



**BUJİ ATEŞLEMELİ BİR MOTORUN ISINMA  
PERİYODUNDA OKSİJEN İLE ZENGİNLEŞTİRİLMİŞ  
EMME HAVASININ PERFORMANS VE  
EGZOZ EMİSYONLARI ÜZERİNDEKİ  
ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Niyazi BASKIN**



T.C

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BUJİ ATEŞLEMELİ BİR MOTORUN ISINMA PERİYODUNDA OKSİJEN İLE  
ZENGİNLEŞTİRİLMİŞ EMME HAVASININ PERFORMANS VE EGZOZ  
EMİSYONLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Niyazi BASKIN**

Dr. Öğr. Üyesi Barış ERKUŞ  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2018

## TEZ ONAYI

Niyazi BASKIN tarafından hazırlanan "BUJİ ATEŞLEMELİ BİR MOTORUN ISINMA PERİYODUNDA OKSİJEN İLE ZENGİNLEŞTİRİLMİŞ EMME HAVASININ PERFORMANS VE EGZOZ EMİSYONLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi. Barış ERKUŞ**

**Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Barış ERKUŞ**

Uludağ Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
Otomotiv Mühendisliği Bölümü

İmza

**Üye : Prof. Dr. Ali SÜRME**

Uludağ Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
Otomotiv Mühendisliği Bölümü

İmza

**Üye : Dr. Öğr. Üyesi Kemal Furkan SÖKMEN**

Bursa Teknik Üniversitesi  
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi  
Makine Mühendisliği Bölümü

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Ali BAYRAM

Enstitü Müdürü

4 / 6 / 2018

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

30/05/2018

İmza

**Niyazi BASKIN**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### BUJİ ATEŞLEMELİ BİR MOTORUN ISINMA PERİYODUNDA OKSİJEN İLE ZENGİNLEŞTİRİLMİŞ EMME HAVASININ PERFORMANS VE EGZOZ EMİSYONLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

**Niyazi BASKIN**

Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Dr. Öğr. Üyesi Barış ERKUŞ

Gün geçtikçe motorlu taşıtlardan kaynaklı artan hava kirliliği önemli bir sorun haline gelmektedir. Bu yüzden araçlardan salınan egzoz gazı emisyon değerlerini istenen standartlara indirmek için çalışmalar yapılmaktadır. Egzoz emisyonları özellikle motor ısınma periyodunda iken, normal çalışma şartlarında açığa çıkan emisyon değerlerinden daha yüksektir. Yanma verimini artırmak, emisyonları düşürmek ve motor performansını artırmak adına yapılan çalışmalardan biride emme havasının oksijence zenginleştirilmesidir. Bu sayede yakıtın yeterli miktarda oksijen ile reaksiyona girmesi sağlanmaktadır.

Deneysel olarak yapılan bu çalışmada, LPG yakıtlı bir motorun ısınma periyodunda, oksijence zenginleştirilmiş emme havasının performans ve egzoz emisyonlarına olan etkileri incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Buji ateşlemeli motor, LPG, Oksijen, Isınma periyodu

**2018,x+62 sayfa.**

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

### **INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF OXYGEN ENRICHED INTAKE AIR ON PERFORMANCE AND EXHAUST EMISSIONS DURING WARM-UP PERIOD OF A SPARK IGNITION ENGINE**

**Niyazi BASKIN**

Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Automotive Engineering

**Supervisor:** Asst. Prof. Barış ERKUŞ

Day by day, air pollution which is sourced from motor vehicles becomes a more crucial problem. There have been studies reach to desired standards exhaust emissions values of emitted from vehicles. When the engine is at warm-up period, exhaust emissions are higher than the emission values which are released during normal operating conditions. Enrichment of the intake air with oxygen is one of the studies to improve combustion efficiency and engine performance, to reduce exhaust emissions. By this means, the fuel react with sufficient oxygen.

In this experimental study, while the LPG fueled engine on warm-up period, the effects of oxygen enriched intake air to performance and exhaust emissions were investigated.

**Keywords:** Spark ignition engine, LPG, Oxygen, Warm-up period

**2018, x+62 pages**

## TEŞEKKÜR

Hayatım boyunca devamlı yanımda olan, alıőmalarımı her zaman sabırla destekleyen, aldığım kararlarda arkamda duran kıymetli anneme, babama ve kardeőime, değerli eőime sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Tez alıőmamda ve yüksek lisans eğitimim süresince bana yol gösteren, bilgi ve birikimleriyle yardımını esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Barış ERKUŞ'a teőekkürü borç bilirim.

Niyazi BASKIN

Mayıs, 2018



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
1.GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	18
3.1 Test Düzenegi Genel Bileşenleri.....	18
3.1.1 Deney motoru.....	18
3.1.2 Motor test dinamometresi.....	19
3.1.3 Egzoz emisyon ölçüm cihazı.....	21
3.1.4 LPG yakıt teknik özellikleri ve tüketim miktarı ölçümü.....	23
3.1.5 Oksijen tüketiminin ölçülmesi.....	24
3.2 Ölçüm Cihazları Ölçüm Aralıkları ve Hassasiyetleri.....	24
3.3 Yöntem ve Matematiksel Hesaplamalar.....	25
3.4 Ölçüm Cihazlarından Kaynaklanan Belirsizlik Değeri.....	29
4.BULGULAR VE TARTIŞMA.....	32
4.1 2000 d/d Motor Çalışma Hızında Elde Edilen Sonuçlar.....	32
4.2 2500 d/d Motor Çalışma Hızında Elde Edilen Sonuçlar.....	36
4.3 3000 d/d Motor Çalışma Hızında Elde Edilen Sonuçlar.....	41
4.4 3500 d/d Motor Çalışma Hızında Elde Edilen Sonuçlar.....	46
4.5 4000 d/d Motor Çalışma Hızında Elde Edilen Sonuçlar.....	50
5.SONUÇ.....	56
KAYNAKLAR.....	59
ÖZGEÇMİŞ.....	62



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

Simgeler	Açıklama
$\lambda$	Hava fazlalık katsayısı [Lambda]
$P_e$	Efektif güç [kw]
$M$	Moment [Nm]
$b_e$	Efektif özgül yakıt tüketimi [gr/kWh]
$\eta_e$	Efektif verim
$F$	Kuvvet [N]
$H_U$	Yakıtın alt ısı değeri [kJ/kg]
$l$	Fren düzeneği moment kolu [m]
$m$	Kütle [kg]
$n$	Motor devri [d/dak]
$T$	Sıcaklık [°C]
$\phi$	Yakıt/Hava eşdeğerlik oranı
$K$	Kelvin
$g$	Gram
$s$	Saniye

### Kısaltmalar

Kısaltmalar	Açıklama
HC	Hidrokarbon
CO	Karbonmonoksit
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
NO <sub>x</sub>	Azot Oksit
O <sub>2</sub>	Oksijen
N <sub>2</sub>	Azot
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Bütan
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Propan
LPG	Sıvılaştırılmış petrol gazı
EKÜ	Elektronik kontrol ünitesi
ppm	Milyonda bir anlamına gelen kütleli yoğunluk birim
Y/H	Yakıt kütleli hava kütleli oranı
TÜİK	Türkiye istatistik kurumu

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 3.1. Deney motoru ön ve arka görünüş .....	20
Şekil 3.2. Deney motoru ve motor test dinamometresi .....	21
Şekil 3.3. a) Duration test sürecinde test parametrelerinin tanımlanması b) Bir duration test süreci.....	22
Şekil 3.4. Program ara yüzünden dinamometreden okunan değerler.....	22
Şekil 3.5. Deney kapsamında yapılan bir çalışmaya ait değerlerin okunması.....	23
Şekil 3.6. BEA 060 egzoz gaz analizörü.....	23
Şekil 3.7. Bosch egzoz emisyon ölçüm cihazından değerlerin okunması.....	24
Şekil 3.8. Yapılan bir deneyde emisyon değerlerinin okunması.....	24
Şekil 3.9. LPG yakıt ve oksijen tüketiminin ölçülmesine yönelik kurulan tertibat .....	25
Şekil 3.10. Deney düzeneği şeması.....	27
Şekil 4.1. 2000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı, motor efektif güç (kW) ve motor moment (Nm) grafiği.....	32
Şekil 4.2. 2000 d/d motor çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve efektif özgül yakıt tüketimi (g/kwh) grafiği .....	33
Şekil 4.3. 2000 d/d motor çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve CO (%) emisyon grafiği .....	34
Şekil 4.4. 2000 d/d motor çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve CO <sub>2</sub> (%) emisyon grafiği .....	34
Şekil 4.5. 2000 d/d motor çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve HC (ppm) emisyon grafiği .....	35
Şekil 4.6. 2000 d/d motor çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve NO <sub>x</sub> (ppm) emisyon grafiği .....	36
Şekil 4.7. 2500 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı, motor efektif güç (kW) ve motor moment (Nm) grafiği.....	37
Şekil 4.8. 2500 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve efektif özgül yakıt tüketimi (g/kwh) grafiği .....	38
Şekil 4.9. 2500 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve CO emisyon değerleri (%) grafiği .....	38
Şekil 4.10. 2500 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve CO <sub>2</sub> emisyon değerleri (%) grafiği .....	39
Şekil 4.11. 2500 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve HC emisyon değerleri (ppm) grafiği .....	40
Şekil 4.12. 2500 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve NO <sub>x</sub> emisyon değerleri (ppm) grafiği .....	41
Şekil 4.13. 3000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı, motor efektif güç (kW) ve motor moment (Nm) grafiği.....	42
Şekil 4.14. 3000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve efektif özgül yakıt tüketimi (g/kwh) grafiği .....	43
Şekil 4.15. 3000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve CO emisyon (%) grafiği .....	43

Şekil 4.16. 3000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve CO <sub>2</sub> (%) emisyon grafiği	44
Şekil 4.17. 3000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve HC (ppm) emisyon grafiği	45
Şekil 4.18. 3000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve NO <sub>x</sub> (ppm) emisyon grafiği	45
Şekil 4.19. 3500 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve motor efektif güç (kW) grafiği	46
Şekil 4.20. 3500 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve efektif özgül yakıt tüketimi (g/kwh) grafiği	47
Şekil 4.21. 3500 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve CO emisyon (%) grafiği	48
Şekil 4.22. 3500 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve CO <sub>2</sub> emisyon (%) grafiği	48
Şekil 4.23. 3500 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve HC emisyon (ppm) grafiği	49
Şekil 4.24. 3500 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve NO <sub>x</sub> emisyon (ppm) grafiği	50
Şekil 4.25. 4000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı, motor efektif güç (kW) ve motor moment (Nm) grafiği	51
Şekil 4.26. 4000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve efektif özgül yakıt tüketimi (g/kwh) grafiği	52
Şekil 4.27. 4000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve CO emisyon (%) grafiği	53
Şekil 4.28. 4000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve CO <sub>2</sub> emisyon (%) grafiği	53
Şekil 4.29. 4000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve HC emisyon (ppm) grafiği	54
Şekil 4.30. 4000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve NO <sub>x</sub> emisyon (ppm) grafiği	55

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 3.1. Motor teknik özellikleri .....	18
Çizelge 3.2. Test Dinamometresine ait teknik özellikler .....	20
Çizelge 3.3. LPG'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri .....	23
Çizelge 3.4. Motor test dinamometresi, egzoz cihazı ve dijital terazilerin ölçüm aralığı ve hassasiyeti.....	25
Çizelge 3.5. Artan oksijen basıncı ve motor hızına bağlı tüketilen LPG yakıt miktarı (gram).....	26
Çizelge 3.6. Artan oksijen ve motor hızına bağlı tüketilen LPG yakıt kütleli debisi (gram/saniye).....	27
Çizelge 3.7. Oksijen tüpünden gönderilen oksijen miktarı (gram) .....	29
Çizelge 3.8. Oksijen tüpünden gönderilen oksijen kütleli debi (gram/saniye).....	29
Çizelge 3.9. Belirsizlik analizi formülündeki değişkenler ve belirsizlik değer sonuçları .....	31

## 1.GİRİŞ

Dünya enerji talebini karşılayan kaynaklar içinde birincil enerji kaynakları arasında bulunan ham petrol dünya enerji talebinin %33,3'ünü karşılamaktadır (Anonim 2018a). Günümüzde, dünya geneline bakıldığında birincil enerji kaynaklarının yaklaşık olarak beşte birinin ulaştırma sektörü tarafından kullanılmakta olduğu görülmektedir. 2016 yılı itibari ile 4 trilyon dolarlık büyüklüğe sahip otomotiv sektörü dünya ekonomisinin yaklaşık %5'ini oluşturmaktadır (Pişkin 2017). 2016 yılı içerisinde toplam binek otomobil üretim sayısı yaklaşık 72 milyon adet olup ülkemizde bu üretimin yaklaşık 1,5 milyon adet civarında olduğu kaydedilmiştir (Anonim 2016). Bahsi geçen bu yüksek üretim miktarları çevre ve hava kirliliği gibi bir takım sorunları da beraberinde getirmektedir. Artan hava kirliliği 1960'larda egzoz emisyon gazı standartlarının ortaya konmasını bir zorunluluk haline getirmiştir. 1970 ve 1980'lerde yakıt verimliliği daha yüksek motorlar üretilmesiyle HC, CO ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında araç başına yaklaşık %95 oranlarında iyileşmeler elde edilebilmiştir (Pulkrabek 1997).

Küresel ısınma ve iklim değişikliği kapsamında, sera gazı emisyon seviyelerini azaltmak için uluslararası düzeyde yoğun çalışmalar yapılmakta ve sıkı önlemler alınmaktadır. Dünya iklim konferansı ile başlayan bu süreç, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, Kyota Protokolü ve Kopenhag Uzlaşması çerçevesinde devam etmektedir. Avrupa Birliği 2020 yılı içerisinde sera gazı emisyon değerlerini 1990 yılı seviyelerine göre %20 oranında azaltmayı hedeflemektedirler (Anonim 2010). Avrupa'da başlıca ülkeler, çevreyi koruma politikaları başlığı altında yüksek miktarda emisyon açığa çıkaran başta dizel araçların şehirlere girişini yasaklamış ve üretimlerini durdurmak için çalışmalara başlamışlardır. Bu uygulamanın daha da genişletilerek sürdürüleceği düşünüldüğünde, alınan önlemlerin alternatif yakıt teknolojilerine geçişi teşvik ettiği görülmektedir.

Her ne kadar son yıllarda elektrikli ve hibrid otomobil sayısında artışlar görülse de 2015 yılı verilerine göre dünya genelinde toplam 947 milyon adet otomobilin yaklaşık %92'sini benzinli ve dizel araçlar oluşturmaktadır (Anonim, 2015). İçten yanmalı motorların egzoz emisyon değerlerinin iyileştirilmesine yönelik çeşitli alanlarda bir takım çalışmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmalar; motor ve yakıt teknolojilerinde yapılan geliştirmeler şeklinde iki ana başlık altında sınıflandırılabilirler. Buji ateşlemeli motorlarda; yakıt/hava karışımının kapalı çevrim kontrol algoritmaları ile kontrolü, elektronik olarak kontrol edilen ateşleme zamanlaması, yavaşlama durumunda yakıt kesme, egzoz gazı resirkülasyonu, rölanti devri kontrolü, yakıt deposunda veya yakıt sistemde bulunan yakıt buharının yanma odasına sevk edilmesi, yanma odası tasarımı, değişken supap zamanlaması ve supap bindirmesi, değişken sıkıştırma oranı, egzoz gazlarının katalitik dönüştürücü kullanılarak reaksiyona sokulması ve ikincil hava yönetimi gibi yöntemler ile egzoz emisyon değerlerinde önemli düzeyde iyileşmeler elde edilebilmektedir (Öztürk, 1999). Egzoz emisyonlarının azaltılmasına ve motor performansının iyileştirilmesine yönelik bir diğer çalışma ise silindirlere gönderilen hava/yakıt karışımındaki oksijen konsantrasyonunu artırmaktır.

Türkiye istatistik kurumunun açıklamalarına göre 2017 yılının Aralık ayı sonu itibariyle Türkiye’de trafiğe kayıtlı 12 milyon 35 bin 978 adet otomobilin %38,4’ü LPG+benzin, %35,4’ü dizel, %25,9’u benzin yakıtlıdır (Anonim 2018b). Yakıt türü bilinmeyen otomobillerin oranı %0,4’tür. LPG benzine kıyasla, daha yüksek ısıl değer, daha yüksek oktandır ve daha geniş hava fazlalık aralığında çalışabilmek gibi bazı üstün özelliklere sahiptir (Erkuş, 2011). Bu üstün özelliklerine rağmen LPG’nin gaz fazında kullanıldığı durumlarda, motor performans ve egzoz emisyon değerlerinin olumsuz etkilendiği tespit edilmiştir (Erkuş ve ark. 2015).

Motor ısınma periyodunda iken, normal çalışma periyoduna kıyasla daha fazla miktarda egzoz emisyonu açığa çıkar. Bunun nedeni ise ısınma periyodunda, motor bloğunun, egzoz manifoldunun soğuk olması ve katalitik konvertörün optimum çalışma sıcaklığına ulaşamamış olmasıdır (Poola 1995).

Yanma verimliliğini artırmak ve egzoz emisyonlarını azaltmak adına yapılan bu deneysel çalışmada silindir içerisine ilave oksijen sevk edilmiştir. Isınma periyodunda iken daha yüksek oranlarda egzoz gazı emisyonu açığa çıkmasından dolayı, deneyler bu fazda gerçekleştirilmiştir. Silindirler içerisine oksijence zenginleştirilmiş emme havası gönderilmiştir. Gaz kelebeği %50 açıklık konumunda iken oksijence zenginleştirilen egzoz emisyon değerlerinin “HC, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO” azaltılması amaçlanmıştır.

Ayrıca motor performans karakteristikleri olan efektif güç ( $P_e$ ), moment ( $M_d$ ) değerlerinde artış amaçlanmıştır. Bunun yanında efektif özgül yakıt tüketimi ( $b_e$ ) ve efektif verim ( $\eta$ ) incelenmiştir. Deneylede buji ateşlemeli, dört zamanlı, dört silindri, içten yanmalı, LPG yakıtlı motor kullanılmıştır. Egzoz emisyonları, emisyon ölçüm cihazından ölçülmüştür. Motor karakteristikleri olan moment ve efektif güç değeri dinamometre vasıtasıyla ölçülmüş ve bilgisayara eş zamanlı kaydedilmiştir.



## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yanma türleri tamamlanmış yanma ve tamamlanmamış yanma olarak sınıflandırılmıştır. Tam yanma reaksiyonu sonucu tüm yakıt tamamen yanmakta ve eksik yanma ürünleri oluşmamaktadır. Tam yanma ürünleri  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $SO_2$ ,  $O_2$  ve  $N_2$ 'dir. Tamamlanmamış yanma ürünleri olan C, CO,  $H_2$  vs. egzoz gazlarında eksik yanma ürünleri olarak görülür. HC, yanmama ürünleri arasındadır.  $NO_x$  ise istenmeyen (fazla) yanma ürünüdür. Eksik yanma ürünü dendiğinde, tam olarak oksitlenmemiş, oksijen ile bulunduğu tepkimeye girerek, ortaya belli bir miktar ısı açığa çıkaran ürün demektir (Sürmen ve ark. 2008).

Agarwal ve ark. (2006) ve Amin (2009) eksik yanma ürünü olan karbonmonoksidin oluşumunun, yanma odasında yakıtın tam olarak oksitlenememesinden ve yanmış gazların sıcaklığının düşük olmasından dolayı oluştuğunu, ayrıca türbülanslı bir yanmanın homojen karışım oluşumunda etkili olduğu, CO emisyon oranlarını etkileyen bir faktör olduğunu ifade etmişlerdir.

Zararlı emisyon gazlarının çevre kirliliğine yol açtığını ve dolayısıyla insan sağlığına vermiş olduğu zararları Amin (2009), şu şekilde açıklamıştır.  $NO_x$  emisyonunun insan sağlığı üzerinde toksik etkisi vardır. Genellikle, dizel yakıtlı motorlardan, benzin yakıtlı motorlara kıyasla daha fazla miktarda  $NO_x$  açığa çıkmaktadır. Azot oksitler, nitrojen ( $N_2$ ) ve oksijenin ( $O_2$ ) 1800 ila 2000 K üzerindeki sıcaklıklarda tepkimeye girmesi ile oluşmaktadır. Silindir içerisinde, hava/yakıt oranının artması ve yüksek yüklerde oluşan yüksek basınç sebebiyle silindir içi sıcaklığının artması ile karışımın daha geniş bir alanda yanması sonucunda  $NO_x$  miktarı artış gösterir. Soruşbay (1988)  $NO_x$  emisyonunun oluşumunu, silindir içi sıcaklığı ve oksijen miktarıyla ilişkili olduğunu, artan sıcaklık ve oksijen miktarının  $NO_x$  emisyonu artırdığını ifade etmiştir.

Motorlu taşıtlardan atmosfere, egzoz gazları bünyesinde bulunan bir diğer egzoz emisyon ürünü olan karbondioksitte salınmaktadır. Atmosferde karbondioksit ( $CO_2$ ) oranı ortalama %0,03 bir diğer ifade ile hacimsel olarak 300 ppm olarak bulunmaktadır. Karbondioksit emisyonları küresel ısınmaya sebep olmaktadır.



Yakıt verimliliğinin artırıldığı ve daha az yakıtı ihtiyaç duyulduğu durumlarda oksijence zenginleştirme işlemi ile karbondioksit emisyonları azaltılabilir (Baukal, 2010).

Egzozdan, atmosfere salınan emisyonları azaltmak için uygulanan çalışmalar arasında katalitik konvertör kullanımı bulunmaktadır. Pulkrabek (1997) katalitik konvertörün ilk çalıştırma sonrası birkaç dakika boyunca verimsiz çalıştığını, katalitik reaksiyonun başladığı sıcaklıkta dahi %50 verim alınabildiğini, bu katalitik reaksiyon başlama sıcaklığı aralığının yaklaşık 250 ila 300 °C olduğunu belirtmiştir. Otomobil yolculuklarının büyük oranının kısa mesafe sürdüğünü, bu sürede katalitik konvertörün çalışma sıcaklığına ulaşamadığını ifade etmiştir. Buna ilave olarak ilk çalıştırma esnasında genellikle içten yanmalı motorların zengin karışımda çalıştığını ve toplam açığa çıkan HC emisyonunun %70-90 oranının ısınma periyodu dahilinde olan ilk çalıştırma zamanında oluştuğunu belirtmiştir. Uyumaz ve ark. (2017) HC emisyonunun oluşumunu yakıtın yanmaya katılmaması ve yakıt sisteminde olan buharlaşmalardan kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Pulkrabek (2010) HC emisyonlarının zehirleyici özelliğe sahip olduğunu ve uzun yıllar içerisinde maruz kalındığında kanser yapıcı özelliğinin olduğundan bahsetmiştir.

Yanma odasında ilerleyen alev, soğuk silindir cidarlarına temas etmekte ve sönebilmektedir. Silindir cidarlarında oksidasyon reaksiyonları kötüleşmesinden dolayı yanma prosesi tamamlanamamakta ve HC emisyonları oluşmaktadır. HC emisyonları, hava fazlalık katsayısının artması ve yakıtın yeterli oksijen ile buluşması ile azalmaktadır. Hava fazlalık katsayısının daha da artması ile meydana gelen fakir karışımlarda alevin sönmesi gibi durumlar ile karşılaşmakta ve tekrar HC emisyonunda artış görülmektedir (Soruşbay 1988).

Motorlu taşıtlarda yanma sonu oluşan çeşitli emisyonları azaltmak için farklı yöntemler denenmiştir. Maxwell (1993) bu yöntemleri, yakıt tüketimini azaltmak, alternatif yakıt kullanmak ve giriş havasını oksijen ile zenginleştirmek olarak sıralamıştır.

İçten yanmalı motorlarda, oksijence zenginleştirme için birçok farklı teknik uygulanmıştır.

Bu teknikler arasında, Callaghan ve Nemser (1999) membran teknolojisini kullanarak atmosfer havasından oksijen elde etmişler ve yanma odasına ilave oksijen göndermişlerdir. Bir aşırı doldurucu kompresör vasıtasıyla atmosfer havasını membran modülüne göndermişlerdir. Oluşan yüksek ve alçak basınçtan yararlanarak hava içerisindeki, azot ve oksijeni ayırtmışlardır. Ayırtılan oksijeni yanma odasına göndermişlerdir.

Baukal (2010) oksijence zenginleştirme yöntemlerini, yanma odasına giden emme havasının zenginleştirilmesi, oksijenin bir üfleç vasıtasıyla alev bölgesine gönderilmesi, yakıtın yanma öncesi oksijen ile zenginleştirilmesi olmak üzere ifade etmiştir. Yakıtın düşük miktardaki oksijen ile ön karıştırılması tekniğinin hava/yakıt karışımı yapan birçok sisteme kolayca adapte edilebildiğini ve yanmaya önemli faydaları olan bir teknik olduğunu ifade etmiştir. İlave oksijen, alevi kısaltır ve şiddetlendirir. Fakat çok fazla miktardaki oksijen ise alevin şeklini kabul edilemeyecek bir şekilde kısaltır ve alev sıcaklığını yükseltmesi sebebiyle de ekipmanlara zarar verebilir. Yanma havasının taşındığı hat, güvenliği sağlamak ve oksijen seviyelerini kontrol edebilmek için gerekli güvenlik donanımları ile teçhiz edilmelidir (Baukal, 2010).

Baukal (2010), oksijenin bir üfleç vasıtası ile alev üzerine sevk edilmesi tekniğinin, yanma havasının oksijenle ön karıştırma tekniğine kıyasla daha avantajlı olduğunu belirtmiştir. Bu tekniğin NO<sub>x</sub> emisyonlarını, havayı ön karıştırmalı zenginleştirme tekniğine oranla daha fazla miktarda düşürdüğünü, oksijen üflecinin yerleştirildiği konuma göre alev boyunun artırılabilindiğini, alevden salınan ısının daha dengeli olduğunu ifade etmiştir. Isı transfer verimliliğinin yüksek olması nedeniyle yanma bloğunun ve motor donanımlarının aşırı ısınma riskini azalttığını belirtmiştir. Bu yöntemin dezavantajını ise oksijen üfleci için küçük ilave bir delik açılması ve kurulum maliyetlerinin artması olarak açıklamıştır (Baukal, 2010).

Oksijen ile zenginleştirmenin üçüncü metodu yakıtın oksijen ile zenginleştirilmesidir. Bu metotta yüksek saflıktaki oksijen, yakıtı yakmak için kullanılmıştır. Yakıtın direkt oksijen ile tepkimeye girmesi, yanma prosesinin geliştirilmesinde büyük potansiyellere sahiptir. Ateşlemeyi sağlamak için yanma odası sıcaklığı yakıtın kendiliğinden tutuşma sıcaklığı seviyesinde olması gerekmektedir.

Değişen geometriye de bağlı olmak kaydıyla, yakıtın direkt oksijence zenginleştirilmesi ile görünmez bir alev oluşmaktadır. Bu tekniğin avantajı çok düşük miktarda NO<sub>x</sub> oluşturmasıdır, çünkü alev içerisindeki kızgın noktalar en aza indirgenmiştir (Baukal, 2010). Ayrıca, oksijence zenginleştirme prosesinin, yanma parametrelerinden olan alev sıcaklığını önemli ölçüde yükselttiğini belirtmiştir. Bunu da, atmosfer havası içerisinde bulunan azotun, karışımda seyreltici rol üstlendiğinden dolayı alev sıcaklığını düşürdüğünü, atmosfer havasında bulunan oksijen konsantrasyonu artırıldığında, alev sıcaklığının artması olarak tanımlamıştır. Propanın (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), atmosfer havası ile tepkimesinde adyabatik alev sıcaklığı ile 1987,85 °C iken oksijence zenginleştirilmiş hava ile tepkimesinde adyabatik alev sıcaklığı 2821,85 °C'dir. Bütanın (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), atmosfer havası ile tepkimesinde adyabatik alev sıcaklığı 1972,85 °C iken, oksijence zenginleştirilmiş yanma havası ile 2826,85 °C olduğu görülmüştür (Baukal, 2010).

Ayrıca, Baukal (2010) Atmosfer havası ile oksijence zenginleştirilmiş havayı alev hızı yönüyle karşılaştırmış, oksijence zenginleşmiş durumda alev hızının yükseldiğini ifade etmiştir. Yakıt memesinden çıkan yakıt hızının en azından alev hızına eşit olması gerektiğini, aksi takdirde alev tepmesi görülebileceğini, bu durumun alev sönmesine ya da patlamaya neden olabileceğini açıklamıştır.

Lewis ve Von Elbe (1987) Azot tarafından ateşleme enerjisinin absorbe edildiğini, artan oksijen oranı ile birlikte minimum ateşleme enerjisinin (mJ) düşüş sergilediğini yapmış oldukları çalışmada ifade etmişlerdir.

Oksijence zenginleştirmenin ateşleme sıcaklıkları üzerine etkileri Baukal (2010) tarafından incelenmiş ve oksijenin hacimsel olarak %20 oranından %35 oranına artırılmasıyla, ateşleme sıcaklığının 706,85 °C'den 686,85 °C'ye düşüş sergilediği açıklanmıştır.

Oksijence zenginleştirmenin sağladığı bir başka fayda ise alev kararlılığının artırılmasıdır. Oksijence zenginleştirme işlemi alev şeklini kontrol etmek için de kullanılmaktadır. Donanımlar iyileştirilerek, istenilen alev şeklinin oluşturulmasına olanak sağlanabilmektedir.

Yakıtın, ısı enerjisinden mekanik enerjiye dönüşümünün verimliliğine bakıldığında oksijence zenginleştirme işleminin bu verimliliği artırdığı görülmektedir. Bunun nedeni olarak alev içerisinde saçılan karbondioksit ve su konsantrasyonlarının yüksek olmasıdır (Baukal, 2010).

İçten yanmalı motorların ısınma ve normal periyodunda, yanma havasını oksijen ile zenginleştirme üzerine yapılan çalışmalar incelenmiştir.

Ng ve ark. (1993) 3.1 litre benzinli bir motorda emme havasını hacimsel olarak %25 ve %28 oranlarında oksijen ile zenginleştirmişlerdir. Oksijence zenginleştirme ile elde edilen sonuçları, oksijence zenginleştirmesiz atmosfer havasıyla yapılan deneylere ait sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Deneyler motor çalışma periyotları olan soğuk, rejim sıcaklığı ve sıcak fazda gerçekleştirilmiştir. Her üç faz için elde edilen sonuçlar incelendiğinde CO ve HC emisyonlarının önemli ölçüde azalmış olduğu tespit edilmiştir. İkinci dakikadan üçüncü dakikaya kadar geçen süre içerisinde, oksijence zenginleştirme ile meydana gelen karbonmonoksit emisyonu %25 oranında azaltılmıştır. Oksijence zenginleştirme ile diğer çalışma evrelerindedeki açığa çıkan karbondioksit emisyonunda azalmalar olduğu görülmüştür. Oksijence zenginleştirme tekniğinin katalitik konvertörün ısınma süresini azalttığı için faydalı bir teknik olduğunu belirtmişlerdir. Alev hızının ve yanma ilerleyişinin hızlıca artması sonucu, silindir içi sıcaklığının arttığını ve bu nedenle açığa çıkan sıcak gazların NO<sub>x</sub> emisyonunu artırdığını ve bu durumda beklenen bir sonuç olduğunu belirtmişlerdir. Emme havası hacimsel olarak %30 oranında oksijence zenginleştirildiğinde motorun sarsıntısız bir şekilde çalıştığını, fakat hacimsel olarak %30 oksijen oranı aşıldığında motorda vuruntu başladığını belirtmişlerdir. Hacimsel olarak %28 oksijen oranı civarında ise motorun mükemmel bir çalışma performansı gösterdiğini belirtmişlerdir.

Catapano ve ark. (2016) silindir hacmi 250 cm<sup>3</sup> olan benzinli bir motorda, emme havasını %5 ve %10 oranlarında oksijen ile zenginleştirmişlerdir. Deneyler 2000 d/d, 3000 d/d, 4000 d/d ve 5000 d/d'da yapılmıştır. Motor çalışması istikrarlı hale gelene kadar ilk 120 saniye süresince beklenmiştir. Oksijence zenginleştirmenin motor performansına olan etkilerinden, silindir içi basınç, ısı salınım hızı, ortalama etkin basınç, motor gücü, yakıt tüketimi hesaplanmıştır.

Değişen devirlerde, %0 oksijen ilavesinden %10 oksijen ilavesi durumunda ortalama olarak motor efektif gücünde %10-12 civarında artış görülmüştür. Ortalama efektif basınç %8-12 civarında artmıştır. Motor stokiyometrik oranda çalışmış ve sarfedilen yakıt miktarının arttığı görülmüştür. Bu nedenle motor performansının iyileşmesinin daha fazla miktarda tüketilen yakıttan kaynaklanmış olduğu belirtilmektedir.

Poola ve ark. (1995) ısınma periyodunda motor çalıştığı an itibari ile ilk 20 saniye içerisinde motorun zengin karışım ile çalışmasından dolayı yanmamış veya kısmen yanmış hidrokarbonların ve yüksek oranda karbonmonoksidin egzozdan atmosfere verildiğini belirtmişlerdir. Benzinli bir motor ısınma periyodunda çalışırken emme havasını oksijence zenginleştirmişlerdir. Oksijence zenginleştirmenin, egzoz gazı emisyon değerleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Emme havasını, hacimsel olarak yaklaşık %23 ve %25 oranlarına denk gelecek şekilde oksijen ile zenginleştirmişlerdir. %23 ve %25 oksijen oranlarında oksijence zenginleştirilmiş yanma havası, oksijence zenginleştirilmemiş atmosfer havası ile karşılaştırıldığında, CO emisyonları sırasıyla %46 ve %50 oranlarında azaltılmıştır. HC emisyonları sırasıyla %33 ve %43 oranlarında azaltılmıştır. Fakat NO<sub>x</sub> emisyonu sırasıyla %56 ve %79 oranlarında artış göstermiştir. Isınma periyodunda motor ilk çalıştırılmasından itibaren ilk 127 saniye içerisinde HC ve CO emisyonları bir hayli düşmüş, ilk 25 saniyede NO<sub>x</sub> emisyonlarında artış olmamıştır. Hacimsel olarak %25 oranındaki oksijence zenginleştirme işleminde emisyon değerleri açısından olumlu sonuçlar almışlardır.

Maxwell ve ark. (1993) tek silindirli, dört zamanlı, buji ateşlemeli motorda yakıt olarak hem doğalgaz hem de benzin kullanmışlardır. Emme havasını, atmosferde hacimsel olarak bulunan %21 oksijen oranını %25 oranına kadar oksijen ile zenginleştirerek silindire göndermişlerdir. Doğalgaz ve benzin yakıtları ile üç farklı oksijen oranlarında deneyler gerçekleştirmişlerdir. Motor efektif gücünde, efektif verimde önemli artışlar elde etmişlerdir. Benzinli çalışma koşullarında, %23 oksijen oranında motor çalışma hızı 6200 ila 6700 d/d iken efektif motor gücü sırasıyla %5 ve %8,4, %25 oksijen oranı için %10 ve %17 oranlarında artış göstermiştir. Doğalgaz ile çalışma koşullarında %23 oksijen oranında motor hızı, 5700 ve 6350 d/d iken motor gücü %3 ve %8, %25 oksijen oranı için %6,5 ve %16 oranlarında artmıştır.

Efektif motor gücündeki bu artış, oksijen oranının artması ile daha fazla miktarda yakıtın tepkimeye girmesine olanak sağlamasına dayandırılmaktadır. Hacimsel olarak %25 oranında oksijen ile zenginleştirilmiş yanma havasının doğalgaz yakıtı ile tepkimesi sonucunda ölçülen efektif motor gücü ile atmosfer havası ve benzinin reaksiyonu sonucu ölçülen efektif motor gücünün eşit olduğu görülmüştür. Bu da oksijenin, doğalgaz yakıtından elde edilen verimi artırdığının göstergesidir. Motor, sırasıyla doğalgaz ve benzin ile çalıştırıldığında her iki durumda efektif özgül yakıt tüketimi düşmektedir. Yüksek egzoz sıcaklık değerleri ölçülmüştür. CO ve HC emisyonları azaltılmıştır. Ayrıca taşıtlarda yanma havasını oksijence zenginleştirmek için oksijen kaynağı olarak membran gaz ayırıcı sisteminin fizibilitesini araştırmışlar ve uygulanabilir olduğunu belirtmişlerdir.

Farklı yakıtlar ile değişen motor çalışma hızlarında, yanma havasının oksijence zenginleştirilmesinin egzoz emisyonları üzerindeki etkileri Maxwell ve ark. (1993) tarafından incelenmiştir. Benzin/hava karışımında 6200-6700 d/d aralığında, hacimsel %23 oksijen oranı için CO emisyonunda yaklaşık %25-27 oranlarında düşüş elde etmişlerdir. Hacimsel olarak %25 oksijen oranı için ise yaklaşık %30-32 civarı düşüş sağlanmıştır. Doğalgaz/hava karışımında 5700-6350 d/d çalışma aralığında hacimsel %23 oksijen oranı için CO emisyonunda %16-21,5, %25 oksijen oranı için %22-28 civarında düşüş elde edilmiştir. 5700-6350 d/d çalışma aralığında hacimsel olarak %23 oksijen oranındaki yanma havasının benzin ile tepkimesi sonrası CO emisyonlarında %29-30, %25 oksijen oranı için ise CO emisyonunda %31-39 oranlarında azalış hesaplanmıştır. Efektif özgül yakıt tüketimi incelendiğinde, artan oksijen oranları ile her iki yakıttan elde edilen veriminde arttığı tespit edilmiştir.

Li ve diğ. (2006) buji ateşlemeli, 125 cm<sup>3</sup> hacminde, dört zamanlı, LPG yakıtlı hava soğutmalı bir motorun ısınma periyodu içerisinde ilk ateşleme çevriminde, emme havasını oksijen ile zenginleştirerek açığa çıkan emisyon değerlerini yapmış oldukları deneysel çalışma ile incelemişlerdir. Oksijence zenginleştirme sonucunda yanma silindiri basıncının arttığını kaydetmişlerdir. Atmosferik hava ve oksijence zenginleştirilmiş hava ile yapılan deneylerde, hava fazlalık katsayılarını Denklem 2.1 ve Denklem 2.2'ye göre belirlemişlerdir.

$$\lambda_{atm. hava} = [hava/yakit]/[(hava/yakit)_{teorik}] \quad 2.1$$

$$\lambda_{OEA} = [O_2 \text{ ile zeng. hava/yakit}]/[(O_2 \text{ ile zeng. hava/yakit})_{teorik}] \quad 2.2$$

Değişen hava fazlalık katsayılarına göre silindir basıncı, motor hızı, HC, CO ve NO<sub>x</sub> verileri ölçülmüştür. Tüm durumlar için silindir basınçları incelendiğinde, oksijence zenginleştirilmiş emme havası ile yakıtın yanması durumundaki silindir içi basıncı, atmosfer havası ile yakıtın yanması durumundaki silindir içi basıncından yüksek değerlerde olduğunu belirtmişlerdir.  $\lambda = 0,4-0,876$  ve  $\lambda_{OEA} = 0,476-1,043$  değerleri aralığında iken HC emisyonları benzer özellikler göstermişlerdir.  $\lambda = 0,876$  ve  $\lambda_{OEA} = 1,043$  iken, HC emisyonu %28 oranında düşürülmüştür. Tüm hava fazlalık katsayı değerleri için atmosfer havası ile oksijence zenginleştirilmiş yanma havası kıyaslandığında, oksijence zenginleştirilmiş yanma havasının tepkime sonucu daha fazla NO<sub>x</sub> emisyonu açığa çıkmıştır.  $\lambda = 0,68$  ve  $\lambda_{OEA} = 0,76$  oranlarında iken maksimum seviyeye ulaşmış ardından düşüş sergilemiştir. Açığa çıkan CO emisyonlarının, artan oksijen miktarı ve  $\lambda = 0,7$  ve  $\lambda_{OEA} = 0,6$ 'dan itibaren artan hava fazlalık katsayısı ile birlikte aynı yakıt miktarı için oldukça düşük düzeyde olduğunu belirtmişlerdir.

Bielaczyc ve Merkisz (1998) benzinli motorlarda ilk çalıştırma ve ısınma periyodunda yüksek miktarlarda oluşan CO ve HC emisyonlarının çevre kirliliği yönüyle hayati derecede sorun teşkil ettiğini vurgulamışlardır. Üç farklı motor yağ sıcaklığında +22°C, -7°C, 15°C, toplamda 195 saniye sürecek testler gerçekleştirmişlerdir. Yapılan her test 40, 66 ve 89 saniye olarak üç fazda ve dört farklı araç tipi için incelenmiştir. CO, NO<sub>x</sub>, HC emisyonlarının ilk 40 saniye içerisinde yüksek miktarlarda oluştuğunu ölçmüşlerdir. Motor ısınma periyodunda iken yakıt tüketiminin artması ile birlikte HC ve CO emisyonlarında arttığını ifade etmişlerdir.

Said ve Gupta (2015) oksijence zenginleştirilmiş havayı, yanma öncesi yakıt ile önceden karıştırmanın CO, NO emisyonlarına olan etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Yakıt olarak metan kullanmışlardır. Hava içerisindeki oksijen hacimsel %21, %25 ve %30 oranlarındadır.

Ön karışımli durumda açığa çıkan CO emisyonlarının, %21'den %30'a yükselen oksijen oranlarıyla birlikte düşmekte olduğu tespit edilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde ön karışım olmadığı durumdaki yanma sonucu oluşan emisyonlar, ön karışım olduğu durumdaki yanma sonucu çıkan emisyonlardan yüksektir. Bu durumun ise yakıt ile oksijenin yeteri kadar karışmadığından dolayı meydana geldiğini belirtmişlerdir. Özetle NO emisyonlarının oksijen oranının artması ile birlikte arttığı tespit edilmiştir. Yanma odası sıcaklıkları ölçülmüş ve ön karışım olmadan ve ön karışım olan durumlar dahil olmak üzere artan oksijen miktarıyla yanma odası sıcaklıklarında doğru orantılı şekilde yükselmiştir.

Wu ve Huang (2007) 50 cc hacmindeki dört zamanlı, tek silindirli, buji ateşlemeli, hava soğutmalı benzinli motorun tam gaz çalışma koşullarında, çalışma hızı 4000 d/d ve 6000 d/d'da iken motor performansını artırmak amaçlı, emme havasını hacimsel olarak %22, %23, %24 ve %25 oranlarında oksijen ile zenginleştirmişlerdir. Yapılan deneylerde motor momenti, yanma hızı, HC, CO ve NO<sub>x</sub> emisyon değerlerini incelemişlerdir. Yanma hızı, %21 oksijen oranında 36,4 cm/s'den, %25 oksijen oranında 61,2 cm/s'ye kadar artmıştır. HC ve CO emisyonlarının artan oksijen oranı ile birlikte azaldığını fakat yanma odası sıcaklığının yükselmesinden dolayı NO<sub>x</sub> emisyonunun arttığını deneysel olarak kanıtlamışlardır. Oksijen oranı %21'den %25'e yükseldiğinde, efektif özgül yakıt tüketimi azalmış, ortalama moment değeri artmıştır. Efektif özgül yakıt tüketiminin azalmasının nedenlerini, ilave oksijen nedeniyle yanma hızının artması ve yüksek alev sıcaklığının oluşması olarak sıralamışlardır.

Egzoz emisyonlarından olan hidrokarbon ve karbonmonoksidin, yanmanın, tamamlanmış yanmaya yaklaşmasından dolayı azaldığını ifade etmişlerdir. Fakat yüksek yanma sıcaklığı sebebiyle Ölçülen NO<sub>x</sub> miktarı, 6000 d/d motor çalışma hızında, %21 oksijen oranı için yaklaşık olarak 600 ppm iken, %25 oksijen oranında 1300 ppm'e yükselmiştir. 4000 d/d'da %21 oksijen oranında yaklaşık 220 ppm iken, %25 oksijen oranında 600 ppm'e yaklaşmıştır. CO emisyonu incelendiğinde, 4000 d/d için %21 oksijen oranından %25 oksijen oranına artışta %2'lik bir azalma olduğu hesaplanmıştır. 6000 d/d için bu azalış değeri yaklaşık olarak %3 tür. HC emisyonlarında her iki devirde de düşüş olduğu tespit edilmiştir. Yaklaşık olarak %21 oksijen oranından %25 oksijen oranına kadar, %44 oranında düşüş meydana gelmiştir.

Ayrıca 50 cc hacminde tek silindirli motorun moment değerleri incelendiğinde, artan oksijen miktarı, moment değeri üzerinde olumlu etki oluşturmuştur.



Callaghan ve Nemser (1999) membran teknolojisi ile yanma havasını oksijen ile zenginleştirmişler ve aracın ilk çalıştırma periyodundaki emisyon değerlerini ilk 30 saniye boyunca kaydetmişlerdir. Atmosferik hava ve oksijence zenginleştirilmiş havanın emisyonlara olan etkilerini incelemişler ve karşılaştırma yapmışlardır. Hacimsel olarak %25 oksijen ile zenginleştirilmiş hava ve oksijence zenginleştirilmemiş hava ile yanma prosesi sonucu, ilk 5 saniye sonucunda HC emisyonu atmosferik hava için 2000 ppm, %25 oranında oksijen ile zenginleştirilmiş hava için 1500 ppm olarak ölçülmüştür. Ardından 15. saniyede ortalama olarak 200 ppm değerine kadar düşülmüştür ve 30. saniyeye kadar bu seviyede kalınmıştır. NO<sub>x</sub> emisyonlarında, oksijence %25 hacimsel olarak zenginleştirilmiş ve oksijence zenginleştirilmemiş hava ile yapılan deneylerde ilk 5 saniyede eşit miktarda artış gerçekleştirilmiştir. 15. saniyede %25 oksijen oranında 400 ppm, %21 oksijen oranında 150 ppm NO<sub>x</sub> ölçülmüştür. Aradaki bu fark 30. saniyeye kadar korunmuştur. CO emisyonlarında farklı oranda oksijen içeren her iki yanma havası için ilk 5 saniye aynı oranda artmış, ardından oksijence zenginleştirilmiş hava sayesinde 15. saniyede %0,4 oranında CO açığa çıkarken, oksijence zenginleştirilmemiş havada bu değer %1,5 olarak ölçülmüştür. 30. saniye sonucunda her iki hava için %1 CO emisyon değerinde eşitlenmiştir. Her iki durumda CO<sub>2</sub> üretimini yaklaşık olarak eşit miktarda artırmıştır.

Nagarağa ve ark. (2015) tek silindirli, dört zamanlı 0,338 litre hacminde benzinli bir motorda oksijence zenginleştirmenin etkilerini incelemek için teorik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Motor tam yükte iken, havayı kütleli olarak %4, %8 ve %12 oranlarında oksijen ile zenginleştirmişlerdir. Dört farklı motor devri için (2500, 3000, 3500 ve 4000 d/d) emisyon değerlerini incelemişlerdir. Deneysel ve teorik yapılan çalışma sonuçları birbirleri ile benzer değerlerde olduğu belirtilmiştir. Yakıtta, tam yanmaya yaklaşılmasının sonucu olarak CO ve HC emisyonları önemli derecede azalmıştır. NO<sub>x</sub> emisyonunun hava fazlalık katsayısı, ateşleme zamanı, maksimum sıcaklık ve yakıt içerisindeki oksijen konsantrasyonu tarafından etkilendiğini belirtmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonunun sıcaklık ile arttığını bunun sebebinin de artan oksijen konsantrasyonu olduğunu belirtmişlerdir.

Kütleli olarak %12 oksijen oranında oksijence zenginleştirmenin mümkün olabileceği, yüksek oksijen konsantrasyonlarında silindir içi sıcaklığının artacağını belirtilmiştir.

Zhou ve ark. (2013) tek silindirli buji ateşlemeli bir motor farklı efektif basınç “400, 600, 800 ve 1000 kPa” değerlerinde iken emme havasını hacimsel olarak %15’den %27’ye kadar oksijen ile zenginleştirmişlerdir. Hava fazlalık katsayısı 0,45 ila 1 aralığındadır. Oksijen konsantrasyonunun yanma karakteristiklerine ve emisyon değerlerine olan etkilerini incelemek için motor 1400 d/d hızında çalıştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, hava içerisindeki oksijen yüzdesi artırıldığında ve hava fazlalık katsayısı azaltıldığında düşük yakıt tüketim değerlerine ulaşılmaktadır. HC emisyonları tüm oksijen oranlarında düşüş göstermiş, en düşük değer %27 O<sub>2</sub> oranında tespit edilmiştir. HC emisyonları hava fazlalık katsayısı 0,9 ila 1 değerleri arasında iken artmıştır, fakir karışım başlangıcı olan 0,9 değerinde en düşük değere ulaşmıştır. Artan gaz sıcaklıkları nedeniyle NO<sub>x</sub> emisyonunun artmış olduğu ifade edilmiştir.

Han ve Chu (2011) benzinli bir motor soğuk çalışma periyodunda iken emme havasını oksijen ile zenginleştirmişlerdir ve yanmaya olan etkilerini incelemiştir. Başlangıçtan itibaren geçen 60 saniye içerisinde atmosfer havası ile %24 oranında oksijen içeren emme havasını kıyaslamışlardır. Isı salınımı, HC, CO, NO<sub>x</sub> ve egzoz sıcaklığı parametreleri ölçülmüştür. HC ve CO emisyonlarında ilk 5 saniyede %21 oksijen oranı ile %24 oksijen oranları arasında net bir fark görülmemiştir. Etkiler 10. saniye sonrasında görülmeye başlanmış, %24 oksijen oranındaki durum ile %21 oksijen oranındaki durum karşılaştırıldığında, HC yaklaşık olarak %30 ve CO yaklaşık olarak %80 oranında düşüş sergilemiştir. Egzoz sıcaklığı ilk 20 saniye içerisinde oksijence zenginleştirilmiş durumda önemli miktarda artış göstermiştir. Yüksek egzoz sıcaklığının katalitik konvertörü kısa sürede çalışma sıcaklığına ulaştığını ve zararlı gazları azalttığını bildirmişlerdir.

Kajitani ve ark. (1992) 433 cc hacminde benzinli bir motorda, emme havasını %22, %23 oranlarında oksijence zenginleştirmişlerdir. Oksijen miktarını ve ateşleme zamanını değiştirerek deneyler yapmışlardır. Yüksek sıcaklık nedeniyle reaksiyon bölgesinden termal radyasyon yayılımını artırdığı tespit edilmiştir. Motor çalışma devri 1500 d/d’da sabit tutulmuştur. Oksijen ilavesinin alev yayılımını etkileyen bir faktör olduğunu tespit etmişlerdir. Beklendiği gibi ateşleme zamanının optimum olması ve oksijen içeriğinin artması ile silindir kapak sıcaklığının artmış olduğu tespit edilmiştir.

Sabitlenmiş avans ayarı ve artırılan oksijen miktarı ile yapılan deneyler incelendiğinde, oksijence zenginleştirme, efektif basınç ve fren ısı verimini artırmıştır. Bu artışın beklenmekte olduğunu, hava içerisindeki artan oksijen miktarı ve yakıtın stokiometrik oranını korumak için ilave yakıt gerektiğini belirtmişlerdir. Artan oksijen oranı egzoz gazı sıcaklıklarını artırmıştır. HC ve CO emisyonlarında ciddi oranda düşüşler tespit edilmiştir.

Li ve Zhang (2009) tek silindirli, karbüratörlü bir motorda farklı oksijen oranlarında deneyler yapmışlardır. Emme havasındaki oksijen oranı %21'den %24'e yükseltildiğinde maksimum silindir basınç değerine erken ulaşıldığı ve bu değer artmakta olduğu belirtilmiştir. Motor performans verilerini değerlendirmek için öncelikle normal çalışma evresinde deneyler gerçekleştirmişler, motor moment ve maksimum güç değerlerini elde etmişlerdir. Motor momenti için motor 1000 d/d 'dan 2500 d/d aralığına kadar olan devirlerde çalıştırılmış, emme havasını sırasıyla %24 ve %30 oranında oksijence zenginleştirmişlerdir. Motor 1500 d/d'da çalıştığında, oksijen konsantrasyonu %21'den %30'a yükseltildiğinde moment artışı %56,7 olarak ölçülmüştür. Tüm motor çalışma hızları için, %30 oksijen oranında ölçülen motor moment değerlerinin %24 oksijen oranında ölçülen motor moment değerlerinden fazla olduğunu, aynı durumun %24 ila %21 oksijen oranları içinde geçerli olduğunu belirtmişlerdir.

Li ve ark. (2008) ilave oksijeni emme manifoldu aracılığıyla silindirlere göndermişlerdir. %24 oksijen oranında yanma sıcaklığı artmış, maksimum sıcaklık ve basınca hızlı bir şekilde ulaşılmıştır. Silindir basıncı ortalama %15 artış göstermiştir. Oksijen konsantrasyonu %21'de, krank açısı  $117^\circ$  iken maksimum silindir basıncı 21,239 bar olarak ölçülmüştür. Oksijen konsantrasyonu %24, krank açısı  $63^\circ$  iken silindir basıncı 24,493 bar olarak ölçülmüştür. Silindir basıncındaki bu fark büyük olmasada maksimum basınç değerine erken ulaşılması oksijence zenginleştirmenin olumlu etkisini göstermektedir. Bunun nedeninin oksijen ilavesi ile yakıtın tam olarak yanması olduğunu belirtmişlerdir.

Li ve ark. (2011) buji ateşlemeli, 4,8 kW motorda 2500 d/d çalışma hızında oksijence zenginleştirme işlemi yapmışlardır.

Oksijen konsantrasyonu %23'ten %25'e yükseltildiğinde, alev sıcaklığı 100 K artmıştır, oksijen konsantrasyonu %25'ten %27'ye yükseltildiğinde alev sıcaklığı 30 K artmıştır. Yüksek miktarda oksijenin, alev sıcaklığını aynı oranda artırmadığını, oksijen konsantrasyonunun %30'dan fazla olmaması gerektiğini belirtmişlerdir.

Li (2010) buji ateşlemeli bir motorda oksijence zenginleştirme üzerine yapılan teorik analizleri doğrulamak amacıyla deneysel çalışmalar yapmışlardır. Soğuk çalışma periyodunda, stokiyometrik oranı baz alarak emme havasını %23, %25 ve %27 oranlarında oksijence zenginleştirmişlerdir. Soğuk çalıştırma sonrasındaki 60 saniye içerisinde HC emisyonlarındaki değişiklikleri emisyon analizör cihazı ile ölçmüştür. Oksijen oranı artışı ile HC emisyonu düşüş eğilimi doğru orantıdadır. %23 oksijen oranında HC düşüşü büyük orandadır, %27 oksijen oranında HC emisyon düşüşü azalmıştır. Bunun nedenini soğuk çalıştırmada, oksijen oranının artması ile birlikte yakıtın tam olarak yanmasına yaklaşılması, silindir basıncının hızlı bir şekilde yükselmesi, sıcaklığın hızlıca artması olarak tanımlamıştır. CO emisyonlarında en fazla düşüş ise %93,6 oranında görülmüştür. Yakıtın tepkimeye girme hızı ve kütleli yanma oranı artmış, ısı salınımı yükselmiştir. Bu nedenle CO emisyonu artmıştır. NO emisyonlarının ise artan oksijen oranı ile birlikte arttığını belirtmiştir.

Caton (2005) benzinli bir motorda termodinamik çevrimi oksijence zenginleştirme için simüle etmiştir ve motor performans parametrelerini incelemiştir. Hava fazlalık katsayı değerinin 1 olduğu deneylerde, tam gaz konumunda maksimum motor moment değerine ulaşabilmek için yanma havasını farklı oranlarda oksijence zenginleştirmiştir. Oksijence zenginleştirmesiz yanma durumunda bir motordan ölçülen moment değerinin, oksijence zenginleştirilmiş ve motor hacminin daha küçük olduğu bir motordan ölçülen moment değeri ile eşit olabileceğini belirtmiştir. Atmosferik hava ile kıyas yapıldığında, %32 oksijen oranı için motor silindir hacminin %73 oranında küçülebileceğini vurgulamıştır. Egzoz gazı sıcaklığının ve silindirlerden transfer edilen ısının artması nedeniyle termal verimliliğin düştüğünü, oksijen oranı hacimsel olarak %21'den %32 oranına çıkarıldığında, termal verimliliğin %33,4'ten %30,1'e düştüğünü gözlemlemiştir. Yüksek oksijen konsantrasyonlarında özgül güç ve ortalama efektif basıncın arttığını, %21 oksijen oranından %32 oksijen oranına çıkıldığında, spesifik gücün 19,2 kW/dm<sup>3</sup>'ten 26,3 kW/dm<sup>3</sup>'e yükseldiğini kaydetmiştir.

Amirshकारी (2012) dizel motorlarda emme havasını oksijence %21'den %27 oranlarına kadar zenginleştirmiştir. Yapmış olduğu çalışmada, oksijence zenginleştirmenin, efektif motor gücünü artırdığını ve yakıt tüketimini düşürdüğünü tespit etmiştir. Isıl verimliliğin artan oksijen oranları ile birlikte arttığını ifade etmiştir. Fakat %27 oksijen ve %50 yük oranı için bir artış tespit edilememiştir. Buda oksijence zenginleştirmeden maksimum verimin alınabileceği pik oksijen oranını göstermektedir. Oksijence zenginleştirmenin duman yoğunluğunu azalttığını ifade etmiştir. Duman yoğunluğu, %50 yük için, %21 oksijen oranında yaklaşık %80 iken, %27 oksijen oranında yaklaşık %50'dir. NO<sub>x</sub> emisyonu ise artan oksijen oranıyla birlikte artmıştır. %100 yük altında, %21 oksijen oranında 1390 ppm NO<sub>x</sub> açığa çıkarken, %25 oksijen seviyesinde 4550 ppm NO<sub>x</sub> açığa çıkmaktadır. CO konsantrasyonun, aynı yük altında %23, %25 ve %27 oksijen oranları için sırasıyla %31, %39 ve %51 oranlarında azalış gösterdiğini ifade etmiştir.

Baskar ve Senthilkumar (2016) direkt enjeksiyonlu dizel bir motorda emme havasını %21 oksijen oranından %27 oksijen oranına kadar oksijence zenginleştirmişlerdir. HC, CO ve duman yoğunluğu seviyesini sırasıyla maksimum %40, %55 ve %60 oranlarında düşürmüşlerdir. Isıl verimlilik %4'ten %8 oranlarına çıkarılmış, özgül yakıt tüketiminde düşüş sağlanmıştır. Artan oksijen miktarı ile NO<sub>x</sub> emisyonlarında arttığını ve oksijence zenginleştirmenin negatif yanı olarak NO<sub>x</sub> artışı olduğunu belirtmişlerdir. Fakat sonuç olarak yanma ve ısı verimliliğinin yüksek ölçüde artırıldığını, bunlarında yüksek yanma oranları, alev sıcaklığı ve artan yanma hızı nedeniyle olduğunu belirtmişlerdir. Artan oksijen oranı ile birlikte hava/yakıt karışımının fakir karışım haline geldiğini böylece özgül yakıt tüketimininde azaldığını kaydetmişlerdir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma, buji ateşlemeli, dört silindirli, dört zamanlı bir motorun %50 gaz keleşbeği açıklık konumunda ve ısınma periyodunda iken emme havasının oksijence zenginleştirilmesi sonucu motor performans ve egzoz gazı emisyonlarına olan etkilerinin araştırılması üzerine yapılan deneysel çalışmaları kapsamaktadır. Bu bölümde deneylerde kullanılan düzenekler, cihazlar, yöntem ve matematiksel hesaplamalar açıklanmaktadır

#### 3.1 Test Düzenegi Genel Bileşenleri

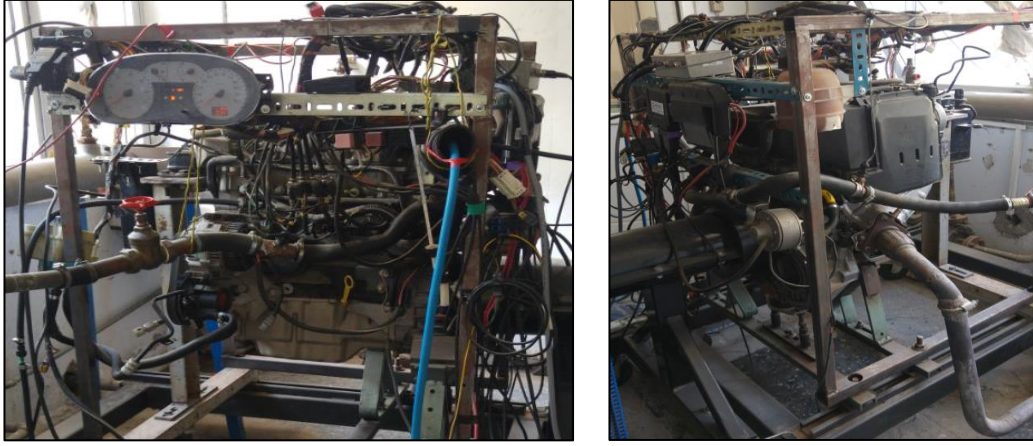
Bu bölümde deney süresince kullanılan motor, motor test dinamometresi, egzoz emisyon cihazı ve teknik özellikleri, oksijen ve yakıt tüketimi ölçümü, motor soğutma sistemi düzenekleri hakkında bilgiler verilmektedir.

##### 3.1.1 Deney motoru

Yapılan deneylerde, dört silindirli, dört zamanlı buji ateşlemeli içten yanmalı Renault Clio 2 K4J-712 kodlu motor kullanılmıştır. Motorda yakıt olarak benzin ve LPG yakıtları kullanılabilir. Deneyler süresince LPG yakıtı kullanılmıştır. Motor teknik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmektedir.

Çizelge 3.1 Motor teknik özellikleri

Motor Özellikleri	Değer	Birim
Motor kodu	K4J-712	
Silindir ve Valf sayısı	4 Silindir, 16 Valf	
Silindir çapı ve stroğu	79,5 ve 70	mm
Toplam strok hacmi	1390	cc
Maks. motor gücü	6000 d/d’da 72	kW
Maks. motor momenti	3750 d/d’da 127	Nm
Süpürme hacmi	1390	cc
Rölanti devri	750 ± 50	d/d
Yakıt sistemi	Çok noktadan püskürtmeli	
Ateşleme sırası	1 – 3 – 4 – 2	
Ateşleme bobin direnci, birincil	0,5 ± 0,02	ohms
Ateşleme bobin direnci, ikincil	7500 ± 1100	ohms
Ateşleme bujileri	Bosch RFC 50LZ2E	
Ateşleme buji aralığı	0,9	mm
Enjeksiyon Basıncı	3 ± 0,2	bar

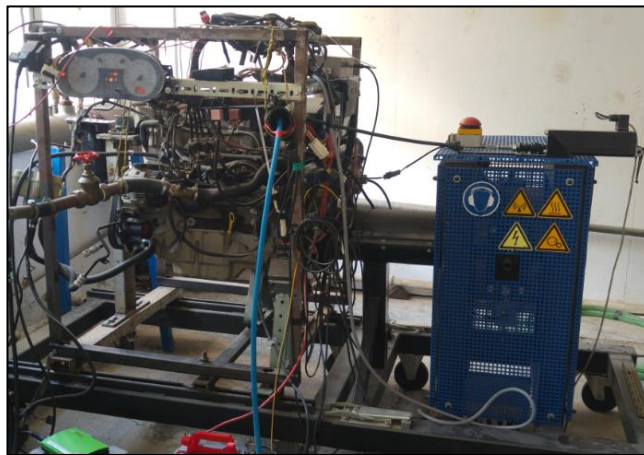


**Şekil 3.1** Deney motoru ön ve arka görünüş

Şekil 3.1’de deneylerin yapıldığı Renault Clio 2 modeline ait, buji ateşlemeli dört silindirli motor görülmektedir.

### **3.1.2 Motor test dinamometresi**

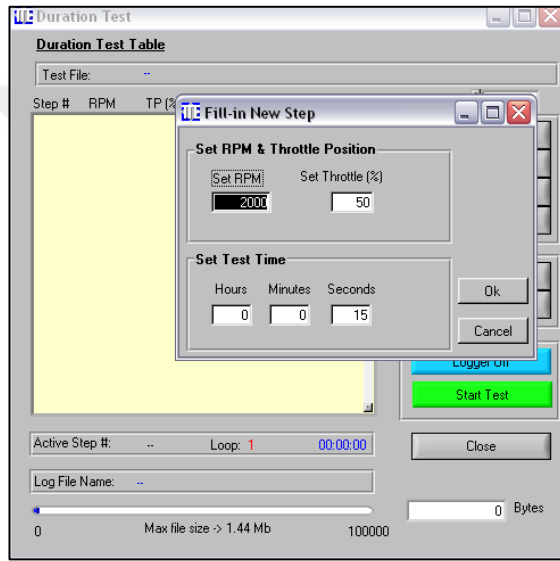
Motora ait performans değerleri, manyetik frenleme prensibi ile çalışan, Çizelge 3.2’ de teknik özellikleri ve Şekil 3.2’de genel görüntüsü verilmiş olan Dynostar ECB500 motor test dinamometresinde “duration test” isimli deney algoritması kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 3.3 de gösterildiği üzere bahsi geçen test algoritmasında, gaz kelebeği konumu, devir sayısı ve çalışma periyodu ayarlanabilmektedir. Deneyler %50 gaz kelebeği açıklığında, sırasıyla 2000, 2500, 3000, 3500 ve 4000 d/d motor hızlarında gerçekleştirilmiştir.



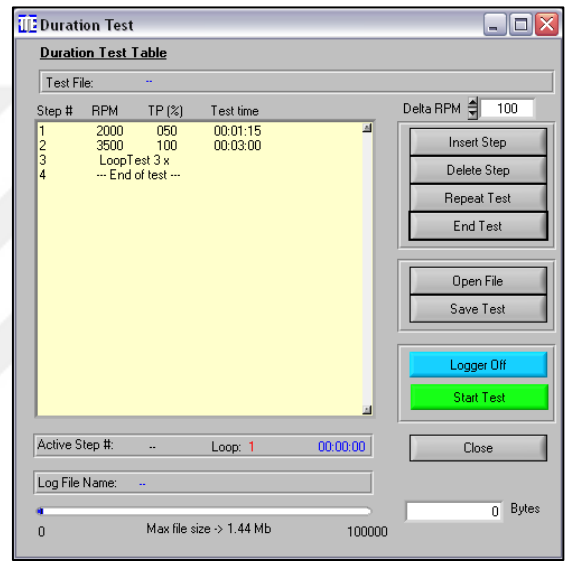
**Şekil 3.2** Deney motoru ve motor test dinamometresi

**Çizelge 3.2** Test Dinamometresine ait teknik özellikler

<b>Test Dinamometresi Teknik Özellikler</b>	
Marka ve Modeli:	Dynostar ECB500
Maksimum Güç:	185 kW
Maksimum Devir:	7000 d/d
Hava Soğutmalı Girdap Akımlı Fren:	Maksimum 1000 Nm moment
Toplam Atalet:	0,75 kgm <sup>2</sup>
Titreşim Sönümleyici:	Superflex- S coupling
Dinamometre Güç Kaynağı:	230 V, 1 faz, 12 A maksimum
Kalibrasyon:	Kalibrasyon ağırlıkları ile manuel



a.

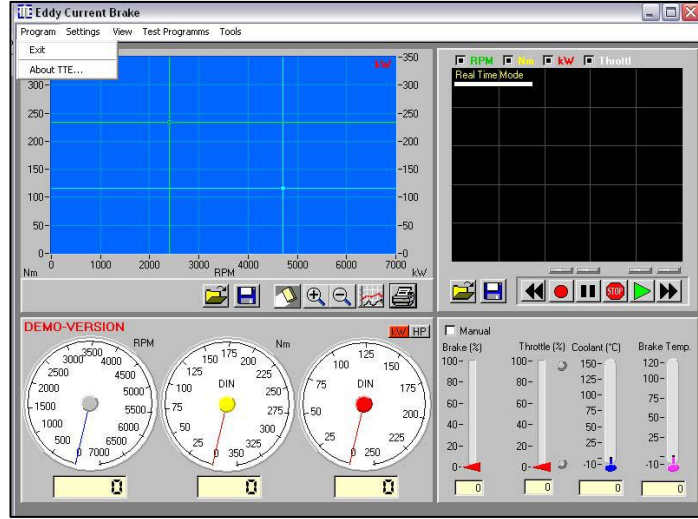


b.

**Şekil 3.3** a) Duration test sürecinde test parametrelerinin tanımlanması b) Bir duration test süreci

Şekil 3.4'te deney esnasında motor hızı (d/d), motor efektif gücü (kW), moment değeri (Nm), frenleme sıcaklığı vb. parametreler okunmaktadır.





Şekil 3.4 Program ara yüzünden dinamometreden okunan değerler



Şekil 3.5 Deney kapsamında yapılan bir çalışmaya ait değerlerin okunması

### 3.1.3 Egzoz emisyon ölçüm cihazı

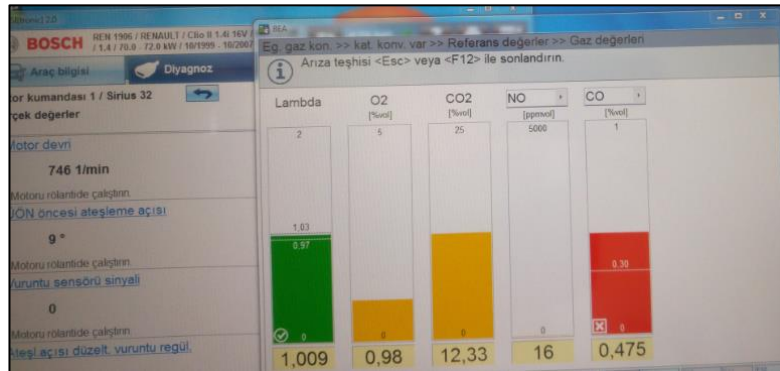
Motor egzoz çıkışından, Bosch marka BEA 550 Otto model egzoz gaz emisyon ölçüm cihazı bünyesinde bulunan BEA 060 tarafından CO (%), CO<sub>2</sub> (%), HC (ppm), NO<sub>x</sub> (ppm) ve hava fazlalık katsayı değerleri ölçülmüştür ve bilgisayara kaydedilmiştir. Emisyon cihazının LPG modu seçilmiştir. Deneyler öncesinde egzoz gaz analizör cihazının kalibrasyonu yapılmıştır.



Şekil 3.6 BEA 060 egzoz gaz analizörü



Şekil 3.7 Bosch egzoz emisyon ölçüm cihazından değerlerin okunması



Şekil 3.8 Yapılan bir deneyde emisyon değerlerinin okunması

### 3.1.4 LPG yakıt teknik özellikleri ve tüketim miktarı ölçümü

Yapılan deneylerde yakıt olarak LPG yakıtı kullanılmıştır. LPG %30 propan ve %70 bütandan oluşmaktadır. Propan ve bütanın fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'te gösterilmektedir. Deneyler süresince, LPG yakıt sarfiyatı, üst limit değeri 60 kg ve 1 gram hassasiyetinde olan bir terazi ile ölçülmüştür.

LPG yakıt tüpünün kütlesi başlangıç ve bitiş değeri teraziden anlık olarak okunmuştur ve tüketilen yakıt miktarı gram cinsinden kaydedilmiştir. Her bir deney için tüketilen yakıt miktarı, deney süresince geçen zamana bölünerek, her bir deney için oksijen tüpünden motora gönderilen yakıt debisi hesaplanmıştır. Şekil 3.9'da LPG yakıt tüpünün terazi üzerine konumlandırılması ve kurulan düzenek görülmektedir. Çizelge 3.3'te LPG'ye ait fiziksel ve kimyasal özellikler verilmiştir.

**Çizelge 3.3** LPG'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri

LPG Özellikleri	Propan	Bütan	Birim
Sıvı yoğunluğu	509	585	kg/m <sup>3</sup>
Isıl değer	46,34	45,56	MJ/kg
Kaynama noktası	-42	-0,5	°C
Kendiliğinden tutuşma derecesi	510	490	°C
Alev hızı	0,4	0,4	m/s
Stokiyometrik oran (hava/yakıt)	15,8	15,6	kg/kg
Alt tutuşma sınırı	2,1	1,5	%Hac.
Üst Tutuşma sınırı	9,5	8,5	%Hac.
Oktan sayısı	111	103	



a. LPG yakıt tüpü



b. Oksijen tüpü

**Şekil 3.9** LPG yakıt ve oksijen tüketiminin ölçülmesine yönelik kurulan tertibat



**Çizelge 3.4** Motor test dinamometresi, egzoz cihazı ve dijital terazilerin ölçüm aralığı ve hassasiyeti

<b>Cihaz</b>	<b>Parametre</b>	<b>Ölçüm aralığı</b>	<b>Hassasiyet</b>
Bosch BEA 550 Benzin	CO	%0- 10 Hac.	%0,001 Hac.
	CO <sub>2</sub>	%0- 18 Hac.	%0,010 Hac.
	HC	0-9,999 ppm	1,0 ppm
	NO <sub>x</sub>	0-5,000 ppm	%0,010 Hac.
	Lambda ( $\lambda$ )	0,5-1,8	0,001
Dynoster ECB500 Motor Dinamometresi	Motor hızı	0-7000 rpm	$\leq$ %0,001 rpm
	Fren momenti (sürekli)	0-124,4 kW	$\leq$ 0,01 Nm
	Soğutma suyu sıcaklığı	(-10) - 150 °C	100 °C'de %3,4
Dijital Ağırlık Ölçüm Cihazı	Yakıt tüketimi	0-60,000 g	0,01 g

### 3.3 Yöntem ve Matematiksel Hesaplamalar

Yapılan tüm deneylerde gaz kelebeği açıklık oranı %50 olarak ayarlanmıştır. Deneylerde, emme havası oksijence belirli oranlarda zenginleştirilmiştir. Motorun, ısınma periyodunda iken oksijence zenginleştirmeye vereceği tepkiyi, performans karakteristiklerini ve açığa çıkan emisyon miktarlarını ölçmek için sıcaklığı bir düzenek ile sabit tutulmuştur. Autonics TK4S14CN kodlu, sıcaklığı elektronik kontrol eden bir düzenek aracılığıyla motor soğutma suyu sıcaklığı 50 °C olacak şekilde ayarlanmıştır ve deneyler ısınma periyodunda iken gerçekleştirilmiştir.

Motorun her çalışma hızı için emme havası ilave oksijen ile zenginleştirilmiştir. Motor 2000, 2500, 3000, 3500 ve 4000 d/d hızlarında çalıştırılırken, her devir/dakika için ilk aşamada oksijen ilavesiz çalışma koşullarında bir diğer ifade ile atmosfer havası ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Ardından oksijen tüpü çıkışındaki oksijen regülatörü vasıtasıyla oksijen çıkış basıncı kademeli olarak 1,2 bar, 1,4 bar, 1,6 bar ve 1,8 bar basınçlarına çıkartılarak emme havası oksijence zenginleştirilmiştir. Her deney 1 dakika 45 saniye sürmüş ve motor optimum çalışma rejiminde iken ölçülen değerler kaydedilmiştir. İlk 40 saniye ve son 5 saniye hariç, 60 saniye aralığında alınan ölçüm değerlerinin ortalaması alınmıştır.

Deneylerde, egzoz emisyonları, motor devri, gaz kelebeği açıklığı, emme manifold vakumu, giriş hava debisi, deney ortamının; sıcaklık, nem ve basınç değerleri, motor soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları, motor yağı basınç ve sıcaklığı, moment ve efektif değerleri ölçüm yoluyla elde edilmiştir.

Motor moment (Nm) ve efektif güç (kW) değeri motor test dinamometresinden okunmuştur ve ortam sıcaklığı 25 °C için Denklem 3.1’de görüldüğü üzere düzeltilmiştir. Denklem 3.1’de görülen değerlerden  $M_d$  dinamometreden okunan moment değeri,  $M_e$  ise ortam sıcaklığına göre normalize edilmiş moment değeridir.  $P_d$  dinamometreden okunan efektif güç,  $P_e$  ise ortam sıcaklığına göre normalize edilmiş efektif güç değeridir.

$$\frac{M_e}{M_d} = \frac{P_e}{P_d} = \sqrt{\frac{273 + T_{ortam}}{298}} \quad 3.1$$

Deneylede motorun birim zamanda tüketmiş olduğu yakıt kütleli debisi  $\dot{m}_y$  [gram/saniye] Denklem 3.2’ye göre hesaplanmıştır.

$m_2$ = Deneyle başlangıcında dijital teraziden okunan yakıt kütlesi (gram)

$m_1$ = Deneyle sonunda dijital teraziden okunan yakıt kütlesi (gram)

$t$ = Deneyle süresi (60 saniye)

$$\dot{m}_{yakıt} = \frac{m_2 - m_1}{t} \left(\frac{g}{s}\right) \quad 3.2$$

Tüketilen yakıt kütleli olarak dijital teraziden ölçülmüştür ve her devir ve artan oksijen basıncı için Çizelge 3.5’te gösterilmektedir.

**Çizelge 3.5** Artan oksijen basıncı ve motor hızına bağlı tüketilen LPG yakıt miktarı (gram)

	Oksijen ilavesiz	1,2 bar	1,4 bar	1,6 bar	1,8 bar
<b>2000 d/d</b>	78	78,6	81	81,6	79,2
<b>2500 d/d</b>	94	97	94	96	95
<b>3000 d/d</b>	97	97	98	95	99
<b>3500 d/d</b>	114	116	115	111	114
<b>4000 d/d</b>	107	116	112	114	113

Çizelge 3.6’da ölçülen yakıt kütlesi, deneyle süresinde geçen zamana bölünerek birim zamandaki tüketim miktarı olan kütleli debisi bulunmuştur.

**Çizelge 3.6** Artan oksijen ve motor hızına bağlı tüketilen LPG yakıt kütleli debisi (gram/saniye)

	Oksijen ilavesiz	1,2 bar	1,4 bar	1,6 bar	1,8 bar
2000 d/d	1,3	1,31	1,35	1,36	1,32
2500 d/d	1,566	1,616	1,566	1,6	1,583
3000 d/d	1,616	1,616	1,633	1,583	1,650
3500 d/d	1,9	1,933	1,916	1,85	1,9
4000 d/d	1,78	1,933	1,866	1,9	1,883

LPG yakıtının alt ısıl değeri  $H_u = 45\ 700$  [kJ/kg],  $P_e$  [kW] efektif güç ve yakıt kütlesi  $\dot{m}_y$  [gram/saniye] olmak üzere Denklem 3.3'te efektif özgül yakıt tüketimi gösterilmektedir.

Efektif özgül yakıt tüketimi;

$$b_e = \frac{\dot{m}_y \times 3600}{P_e} \left[ \frac{g}{kWh} \right] \quad 3.3$$

Denklem 3.4'da efektif verim denklemleri  $\dot{m}_y$  [kg/saniye],  $H_u = 45\ 700$  [kJ/kg],  $P_e$  [kW] olmak üzere efektif verim hesaplanmıştır.

Efektif verim;

$$\eta_e = \frac{P_e}{\dot{m}_y H_u} \quad 3.4$$

Oksijen lambda sensörü egzoz manifoldunun çıkışında bulunmaktadır. Egzoz gazı içerisindeki oksijen miktarını algılayarak, motor kontrol ünitesi olan ECU'ya sinyal göndererek ideal hava/yakıt karışım oranının belirlenmesini sağlamaktadır. Motor lambda sensörü araç ilk çalıştırmada iken, motorun ısınması esnasında zaman geçeceğinden soğuk şartlarda çalışmaz. Yapılan deneylerde motor egzoz gaz çıkışında bulunan lambda sensörü sökülüştür. Böylece motor kontrol ünitesi, lambda sensöründen geri besleme sinyali alarak LPG yakıt püskürtme sürelerine müdahalesi engellenmiştir. LPG enjeksiyon süresi, kısmi eksik yanma durumu için hava fazlalık katsayısı  $\lambda \geq 1$  eşitliğine göre,  $\lambda=1$  değerini sağlayacak şekilde kalibre edilmiştir. Hava fazlalık katsayısı, gerçek hava/yakıt oranının, stokiyometrik (ideal) hava/yakıt karışımına olan oranıdır.  $\lambda$  değeri 1'den büyük olduğunda fakir karışım, 1'den küçük olduğunda zengin karışım olarak adlandırılmaktadır. Denklem 3.5'de hava fazlalık katsayısı denklemi verilmiştir.

$$\lambda = \frac{\text{hava}_{gerçek} / \text{yakıt}_{gerçek}}{\text{hava}_{stokiyometrik} / \text{yakıt}_{stokiyometrik}} \quad 3.5$$

LPG kimyasal olarak %30 propan [C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>] ve %70 bütan [C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>]’dan oluşmaktadır.

%30 Propan ve %70 bütandan oluşan LPG karışımının stokiyometrik yanma formülü

Denklem 3.6’da gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} 0,7C_4H_{10} + 0,3C_3H_8 + 6,05(O_2 + 3,762N_2) \\ = c_1CO_2 + c_2CO + c_3C + 0,5h_1H_2O + 0,5h_2H_2 \\ + [(\lambda - 1)\Theta_{min} + 0,5c_2 + c_3 + 0,25h_2]O_2 + (3,762\lambda\Theta_{min})N_2 \end{aligned} \quad 3.6$$

Denklem 3.6’da deneylerde kullanılmış olan LPG yakıtının yanma denklemi gösterilmiştir. Yapılan deneylerde yanma tipi kısmi eksik yanma olmasından dolayı lambda değeri  $\lambda \geq 1$  eşitliğine göre,  $\lambda=1$  olarak deney düzeneğinde sabitlenmiştir. Hava yakıt fazlalık oranının bulunabilmesi için Denklem 3.7 uygulanmıştır.

$$0,7 C_4H_{10} + 0,3C_3H_8 + \lambda\Theta_{min}(O_2 + 3,762 N_2) \Rightarrow \quad 3.7$$

$$m_{C_4H_{10}} = (4 * 12) + (10 * 1) = 58 \text{ kg/mol}$$

$$58 * 0,7 = 40,6 \text{ kg/kmol}$$

$$m_{C_3H_8} = (3 * 12) + (8 * 1) = 44 \text{ kg/kmol}$$

$$44 * 0,3 = 13,2 \text{ kg/kmol}$$

$$\%70m_{C_4H_{10}} + \%30m_{C_3H_8} = 40,6 + 13,2 = 53,8 \text{ kg/kmol}$$

$$\Theta_{min} = c + 0,25 * h \quad 3.8$$

$$c = (0,7 * 4) + (0,3 * 3) = 3,7$$

$$h = (0,7 * 10) + (0,3 * 8) = 9,4$$

$$\Theta_{min} = 3,7 + (0,25 * 9,4) = 6,05$$

$$\lambda\Theta_{min}(O_2 + 3,762N_2) = 830,8828 \text{ kg}$$



Kısmi eksik yanma denklemine göre 53,8 kg kullanılan (bütan+propan) LPG yakıtı için 830,8828 kg hava tüketilmiştir. 1 kg yakıt için 15,45 kg hava tüketilmiştir. Denklem 3.9'da LPG yakıtı ve havaya ait stokiyometrik hava fazlalık katsayısı verilmiştir.

$$15,45 = \frac{Hava_{stokiyometrik}}{Yakıt_{stokiyometrik}} \quad 3.9$$

Oksijen tüpünden emme manifolduna gönderilen oksijen miktarları dijital teraziden ölçülmüştür ve kütleli olarak Çizelge 3.7'de verilmiştir.

**Çizelge 3.7** Oksijen tüpünden gönderilen oksijen miktarı (gram)

	Oksijen ilavesiz	1,2 bar	1,4 bar	1,6 bar	1,8 bar
<b>2000 d/d</b>	0	28	52	64	70
<b>2500 d/d</b>	0	32	52	64	68
<b>3000 d/d</b>	0	36	54	61,8	70
<b>3500 d/d</b>	0	38	54	64	72
<b>4000 d/d</b>	0	38	54	63,6	70

Oksijen tüpünden, emme manifolduna gönderilen oksijenin kütleli debisi Çizelge 3.8'de gösterilmektedir.

**Çizelge 3.8** Oksijen tüpünden gönderilen oksijen kütleli debi (gram/saniye)

	Oksijen ilavesiz	1,2 bar	1,4 bar	1,6 bar	1,8 bar
<b>2000 d/d</b>	0	0,46	0,86	1,06	1,16
<b>2500 d/d</b>	0	0,533	0,866	1,066	1,133
<b>3000 d/d</b>	0	0,6	0,9	1,03	1,166
<b>3500 d/d</b>	0	0,633	0,9	1,066	1,2
<b>4000 d/d</b>	0	0,633	0,9	1,066	1,167

### 3.4 Ölçüm Cihazlarından Kaynaklanan Belirsizlik Değeri

Motor parametreleri olan efektif güç, moment, motor hızı dinamometre tarafından, tüketilen yakıt miktarı dijital teraziden ölçülmüştür. Bu ölçüm cihazlarının hassasiyetlerinden kaynaklı hata değerleri oluşmaktadır. Belirsizlik analizi uygulayarak bu hata değerlerinin ölçüm sonuçlarına olan etkisi görülmüştür.

Denklem 3.9’da efektif verim formülü içerisinde yer alan değerler kuvvet (Nm), kuvvet kolu (m), motor hızı (d/d), kütleli yakıt debisi (kg/saniye), LPG yakıtının alt ısıl değeri  $H_u = 45\,700$  [kj/kg] olmak üzere, ölçülen değişkenlerin oluşturduğu belirsizlik değeri Denklem 3.14’te oluşturulmuştur.

$$\eta = \frac{P_e}{\dot{m} H_u} = \frac{T \frac{2\pi n}{60}}{\dot{m}_y H_u} = \frac{F l \frac{2\pi n}{60}}{\dot{m}_y H_u} \quad 3.9$$

$$S = \frac{0,4672 \times 2\pi}{60 \times H_u} \quad 3.10$$

Denklem 3.9’da formülde yer alan, değerlerde hata etkisi yaratmayan sabit değerler olan kuvvet kolu, LPG yakıtının alt ısıl değeri görülmektedir. S ile belirtilen sabit değer=  $1,07054 \times 10^{-6}$ ’dır.

$$\frac{\partial \eta_e}{\partial F} = \frac{n}{\dot{m}_y} S \quad 3.11$$

$$\frac{\partial \eta_e}{\partial n} = \frac{F}{\dot{m}_y} S \quad 3.12$$

$$\frac{\partial \eta_e}{\partial n} = \frac{Fn}{(\dot{m}_y)^2} S \quad 3.13$$

$$B = \left[ \left( \frac{\partial \eta_e}{\partial F} F \times 0,001 \right)^2 + \left( \frac{\partial \eta_e}{\partial n} n \times 0,001 \right)^2 + \left( \frac{\partial \eta_e}{\partial \dot{m}_y} \dot{m}_y \times 0,001 \right)^2 \right]^{1/2} \quad 3.14$$

Denklem 3.14’de görüldüğü üzere belirsizlik değerinin elde edildiği denklem formülize edilmiştir. Yapılan deneylerde 2000, 2500, 3000, 3500, 4000 devir/dakika hızlarında yapılan ölçümler sonucu her motor hızı ve değişen oksijen oranları için ortalama olarak alınan yakıtın kütleli debisi  $\dot{m}_y$  (kg/s), kuvvet (N), moment (Nm) değerleri ve (+/-) belirsizlik değerleri Çizelge 3.9’da görülmektedir.

**Çizelge 3.9** Belirsizlik analizi formülündeki değişkenler ve belirsizlik değer sonuçları

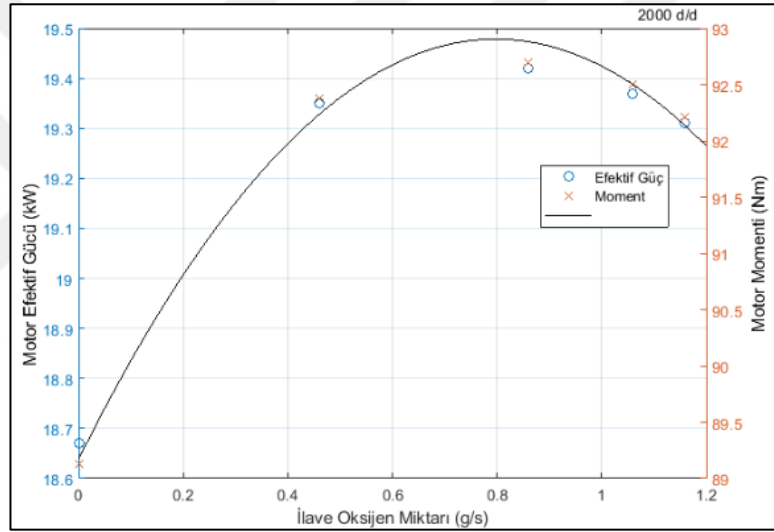
	<b>Moment (Nm)</b>	<b>Kuvvet (N)</b>	<b>m<sub>v</sub> (kg/saniye)</b>	<b>B (%)</b>
<b>2000</b>	90	192,636	0,00164	+/- 0,35
<b>2500</b>	88	188,356	0,0016	+/- 0,44
<b>3000</b>	75	160,53	0,0016	+/- 0,45
<b>3500</b>	72	154,109	0,0019	+/- 0,42
<b>4000</b>	60	128,424	0,0019	+/- 0,40

Ölçüm cihazlarının hassasiyetlerinden kaynaklanan hata paylarının maksimum etkileri efektif verim değerlerinde görüleceğinden efektif verim denklemi üzerinden belirsizlik analizi yapılmıştır. Sırasıyla 2000, 2500, 3000, 3500 ve 4000 devir/dakika çalışma hızları için  $\pm 0,35$ ,  $\pm 0,44$ ,  $\pm 0,45$ ,  $\pm 0,42$  ve  $\pm 0,40$  belirsizlik değerleri elde edilmiştir. Bu hatanın, efektif verimi sırasıyla %1,1, %1,3, %1,4, %1,3 ve %1,4 oranlarında etkileyeceği görülmüştür. Tüm parametrelerin formül içerisinde yer aldığı dolayısı ile en büyük hatanın görülebileceği efektif verim değerleri incelendiğinde belirsizlik değerlerinin etkisinin göz ardı edilebileceği, sonuçların üzerinde büyük etkilerinin olmadığı görülmüştür.

## 4.BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1 2000 d/d Motor Çalışma Hızında Elde Edilen Sonuçlar

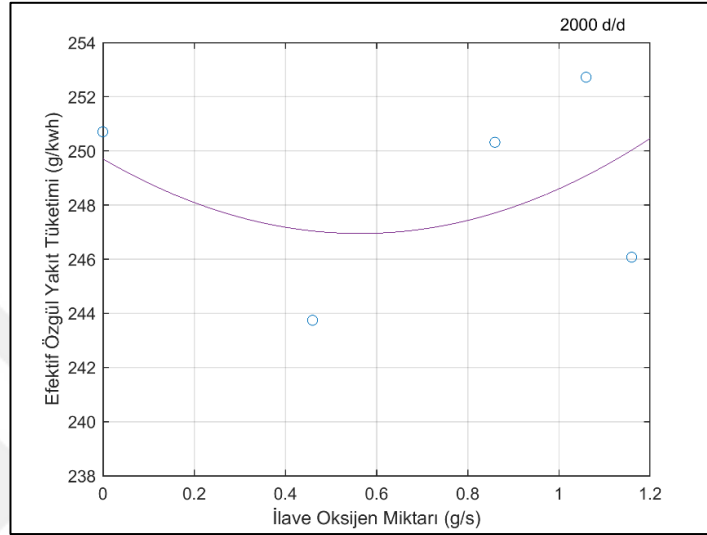
Motor 2000 devir/dakika çalışma hızında iken, ısınma periyodunda %50 gaz kelebeği açıklık pozisyonunda, emme havasına miktarı kademeli olarak artırılan ilave oksijen gönderilmiştir. Motor çalışmasına normal atmosfer havası ile başlanmış ve emme havasına, sırasıyla 1,2, 1,4, 1,6 ve 1,8 bar basınçlarında oksijen gönderilmiştir. Her basınç kademesinde sırasıyla oksijen tüpünden motora gönderilen oksijen kütlesi 28 gram, 52 gram, 64 gram ve 70 gramdır. Oksijen tüpünden, silindirlere gönderilen oksijen debisi sırasıyla 0,46 g/s, 0,86 g/s, 1,06 g/s ve 1,16 g/s'dir.



**Şekil 4.1** 2000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı, motor efektif gücü (kW) ve motor moment (Nm) grafiği

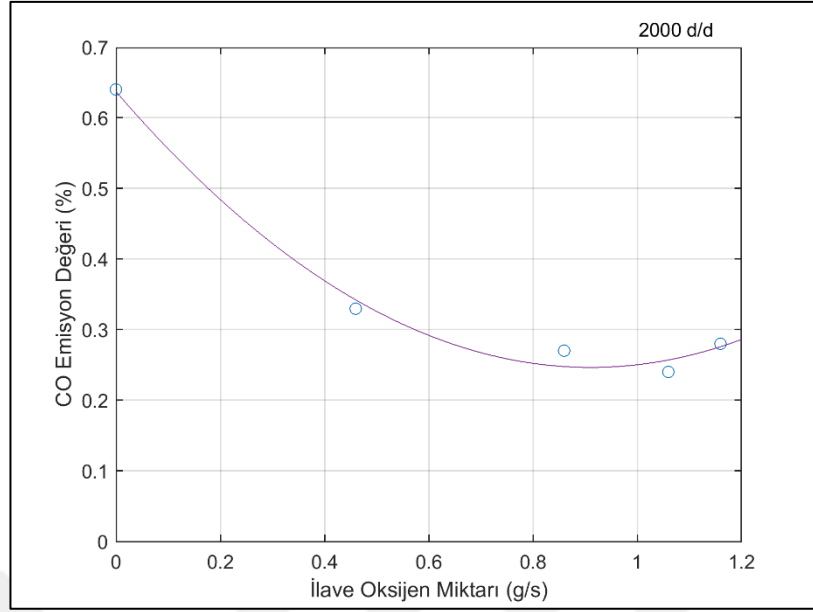
Şekil 4.1'de görüldüğü üzere 2000 d/d çalışma hızında, emme havası içerisinde artan oksijen oranının motor efektif gücüne ve motor momentine pozitif etkisi olduğu görülmüştür. Motor efektif gücü 0,46 g/s oksijen ilave debisinde %3,64, 0,86 g/s'de %4, 1,06 g/s'de %3,77 ve 1,16 g/s'de %3,44 oranlarında artmıştır. Oksijence zenginleştirmesiz yanma halinde motor efektif gücü 18,67 kW olarak ölçülmüştür. Emme havasına ilave edilen ortalama kütledebisi ortalama 0,885 g/s olan oksijen ile zenginleştirilmiş yanma durumunda motor efektif gücü 19,36 kW olarak ölçülmüştür. Her iki durum karşılaştırıldığında ortalama %3,71 oranında artış tespit edilmiştir.

Emme havasına ilave olarak gönderilen her oksijen debisi için motor momentinde sırasıyla, %3,64, %4, %3,77 ve %3,45 oranlarında artış görülmüştür. Oksijence zenginleştirmesiz çalışmada 2000 d/d çalışma hızında 89 Nm değeri elde edilirken, oksijence zenginleştirilmiş yanma 0,885 g/s ilave oksijen debisinde bu değerler ortalama 92,5 Nm'ye kadar çıkartılmıştır.



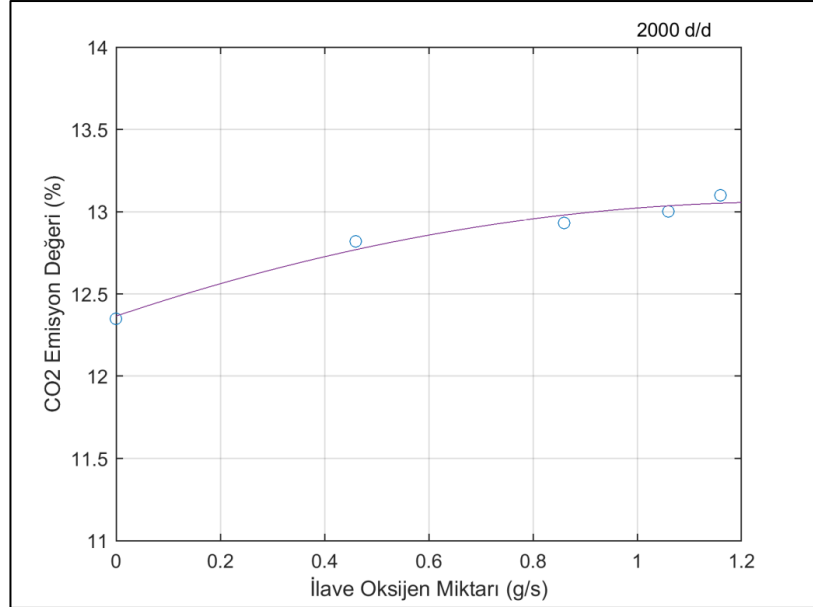
**Şekil 4.2** 2000 d/d motor çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve efektif özgül yakıt tüketimi (g/kwh) grafiği

Şekil 4.2'de efektif özgül yakıt tüketiminin, ilave edilen 0,46 g/s oksijen debisinde %2,77 oranında düştüğü, 250 g/kwh değerinden 243,75 g/kwh değerine indiği görülmektedir. Emme havasına 0,86 g/s ilave edilen oksijen ile yanmada elde edilen efektif özgül yakıt tüketim değerinin, atmosferik hava ile yanmada elde edilen efektif özgül yakıt tüketim değeri ile eşit olduğu tespit edilmiştir. Oksijen debisi 1,16 g/s iken %1,85 düşüş oranı ile 246 g/kwh değerine ulaştığı hesaplanmıştır. Bu da oksijen miktarının artması ile efektif özgül yakıt tüketiminin, düşük devirde çalışmada olumsuz etkilendiği anlamına gelmektedir.



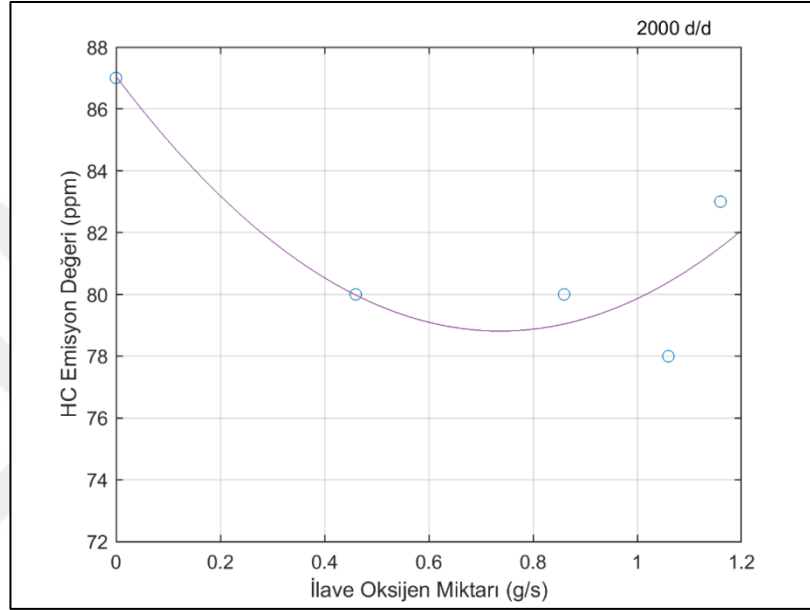
**Şekil 4.3** 2000 d/d motor çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve CO (%) emisyon grafiği

Şekil 4.3'de görüldüğü üzere oksijen ilavesiz yanma durumunda CO emisyonu %0,6 değerinde iken, artan oksijen oranları ile açığa çıkan CO emisyon değerleri sırasıyla %0,33, %0,27, %0,24 ve %0,28 değerlerinde ölçülmüştür. CO emisyonlarında oksijence zenginleştirme ile ortalama olarak %49 ila %62 aralığında düşüş sağlanmıştır.



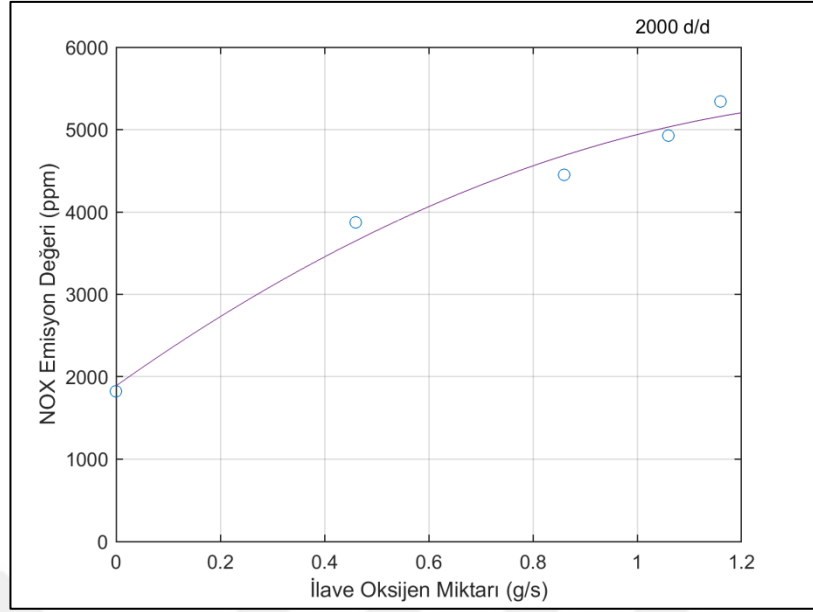
**Şekil 4.4** 2000 d/d motor çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve CO<sub>2</sub> (%) emisyon grafiği

Şekil 4.4’de görüldüğü gibi, oksijen tüpünden emme manifolduna sevk edilen oksijenin debisinin artması ile birlikte açığa çıkan CO<sub>2</sub> emisyonunda artış kaydedilmiştir. Karbon moleküllerinin, oksijence zenginleştirme ile normalden daha fazla miktarda bulunan oksijen molekülü ile birleşmesi sonucu bu artış görülmüştür. Bu artış değerleri oksijence zenginleştirmesiz yanma ile karşılaştırıldığında sırasıyla, %3,81, %4,7, %5,26 ve %6,07’dir.



**Şekil 4.5** 2000 d/d motor çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve HC (ppm) emisyon grafiği

Şekil 4.5’de 2000 d/d çalışma hızında, oksijen debilerindeki artışın hidrokarbon emisyon değerlerine olan etkileri görülmektedir. Oksijen ilavesiz yanma sonucunda HC emisyonu 87 ppm olarak ölçülmüştür. HC emisyonu, 0,46 g/s ve 0,86 g/s oksijen debilerinde yaklaşık 80 ppm değerine düşmekte buda %8’lik bir azalışa tekabül etmektedir. 1,06 g/s oksijen debisine ulaşıldığında %10’luk bir düşüş tespit edilmiştir. 1,16 g/s oksijen debisinde ise %4,6’lık bir düşüş ölçülmüştür. Grafikte anlaşıldığı üzere emme manifolduna sevk edilen oksijenin debisi 1,16 g/s değerini aştıktan sonra HC emisyonlarında azalış eğrisi yerini artışa bırakmıştır. Buna rağmen, oksijence zenginleştirmenin HC emisyonlarını düşürmesi ile ilgili kanıtı korumuş ve oksijence zenginleştirilmiş durumda ölçülen emisyon değeri oksijen ilavesiz durumda elde edilen sonucun altında kalmıştır.



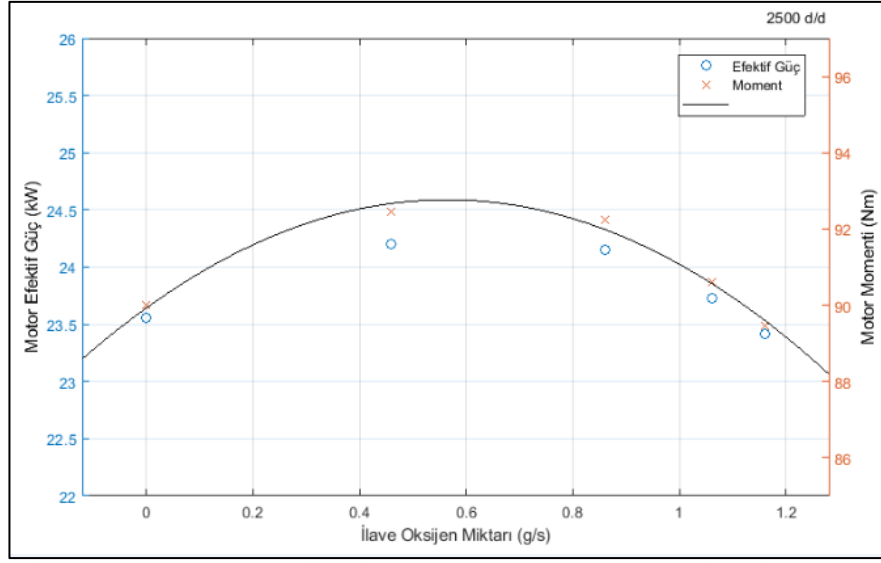
**Şekil 4.6** 2000 d/d motor çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve NO<sub>x</sub> (ppm) emisyon grafiği

Şekil 4.6'da NO<sub>x</sub> emisyonlarının silindirler içerisinde artan oksijen miktarı ile arttığı görülmektedir. Oksijen ilavesiz durumda, atmosfer havası ile yanma halinde 1826 ppm NO<sub>x</sub> açığa çıkmaktadır. 0,46 g/s debisinde ilave oksijen sevk edildiğinde %111 artış ile NO<sub>x</sub> emisyonu 3872 ppm değerine yükselmiştir. 1,16 g/s ilave oksijen debisinde %169 artış ile 4925 ppm değerine çıkmaktadır.

#### 4.2 2500 d/d Motor Çalışma Hızında Elde Edilen Sonuçlar

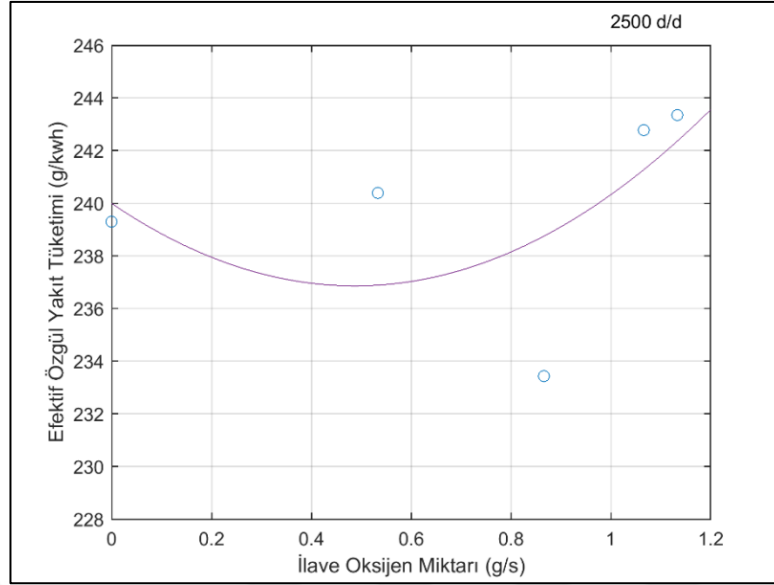
2500 d/d'da oksijence zenginleştirmenin motor performansına ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini incelemek için deneyler yapılmıştır. Grafiklerde, oksijence zenginleştirme olmadığı durumda, ilave oksijen debisi 0 g/s olarak adlandırılmıştır. Oksijence zenginleştirme işleminde sırasıyla, oksijen tüpünden emme manifolduna gönderilen oksijenin debisi sırasıyla, 0,533 g/s, 0,87 g/s, 1,07 g/s ve 1,13 g/s'dir. Her kademedeki sırasıyla oksijen tüpünden çekilen oksijenin kütlesi 32 gram, 52 gram, 64 gram ve 68 gramdır.





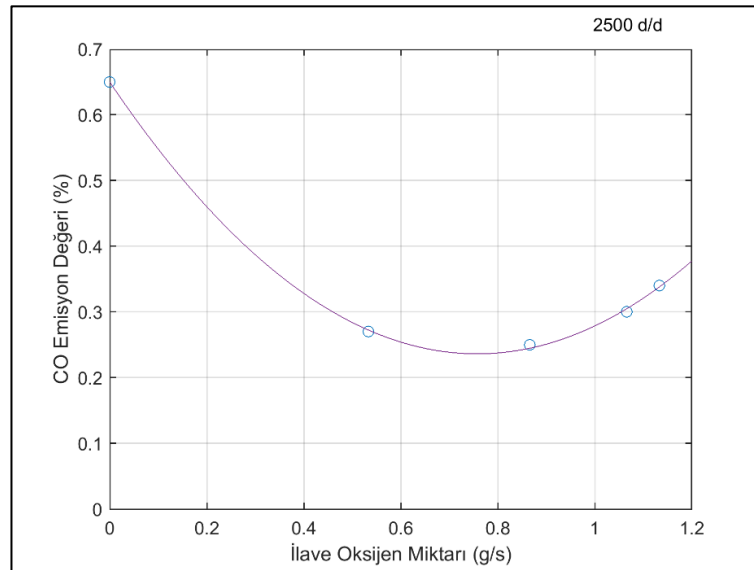
**Şekil 4.7** 2500 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı, motor efektif güç (kW) ve motor moment (Nm) grafiği

Şekil 4.7’de görüldüğü üzere motor efektif gücünde, 0,533 g/s ve 0,87 g/s oksijen debilerinde, oksijence zenginleştirmesiz yanma ile kıyasla sırasıyla %2,71, %2,50 oranlarında artış sağlanmıştır. Oksijen ilavesiz yanma sonucunda 23,56 kW efektif güç değerine ulaşılırken, 1,07 g/s oksijen debisinde 24,15 kW motor efektif güç değeri ölçülmüştür. Fakat 1,13 g/s ilave oksijen debisinde ise düşüş tespit edilmiştir. 2500 d/d çalışma hızı için oksijence zenginleştirmenin, motor efektif güç değeri üzerindeki etkileri incelendiğinde, yüksek oksijen konsantrasyonlarında düşüş olduğu ve performans değerlerini olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Oksijen debisi, 0 g/s den 0,87 g/s debisine kadar artırıldığında motor momentinin artışa geçtiği görülmektedir. Fakat bu ilave edilen oksijen debi değeri aşıldığında bir diğer ifade ile emme havası içerisinde oksijen konsantrasyonu arttığında, yükseliş eğrisi bir süre sonra sabit bir değerde kalmıştır. Fakat oksijen ilavesiz durumla kıyasla oksijence zenginleştirmenin motor performans değerlerinden olan motor momentini artırdığı ölçüm yolu ile elde edilmiştir. 1,13 g/s oksijen debisine ulaşıldığında ise motor moment değerinde düşüş tespit edilmiştir.



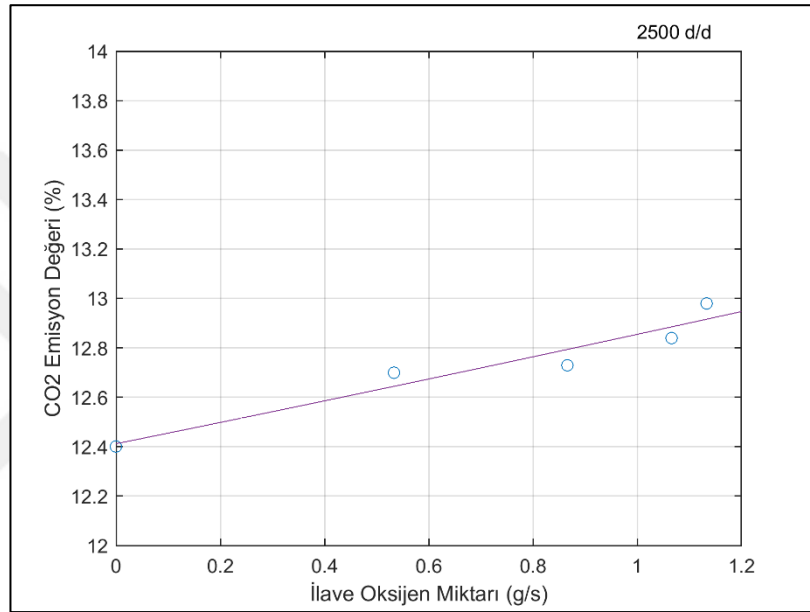
**Şekil 4.8** 2500 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve efektif özgül yakıt tüketimi (g/kwh) grafiği

Efektif özgül yakıt tüketim değeri, oksijen ilavesiz durumda 239 g/kwh olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.8'de görüldüğü üzere oksijen ilave edilen durumda, 0,533 g/s oksijen debisiyle 240 g/kwh değerine yükselmiştir. 1,06 g/s ilave oksijen debisinde 233,44 g/kwh değerine düşmüştür ve 2500 d/d çalışma hızı için optimum oksijen ilave debisi tespit edilmiştir. Artan oksijen debileri ile birlikte efektif özgül yakıt tüketiminde artışa geçmiştir.



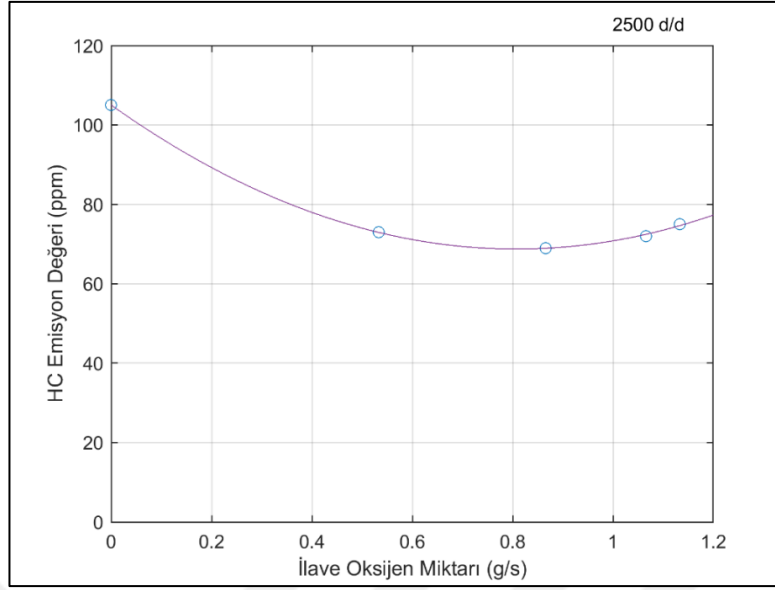
**Şekil 4.9** 2500 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve CO emisyon değerleri (%) grafiği

Şekil 4.9’da görüldüğü üzere, emme havasından silindirlere giden hava içerisinde artan oksijen miktarının CO (%) emisyonlarını düşürdüğü görülmektedir. İlave edilen oksijen debileri olan 0,533 g/s, 0,866 g/s, 1,066 g/s ve 1,133 g/s için, CO (%) emisyon azalış oranları sırasıyla %58, %62 %54 ve %48’dir. Oksijen debisinde, ortalama 1 g/s’ den yüksek debiler için CO emisyonlarındaki azalış ivmesi düşmektedir. Oksijen seviyesinin optimum değerinin aşılması ile yanma verimi düşmüş, CO emisyon değerinin düşüş eğrisinde, artışa geçmiştir.



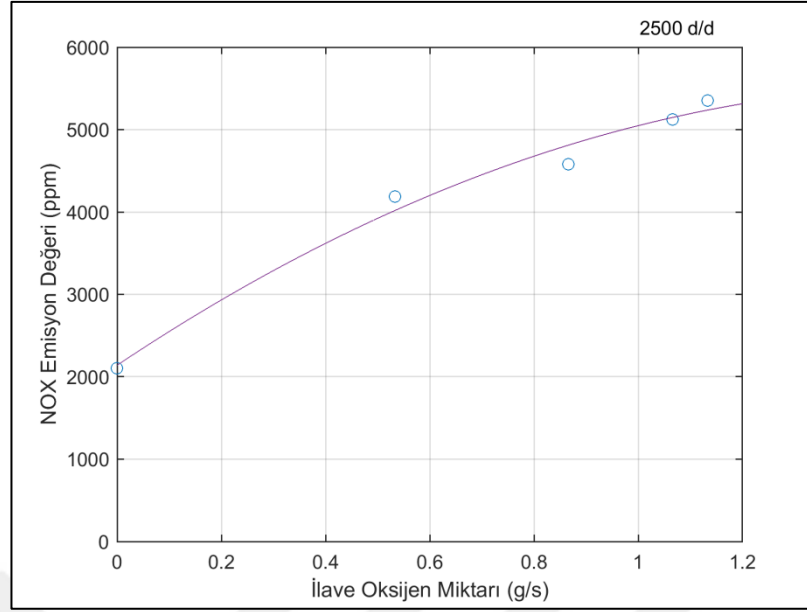
**Şekil 4.10** 2500 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve CO<sub>2</sub> emisyon değerleri (%) grafiği

Şekil 4.10’da görüldüğü üzere 2500 d/d çalışma hızında, emme havası içerisinde artan oksijen oranı ile CO<sub>2</sub> emisyon değeri orantılı bir şekilde artmaktadır. Oksijen ilavesiz bir diğer ifade ile atmosfer havası ile yanma sonucunda ölçülen CO<sub>2</sub> emisyon değeri %12,4’tür. Emme havasına gönderilen oksijen miktarı arttıkça sırasıyla CO<sub>2</sub> emisyonu %12,7, %12,73, %12,84 ve %12,98 değerlerine yükselmiştir. Bu değerler oksijen ilavesiz durum ile oranlandığında, %2,4, %2,66, %3,55 ve %4,68 oranlarında artışa eşit olmaktadır. Bunun nedeni ise artan oksijen konsantrasyonu ile CO bileşiğinin CO<sub>2</sub> bileşiğine dönüşmesidir.



**Şekil 4.11** 2500 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve HC emisyon değerleri (ppm) grafiği

Yanmamış hidrokarbonların, silindir içerisine gönderilen hava içerisindeki oksijen oranının artması ile azalış gösterdiği Şekil 4.11’de görülmektedir. Oksijen ilavesiz yanma sonucunda 105 ppm ölçülen hidrokarbon emisyonu, ilave oksijen debisi 0,533 g/s’ye olduğunda %30’luk bir azalış sergileyerek 73 ppm değerine ulaşmıştır. İlave oksijen debisi 0,87 g/s’ye çıkarıldığında %34’lük bir azalış ile 69 ppm değerine düşmüştür. HC emisyonu, ilave edilen oksijen debisi 1,066 g/s olduğunda 72 ppm, 1,13 g/s oksijen debisi ile 75 ppm emisyon değerine düşmüştür. Deneylede ulaşılan 1,13 g/s oksijen debisinde elde edilen sonuç istenen emisyon düşüşünü halen daha sağlamaktadır fakat grafikteki eğrinin azalış yerine artışa geçmesi potansiyel olumsuz etkilerin işaretçisidir.

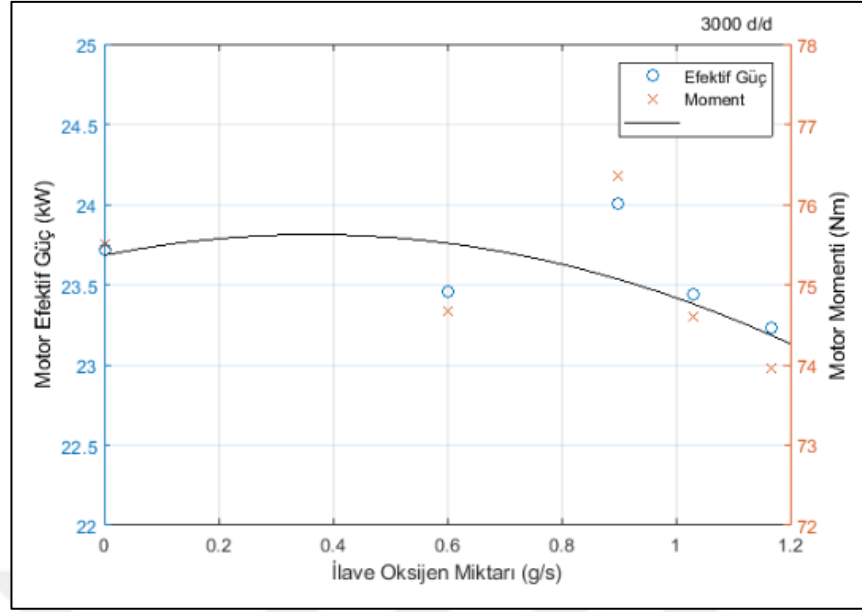


**Şekil 4.12** 2500 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve NO<sub>x</sub> emisyon değerleri (ppm) grafiği

Oksijen seviyesinin artması ile beklenen gibi NO<sub>x</sub> emisyon değerlerinde artış Şekil 4.12'de görülmektedir. Oksijen ilavesiz durumda hava içerisinde kütleli olarak %23,2 oranında oksijen bulunduğunda yanma sonucunda 2105 ppm NO<sub>x</sub> emisyonu ölçülmüştür. Oksijence ilavesiz yanmada, oksijence zenginleştirme değerine 0 g/s değeri verilmiştir. Bu debi değeri 0,533 g/s'ye çıkartıldığında 4189 ppm olarak ölçülmüştür ve artış oranı %99'dur. Oksijen oranı arttıkça bu oranlarda artmaktadır.

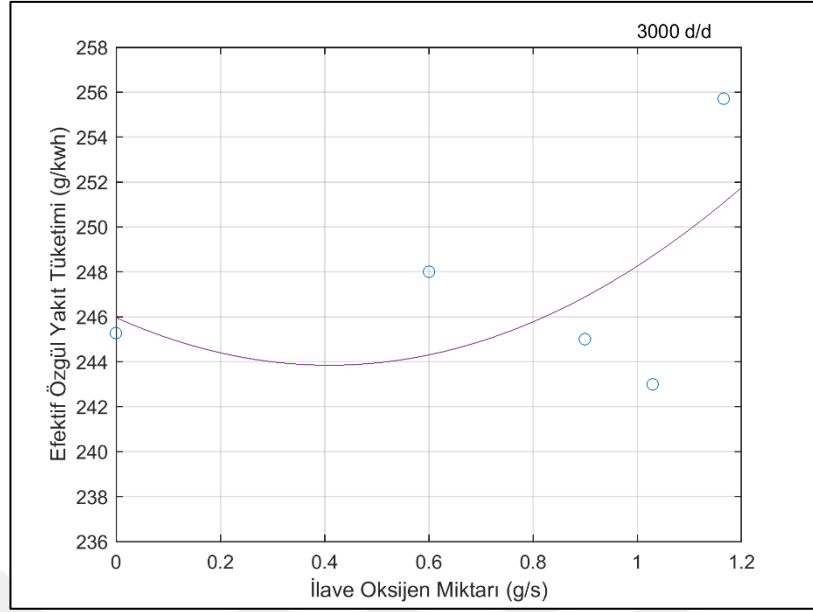
### 4.3 3000 d/d Motor Çalışma Hızında Elde Edilen Sonuçlar

Motor 3000 d/d çalışma hızına çıkartıldığında oksijence zenginleştirme ile elde edilen sonuçlar takip eden grafiklerde görülmektedir. Oksijen basıncı regülatör ile sırasıyla 1,2 bar, 1,4 bar, 1,6 bar ve 1,8 bar artırıldığında, oksijen tüpünden sırasıyla 36 gram, 54 gram, 61,8 gram ve 70 gram oksijen emme havasına gönderilmiştir. Bununla birlikte oksijen tüpünden emme manifolduna gönderilen oksijen debisi sırasıyla 0,6 g/s, 0,9 g/s, 1,03 g/s, 1,166 g/s'dir. Oksijen zenginleştirmesiz, bir diğer ifade ile atmosfer havası ile yanma durumunda ilave edilen oksijenin debisi 0 g/s'dir. Oksijence zenginleştirmesiz ve oksijence zenginleştirmeli deneylerde, tüketilen LPG yakıtının miktarı sırasıyla, 114 gram, 97 gram, 98 gram, 95 gram ve 99 gramdır.



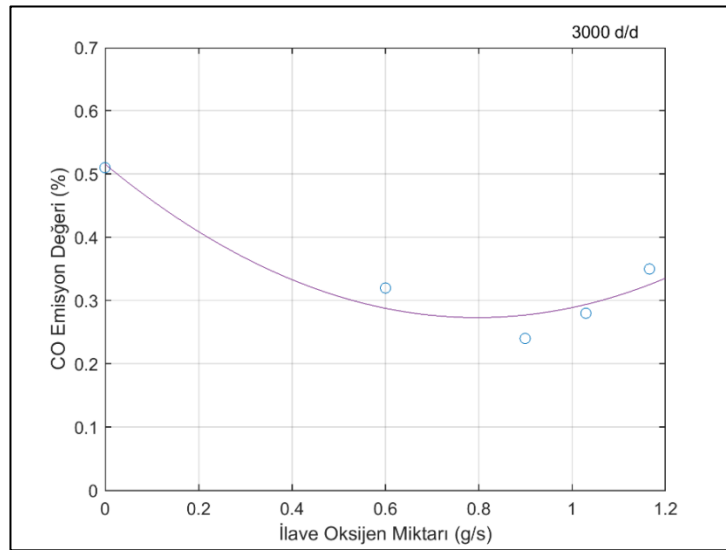
**Şekil 4.13** 3000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı, motor efektif güç (kW) ve motor moment (Nm) grafiği

Şekil 4.13’de 3000 devir/dakika çalışma hızında emme havasına, kademeli olarak miktarı artırılan olarak sevk edilmiştir. 0,92 g/s ortalama oksijen debisinde motor efektif gücünde ortalama olarak 23,53 kW bir değer elde edilmiştir. Oksijen ilavesiz yanma sonucunda, ölçülen motor efektif güç değeri 23,72 kW’tır. 3000 d/d çalışma hızı için oksijence zenginleştirmenin motor efektif güç değerini önemli derecede artırmadığı kaydedilmiştir. Oksijence zenginleştirilmemiş yanma sonucunda motor momentini 75,5 Nm olarak ölçülmüştür. Oksijence zenginleştirilmiş çalışmada ilave olarak 0,6 g/s oksijen kütleli debisinde motor momentinde %1,1 oranında düşüş görülmüştür. 0,9 g/s oksijen debisinde %1,13 oranında artış meydana gelmiştir. 1,03 g/s ve 1,166 g/s oksijen debilerinde ise sırasıyla moment değerleri 74,6 Nm ve 73,95 Nm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.14** 3000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve efektif özgül yakıt tüketimi (g/kwh) grafiği

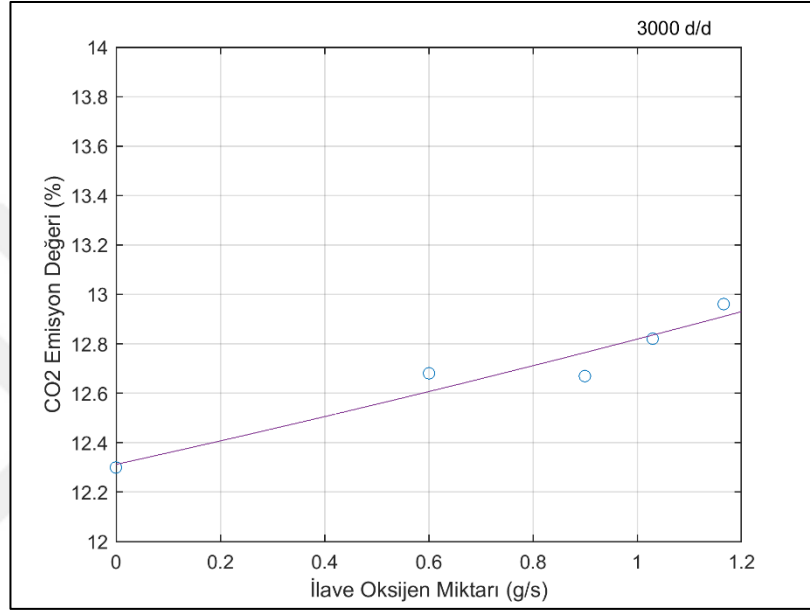
Şekil 4.14’de efektif özgül yakıt tüketim grafiği verilmiştir. Efektif özgül yakıt tüketiminde, 0,6 g/s oksijen debisinde %1,1 oranında artış tespit edilmiştir. 0,9 g/s ve 1,03 g/s oksijen debilerinde ise %0,8 oranında düşüş görülmüştür. Emme manifoldundan silindirlere gönderilen oksijen debisi 1,03 g/s iken özgül yakıt tüketiminde oksijence zenginleştirmesiz duruma oranla %0,85 azalış görülmüştür. Oksijen debisinin artması ile özgül yakıt tüketiminde artış başlamıştır.



**Şekil 4.15** 3000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve CO emisyon (%) grafiği

Şekil 4.15’de 3000 d/d motor çalışma hızında farklı oranlarda ilave edilen oksijenin, CO emisyonuna olan etkileri grafiksel olarak görülmektedir.

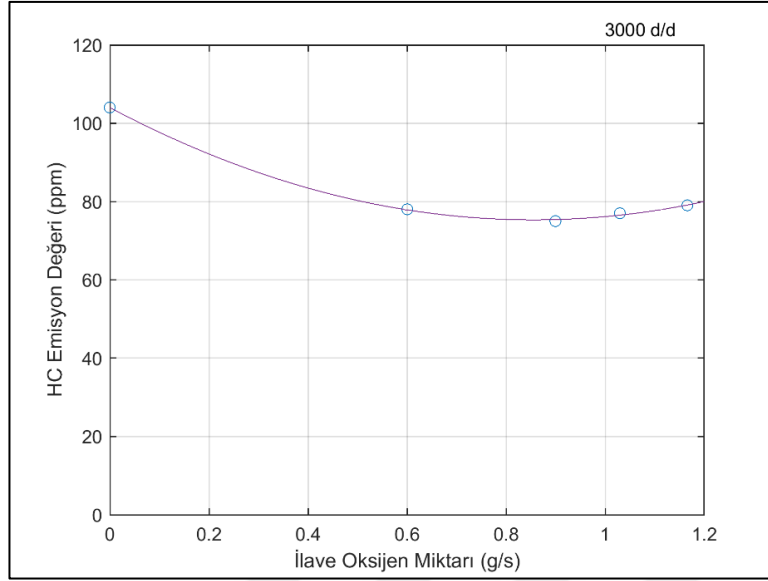
İlave oksijen debilerinde sırasıyla 0,6 g/s ve 0,9 g/s değerleri için CO emisyonu %36 ve %53 oranlarında azaltılmıştır. CO emisyonunda ölçülen en büyük azalış miktarı, ilave edilen oksijen debisinin 0,9 g/s olduğu değerinde tespit edilmiştir. 1,03 g/s ve 1,17 g/s oksijen debilerinde CO emisyonlarında azalış oranları sırasıyla %44 ve %30’ dur.



**Şekil 4.16** 3000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve CO<sub>2</sub> (%) emisyon grafiği

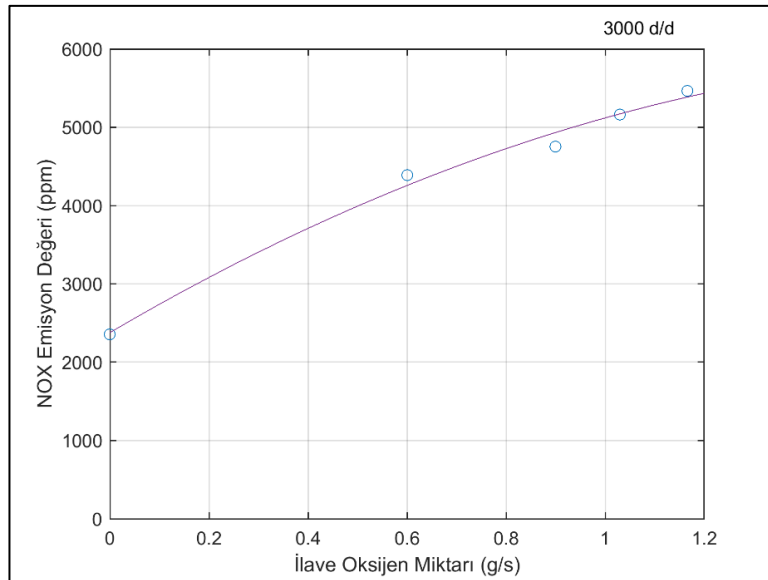
Şekil 4.16’da görüldüğü üzere, karbondioksit emisyonu, yüksek oksijen konsantrasyonu sebebiyle karbonların oksijen ile birleşmesinden dolayı artmıştır. Karbondioksit oranı, 0,6 g/s ve 0,9 g/s ilave oksijen debilerinde ortalama olarak %3 civarında artış göstermiştir. 1,03 g/s oksijen debisinde %4,23, 1.17 g/s oksijen debisinde ise %5,37 oranında artış kaydedilmiştir.





**Şekil 4.17** 3000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve HC (ppm) emisyon grafiği

Emme havasını oksijence zenginleştirmenin hidrokarbon emisyonları üzerindeki etkisi 3000 d/d çalışma hızı için Şekil 4.17’de verilmiştir. İlave oksijen olmadan ki durumda yanma sonucu açığa çıkan hidrokarbon 104 ppm olarak ölçülmüştür. Bu oran yanma odasına gönderilen oksijen konsantrasyonunun artmasıyla ortalama olarak 78 ppm seviyelerine çekilmiştir, 0,924 g/s ortalama oksijen debi değeri için hidrokarbon emisyonunda %25 ila %28 aralığında azalış görülmüştür.

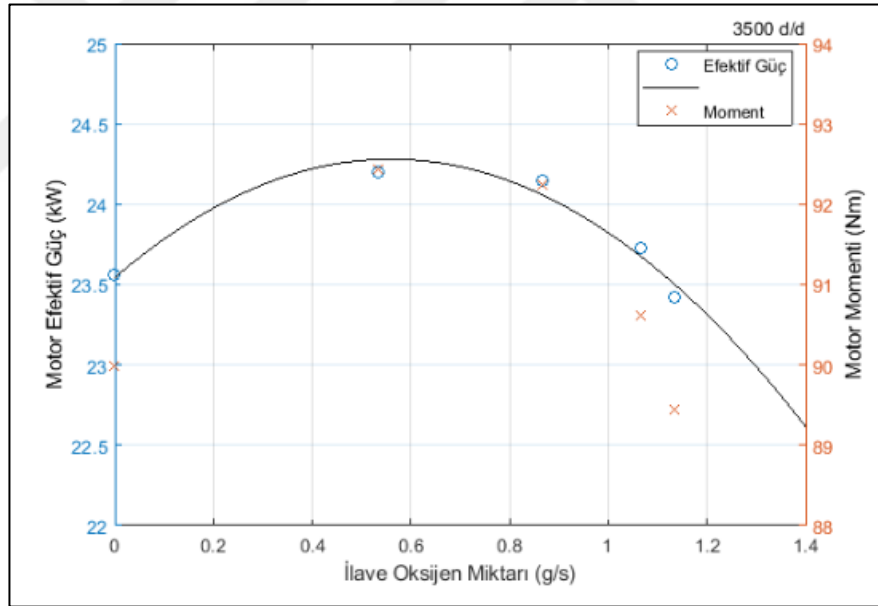


**Şekil 4.18** 3000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve NO<sub>x</sub> (ppm) emisyon grafiği

Şekil 4.18'de NO<sub>x</sub> emisyonlarının, emme havası içerisinde artan oksijen miktarı ile birlikte arttığı görülmektedir. NO<sub>x</sub> emisyonunun, 0,633 g/s oksijen debisi için %86,21, 1,166 g/s oksijen debisi için %132 oranında arttığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak emme havasına ilave edilen oksijen ile silindir sıcaklıklarının arttığı ve oksijen fazlalığının NO<sub>x</sub> emisyonunu artırdığı yapılan deneylerde tespit edilmiştir.

#### 4.4 3500 d/d Motor Çalışma Hızında Elde Edilen Sonuçlar

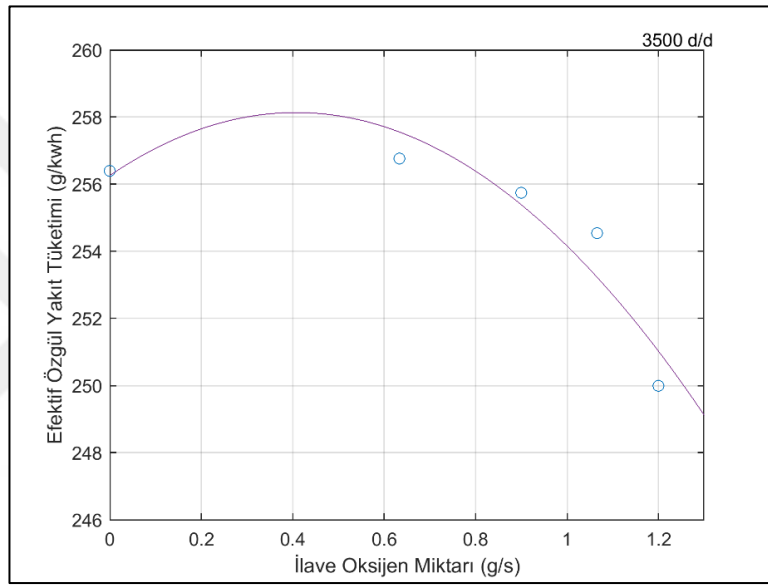
Motor, ısınma periyodunda %50 gaz kelebeği açıklığında iken 3500 devir/dakika hız ile çalıştırılmıştır. Oksijen tüpünden basınçlandırılarak emme manifolduna sevk edilen oksijen miktarları sırasıyla 38 gram, 54 gram, 64 gram ve 72 gramdır. Oksijen debileri sırasıyla, 0,633 g/s, 0,9 g/s, 1,066 g/s ve 1,2 g/ s'dir. Oksijence zenginleştirmesiz ve zenginleştirmeli tüm deneylerde, tüketilen LPG yakıt miktarı ise sırasıyla, 114 gram, 116 gram, 115 gram, 111 gram ve 114 gramdır.



**Şekil 4.19** 3500 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve motor efektif güç (kW) grafiği

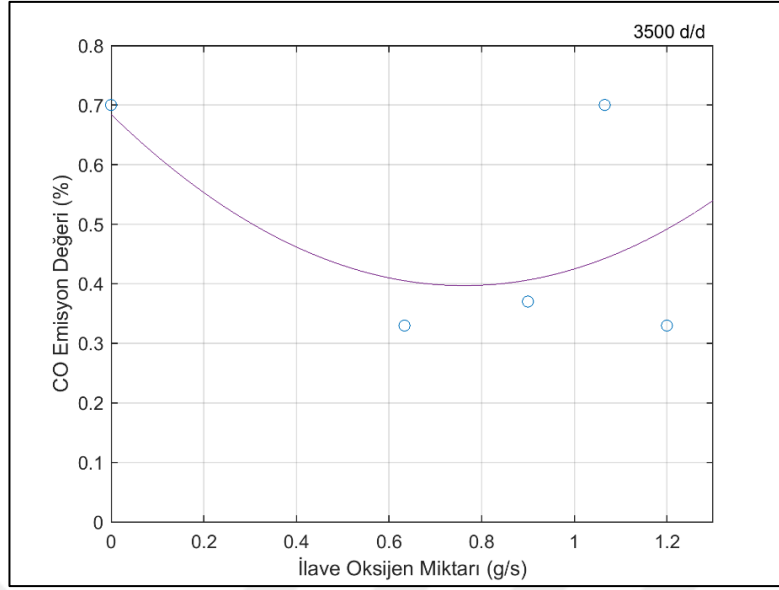
Şekil 4.19'da, 3500 d/d çalışma hızında motor efektif güç değerlerinin oksijen miktarına göre değişimi gösterilmektedir. Oksijen ilavesiz yanma sonucu ölçülen motor efektif güç değeri 26,68 kW'tır. Bu değer ilave oksijen debisi 0,633 g/s olduğunda 27,10 kW değerine yükselmektedir. İlave oksijen debisi 0,9 g/s iken 26,97 kW olarak ölçülmektedir.

1,066 g/s oksijen debisinde %2'lik bir düşüş söz konusudur bu da tüketilen yakıt miktarının %2,63 oranında azalması ile ilgilidir. Motor efektif gücü 1,2 g/s oksijen debisinde ise 27,36 kW değerine ulaşarak, oksijence zenginleştirmesiz yanma sonucunda ölçülen değer üstüne çıkmıştır. Artan oksijen miktarının motor momenti üzerinde olumlu etki gösterdiği Şekil 4.19'da görülmektedir. Oksijen ilavesiz yanma sonucu 72,79 Nm moment değeri ölçülürken, 0,9 g/s oksijen debisi için motor momenti 73,59 Nm olarak ölçülmüştür. Ortalama olarak 0,94 g/s debide ilave edilen oksijen, 3500 d/d çalışma hızında moment değerini %2 oranında artırdığı hesaplanmıştır.



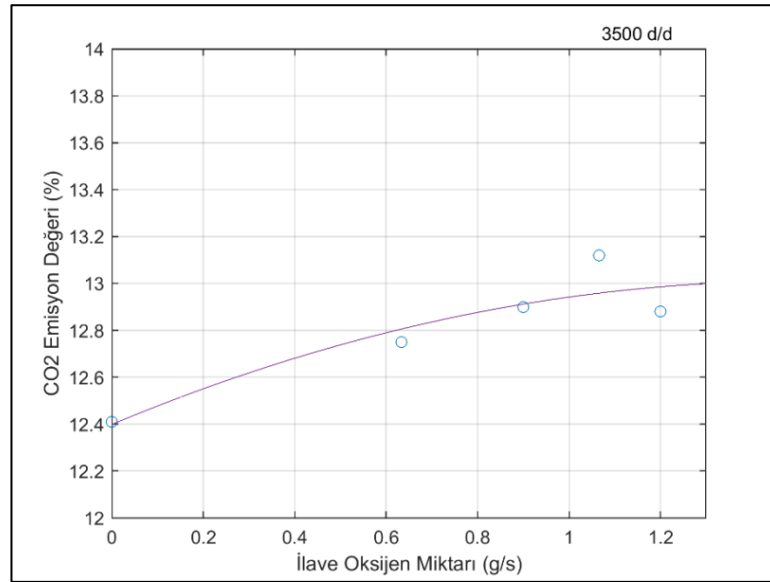
**Şekil 4.20** 3500 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve efektif özgül yakıt tüketimi (g/kwh) grafiği

Şekil 4.20'de 3500 d/d çalışma hızında efektif özgül yakıt tüketiminin, yanma odası içerisindeki artan oksijen miktarına göre azalış eğrisi gösterilmektedir. Oksijen miktarının, yakıt tüketimini aynı motor performansı karşılayarak, düşürdüğünü açıkça görülmektedir. İlave oksijen debileri sırasıyla 0 g/s, 0,633 g/s, 0,9 g/s, 1,066 g/s ve 1,2 g/s'ye karşılık olarak, efektif özgül yakıt tüketim değerleri sırasıyla 256,39 g/kwh, 256,76 g/kwh, 255,75 g/kwh, 254,54 g/kwh ve 249,96 g/kwh olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 4.21** 3500 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve CO emisyon (%) grafiği

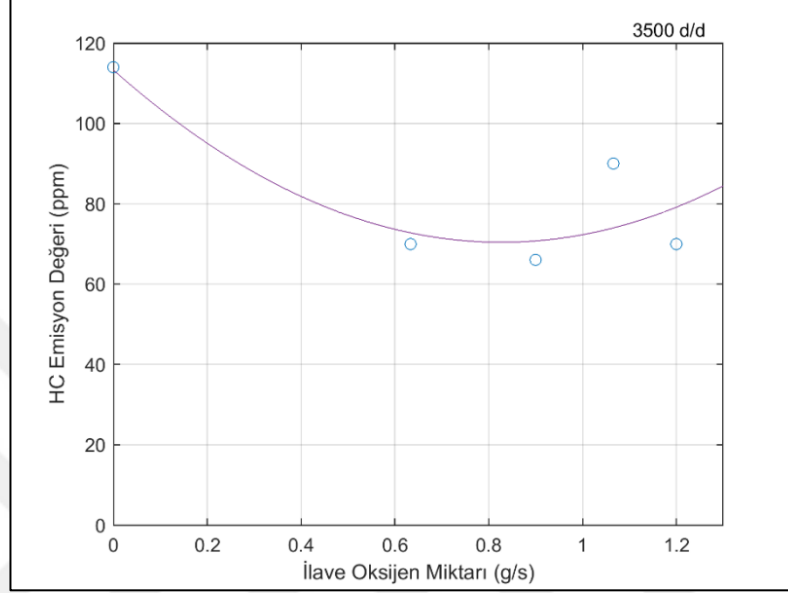
Şekil 4.21’de artan oksijen konsantrasyonunun CO emisyonlarını düşürdüğü görülmektedir. Oksijen ilavesiz durumda yanma sonucu %0,7 oranında CO emisyonu açığa çıkmıştır. Oksijen oranı artırıldığında 0,633 g/s ilave oksijen debisinde CO emisyonunda %53, 0,9 g/s oksijen debisinde %47 oranında düşüş tespit edilmiştir.



**Şekil 4.22** 3500 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve CO<sub>2</sub> emisyon (%) grafiği

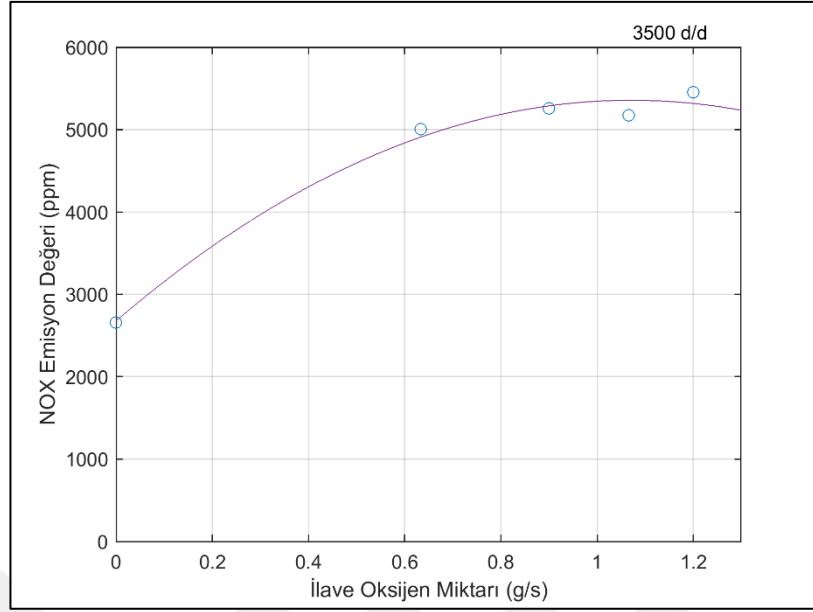
Şekil 4.22’de CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinin 3500 d/d çalışma hızında oksijen oranına göre değişim eğrisi görülmektedir.

Artan oksijen miktarının karbondioksit emisyonunu artırdığı görülmektedir. Oksijen ilavesiz durumda %12,41 değerinde oluşan CO<sub>2</sub> emisyonu, sırasıyla 0,633 g/s, 0,9 g/s, 1,066 g/s ve 1,2 g/s oranları için, %12,75, %12,9, %13,12 ve %12,88 oranlarında oluşmuştur.



**Şekil 4.23** 3500 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve HC emisyon (ppm) grafiği

Oksijence zenginleştirmenin pozitif etkisi olarak HC emisyonlarını düşürdüğü Şekil 4.23'de görülmektedir. Oksijence zenginleştirmesiz durumda 114 ppm HC emisyonu açığa çıkmaktadır. İlave edilen oksijen debileri sırasıyla 0,633 g/s, 0,9 g/s, 1,066 g/s ve 1,2 g/s'ye çıkartıldığında oluşan hidrokarbon emisyonları sırasıyla 70 ppm, 66 ppm, 90 ppm ve 70 ppm'dir. Hidrokarbon emisyonlarının ortalama azalış oranı %35'tir.

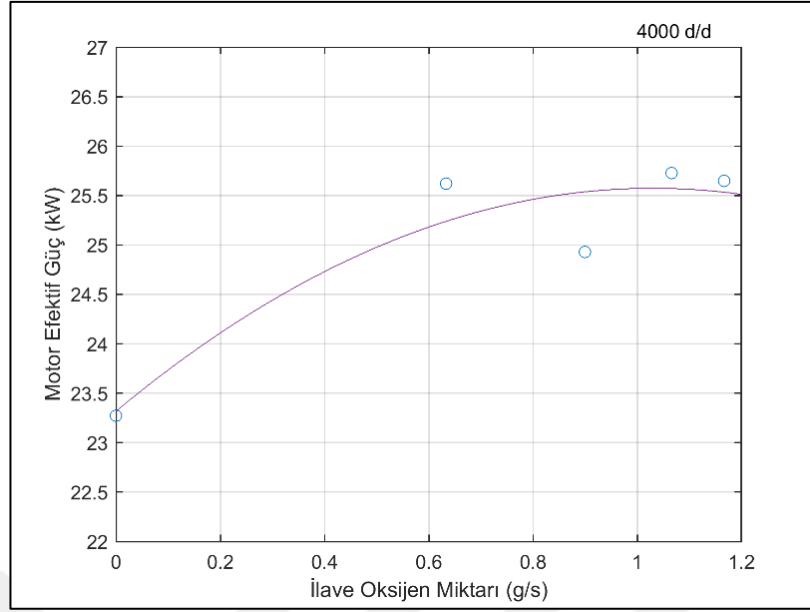


**Şekil 4.24** 3500 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve NO<sub>x</sub> emisyon (ppm) grafiği

Şekil 4.24'de NO<sub>x</sub> emisyonlarının oksijen seviyesi yükseldikçe, arttığı görülmektedir. Oksijen ilavesiz durumda 2661 ppm oluşan NO<sub>x</sub> emisyonu, ortalama 0,95 g/s oksijen debisinde, 5222 ppm oranına yükselmiş ve %96 oranında artış söz konusudur.

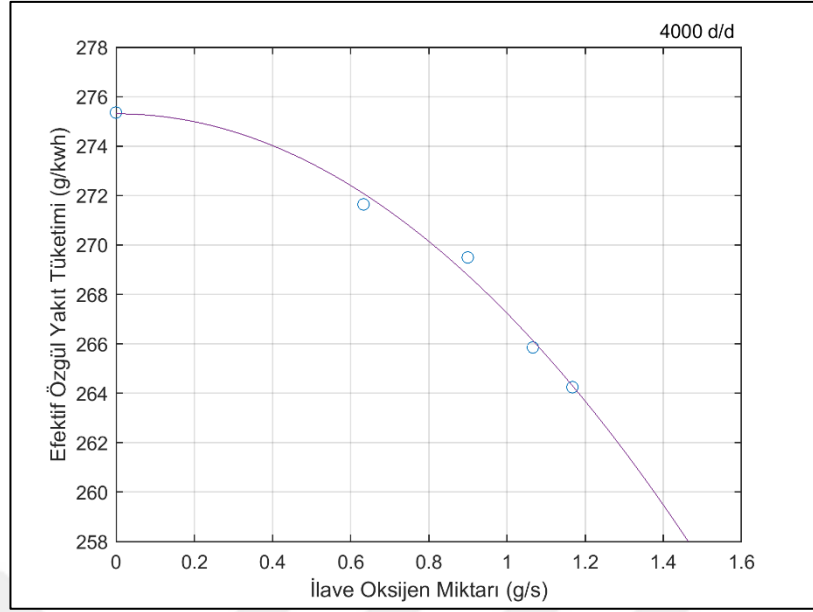
#### **4.5 4000 d/d Motor Çalışma Hızında Elde Edilen Sonuçlar**

Motor 4000 devir/dakika çalışma hızında iken, emme havasına kademeli olarak basıncı 1, 1,2, 1,4 ve 1,6 bar artırılan oksijen gönderilmiştir. Her bir basınç kademesi için gönderilen oksijen miktarı sırasıyla 38 gram, 54 gram, 63,6 gram ve 70 gramdır. Oksijen zenginleştirmede oksijen debileri sırasıyla 0 g/s, 0,633 g/s, 0,9 g/s, 1,066 g/s ve 1,167 g/s'dir. Tüketilen LPG yakıt miktarı sırasıyla, 107 gram, 116 gram, 112 gram, 114 gram ve 113 gramdır.



**Şekil 4.25** 4000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı, motor efektif güç (kW) ve motor moment (Nm) grafiği

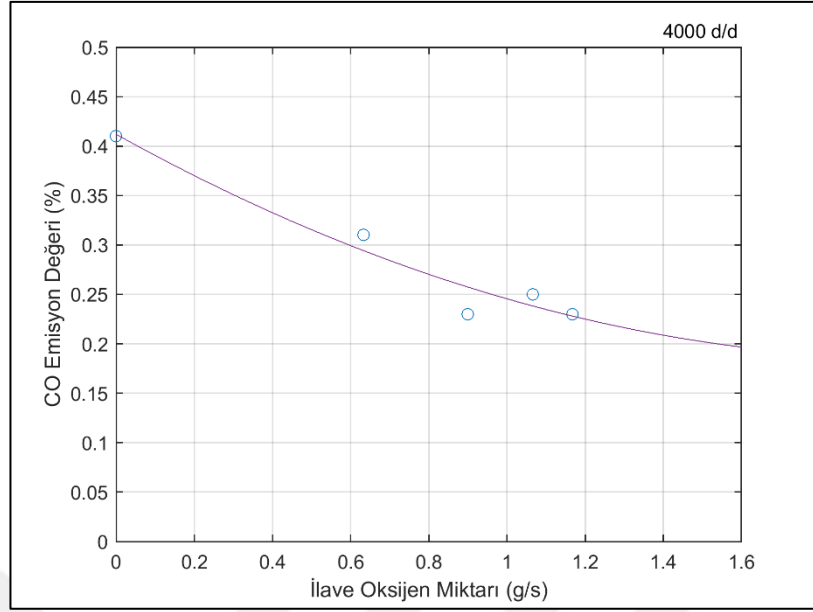
Şekil 4.25’de ilave oksijenin motor efektif gücünde bariz derecede artış gerçekleştirdiği görülmektedir. Oksijen ilavesiz durumda motor efektif güç 23,27 kW olarak ölçülmüştür. Oksijen debisi sırasıyla 0 g/s, 0,633 g/s, 0,9 g/s, 1,066 g/s ve 1,167 g/s değerleri için efektif güç değeri 23,27 kW, 25,62 kW, 24,93 kW, 25,73 kW, 25,65 kW olarak ölçülmüştür. Şekil 4.25’de 4000 devir/dakika çalışma hızı için kademeli olarak artan oksijen miktarının, motor momentine olan etkisi görülmektedir. Oksijen ilavesiz durumda ölçülen motor momentini 55,56 Nm’dir. Sırasıyla 0,633 g/s, 0,9 g/s, 1,066 g/s ve 1,167 g/s oksijen debi değerleri için motor moment değerleri, 61,16, 59,51, 61,42 ve 61,24 Nm’dir. Artış oranları sırasıyla %10, %7,11, %10,55 ve %10,23’tür.



**Şekil 4.26** 4000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve efektif özgül yakıt tüketimi (g/kwh) grafiği

Silindir içerisine gönderilen ilave oksijenin yanma performansını artırdığı ve efektif özgül yakıt tüketimini düşürdüğü Şekil 4.26'da görülmektedir. Oksijen ilavesiz durumda hesaplanan efektif özgül yakıt tüketimi 275,36 g/kwh'tir. Atmosferdeki mevcut oksijen %18,48 oranında zenginleştirildiğinde yani oksijen debisi 0,633 g/s olduğunda hesaplanan efektif özgül yakıt tüketimi 271,65 g/kwh olmuştur. Azalış oranı %1,35'tir. Oksijen basıncı bir kademe daha artırıldığında oksijen debisi 0,9 g/s olduğunda, ölçülen efektif özgül yakıt tüketimi 269,49 g/kwh'tir. Oksijen debisi 1,167 g/s'ye çıkartıldığında efektif özgül yakıt tüketimi 264,24 g/kwh olarak hesaplanmıştır. Yüksek devirlerde oksijen zenginleştirmenin efektif özgül yakıt tüketimini azalttığı görülmüştür.

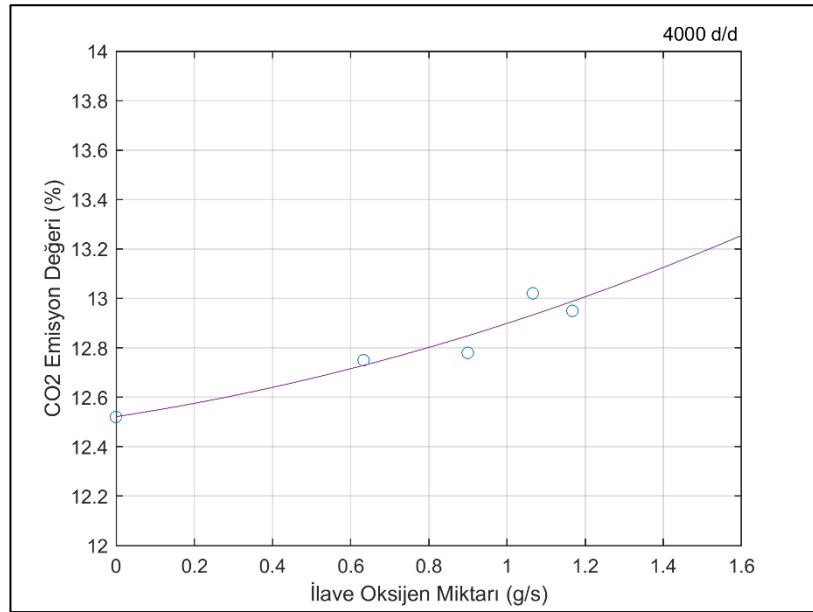




**Şekil 4.27** 4000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve CO emisyon (%) grafiği

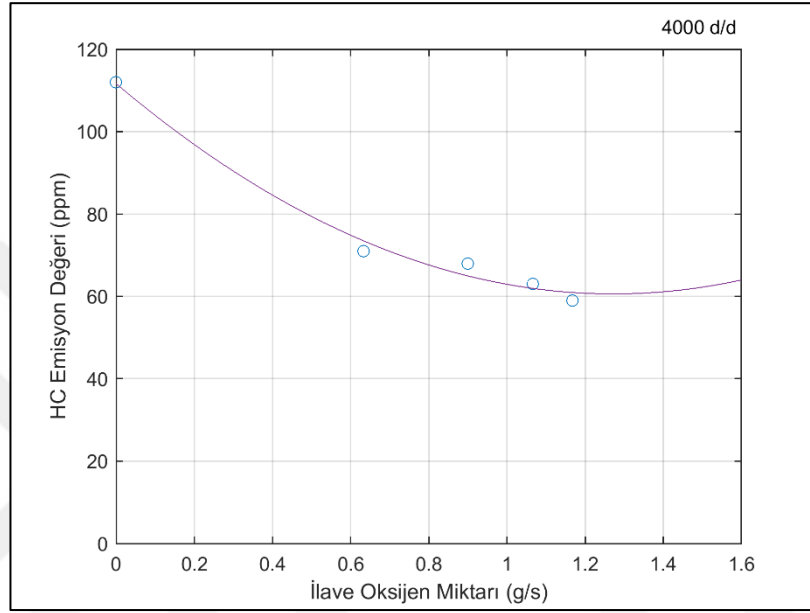
Şekil 4.27'de görüldüğü üzere oksijen ilavesiz durumda 0 g/s ilave oksijen debisinde %0,4 oranında CO emisyonu açığa çıkmıştır.

Oksijen debileri 0,633 g/s, 0,9 g/s, 1,066 g/s ve 1,167 g/s'ye yükseldiğinde CO emisyonları sırasıyla %25, %44, %40 ve %43 oranlarında azalmıştır.



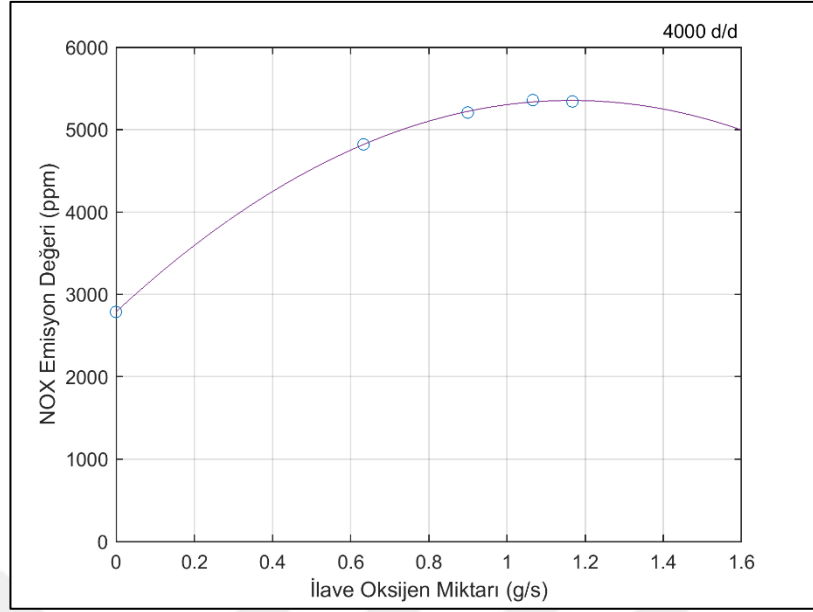
**Şekil 4.28** 4000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve CO<sub>2</sub> emisyon (%) grafiği

Şekil 4.28’de görüldüğü üzere CO<sub>2</sub> emisyonları, artış göstermektedir. Bu durum literatür araştırmalarında görülen, bilinen bir durumdur. Oksijen ilavesiz durumda %12,52 oranında CO<sub>2</sub> emisyonu oluşmaktadır. CO<sub>2</sub> emisyonları artan oksijen oranları ile birlikte artmaktadır. Ortalama 0,94 g/s oksijen debisinde, %12,88 CO<sub>2</sub> emisyonu oluşmuştur ve artış oranı %2,84’tür.



**Şekil 4.29** 4000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve HC emisyon (ppm) grafiği

Şekil 4.29’da 4000 d/d çalışma hızında artan oksijen oranlarına karşın azalış gösteren HC emisyon eğrisi görülmektedir. Oksijen ilavesiz yanma sonucu 112 ppm HC açığa çıkmaktadır. Oksijen debisi 0,633 g/s’ye çıkartıldığında 71 ppm HC emisyonu oluşmaktadır. %36 oranında bir azalış söz konusudur. 1,167 g/s oksijen debisinde ise 59 ppm olarak ölçülen HC emisyonunda %47 oranında azalış görülmüştür.



**Şekil 4.30** 4000 d/d çalışma hızında ilave oksijen miktarı ve NO<sub>x</sub> emisyon (ppm) grafiği

Şekil 4.30'da, silindirlere gönderilen yanma havası içerisinde oksijen oranı arttığında NO<sub>x</sub> emisyonunun arttığı görülmektedir. Atmosfer havası ile yanma sonucunda 2788 ppm NO<sub>x</sub> açığa çıkmıştır. 0,633 g/s oksijen debisinde 4822 ppm açığa çıkmıştır. 0,9 g/s oksijen debisinde ise 5208 ppm açığa çıkmıştır. Sırasıyla 1,066 g/s ve 1,167 g/s oksijen oranlarında 5358 ve 5343 ppm NO<sub>x</sub> açığa çıkmıştır. Yaklaşık olarak %90 civarında bir artış görülmüştür.

## 5.SONUÇ

İçten yanmalı motorlarda performans artırmak ve açığa çıkan emisyonları düşürmek için sürekli çalışmalar yapılmaktadır. Motorlar üzerinde farklı teknolojiler uygulanmakta, farklı yakıt türleri denenmektedir. Bu çalışmaların yapılmasındaki teşvik nedenlerinden biri, motorlu taşıt kaynaklı açığa çıkan emisyonların mümkün olan en alt merteye sınırına çekilmesi için yasal zorunlulukların getirilmesidir. Artan emisyonlar sebebiyle, atmosfer havası ve çevre olumsuz etkilenmekte ve direkt olarak insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri görülmektedir.

Emisyon oluşumlarının, araç çalışma periyotları dağılımı incelendiğinde, araçlar ısınma periyodunda iken normal çalışma periyodundan daha yüksek oranlarda emisyon açığa çıkardığı yapılan ölçümler ile elde edilmiştir. Bu sebep ile, emme havasını oksijence zenginleştirme işlemi araç ilk çalıştırma esnasından, normal çalışma periyoduna geçerken bir diğer ifade ile ısınma periyodunda yapılmıştır ve ısınma periyodunda oluşan emisyonları azaltmak amaçlanmıştır.

Emme havasını, dolayısıyla silindirlere gönderilen yanma havasının oksijence zenginleştirilmesiyle birlikte, yanma sonucunda açığa çıkan emisyon değerleri, motor efektif güç, moment, efektif özgül yakıt tüketimi ve efektif verim değerleri ölçülmüş ve hesaplanmıştır.

Egzoz emisyon ürünlerinden olan hidrokarbon, yakıtın yanmaya katılmamasından dolayı oluşmaktadır. Oksijence zenginleştirmesiz yanma durumunda motor çalışma hızı 2000 d/d'dan, 4000 d/d'ya yükseltildiğinde, hidrokarbon emisyonlarının %32 oranında arttığı tespit edilmiştir. Bu da motorun çalışma hızı artırıldığında, yakıt tüketim miktarının artması ve orantılı olarak açığa çıkan hidrokarbon emisyonun yükseldiğini ifade etmektedir. Emme havası oksijence zenginleştirildiğinde, hidrokarbon emisyonlarında en fazla düşüş, 4000 d/d çalışma hızında görülmüştür. 112 ppm' den 59 ppm seviyelerine kadar düşüş kaydedilmiştir. Bu düşüş %47,32 oranına karşılık gelmektedir. Silindir içerisine çekilen yakıtın, emme havasına ilave edilen oksijen ile buluşması ve yanmanın iyileştirilmesi ile yanmamış hidrokarbon emisyonlarının azaltılması sağlanmıştır.

Karbonmonoksit emisyonları göz önüne alındığında, yanma sürecince yeterli oksijen ile buluşamayan karbon atomlarının, karbonmonoksit emisyon oluşumunu artırdığı görülmektedir. Silindirlere, oksijence zenginleştirilmiş yanma havası gönderilmesi sonucunda, serbest oksijen oranı artmış ve karbonmonoksit emisyonları azaltılmıştır. Karbonmonoksit emisyonlarında, 2000 d/d motor çalışma hızında ortalama olarak %56, 2500 d/d motor çalışma hızında ortalama %55, 3000 d/d motor çalışma hızında ortalama %41, 3500 d/d motor çalışma hızında ortalama %51 ve 4000 d/d motor çalışma hızında ortalama olarak %38 oranlarında düşüş görülmüştür. Artan oksijen miktarı ile karbonmonoksit emisyonlarının azaltılmasında oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Karbondioksit emisyonları beklenildiği gibi, artan oksijen miktarı ile beraber yakıt içerisindeki karbon moleküllerinin serbest olarak dolaşan oksijen ile bileşik oluşturması nedeniyle artış göstermiştir. Silindirler içerisinde artan oksijen konsantrasyonu ile karbonmonoksidin, karbondioksite oksidasyonu sağlanmıştır. Ölçülen karbondioksit emisyon değerlerinde, ortalama olarak 2000 d/d'da %4,96, 2500 d/d'da %3,33, 3000 d/d'da %3,92, 3500 d/d'da %4 ve 4000 d/d'da %2.84 oranlarında artış görülmüştür. Genel olarak efektif özgül yakıt tüketiminin düşüyor olması ve karbondioksit emisyonunun ise artıyor olması beklenen bir durumdur.

Emme havası içerisinde oksijen konsantrasyonunun artmasına bağlı olarak alev hızında artmakta ve silindir içi sıcaklıklar yükselmektedir ve buna bağlı olarak NO<sub>x</sub> emisyon değerinin artmakta olduğu tespit edilmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonu, silindirler içerisinde mevcut oksijen konsantrasyonunun artması ve buna bağlı olarak silindir içerisinde sıcaklıkların artması nedeniyle azot ve oksijen moleküllerinin kimyasal olarak birleşmesiyle yükselmiştir. Buna ilave olarak emme havasını oksijence zenginleştirdiğimizde, yanma esnasında oksijen miktarında arttığından NO<sub>x</sub> emisyonunda artması beklenmektedir.

Emme havasını oksijence zenginleştirmenin, motor efektif güç ve moment parametreleri üzerinde de olumlu etkileri olduğu tespit edilmiştir.

Motor efektif güç değerleri incelendiğinde, 2000 d/d'da ortalama %3,71, 2500 d/d'da ortalama %1,33 artış meydana gelmiştir. 3000 d/d'da oksijen ilavesiz durum ile hemen hemen aynı değerler elde edilmiştir. 3500 d/d'da oksijence zenginleştirme işlemi sonrasında artan oksijen konsantrasyonlarında artışlar meydana gelmiştir.

4000 d/d'da oksijence zenginleştirme ile motor efektif güç değerinde ortalama %9,5 artış tespit edilmiştir. Emme havasını oksijen ile zenginleştirme işlemiyle beraber, alev nüvesinin oluşum süresi kısalmış, alev hızı ve sıcaklığı yükselmiştir. Böylece motor efektif gücü artış göstermiştir. Motor hızı sabit olduğundan dolayı, tüm motor çalışma hızları ve oksijen oranları için motor momenti ve motor efektif gücü aynı eğrilerde seyretmiştir.

Özetle emme havasını oksijence zenginleştirme sonucunda azaltılması hedeflenen emisyon değerlerinin azaltılmış olduğu tespit edilmiştir. Motor performans parametre değerlerinde artış elde edilmiştir. Özellikle aracın ısınma periyodunda çalışması sırasında açığa çıkan yüksek oranlardaki emisyonların düşürülmesi sağlanmıştır.

Motorlu taşıt kaynaklı emisyonların hedeflenen emisyon seviyelerine indirgenebilmesi için oksijence zenginleştirmenin alternatif bir yöntem olduğu, yanma reaksiyonlarını geliştirdiği ispatlanmıştır.

Efektif özgül yakıt tüketiminde, özellikle 3500 ve 4000 d/d motor çalışma hızlarında artan oksijen konsantrasyonları ile önemli düşüşler olduğu görülmüştür. Buna ilave olarak motor efektif gücünde ve motor momentinde artış sağlanmıştır.

Efektif verim grafikleri incelendiğinde 2000, 2500, 3000 d/d motor çalışma hızlarında, oksijen ilavesiz durum ile oksijen ilaveli durumlarda, yaklaşık değerlerde olduğu hesaplamalar sonucu elde edilmiştir. 3500 ve 4000 d/d motor çalışma hızlarında ise 1,167 g/s oksijen oranları için sırasıyla %2,6 ve %4,2 oranlarında artış sağlanmıştır.

Motor ısınma periyodunda iken, LPG yakıtının gaz fazında silindir içerisine gönderilmesinden dolayı karışımın elektriksel iletkenliği zayıftır. Bu nedenle alev nüvesi oluşum hızı düşüktür ve zaman almaktadır. Emme havasının oksijence zenginleştirilmesi ile alev hızı ve sıcaklığının artması ve yanma sonu sıcaklıklarının artmasıyla yanma veriminde iyileşme görülmüştür.

Deneyler süresince, oksijence zenginleştirilmiş emme havasının yanması sonucunda sıcaklıklar artmasına rağmen motorda herhangi bir vurutuya rastlanmamıştır.

## KAYNAKLAR

- Anonim, 2010.** Otomobil teknoloji platformu, Elektrikli araç çalışma raporu. <http://www.otev.org.tr/pdf/ELEKTRIKLI-ARAC-CALISMA-GRUBU-RAPORU-V.1-09.11.2010.pdf>-(Erişim Tarihi: 08.02.2018)
- Anonim, 2014.** T.C. Kalkınma Bakanlığı, Onuncu Kalkınma Planı (2014-2018), Otomotiv sanayi çalışma grubu raporu, Ankara, <http://www.kalkinma.gov.tr/Lists/zel%20htisas%20Komisyonu%20Raporlar/Attachments/236/Otomotiv%20Sanayi.pdf>-(Erişim Tarihi: 07.02.2018).
- Anonim, 2015.** Number of passenger cars and commercial vehicles in use worldwide from 2006 to 2015. <https://www.statista.com/statistics/281134/number-of-vehicles-in-use-worldwide/>-(Erişim Tarihi: 08.02.2018).
- Anonim, 2016.** Ülkelerin 2016 yılı içerisinde otomotiv sektöründe toplam araç üretim verileri. <http://www.oica.net/category/production-statistics/2016-statistics/>-(Erişim Tarihi: 08.02.2018).
- Anonim, 2018a.** Bilgi merkezi, petrol. Dünya petrol rezervleri, üretim miktarları ve dağılımları. <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Petrol->(Erişim tarihi: 07.02.2018).
- Anonim, 2018b.** Türkiye İstatistik Kurumu, haber bülteni, motorlu kara taşıtları, şubat 2018, <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=27640->(Erişim Tarihi: 06.02.2018.)
- Amin, A. N. 2009.** Reducing Emissions from Private Cars: Incentive measures. UNEP-Green Economy Initiative, Jakarta.
- Amirshakari, M. 2012.** Investigation of oxygen enriched air intake on diesel engine exhaust emissions. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, 5(3), 15.
- Baskar, P., Senthilkumar, A. 2016.** Effects of oxygen enriched combustion on pollution and performance characteristics of a diesel engine. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(1): 438-443.
- Baukal Jr, C. E. 2010.** Oxygen-enhanced combustion. CRC press.
- Bielaczyc, P., Merkisz, J. 1998.** Cold start emissions investigation at different ambient temperature conditions. *SAE Technical Paper*.
- Callaghan, K., Nemser, S., Johanson, W., 1999.** Oxygen enriching membranes for reduced cold start emissions, *Society of Automotive Engineers Technical Paper*.
- Catapano, F., Di Iorio, S., Luise, L., Sementa, P., Vaglieco, B. M. 2016.** Experimental analysis of O<sub>2</sub> addition on engine performance and exhaust emissions from a small displacement SI engine, *Society of Automotive Engineers Technical Paper*.
- Caton, J. A. 2005.** Use of a cycle simulation incorporating the second law of thermodynamics: results for spark-ignition engines using oxygen enriched combustion air, *Society of Automotive Engineers Technical Paper*.
- Erkuş, B., Karamangil, M.İ., Sürmen, A., 2015.** Enhancing the heavy load performance of a gasoline engine converted for LPG use by modifying the ignition timings. *Applied Thermal Engineering*, 85: 188-194.
- Erkuş, B. 2011.** Otto motorlarının farklı yakıt tiplerinde optimum performanslarının araştırılması. *Doktora Tezi*, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

- Han, B., Chu, J. 2011.** Study on Emission Control of Gasoline Engines during Cold-Start Period Based on Oxygen-Enriched Combustion. *In ICCTP 2011: Towards Sustainable Transportation Systems*, 3814-3819.
- Heywood, J.B. 1998.** Internal Combustion Engines Fundamentals. McGraw-Hill, New York, USA, 504-541.
- Kajitani, S., Sawa, N., McComiskey, T., Rhee, K. T. 1992.** A spark ignition engine operated by oxygen enriched air, *Society of Automotive Engineers Technical Paper*.
- Lewis, B., Von Elbe, G. 2012.** Combustion, flames and explosions of gases. Elsevier, New York, USA, 731 pp.
- Li, S., Guan, Q., Zhang, W. 2008.** Experimental Research on the Effects of Oxygen-Enriched Air on Combustion in a Small Spark-Ignition Engine. *In Transportation and Development Innovative Best Practices*, 357-362.
- Li, G., Li, L., Qiao, X., Xiao, G., Qiu, D. 2006.** Oxygen-enriched combustion of the first cycle during cold start in a liquefied petroleum gas spark-ignition engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 220(9): 1265-1274.
- Li, S., Zhang, W. 2009.** Reaction Parameter and Dynamical Performance of Gasoline Engine with Oxygen-Enriched Combustion. *In International Conference on Transportation Engineering*, 3988-3993.
- Li, S. 2010.** Emissions Performance Study of Oxygen-enriched combustion on Spark-ignition Engine at Cold-start. *In Intelligent Computation Technology and Automation, International Conference on The Institute of Electrical and Electronics Engineers*, (2) 204-207.
- Li, S., Yao, C., Chu, J., Han, B., Li, X. 2011.** Parameter Study of Combustion Process in Spark Ignition Engine under Oxygen-Enriched Air, *International Conference on Thermal Engineering*, 2497-2502.
- Masimalai, S., Kuppusamy, V., Mayakrishnan, J. 2015.** Assessment of Performance, Emission and Combustion Behaviour of a WCO Based Diesel Engine Using Oxygen Enrichment Technique, *Society of Automotive Engineers Technical Paper*.
- Maxwell, T. T., Setty, V., Jones, J. C., Narayan, R. 1993.** The effect of oxygen enriched air on the performance and emissions of an internal combustion engines, *Society of Automotive Engineers Technical Paper*.
- Ng, H. K., Sekar, R. R., Kraft, S. W., Stamper, K. R. 1993.** The potential benefits of intake air oxygen enrichment in spark ignition engine powered vehicle. *Society Automotive Engineers Technical of Paper*.
- Ng, H. K., Sekar, R. R., 1994.** Potential benefits of oxygen-enriched intake air in a vehicle powered by a spark-ignition engine. Argonne National Lab., United States.
- Öztürk, Z. 1999.** Motorlu araçlardan oluşan kirlilik ve egzoz emisyon regülasyonları. 2. Ulaşım ve trafik kongresi-sergisi bildiriler kitabı, 29 Eylül - 02 Ekim 1999, Ankara.
- Pişkin, S., 2017.** Otomotiv sektör raporu, Türkiye otomotiv sanayii rekabet gücü ve talep dinamikleri perspektifinde 2020 iç Pazar beklentileri, [http://www.osd.org.tr/sites/1/upload/files/Otomotiv\\_Sektor\\_Raporu\\_TSKB-2208.pdf](http://www.osd.org.tr/sites/1/upload/files/Otomotiv_Sektor_Raporu_TSKB-2208.pdf)-(Erişim Tarihi: 07.02.2018).
- Poola, R. B., Ng, H. K., Sekar, R. R., Baudino, J. H., Colucci, C. P. 1995.** Utilizing intake-air oxygen-enrichment technology to reduce cold-phase emissions, *Society Automotive Engineers Technical Paper*.
- Pulkrabek, W. W. 1997.** Engineering fundamentals of the internal combustion engine, 621.43 P8.



- Said, A. O., Gupta, A. K. 2015.** Oxygen Enriched Air Effects on Combustion, Emission and Distributed Reaction. *Journal of Energy Resources Technology*, 137(4): 042203.
- Sakleshpur Nagaraja, S., Nagaraj, C., GN, K. 2015.** Computational and experimental study on oxygen enriched intake of a spark ignition engine. *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska*, 17(3).
- Soruşbay, C. 1988.** İçten Yanmalı Motorlarda Egzoz Gazları Emisyonları, Ders Notları, İ.T.Ü. Makina Fakültesi, İstanbul.
- Sürmen, A., Karamangil, M. İ., Arslan, R., 2004.** Motor termodinamiği. Alfa Aktüel Yayınları, 2.Baskı, 244s.
- Uyumaz, A., Fahrettin, B. O. Z., Yılmaz, E., Solmaz, H., Polat, S. 2017.** Taşıt Egzoz Emisyonlarını Azaltma Yöntemlerindeki Gelişmeler, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 8(Özel 1): 15-24.
- Zhou, J., Richard, S., Mounaïm-Rousselle, C., Foucher, F. 2013.** Effects of Controlling Oxygen Concentration on the Performance, Emission and Combustion Characteristics in a Downsized SI Engine, *Society Automotive Engineers Technical Paper*.
- Wu, Y. Y., Huang, K. D. 2007.** Improving the performance of a small spark-ignition engine by using oxygen-enriched intake air, *Society Automotive Engineers Technical Paper*.

## ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı** : Niyazi BASKIN  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Bursa, 1991  
**Yabancı Dili** : İngilizce

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

**Lise** : Bursa Anadolu Erkek Lisesi/ 2009  
**Lisans** : Balıkesir Üniversitesi, Makine Mühendisliği/2014  
**Lisans** : Anadolu Üniversitesi, İşletme, 2015  
**Yüksek Lisans** : Balıkesir Üniversitesi, Makine Mühendisliği,2017

**İletişim(e-posta)** : niyazibaskin@gmail.com

### Yüksek Lisans Tezi

**Baskın, N. 2017.**Bir soğuk hava deposunda farklı kontrol yöntemlerinin enerji verimliliği yönüyle karşılaştırmalı analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, BAÜN Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir.

### Makale

**Baskın, N, Erkuş, B, Bulut, E, Çiçek, A, Türköz, N. 2018.** LPG yakıtlı buji ateşlemeli motorun ısınma periyodunda oksijen ile zenginleştirilmiş emme havasının performans ve egzoz emisyonlarına olan etkilerinin incelenmesi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 23 (1), 403-416.