme açısına tekabül eden 900 derecede, dizel yakıtı püskürtmesi hissedilir şekilde azaltılmış ve diğer performans değerlerini azaltacak şekilde etkilemişlerdir. Bu iki ÖYT’ni ortalama değeri (1200-2400 motor devri için); 25HHOCNG (900) için 165,05 g/kWh iken, Dizel için 188,9 g/kWh olmuştur. Ayrıca veriler analiz edildiğinde; en düşük yakıt sarfıyatı 1600 rpm de; 25HHOCNG (900) için 129.2 g/kWh; yine aynı devirde Dizel için 150 g/kWh’tir.

Şekil 4.3’de en alttaki şekilde 1080 derece kısılmaya sahip olan pilot püskürtmeli 25HHOCNG (1080) yakıt zenginleştirmesi, dizel yakıtı oranla; ÖYT değerinde %24 oranında hissedilir bir düşüş göstermiştir. Burada dizel yakıt gönderiminin minimum hali ile fakir yanma etkisinin iyiden iyiye hissedilmesi; diğer performans değerlerinin düşmesine sebebiyet vermiştir. Ayrıca veriler analiz edildiğinde; en düşük yakıt sarfıyatı 1600 rpm de; 25HHOCNG (1080) için 134,9 g/kWh; yine aynı devirde Dizel için 150 g/kWh’tir.



Şekil 4.3. Dizel ve 25HHOCNG farklı kısılmaları için ÖYT-Devir grafiği

4.2. Motor Emisyon Sonuçları

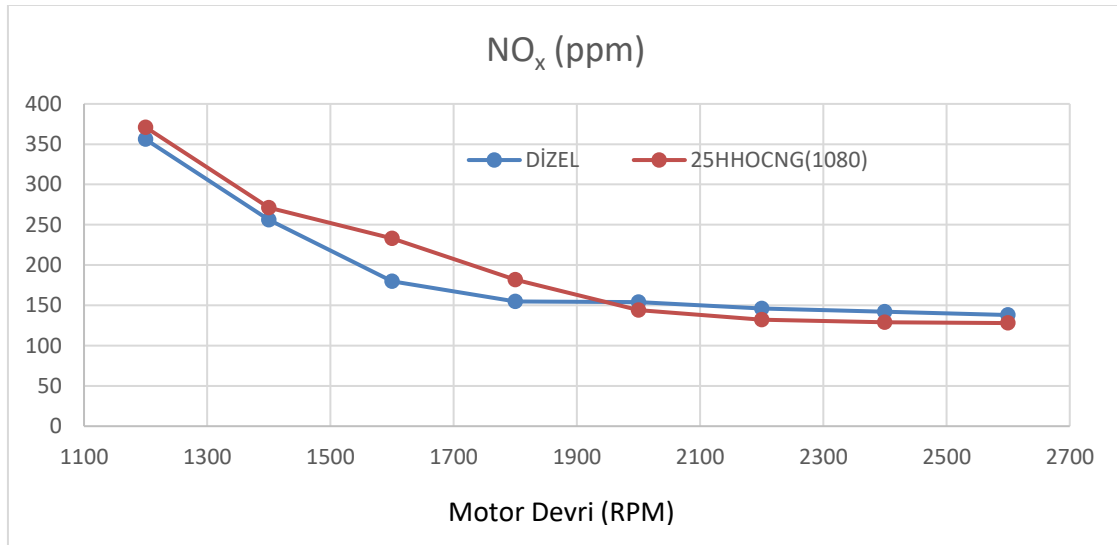
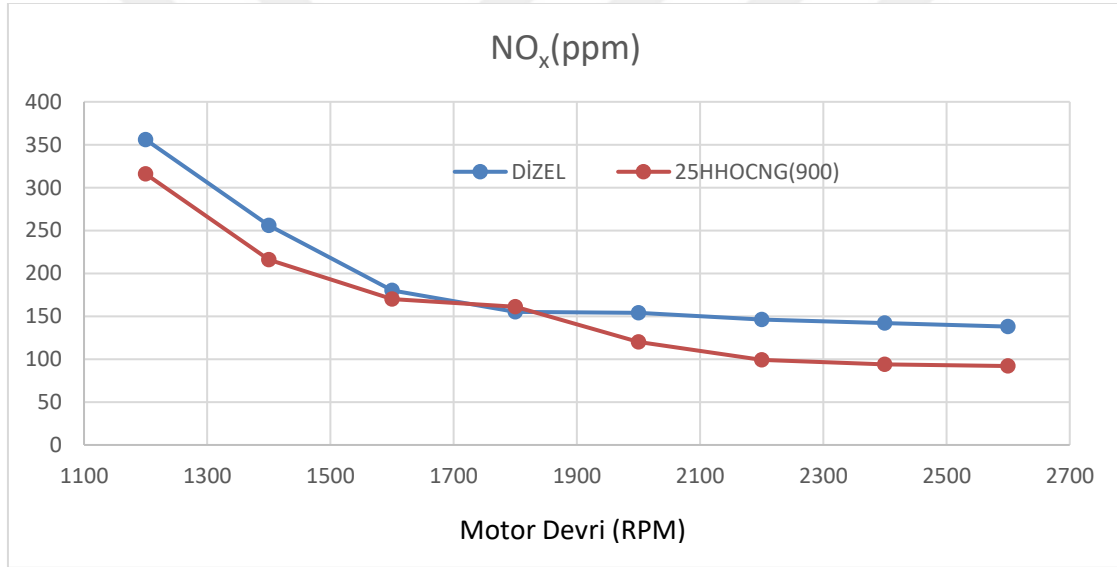
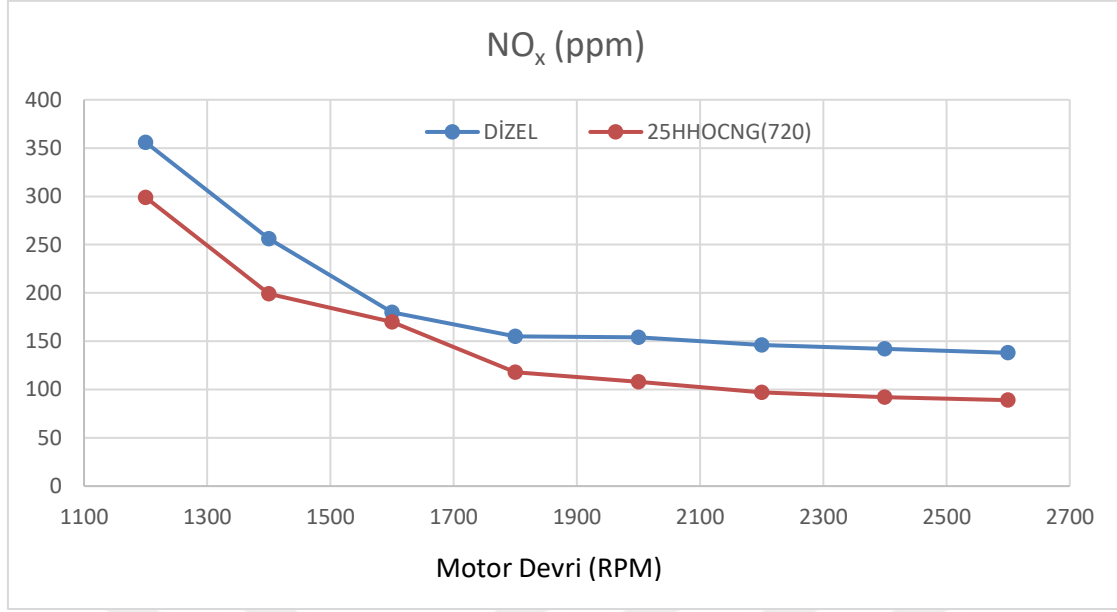
Dizel motorların üretiminde dikkat edilmesi ve ölçülmesi gereken en önemli parametrelerden biri emisyon değerleridir. Kimyasal reaksiyonların hareket elde edilebilecek şekilde evrilmesi ile ortaya yanma sonunda oluşan kirleticiler çıkmaktadır. Dizel motorlarda bu emisyonların giderilmesi veya en aza indirilmesi için yapılan çalışmalar literatürde büyük yer tutmaktadır. Bir dizel motorda emisyon oluşumu sonucunda; CO, CO₂, NO_x ve kükürtoksit oluşumu bertaraf edilmesi gereken en önemli kirleticilerdir.

Bu çalışmada, materyal bölümünde bahsi geçen egzoz gaz analizörü ile en önemli iki emisyonlardan NO_x ve CO₂ emisyonu analiz edilmiştir. Özellikle yüksek yanma sıcaklıklarında ortaya çıkan NO_x ve Karbon ihtivası ile yanmamış hidrokarbonlarla işlem sonucunda oluşan CO₂, dizel ve 25HHOCNG gaz yakıtı için farklı kısılma oranlarında karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.4.'te Dizel ve 25HHOCNG farklı kısılmaları için NO_x-Devir grafiği resmedilmiştir. Şekilde 720, 900 ve 1080 derece kısılma pilot dizel verileri alt alta verilmiştir. 720 kısılmaya sahip olan pilot püskürtmeli 25HHOCNG (720) yakıt zenginleştirmesinde, dizel yakıtı oranla; NO_x değerinde plancırdan pilot püskürtme ile kısılan dizel püskürtmesi %23 oranında iyileştirmiştir. 2 tur döndürme sonucunda mekanik yakıt pompasından daha az gönderilen dizel yakıt, HHO etkisiyle NO_x artırmaya çalışsa da, hem kısılmış dizel hem CNG karışımı NO_x üretimini minimize etmekte ve yarar sağlamaktadır. Bu iki NO_x ortalama değeri (1200-2600 motor devri için); 25HHOCNG (720) için 146,5 ppm iken, Dizel için 190,8 ppm olmuştur.

Şekil 4.4'te ortadaki şekilde 900 derece kısılmaya sahip olan pilot püskürtmeli 25HHOCNG (900) yakıt zenginleştirmesi, dizel yakıtı oranla; NO_x değerinde %17 oranında düşüş göstermiştir. İki tam bir yarım döndürme açısına tekabül eden 900 derecede, dizel yakıtı püskürtmesi hissedilir şekilde azaltılmış olsa da tam yanma işleminin tamamen gerçekleşmemesinden mütevellit NO_x değeri 720 ye göre bir miktar artmaktadır. Bu iki NO_x ortalama değeri (1200-2600 motor devri için); 25HHOCNG (900) için 158,5 ppm iken, Dizel için 190,8 ppm olmuştur.

Şekil 4.4'te en alttaki şekilde 1080 derece kısılmaya sahip olan pilot püskürtmeli 25HHOCNG (1080) yakıt zenginleştirmesi, dizel yakıtı oranla; NO_x değerinde %4 oranında hissedilir bir artış göstermiştir. Burada dizel yakıt gönderiminin minimum hali ile fakir yanma etkisinin iyiden iyiye hissedilmesi; NO_x değerini artırmıştır.



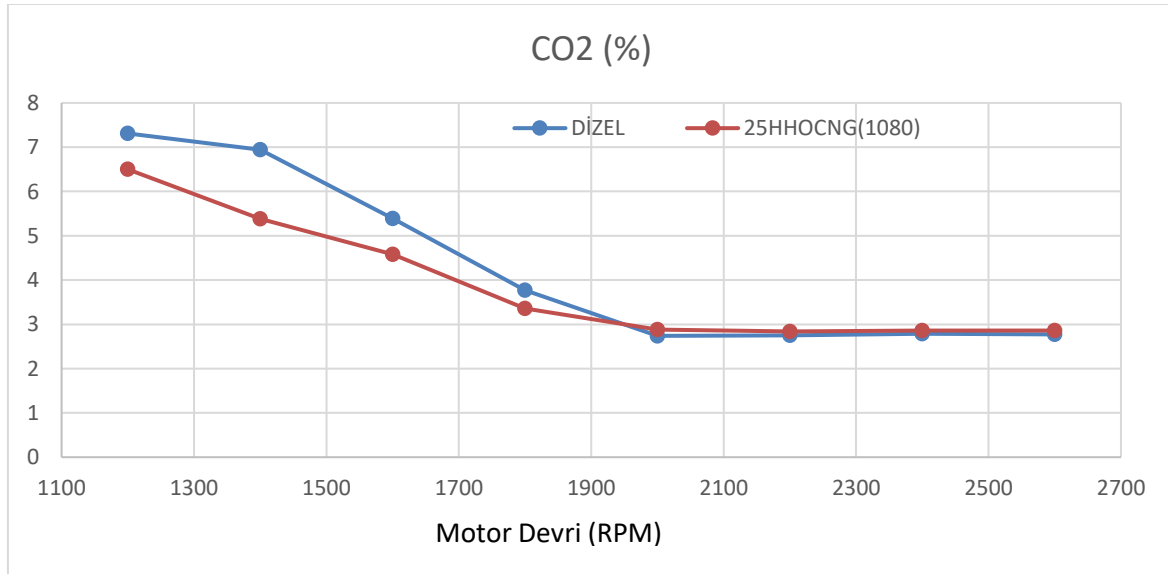
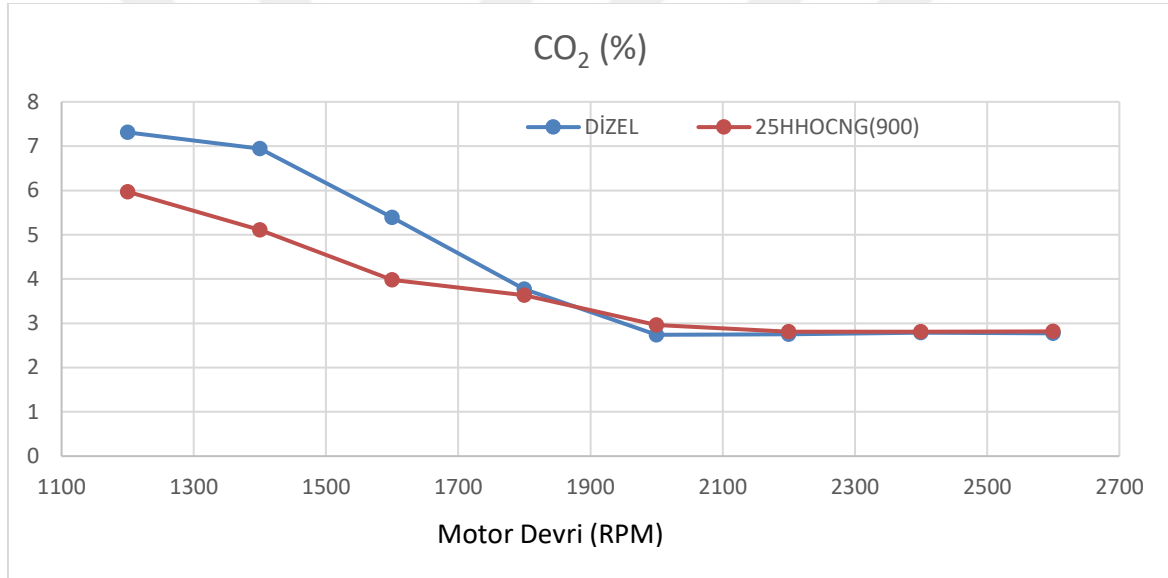
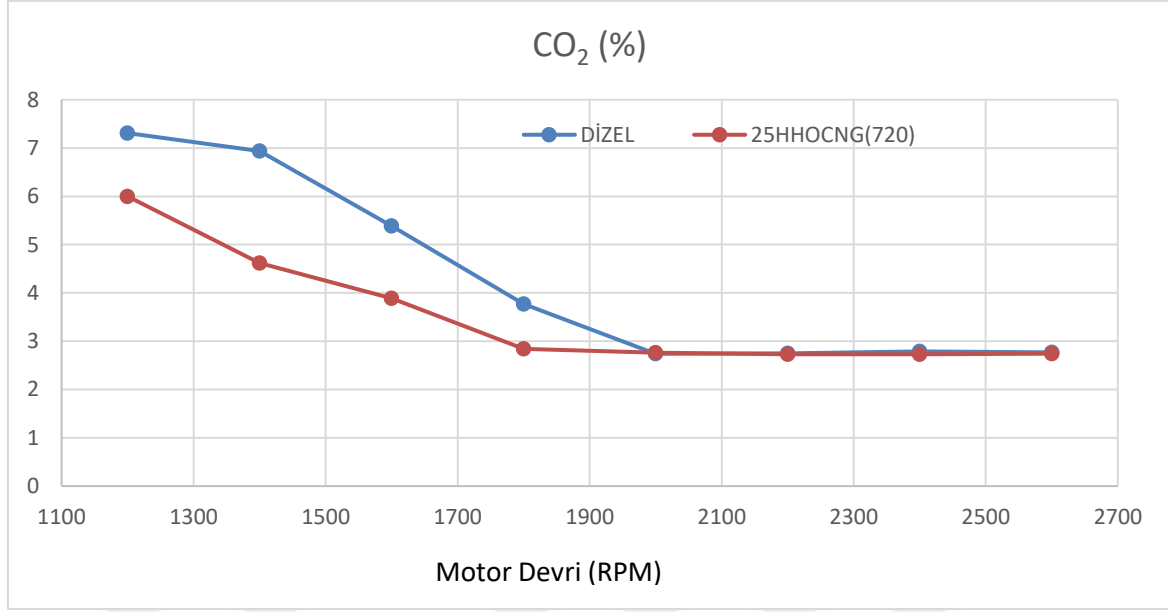
Şekil 4.4. Dizel ve 25HHOCNG farklı kısılmaları için NO_x-Devir grafiği

Bu çalışmada, materyal bölümünde bahsi geçen egzoz gaz analizörü ile en önemli iki emisyonlardan NO_x ve CO_2 emisyonu analiz edilmiştir. Özellikle yüksek yanma sıcaklıklarında ortaya çıkan NO_x ve Karbon ihtivasi ile yanmamış hidrokarbonlarla işlem sonucunda oluşan CO_2 , dizel ve 25HHOCNG gaz yakıtı için farklı kısılma oranlarında karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.5.'te Dizel ve 25HHOCNG farklı kısılmaları için CO_2 -Devir grafiği resmedilmiştir. Şekilde 720, 900 ve 1080 derece kısılma pilot dizel verileri alt alta verilmiştir. 720 kısılmaya sahip olan pilot püskürtmeli 25HHOCNG (720) yakıt zenginleştirmesinde, dizel yakıtı oranla; CO_2 değerinde plancından pilot püskürtme ile kısılan dizel püskürtmesi %19 oranında iyileştirmiştir. 2 tur döndürme sonucunda mekanik yakıt pompasından daha az gönderilen dizel yakıt, HHO etkisiyle CO_2 düşürmeye yardımcı olmuş, içerisindeki karbon ihtivasi olduğundan CNG karışımı CO_2 üretimini bir parça artıracak olsa da kısılma sonundaki pilot püskürtme sonucunda dizel yakıt içerisindeki karbon düşürülmüş olduğundan genel CO_2 emisyonunda düşüşler sağlayarak, çevreci bir tutum sergilemektedir. Bu iki CO_2 ortalama değeri (1200-2600 motor devri için); 25HHOCNG (720) için %3,5 iken, Dizel için %4,3 olmuştur.

Şekil 4.5'te ortadaki şekilde 900 derece kısılmaya sahip olan pilot püskürtmeli 25HHOCNG (900) yakıt zenginleştirmesi, dizel yakıtı oranla; CO_2 değerinde %13 oranında düşüş göstermiştir. İki tam bir yarım döndürme açısına tekabül eden 900 derecede, dizel yakıtı püskürtmesi hissedilir şekilde azaltılmış olsa da tam yanma işleminin tamamen gerçekleşmemesinden mütevellit CO_2 değeri 720 ye göre bir miktar artmaktadır. Bu iki CO_2 ortalama değeri (1200-2600 motor devri için); 25HHOCNG (900) için %3,7 iken, Dizel için %4,3 olmuştur.

Şekil 4.5'te en alttaki şekilde 1080 derece kısılmaya sahip olan pilot püskürtmeli 25HHOCNG (1080) yakıt zenginleştirmesi, dizel yakıtı oranla; NO_x değerinde %10 oranında düşüş göstermiştir. Burada dizel yakıt gönderiminin minimum hali ile fakir yanma etkisinin iyiden iyiye hissedilmesi; CO_2 değerini artırmıştır. Bu iki CO_2 ortalama değeri (1200-2600 motor devri için); 25HHOCNG (900) için %3,9 iken, Dizel için %4,3 olmuştur.



Şekil 4.5. Dizel ve 25HHOCNG farklı kısılmaları için CO₂-Devir grafiği

5. SONUÇLAR

Dünyada artan nüfus ve şehirleşme ile birlikte kişi başına düşen enerji tüketimi hızla artmaktadır. Bu durum enerji ihtiyacını büyük oranda fosil enerji kaynaklarından temin eden dünyanın, başlıca iki sorununa neden olmaktadır. Bu sorunlardan ilki, sınırlı olan petrol rezervleri ve bu rezervlerin dünyada dengeli dağılmamış olması durumu; bir diğeri ise çevresel nedenlerden dolayı artan sera gazı emisyonları ve küresel ısınma etkisidir.

Petrole bağımlı ülkelerle petrol üreticisi ülkeler arasında ekonomik ve siyasi çatışmalara ve hatta ülkelerin işgaline varan gelişmelere neden olmaktadır. Dünya üzerinde ulaşımda kullanılan araçların büyük çoğunluğu (%90) içten yanmalı motor tekniği ile çalışmaktadır. İçten yanmalı motorlarda (İYM) kullanılan yakıtlar ise petrol türevi yakıtlar olan benzin ve motorinden oluşmaktadır. İYM’da kullanılan yakıtlar kolay buharlaşabilme, hava ile kolay karışabilme, birim hacminden yüksek enerji sağlayabilme ve kolay tutuşabilirlik ile kolay bulunabilirlik gibi özellikleri taşımalıdır. Ancak hem benzin hem de dizel yakıtların yukarıda bahsedilen kullanım avantajlarına sahip olmalarına rağmen fosil yakıt ailesine mensup olan bu yakıtların neden olduğu emisyon kirliliği, küresel ısınma, sınırlı rezervler ve aşırı fiyat artışları alternatif yakıt arayışlarının hız kesmeden devam etmesine neden olmaktadır. Bu nedenle akla gelebilen her yakıt denenmekte ve fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltmasına çalışılmaktadır.

Özellikle dizel motorlarda hem çevreci olmak hem de enerji verimliliği ve performanstan ödün vermeden operasyon gerçekleştirilmesi için alternatif yakıtlar kullanılmaktadır. Biodizel ve alternatif yakıtların dizel motorlarda kullanımı emisyon açısından ümitvar olsa da, performans açısından iç açıcı sonuçlar doğurmamaktadır. Benzinli motorlar, yapıları itibari ile gaz yakıtlarla uyumlu ve elverişli yanma sağlayacak prensibine uygundur. Yanma şekilleri ve özellikleri bakımından dizel motorlar (sıkıştırma ile patlama) konusunda benzinli motorlar kadar şanslı değildir. Lakin verimli ve çevreci olabilecek gaz yakıtların dizel motorlarda kullanılması emme manifolduna girecek hava ile zenginleştirilerek yapılması olasıdır.

Bu tez çalışmasında ise hidroksi gaz ve CNG yakıt karışımı, yapısal değişiklik yapılmamış bir dizel motorda pilot dizel püskürtme yöntemiyle irdelenmiş; yakıt karışımının motor performans ve emisyonuna etkileri detaylı biçimde incelenmiştir. Belirli bir oranda hacimsel karışıma sahip karışımla deney yapılmış ve optimum oran olan %25 hacimsel oranlarda

HHO-CNG yakıt karışımının etkileri incelenmiştir. Özellikle pilot püskürtme yöntemi üzerinde durulan bu tezde, common-rail (ortak borulu) püskürtme sistemine sahip olmayan göreceli daha eski dizel motorlarda; yakıt miktarının olabildiğince düşürülerek, yerine emme manifoldundan hava karışımı ile beslenen alternatif gaz yakıt karışımı ile çalışmalar yapılmıştır. Özellikle pilot püskürtme yöntemi, yakıt pompası plancırı vasıtasıyla belli oranlarda kısılarak, yakıt minimizasyonu sağlanmış ve bu düşülme için ayrı ayrı performans ve emisyon değerleri ölçülmüştür.

Deneyisel veriler Çukurova Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Hidroksi gaz jeneratöründen suyun elektrolizi yöntemiyle elde edilen hidroksi gaz ve sıkıştırılmış doğalgaz 25HHOCNG hacimsel oranında karıştırılarak, yapısal değişiklik yapılmamış geleneksel bir dizel motorlarda pilot püskürtme yöntemiyle birlikte; alternatif yakıt karışımı olarak kullanılmıştır. İçten yanmalı motorlarda hidrojen ve diğer gaz yakıtların kullanılması konusunda literatürde mevcut birçok çalışma olmasına rağmen, özellikle hidroksi gazın sıkıştırılmış doğalgaz ile birleştirilerek, dizel motorlarda pilot püskürtme ile kullanımı literatürde eksik olarak saptanmış ve bu boşluğun giderilmesi amacıyla böyle bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Ayrıca pilot püskürtme oranlarının nasıl değişeceği ve değişken pilot püskürtme oranlarında bu durumun nasıl değişeceği; yakıt karışımının motor performans ve emisyonlara etkileri ile detaylı biçimde incelenmiştir. 25% hacimsel karışıma sahip karışımla deney yapılmış %25 hacimsel oranda HHO-CNG yakıt karışımının etkileri incelenmiştir.

Test düzeneği ve ölçüm gereçleri, dizel yakıt kısılması ve pilot püskürtme benzerliği, motor performans ve emisyonlarına etkileri konu başlıkları olarak detaylı şekilde irdelenmiş ve izah edilmiştir.

Tezde ana amaç olarak belirlenmiş olan motor verimini düşürmeden (hatta azda olsa artırarak) egzoz emisyon değerlerinin ve dizel yakıt sarfiyatının düşürülmesi hedefi gerçekleştirilmiştir. Pilot püskürtme işlemine benzer dizel kısılmasının, 720, 900 ve 1080 derecesinde gerçekleştirilmiştir. Bütün deney setlerinde 720° kısılma hem performans hem emisyon bağlamında 900 ve 1080° kısılmalarından daha iyi sonuçlar vermiştir. Gaz yakıtların 720° kısılmalarla kullanımı, özellikle emisyon azatılımı ve yakıt ekonomisinde avantaj sağlamışlardır.

25HHOCNG yakıt karışımının, emme manifoldundan hava ile zenginleştirilmesi sayesinde motor performans ve emisyonlarına nasıl etki ettiğinin sonuçları irdelenmiştir. Burada zikredilen karışım sayısal ve volümetrik olarak 5,1 LPM HHO; 15.3 LPM CNG karışımıdır.

Deneyle normal oda sıcaklığı şartlarında üçer defa gerçekleştirilmiş; her bir deney verisi bu üçünün ortalaması alınarak elde edilmiştir. Motor performansı açısından değerlendirildiğinde; deneylerde kullanılan değerler; Tork, Güç ve Özgül yakıt tüketimi olarak sonuçlandırılmış ve buna göre normal dizel operasyonu ile karşılaştırılmıştır.

Egzoz emisyonu olarak, dizel motorlarda önemli bir yere sahip olan NO_x ve CO_2 değerlerinde ölçümler gaz analizöründen alınmış ve yine normal dizel operasyonu ile karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışmasının benzerlerinden farkı; görece eski dizel motorlarda kullanılan mekanik yakıt pompası ile kısılması gerçekleştirilen ve plancıra bağlı “dizel yakıt püskürtmesini” azaltarak; pilot dizel püskürtmesi gerçekleştirilmesini sağlamaktır. Pilot dizel püskürtmesinin dizel yakıtının ne kadar düşürülebileceğinin saptanmasında önemli bir çalışma olarak yapılan bu deneysel sette; plancır vidası adımlarla belirlenerek isimlendirilmiştir. 720, 900 ve 1080 dereceleri; döndürülme dereceleri olarak isimlendirilmiştir. 720; iki tur, 900; iki buçuk tur, 1080 ise üç tur adımlama olarak hesaplanmıştır. Bu aşamadan sonra her 3 derece için ayrı ayrı güç, tork, özgül yakıt tüketimi, NO_x ve CO_2 değerleri alınmış, bunlar normal dizel verileri ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu deney prosedürü ve ilgili şartlar altında elde edilen önemli sonuçlar şu şekilde sıralanabilmektedir:

- ✓ 720 kısılmaya sahip olan pilot püskürtmeli 25HHOCNG (720) yakıt zenginleştirmesi, dizel yakıtı oranla; tork değerinde %1,02 oranında iyileştirme sağlamıştır.
- ✓ 720 kısılmaya sahip olan pilot püskürtmeli 25HHOCNG (720) yakıt zenginleştirmesi, dizel yakıtı oranla; güç değerinde %1,01 oranında iyileştirme sağlamıştır.
- ✓ 720 kısılmaya sahip olan pilot püskürtmeli 25HHOCNG (720) yakıt zenginleştirmesinde, dizel yakıtı oranla; ÖYT değerinde plancırdan pilot püskürtme ile kısılan dizel püskürtmesi %18 oranında düşürülmüştür.
- ✓ 720 kısılmaya sahip olan pilot püskürtmeli 25HHOCNG (720) yakıt zenginleştirmesinde, dizel yakıtı oranla; NO_x değerinde plancırdan pilot püskürtme ile kısılan dizel püskürtmesi %23 oranında iyileştirmiştir.
- ✓ 720 kısılmaya sahip olan pilot püskürtmeli 25HHOCNG (720) yakıt zenginleştirmesinde, dizel yakıtı oranla; CO_2 değerinde plancırdan pilot püskürtme ile kısılan dizel püskürtmesi %19 oranında iyileştirmiştir.

Genel sonuç olarak; değişken pilot püskürtmeli (720,900 ve 1080) bir dizel motorda alternatif gaz yakıtlı (25HHOCNG) zenginleştirmenin motor performans ve emisyonlarına etkisi başarı ile irdelenmiş ve 720 derece kısılmanın motorda hem çevreci hem performans bakımından kayba neden olmadığı görülmüştür.



KAYNAKLAR

1. İnternet: <http://www.odd.org.tr> ODD (2021) VERİLERİ, Son erişim tarihi: 01.06.2021
2. İnternet: [https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2019-37196#:~:text=T%C3%9C%C4%B0K%20Kurumsal&text=Sera%20gaz%C4%B1%20envanteri%20sonu%C3%A7lar%C4%B1na%20g%C3%B6re,CO2%20e%C5%9Fde%C4%9Feri%20\(e%C5%9Fd.\)&text=Ki%C5%9Fi%20ba%C5%9F%C4%B1%20toplam%20sera%20gaz%C4%B1,CO2%20e%C5%9Fd.%20olarak%20hesapland%C4%B1](https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2019-37196#:~:text=T%C3%9C%C4%B0K%20Kurumsal&text=Sera%20gaz%C4%B1%20envanteri%20sonu%C3%A7lar%C4%B1na%20g%C3%B6re,CO2%20e%C5%9Fde%C4%9Feri%20(e%C5%9Fd.)&text=Ki%C5%9Fi%20ba%C5%9F%C4%B1%20toplam%20sera%20gaz%C4%B1,CO2%20e%C5%9Fd.%20olarak%20hesapland%C4%B1) Son erişim tarihi: 01.06.2021
3. Akansu, S.O., (2007). Hidrojen Yakıtının İçten Yanmalı Motorlarda Uygulanması, Tübitak 104M413 Sonuç Raporu
4. Karagöz, Y. (2012). İçten Yanmalı Motorlarda Hidrojenin Alternatif Yakıt Olarak Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
5. Tangöz S., (2015). Farklı Sıkıştırma Oranlarındaki Buji Ateşlemeli Bir Motorda Doğalgaz ve Doğalgaz – Hidrojen Karışımlarının Yakıt Olarak Kullanılmasının Araştırılması Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi.
6. Goyal, P and Siddhartha, (2003). Present Scenario Of Air Quality İn Delhi: A Case Study Of CNG İmplementation. Atmospheric Environment, 37 5423–5431.
7. Poornipatpong, C., Cheenkachorn, K. (2011). A Modified Diesel Engine For Natural Gas Operation: Performance And Emission Tests, Energy, vol. 36, p. 6862-6866.
8. Papagiannakis, R.G., Rakopoulos, C.D., Hountalas D.T., Rakopoulos D.C., (2010). Emission Characteristics Of High Speed, Dual Fuel, Compression Ignition Engine Operating In A Wide Range Of Natural Gas/Diesel Fuel Proportions. Fuel 89 1397–1406.
9. Nwafor, O.M.I., (2000). Effect Of Choice Of Pilot Fuel On The Performance Of Natural Gas In Diesel Engines. Renewable Energy 21:495-504.

10. Sahoo, B.B., Sahoo, N., Saha, U.K., (2009). Effect Of Engine Parameters And Type Of Gaseous Fuel On The Performance Of Dual-Fuel Gas Diesel Engines—A Critical Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13:1151–1184.
11. Mbarawa, M., Milton, B.E., CASEY, R.T., (2001). Experiments And Modeling Of Natural Gas Combustion Ignited By A Pilot Diesel Fuel Spray. *Int. J. Therm. Sci.*, 40: 927–936.
12. Demirci, A. (2010). Elektroliz Yöntemi ile Elde Edilen Hidrojenin Dizel Motor Dolgusuna İlavesinin Performans ve Emisyonlara Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi
13. Ciniviz, M., Köse, H., (2012). Hydrogen Use in Internal Combustion Engine: A Review, *International Journal of Automotive Engineering and Technologies* 1, (1): 1 – 15.
14. 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.
15. Maki, D. F., Prabhakaran, P., (2001). An Experimental Investigation On Performance And Emissions Of A Multi Cylinder Diesel Engine Fueled With Hydrogen-Diesel Blends. *World Renewable Energy Congress*, 3557-3564.
16. Verhelst, S., Wallner, T., (2009). Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines. *Progress in Energy and Combustion Science* 35:490–527.
17. Arat, H.T., Baltacioğlu, M.K., Özcanlı, M., Aydın, K., (2016). Optimizing the quantity of diesel fuel injection by using 25HHOCNG gas fuel mixture, *Advanced Engineering Forum* 14: 36-45
18. Dincer, I., Zamfirescu, C., (2011). *Ustainable Energy Systems And Applications*. New York: Springer.
19. Çeper, B.A, (2012). Use Of Hydrogen-Methane Blends In Internal Combustion Engines, *Hydrogen Energy- Challenges And Perspectives*, Prof. Dragica Minic (Ed.), ISBN: 978-953-51-0812-2, InTech, DOI: 10.5772/50597.

20. Yilmaz, A.C., (2010). Design And Applications Of Hydroxy (HHO) System. Çukurova University, MSc. Thesis, 76 p.
21. Birtas A., Chiriac, R., (2011). A Study Of Injection Timing For A Diesel Engine Operating With Gasoil And HRG Gas, U.P.B. Sci. Bull., Series D; 73/4: 65-78.
22. Bari, S., Esmaeil, M.M., 2010. Effect Of H₂/O₂ Addition In Increasing The Thermal Efficiency Of A Diesel Engine. Fuel; 89: 378–383,
23. Zammit, G., Farrugia, M., Ghirlando, R., (2012). Experimental Investigation Of The Effects Of Hydrogen Enhanced Combustion In SI And CI Engines On Performance And Emissions. HEFAT 2012; 641–650
24. Samuel, S., McCormick, G., (2010).Hydrogen Enriched Diesel Combustion. SAE Technical Paper, 2010-01-2190, doi:10.4271/2010-01-2190.
25. Gad, M. S., & Razek, S. A. (2021). Impact of HHO produced from dry and wet cell electrolyzers on diesel engine performance, emissions and combustion characteristics. International Journal of Hydrogen Energy.
26. Khan, M. B., Kazim, A. H., Farooq, M., Javed, K., Shabbir, A., Zahid, R., ... & Atabani, A. E. (2021). Impact of HHO gas enrichment and high purity biodiesel on the performance of a 315 cc diesel engine. International Journal of Hydrogen Energy.
27. Salek, F., Zamen, M., Hosseini, S. V., & Babaie, M. (2020). Novel hybrid system of pulsed HHO generator/TEG waste heat recovery for CO reduction of a gasoline engine. International Journal of Hydrogen Energy, 45(43), 23576-23586.
28. Jakliński, P., & Czarnigowski, J. (2020). An experimental investigation of the impact of added HHO gas on automotive emissions under idle conditions. International Journal of Hydrogen Energy, 45(23), 13119-13128.
29. Subramanian, B., & Thangavel, V. (2020). Experimental investigations on performance, emission and combustion characteristics of Diesel-Hydrogen and Diesel-HHO gas in a Dual fuel CI engine. International Journal of Hydrogen Energy, 45(46), 25479-25492.
30. Polverino, P., D’Aniello, F., Arsie, I., & Pianese, C. (2019). Study of the energetic needs for the on-board production of Oxy-Hydrogen as fuel additive in internal combustion engines. Energy conversion and management, 179, 114-131.

31. Sharma, P. K., Sharma, D., Soni, S. L., Jhalani, A., Singh, D., & Sharma, S. (2020). Energy, exergy, and emission analysis of a hydroxyl fueled compression ignition engine under dual fuel mode. *Fuel*, 265, 116923.
32. Rahman, M. A., & Aziz, M. A. (2021). Biodiesel from water hyacinth biomass and its influence on CI engine performance, emission, combustion and heat loss characteristics with the induction of hydroxy. *Energy*, 224, 120151.
33. Sharma, P. K., Sharma, D., Soni, S. L., Jhalani, A., Singh, D., & Sharma, S. (2020). Characterization of the hydroxy fueled compression ignition engine under dual fuel mode: Experimental and numerical simulation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(15), 8067-8081.
34. Chinguwa, S., Jen, T. C., & Akinlabi, E. T. (2020). Conceptualization of the optimal design of a hydroxyl booster dry cell for enhancing efficiency of internal combustion engines. *Procedia CIRP*, 91, 819-823.
35. Thangaraj, S., & Govindan, N. (2018). Evaluating combustion, performance and emission characteristics of diesel engine using karanja oil methyl ester biodiesel blends enriched with HHO gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(12), 6443-6455.
36. Ozcanli, M., Akar, M. A., Calik, A., & Serin, H. (2017). Using HHO (Hydroxy) and hydrogen enriched castor oil biodiesel in compression ignition engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(36), 23366-23372.
37. Uludamar, E. (2018). Effect of hydroxy and hydrogen gas addition on diesel engine fuelled with microalgae biodiesel. *International journal of hydrogen energy*, 43(38), 18028-18036.
38. Baltacioglu, K. B. (2016). Hydroxy (HHO) and Hydrogen (H₂) Enriched Compressed Natural Gas (CNG) Usage In Biodiesel Fuelled Compression Ignition (CI) Engines. PhD thesis, Cukurova University, Adana.

DİZİN

A

Amperaj · 13, 18, 19
Atmosfer · 3,19

B

Biodizel · 14,15,32

C

Common-rail · 5,20

Ç

çevre · 1,2,3,4,5, 15, 29, 30, 32

D

Dogalgaz · 2,6,7,10

E

Elektroliz · 2,4,11,12,13,18,31,32
Emisyon · 3,4,5,6,7,8,10,11,13,
14, 15,17,19,31,32
Ekonomi · 2,5,6,8,14,20,32
Ekserji · 15

F

Fiziksel · 2,4
fosil · 1,2,3,6

H

Handikap · 10

İ

iyileştirme · 15,16,23,25,27,30

K

Kimyasal · 1,2,4
Kurşun · 3

L

literatür · 6,7,8,13, 15, 16,31

M

Manifold · 5,8,9, 13,14,15,18,19

N

Otto · 4

Ö

Özet · 10, 25, 64, 68

P

plancır · 5,19,20,21,26,28,30
partikül madde · 3

S

Sera gazı · 1,3

T

Teorik · 13,14,15,32

Ü

Teorik · 13,14,15,32

V

Verim ·
5,8,9,13,14,15,18,19,22,28,31,
32

Y

Yanma ·
1,2,4,5,6,7,8,9,10,11,12,14,15,
20,23,25,27,28,31

Z

Zenginleştirme ·
4,5,9,10,13,14,15,22,23,25,27,
28,29,30,31



TEKNOVERSİTE