



**BENZİNLİ MOTORDA FARKLI SIKIŞTIRMA  
ORANLARINDA BÜTANOL KULLANIMININ  
MOTOR PARAMETRELERİNE ETKİSİNİN  
DENEYSEL VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE  
İNCELENMESİ**

**2025  
DOKTORA TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Mehmet Cem MENTEŞ**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Mustafa Bahattin ÇELİK**

**BENZİNLİ MOTORDA FARKLI SIKIŞTIRMA ORANLARINDA  
BÜTANOL KULLANIMININ MOTOR PARAMETRELERİNE ETKİSİNİN  
DENEYSEL VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE İNCELENMESİ**

**Mehmet Cem MENTEŞ**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Mustafa Bahattin ÇELİK**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında  
Doktora Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Ocak 2025**

Mehmet Cem MENTEŞ tarafından hazırlanan “BENZİNLİ MOTORDA FARKLI SIKIŞTIRMA ORANLARINDA BÜTANOL KULLANIMININ MOTOR PARAMETRELERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa Bahattin ÇELİK .....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Süleyman ŞİMŞEK .....

İkinci Danışman, İAÜ Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 16/01/2025

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Mehmet ŞEN (BAİBÜ) .....

Üye : Prof. Dr. Mustafa Bahattin ÇELİK (KBÜ) .....

Üye : Doç. Dr. Bahadır ACAR (KBÜ) .....

Üye : Doç. Dr. Samet USLU (KBÜ) .....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mustafa AYDIN (PAÜ) .....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN .....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Mehmet Cem MENTEŞ

## ÖZET

Doktora Tezi

### BENZİNLİ MOTORDA FARKLI SIKIŞTIRMA ORANLARINDA BÜTANOL KULLANIMININ MOTOR PARAMETRELERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE İNCELENMESİ

Mehmet Cem MENTEŞ

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Mustafa Bahattin ÇELİK

Ocak 2025, 97 sayfa

Bu çalışmada, performans ve emisyonları iyileştirmek amacıyla tek silindirli 4 zamanlı benzinli bir motorun sıkıştırma oranı artırılmış ve benzin içerisine belirli oranlarda izobütanol eklenmiştir. İzobütanol-benzin karışımları İ5, İ10, İ15, İ20 olacak şekilde oluşturulmuştur. Deney motoru; 4 farklı sıkıştırma oranıyla (7,4/1; 8,2/1; 8,62/1 ve 9,36/1) benzin/izobütanol karışımları ve saf benzin yakıtıyla test edilmiştir. Motor deneyleri, sabit devirde (3000 d/d) ve 5 farklı yükte (1 kW, 2 kW, 3 kW, 4 kW, 5 kW) gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre artan sıkıştırma oranıyla birlikte FÖYT’de azalma FEV’de artış kaydedilmiştir. Diğer taraftan SO artışı CO emisyonlarının düşmesine katkıda bulunurken HC ve NOx emisyonlarını artırmıştır. Benzin yakıtı içerisindeki miktarının

artması ile CO, HC ve NOx emisyonlarında sırayla benzinli çalışmaya göre yaklaşık olarak %97, %75 ve %28 oranlarında azalma sağlanmıştır. Maksimum silindir içi gaz basıncı değeri 35,65 bar olarak 9,36:1 SO'da ve İ20 yakıtı ile ÜÖN'den 18° sonra elde edilmiştir. Aynı SO ve motor yükünde benzinle yapılan çalışmayla kıyaslandığında yaklaşık %11,7 arttığı belirlenmiştir.

Motor performans değerleri için gerçekleştirilen YSA ile tahmin uygulamaları sonucunda ortalama mutlak yüzdesel hata (MAPE) FÖYT ve FEV değerleri için sırasıyla 0,06; 0,11 olarak bulunmuştur. Deneysel sonuçlara yakınsamanın bir ölçütü olan  $R^2$  değerleri ise 0,96 ve 0,94 olarak bulunmuştur. CO, HC ve NOx emisyonları için MAPE değeri sırasıyla 0,74; 0,28 ve 0,25 olarak hesaplanmıştır.  $R^2$  değerleri ise 0,92; 0,86 ve 0,98 olarak bulunmuştur. Motor performans ve egzoz emisyon değerleri için YSA sonuçlarının kabul edilebilir düzeylerde olduğu görülmüştür.

**Anahtar Sözcükler :** Alternatif yakıt, İzobütanol, Egzoz emisyonları, Sıkıştırma oranı, Yapay sinir ağları.

**Bilim Kodu** : 91413

## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

# **EXPERIMENTAL AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORK INVESTIGATION OF THE EFFECT OF BUTANOL USE AT DIFFERENT COMPRESSION RATIOS ON ENGINE PARAMETERS IN GASOLINE ENGINE**

**Mehmet Cem MENTEŞ**

**Karabük University  
Institute of Graduate Programs  
Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Mustafa Bahattin ÇELİK**

**January 2025, 97 pages**

In this study, the compression ratio of a single-cylinder 4-stroke gasoline engine was increased and isobutanol was added to the gasoline at certain rates in order to improve performance and emissions. Isobutanol-gasoline mixtures were created as İ5, İ10, İ15, İ20. The test engine was tested with gasoline/isobutanol mixtures and pure gasoline fuel with 4 different compression ratios (7.4/1; 8.2/1; 8.62/1 and 9.36/1). Engine tests were carried out at constant speed (3000 rpm) and 5 different loads (1 kW, 2 kW, 3 kW, 4 kW, 5 kW).

According to the test results, a decrease in BSFC and an increase in BTE were recorded with the increasing compression ratio. On the other hand, the increase in SO contributed to the decrease in CO emissions and increased HC and NO<sub>x</sub> emissions.

With the increase in the amount of isobutanol in gasoline fuel, CO, HC and NO<sub>x</sub> emissions were reduced by approximately 97%, 75% and 28%, respectively, compared to gasoline operation. The maximum in-cylinder gas pressure value was obtained at 35.65 bar at 9.36:1 CR and 18° after TDC with İ20 fuel. It was determined that it increased by approximately 11.7% when compared to the operation with gasoline at the same CR and engine load.

As a result of the ANN estimation applications performed for engine performance values, the mean absolute percentage error (MAPE) was found to be 0.06 and 0.11 for BSFC and BTE values, respectively. R<sup>2</sup> values, which are a measure of convergence to experimental results, were found to be 0.96 and 0.94. MAPE values for CO, HC and NO<sub>x</sub> emissions were calculated as 0.74; 0.28 and 0.25, respectively. R<sup>2</sup> values were 0.92; It was found to be 0.86 and 0.98. It was observed that the ANN results for engine performance and exhaust emission values were at acceptable levels.

**Key Word** : Alternative fuel, Isobutanol, Exhaust emissions, Compression ratio, Artificial neural networks.

**Science Code** : 91413

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve deneyimlerini paylaşarak akademik gelişmemde büyük rol oynayan, çok değerli hocam Prof. Dr. Mustafa Bahattin ÇELİK'e kattığı değer için saygı ve sevgilerimi sunarım.

Tez sürecimin her aşamasında değerli zamanını ayıran, desteğini esirgemeyen, bilgisi, tecrübesi, yorumları ve tavsiyeleriyle rehberlik eden, Sayın Doç. Dr. Samet USLU'ya ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi. Mustafa AYDIN'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimine başladığımdan ilk günden bugüne beraber yol aldığım değerli yol arkadaşım Öğr. Gör. Sedat ŞEN'e ve deney seti kurulumunda deneylerin gerçekleştirilmesinde değerli zamanını ayıran değerli arkadaşım Öğr. Gör. Yavuz Selim ARI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Yapay sinir ağları uygulamalarında yaptığı katkılardan dolayı değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Erhan BERGİL'e ve değerli arkadaşım Doç. Dr. Boğaçhan BAŞARAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 221M761 numaralı proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı tüm çalışanlarına teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca desteklerini ve sevgilerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli aileme, çalışmalarım boyunca gösterdiği destek için sevgili eşime, biricik kızıma tüm kalbimle sonsuz teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL .....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	5
LİTERATÜR TARAMASI.....	5
BÖLÜM 3 .....	14
BUJİ ATEŞLEMELİ MOTORLARDA KULLANILAN ALKOL YAKITLAR ....	14
3.1. ETANOL .....	14
3.2. METANOL .....	16
3.3. BÜTANOL .....	17
3.3.1. İzobütanol Üretimi.....	18
BÖLÜM 4 .....	20
BUJİ ATEŞLEMELİ MOTORLARDA PERFORMANS VE EMİSYONLAR .....	20
4.1. SIKIŞTIRMA ORANI .....	20
4.2. SIKIŞTIRMA ORANININ FREN EFEKTİF GÜCÜNE VE FREN ÖZGÜL YAKIT TÜKETİMİNE ETKİSİ .....	21
4.3. BUJİ ATEŞLEMELİ MOTORLARDA YANMA VE EMİSYONLAR .....	23

	<u>Sayfa</u>
4.3.1. Tam Yanma .....	23
4.3.2. Teorik Tam Yanma.....	23
4.3.3. Eksik Yanma.....	23
4.3.4. Kısmi Eksik Yanma.....	24
4.3.5. Buji Ateşlemeli Motorlarda Egzoz Emisyonları.....	24
4.3.5.1. HC Emisyonları .....	24
4.3.5.2. CO Emisyonları .....	25
4.3.5.3. NOx Emisyonları .....	25
BÖLÜM 5 .....	28
MATERYAL YÖNTEM .....	28
5.1. DENEY DÜZENEGİ .....	28
5.1.1. Jeneratör Ve Deney Motoru.....	29
5.1.2. PLC Kontrol Ünitesi .....	30
5.1.3. Veri Toplama Kartı (Daq Card).....	30
5.1.4. LabVIEW Yazılımı.....	31
5.1.5. Yakıt Tüketimi Ölçümü.....	32
5.1.6. Emisyon Ölçüm Cihazı.....	33
5.1.7. Silindir İçi Gaz Basıncı Ölçüm Sistemi.....	34
5.2. SIKIŞTIRMA ORANI .....	36
5.3. DENEYLERDE KULLANILAN HESAPLAMALAR .....	38
5.3.1. Fren Özgül Yakıt Tüketimi (FÖYT).....	38
5.3.2. Fren Efektif Verim (FEV) .....	39
5.3.3. Silindir İçi Gaz Basıncı (SİGB).....	39
5. 4. YAPAY SİNİR AĞLARI.....	41
5.4.1. İleri Beslemeli Ağlar.....	43
5.4.2. Geri Beslemeli Ağlar .....	44
5.4.3. Yapay Sinir Ağları Performans Ölçümleri Ve Hata Hesaplamaları.....	45
5.4.3.1. Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error – MAE) .....	45
5.4.3.2. Ortalama Mutlak Yüzdese Hata (Mean Absolute Percentage Error- (MAPE).....	45
5.4.3.3. Kök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Square Error – Rmse).....	46

## Sayfa

5.4.3.4.Ortalama Kare Hatası (Mean Square Error – MSE) .....	46
5.5. MATLAB YAPAY SİNİR AĞLARI UYGULAMASI (NN TOOLBOX) ...	47
BÖLÜM 6 .....	52
BULGULAR VE TARTIŞMA .....	52
6.1. MOTOR PERFORMANSI.....	52
6.1.2. Fren Özgül Yakıt Tüketimi.....	52
6.1.3. Fren Efektif Verim.....	57
6.2. EGZOZ EMİSYONLARI .....	61
6.2.1. Karbonmonoksit .....	61
6.2.2. Hidrokarbon.....	65
7.2.3. Azotoksit.....	70
6.3. SİLİNDİR İÇİ GAZ BASINCI .....	74
6.4. YAPAY SİNİR AĞI BULGULARI.....	78
6.4.1. Deney Ve Tahmin Bulgularının Kıyaslanması.....	78
6.4.2. Motor Performans Parametreleri İçin YSA Sonuçları.....	79
6.4.2.1. Fren Özgül Yakıt Tüketimi İçin YSA İle Tahmin .....	79
6.4.2.2. Fren Efektif Verim İçin YSA İle Tahmin .....	80
6.4.3. Emisyonlar İçin YSA İle Tahmin .....	82
6.4.3.1. Karbonmonoksit Emisyonu İçin YSA İle Tahmin.....	82
6.4.3.2. Hidrokarbon Emisyonu İçin YSA İle Tahmin .....	83
6.4.3.3. Azotoksit Emisyonu İçin YSA İle Tahmin .....	85
BÖLÜM 7 .....	87
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	87
KAYNAKLAR .....	89
ÖZGEÇMİŞ .....	97

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 4. 1.Sıkıştırma oranının motor gücüne etkisi [55] .....	21
Şekil 4. 2. Oktan sayısına bağlı vuruş sınırının değişimi [58].....	22
Şekil 4. 3. Hava Fazlalık Katsayısına göre emisyonların değişimi [56] .....	26
Şekil 5. 1. Deney setinin şematik görünümü.....	28
Şekil 5. 2. Jeneratör ve deney motoru .....	29
Şekil 5. 3. Deney seti kontrol panosu.....	30
Şekil 5. 4. Veri toplama kartı (DAQ Card).....	31
Şekil 5.5. Yakıt tüketimi ölçümlerine ve motor yükü kontrolüne ait LabVIEW blok diyagram görüntüsü.....	32
Şekil 5. 6. Elektronik terazi.....	33
Şekil 5. 7. Emisyon ölçüm cihazı.....	33
Şekil 5. 8. OPTRAND fiber-optik basınç sensörü .....	34
Şekil 5. 9. Krank mili enkoder bağlantısı.....	35
Şekil 5. 10. Silindir kapağı delme ve montaj işlemi .....	36
Şekil 5. 11. Standart motor yanma odası hacmi.....	37
Şekil 5. 12. Silindir kapak taşlama işlemleri.....	37
Şekil 5. 13. Filtreli ve filtresiz silindir basınç verileri.....	40
Şekil 5. 14. Yapay sinir ağı .....	41
Şekil 5. 15. Çok katmanlı yapay sinir ağı örneği .....	42
Şekil 5. 16. İleri beslemeli tek katmanlı yapay sinir ağı örneği.....	44
Şekil 5. 17. Geri beslemeli tek katmanlı yapay sinir ağı örneği .....	44
Şekil 5. 18. Matlab 2022a arayüzü üzerinde girdi ve çıktılar workspace aktarılması .....	47
Şekil 5. 19. Neural network uygulamasının açma komutu (nnstart).....	48
Şekil 5. 20. İntput-output fitting, regression, and curve-fitting (nftool) .....	48
Şekil 5. 21. Yapay sinir ağının genel yapısı.....	49
Şekil 5. 22. Yapay sinir ağının eğitiminde sonra model özeti .....	50
Şekil 5. 23. Yapay sinir ağının regresyon eğrileri.....	50

Şekil 5. 24. Yapay sinir ağı ile elde edilen çıktılarının aktarılması .....	51
Şekil 6. 1 Sıkıştırma oranına bağlı 1000W FÖYT değerleri.....	53
Şekil 6. 2. Sıkıştırma oranına bağlı 2000W FÖYT değerleri.....	54
Şekil 6. 3. Sıkıştırma oranına bağlı 3000W FÖYT değerleri.....	55
Şekil 6. 4. Sıkıştırma oranına bağlı 4000W FÖYT değerleri.....	56
Şekil 6. 5. Sıkıştırma oranına bağlı 5000W FÖYT değerleri.....	56
Şekil 6. 6. Sıkıştırma oranına bağlı 1000W FEV değerleri.....	58
Şekil 6. 7. Sıkıştırma oranına bağlı 2000W FEV değerleri.....	58
Şekil 6. 8. Sıkıştırma oranına bağlı 3000W FEV değerleri.....	59
Şekil 6. 9. Sıkıştırma oranına bağlı 4000W FEV değerleri.....	60
Şekil 6. 10. Sıkıştırma oranına bağlı 5000W FEV değerleri.....	60
Şekil 6. 11. Sıkıştırma oranına bağlı 1000W CO değerleri.....	62
Şekil 6. 12. Sıkıştırma oranına bağlı 2000W CO değerleri.....	63
Şekil 6. 13. Sıkıştırma oranına bağlı 3000W CO değerleri.....	64
Şekil 6. 14. Sıkıştırma oranına bağlı 4000W CO değerleri.....	64
Şekil 6. 15. Sıkıştırma oranına bağlı 5000W CO değerleri.....	65
Şekil 6. 16. Sıkıştırma oranına bağlı 1000W HC değerleri.....	66
Şekil 6. 17. Sıkıştırma oranına bağlı 2000W HC değerleri.....	67
Şekil 6. 18. Sıkıştırma oranına bağlı 3000W HC değerleri.....	68
Şekil 6. 19. Sıkıştırma oranına bağlı 4000W HC değerleri.....	69
Şekil 6. 20. Sıkıştırma oranına bağlı 5000W HC değerleri.....	69
Şekil 6. 21. Sıkıştırma oranına bağlı 1000W NOx değerleri .....	71
Şekil 6. 22. Sıkıştırma oranına bağlı 2000W NOx değerleri .....	72
Şekil 6. 23. Sıkıştırma oranına bağlı 3000W NOx değerleri .....	72
Şekil 6. 24. Sıkıştırma oranına bağlı 4000W NOx değerleri .....	73
Şekil 6. 25. Sıkıştırma oranına bağlı 5000W NOx değerleri .....	74
Şekil 6. 26. SO 7.4:1'deki SİGB değişimi.....	75
Şekil 6. 27. SO 8.2:1'deki SİGB değişimi.....	76
Şekil 6. 28. SO 8,62:1'deki SİGB değişimi.....	76
Şekil 6. 29. SO 9,36:1'deki SİGB değişimi.....	77
Şekil 6. 30. FÖYT YSA model özeti .....	79
Şekil 6. 31. Deneysel olarak elde edilen FÖYT sonuçları ile YSA ile tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması .....	80
Şekil 6. 32. FEV YSA model özeti .....	81

## **Sayfa**

Şekil 6. 33. Deneysel olarak elde edilen FEV sonuçları ile YSA ile tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması .....	81
Şekil 6. 34. CO YSA model özeti .....	82
Şekil 6. 35. Deneysel olarak elde edilen CO sonuçları ile YSA ile tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması .....	83
Şekil 6. 36. HC YSA model özeti .....	84
Şekil 6. 37. Deneysel olarak elde edilen HC sonuçları ile YSA ile tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması .....	84
Şekil 6. 38. NOx YSA model özeti .....	85
Şekil 6. 39. Deneysel olarak elde edilen NOx sonuçları ile YSA ile tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması .....	86

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 3. 1. Benzin ve etanolün özellikleri [43].....	15
Çizelge 3. 2. Benzin ve metanol özellikleri [47].....	17
Çizelge 3. 3. Benzin ve bütanol özellikleri [52,53].....	19
Çizelge 5. 1. Deney motoru teknik özellikleri .....	29
Çizelge 5. 2. Emisyon ölçüm cihazı teknik özellikleri.....	34
Çizelge 5. 3. Basınç sensörü ve enkoderin teknik özellikleri .....	35
Çizelge 5. 4. Sıkıştırma oranları.....	38
Çizelge 5.5. Yapay sinir ağlarında kullanılan aktivasyon fonksiyonları [80].....	43
Çizelge 7. 1. Hata Ölçütleri.....	78

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

(A/F) <sub>s</sub>	: Stokiyometrik hava/yakıt oranı
CO	: Karbonmonoksit
HC	: Hidrokarbon
H <sub>u</sub>	: Yakıtın alt ısıl değeri
H <sub>2</sub> O	: Su
$\dot{m}$	: Kütlesel yakıt debisi
Me	: Efektif motor momenti
n	: Motor hızı
$\eta_e$	: Fren efektif verim
NO	: Azotoksit
NO <sub>2</sub>	: Azotdioksit
NO <sub>x</sub>	: Azotoksitler
O <sub>2</sub>	: Oksijen
P	: Sıkıştırma basıncı
Pe	: Efektif güç
Q <sub>n</sub>	: Yanma odasında ortaya çıkan net ısı
R	: Regresyon
S	: Sensör hassasiyeti
SO <sub>g</sub>	: Motorun gerçek sıkıştırma oranı değeri

## KISALTMALAR

ANN	: Artificial Neural Network (Yapay Sinir Ağları)
AÖN	: Alt Ölü Nokta
BA	: Buji Ateşlemeli
EGS	: Egzoz Gaz Sıcaklığı
FEV	: Fren Efektif Verim
FÖYT	: Fren Özgül Yakıt Tüketimi
HFK	: Hava Fazlalık Katsayısı
İ0	: %100 Benzin
İ5	: %95 Benzin + %5 İzobütanol
İ10	: %90 Benzin + %10 İzobütanol
İ15	: %85 Benzin + %15 İzobütanol
İ20	: %80 Benzin + %20 İzobütanol
İYM	: İçten Yanmalı Motor
KA	: Krank Açısı
MAE	: Mean Absolute Error (Ortalama Mutlak Hata)
MAPE	: Mean Absolute Percentage Error (Ortalama Mutlak Yüzdesele Hata)
MON	: Motor Octane Number (Motor Oktan Sayısı)
MRE	: Mean Relative Error (Ortalama Bağıl Hata)
RMSE	: Root Mean Square Error (Kök Ortalama Karesel Hata)
RON	: Research Octane Number (Araştırma Oktan Sayısı)
OS	: Oktan Sayısı
SİGB	: Silindir İçi Gaz Basıncı
SO	: Sıkıştırma Oranı
ÜÖN	: Üst Ölü Nokta
YZ	: Yapay Zekâ
YSA	: Yapay Sinir Ağı

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Tarih, dünya enerji tüketiminin sürekli olarak arttığını ve son iki yüzyılda enerji tüketiminde de büyük bir artış olduğunu göstermektedir. Bu istikrarlı artışın nedenleri arasında insan yaşam kalitesindeki gelişmeler, nüfus artışı, sanayileşme, gelişmekte olan ülkelerin hızlı ekonomik büyümesi yer almaktadır [1]. Gelişmelere bağlı olarak yüksek enerji ihtiyacı ve sınırlı kaynaklardan dolayı alternatif yakıtlara olan ilgiyi gün geçtikçe artırmaktadır [2].

Taşıt emisyonları küresel düzeyde hava kalitesi ve insan sağlığı üzerinde önemli derece olumsuz etkiye neden olmaktadır. Çevresel sınırlamalar ve yakıt maliyetleri nedeniyle yanma endüstrisi tarafından yakıt verimliliği ve emisyonların azaltılması istenmektedir [3]. Özellikle düşük güçlü (motor gücü 25 HP den küçük) benzinli motorlar hava soğutmalı olduğu için düşük sıkıştırma oranlarıyla ve zengin karışımla çalıştıklarından verimleri düşük, emisyon değerleri yüksektir. Bu motorların performanslarını artırma ve emisyon değerlerini düşürme potansiyeli bulunmaktadır. Benzinli motorlar yaydıkları CO, HC ve NOx emisyonları ile hava kirliliğini artırmaktadır. Motor emisyonları küresel düzeyde hava kalitesi ve insan sağlığı üzerinde önemli derece olumsuz etkiye neden olmaktadır. Birçok ülkede düşük güçlü motorlar için de emisyon sınırlamaları getirilmiştir. Düşük güçlü motorlarda motor fiyatını artırdığı için elektronik kontrollü yakıt sistemi ve katalitik konvertör gibi egzoz kontrol sistemleri bulunmamaktadır. Bundan dolayı bu motorlarda emisyon değerleri yüksektir [4].

Emisyon değerlerinin düşürülmesinde yapısında oksijen bulunan alternatif yakıtların kullanımını etkili olmaktadır [5]. Buji ateşlemeli motorlarda alternatif yakıt olarak etanol, metanol, bütanol, LPG (Likit Petrol Gazı), doğal gaz ve hidrojen kullanılmaktadır.

Petrolden üretilen yakıtların buji ateşlemeli motorlarda yüksek oranda kirletici emisyonları nedeniyle, araştırmacılar mevcut motorlarda alternatif yakıt olarak kirletici emisyonları düşüren ve motor performansını arttıran alternatif yakıtları tercih etmektedirler. Petrolden üretilen yakıtların buji ateşlemeli motorlarda yüksek oranda kirletici emisyonları nedeniyle araştırmacıları mevcut motorlarda alternatif yakıt olarak kirletici emisyonları düşüren ve motor performansını önemli ölçüde arttıran biyolojik kaynaklardan üretilen yakıtların uygulanabilirliğini değerlendirmeye yöneltmiştir. Alkoller, benzin yakıtında oktan arttırıcı olarak diğer tüm katkı maddelerinin yerini aldıkları en popüler katkı maddeler olarak günümüzde kullanılmaktadır. Biyokütle yakıtlarından elde edilen yüksek oksijen içerikli ve yüksek oktan sayılı alkoller alternatif yakıtlar içerisinde önemli bir yere sahiptir [6,7].

Benzinli motorda alternatif yakıt olarak metanol ve etanol kullanılması durumunda, alkol-benzin karışımında faz ayrışması oluşmakta ve motor düzensiz çalışmaktadır. Mükemmel yakıt özelliklerine sahip bir kimyasal olan bütanol, benzin ve dizel yakıtlarla diğer alkollerden daha iyi karışmaktadır. Enerji içeriği etanolden %25 daha yüksek; buharlaşma oranı da benzin ve etanolden daha düşüktür. Ayrıca etanole göre çok daha az korozif olduğu için güncel sistemdeki borularla taşınabilmekte ve dağıtılabilmektedir [8]. Bütanolün 4 adet izomeri bulunmaktadır. Bunların içinde izobütanolün oktan sayısı diğerlerine göre daha yüksektir [9]. İzobütanol, alkol üretiminde yan ürün olarak çıkan fuzel yağının içerisinde hacimsel olarak yaklaşık %16,6 oranında bulunmaktadır. Motor modifikasyonu gerektirmeksizin İYM'lerde benzinle herhangi bir oranda karıştırılarak kullanılabilen bütanol çeşitli biyosentez yöntemlerle ve fuzel yağının destilasyonu ile elde edilebilen dört karbonlu bir yüksek alkol çeşididir [10].

İzobütanolün önemli avantajlarından biri mevcut benzin altyapısıyla uyumlu olmasıdır. Çalışmalar, izobütanolün geleneksel buji ateşlemeli (BA) motorların yakıt sisteminde değişiklik yapılmasını gerektirmeden benzinle etanolden daha yüksek konsantrasyonlarda karıştırılabileceğini göstermiştir. Çalışmalar, %70'e kadar izobütanol içeren karışımların modifiye edilmemiş motorlarda etkili bir şekilde kullanılabilceğini, saf izobütanolün ise düşük ortam sıcaklıklarında soğuk çalışma koşullarında zorluk çıkardığını göstermektedir [11]. Bu özellik izobütanolü, motor

performansı sorunlarından kaçınmak için tipik olarak daha düşük harmanlama oranları gerektiren etanole kıyasla yakıt harmanlama için daha çok yönlü bir seçenek haline getirmektedir [12]. Literatürde etanol, metanol ve bütanol ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmış olmasına karşın pek az çalışmada izobütanol karışımlarının performansa olan etkileri incelenmiştir [13–16].

Ayrıca, BA motorlarda izobütanolün yanması, genel motor stabilitesini ve performansını etkileyebilecek döngüden döngüye değişimlerle ilişkilendirilmiştir. Yapılan bir çalışmada, motorun çalışması üzerindeki etkisini tam olarak anlamak için izobütanolün yanma dinamikleri hakkında daha fazla araştırma yapılması gerektiği vurgulanmıştır [17]. Bu durum, BA motorlarda alternatif yakıtlar kullanılırken yanma parametrelerinin optimize edilmesinin önemine dikkat çeken diğer araştırmacıların bulgularıyla da örtüşmektedir [18].

Sıkıştırma oranı motor performansını artıran en önemli parametrelerden biridir. SO'nun artmasıyla motor verimi ve gücü artmaktadır. Hava soğutmalı tek silindirli motorların sıkıştırma oranları yüksek oktanlı yakıt kullanıldığında bir miktar daha artırılabilir. BA motorda yüksek SO'da izobütanol kullanımıyla vuruntu olmadan performans artırılabilir.

Buji ateşlemeli motorlardan kaynaklanan emisyonların ve performansın tahmin edilmesinde Yapay Sinir Ağlarının (YSA) uygulanması, motor performansı ve emisyonların doğasında bulunan karmaşık doğrusal olmayan ilişkileri modelleme yeteneği nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmüştür. Çok sayıda çalışma, farklı yakıt türleri ve motor konfigürasyonlarında azot oksitler (NO<sub>x</sub>), karbon monoksit (CO) ve hidrokarbonlar (HC) dahil olmak üzere çeşitli emisyon parametrelerinin tahmininde YSA'nın etkinliğini göstermiştir. Araştırmalar, farklı alternatif yakıtlarla çalışan BA motorlarda, YSA'nın motor performans değerlerini ve egzoz emisyonlarını etkili bir şekilde tahmin edebildiğini göstermektedir [19].

Bu çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, BA bir motorun sıkıştırma oranı artırılmış ve yakıt olarak yüksek oktan sayısına sahip izobütanol benzine eklenmiştir. Bu sayede benzin-

izobütanol karışımlarının daha yüksek sıkıştırma oranlarında kullanılması ile silindir içi yanma reaksiyonlarını iyileştirmesi sonucunda motor performansı ve emisyonları olumlu yönde etkilemesi hedeflenmiştir.

İkinci aşamada, YSA ile performans ve emisyon tahmini yapılmıştır. Deneysel sonuçlardan elde edilen verilerle geliştirilen YSA modeli ile performans ve emisyon tahmini yapılması da hedeflenmiştir.



## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde etanol, metanol gibi alkollerin buji ateşlemeli motorlarda kullanımı hakkında birçok araştırma bulunmaktadır. Ancak bütanolün bir izomeri olan izobütanol hakkında az sayıda çalışma bulunmaktadır. Ayrıca izobütanolün içten yanmalı motorlarda kullanımının yapay sinir ağları ile tahmini üzerine henüz bir çalışma yapılmamıştır. Aşağıda bütanol ve izobütanolün buji ateşlemeli (BA) motorlarda kullanımının hakkında yapılan çalışmalar verilmiştir. Son olarak buji ateşlemeli motorlarda alkol yakıtlarının kullanımının yapay sinir ağları ile tahmini içeren literatür çalışmaları verilmiştir.

Alasfour, izobütanol-benzin karışımlarının BA motorlarda kullanımının NOx emisyonlarına etkisini incelemiştir. Çalışmada giriş havasının ısıtılması ve yakıt/hava oranının NOx emisyonları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tek silindirli buji ateşlemeli bir motorda hacmen %30 izobütanol oranına sahip, 0.7-1.1 yakıt/hava oranları aralığında ve 1500 d/d motor devrinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Giriş havasının ısıtılmasının NOx emisyonlarının %10'luk bir artışa neden olduğunu, izobütanol kullanımının ise saf benzine kıyasla %9'luk bir azalışa neden olduğunu ifade etmiştir [20].

Alasfour, benzine metanol ve bütanol ilavesinin fren özgül yakıt tüketimine, termal verime ve egzoz gaz sıcaklıkları üzerinde etkisini deneysel olarak incelemiştir. Tek silindirli, buji ateşlemeli, yakıt enjeksiyonlu bir motorda, hacmen %30 alkol-benzin karışımları için yakıt/hava oranı 0,8-1,3 aralığında deneyler gerçekleştirmiştir. Alkol-benzin karışımlarının FÖYT'nin benzine kıyasla artmasına neden olduğunu, bütanol-benzin karışımının FÖYT değerinin metanol-benzin karışımının FÖYT değerinden daha az olduğu belirtmiştir. Alkol ilaveleri ile ısıl verimin ve egzoz gaz sıcaklığının azaldığını belirtmiştir [21].

Alasfour, buji ateşlemeli bir motorda hacimce %30 izobütanol-benzin karışımının HC emisyonlarına etkisini deneysel olarak incelemiştir. Deneysel yakıt/hava oranı, ateşleme zamanı ve motor hızı değişimlerinin HC emisyonları üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışmaya göre ateşleme avansının 6 (°KMA) artması HC emisyonlarını %12 azaltmıştır ve soğutma suyunun sıcaklığının 55°C' den 90°C' ye artması HC emisyonlarını %30 oranında azaltmıştır [22].

Rice vd, çalışmalarında bütanol-etanol ve metanol benzin karışımlarının 4 silindirli 4 zamanlı buji ateşlemeli bir motorda egzoz emisyonları ve fren özgül yakıt tüketimi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Belirli yakıt/hava oranı için alkol kullanımının yanmaya daha fazla oksijen sağladığını ve bu sayede CO'nun CO<sub>2</sub>'ye dönüşümünün sadece benzin kullanılan motora kıyasla daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Bu etkinin kullanılan alkoller içerisinde en çok oksijen içeriğine sahip olan metanol için belirgin olması gerektiğini ve %20 hacimli metanol karışımının kullanımı ile en düşük CO emisyonu gözlemlendiğini sunmuşlardır. İzobütanol etanol ve metanol karışımlarının testlerinde, özellikle zengin yakıt/hava oranları için alkol karışımlarında benzine kıyasla daha düşük CO ve NO<sub>x</sub> emisyonları gözlemlendiği belirtilmiştir. Etanol ve metanole kıyasla izobütanolün benzer özellikler sergilediği ancak ekonomik olarak uygun olmadığını ifade etmişlerdir [23].

Irimescu çalışmasında, buji ateşlemeli bir motorda benzin-izobütanol karışımlarını soğuk çalışma performansı ve emisyonları üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Hava-yakıt karışım parametreleri için basit bir termodinamik model geliştirmiştir. Hesaplanan sonuçlar ile ölçülen değerler kıyaslanmıştır. Teorik değerler ile deneysel çalışmalar arasında iyi bir uyum olduğunu gözlemlemiştir. Geliştirilen termodinamik modelle yapılan teorik çalışmalar, yakıt karışımındaki izobütanol içeriği arttıkça düşük ortam sıcaklıklarında buharlaşan yakıt fraksiyonunda önemli bir düşüş meydana geldiğini göstermiştir. Deneysel çalışmalar sırasında 20 °C'nin altındaki ortam sıcaklıklarında saf izobütanol kullanıldığında motor çalıştırılmamıştır. Soğuk çalışma yüksek alkol konsantrasyonlarında (IB70) çok zor olurken, IB50 için motor 5°C gibi düşük sıcaklıklarda bile çalıştırılabilmektedir. Tüm alkollerde olduğu gibi izobütanol de modifiye edilmemiş BA motorların soğuk mevsimlerde zayıf soğuk çalışma performansı sergilemesine neden olmaktadır [11].

İrimescu, bir başka çalışmasında, BA motorlarda yakıt olarak etanol yerine izobütanol kullanımının karşılaştırmalı avantajlarını açıklamaktadır. Benzinle harmanlanmış %10, %30 ve %50 izobütanol içeren karışımlarla beslenen port enjeksiyonlu bir motor üzerinde yakıt dönüşüm verimliliği üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Tüm motor devri ve yük aralığını kapsayan denemeler, güç ünitesinin benzin-izobütanol karışımları ile beslendiğinde yakıt dönüşüm verimliliğinde hafif bir düşüş sergilediğini ortaya koymuştur. Bağlı olarak, 2000-4000 devir/dakika aralığında çok düşük motor yükünde maksimum %12 verimlilik düşüşü kaydedilmiştir. Orta yük ve orta motor devri aralığında verimlilik düşüşü %8'in altındayken, %80 yükte verimlilik %6'dan fazla azalmamıştır. Verimliliğin yanı sıra performans seviyeleri, motorun saf benzinle çalıştırılmasına kıyasla her üç yakıt karışımı türü için de kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu belirtilmiştir. Bu sonuçlar izobütanolün BA motorlar için cazip bir yakıt olduğunu ve yakıt sisteminde veya diğer motor bileşenlerinde herhangi bir değişiklik yapılmadan etanole kıyasla çok daha yüksek konsantrasyonlarda benzinle harmanlanabileceğini göstermiştir [24].

Elfasakhany, benzin ve izobütanol-benzin karışımları ile beslenen BA motorun kirletici emisyonları ve performansı üzerine deneysel bir araştırma gerçekleştirmiştir. Motor, her bir karışım (%3, %7 ve %10 izobütanol) ve saf benzin için 2600-3400 d/d hız aralığında çalıştırılmıştır. Motor devri 2900 d/d değerlerine kadar CO ve HC emisyonlarının izobütanol ilavesi ile düştüğü ancak 2900 d/d sonra izobütanol-benzin karışımlarının saf benzinden daha yüksek CO ve HC emisyonu verdiğini ifade etmiştir. İzobütanol-benzin karışımlarının tüm motor hızları için daha düşük CO<sub>2</sub> emisyon değerleri elde edildiğini belirtmiştir. BA motorda herhangi bir motor ayarı yapılmadan izobütanol-benzin karışımlarının kullanılmasının tüm hız aralıklarında motor performansında düşüşe yol açtığı belirtilmiştir. Motor sistemi modifiye edilmeden, izobütanol-benzin karışımlarının eksik yanma gözlemlendiğini ancak motor sistemi optimize edildiğinde yanmanın iyileşeceğini sonuç olarak daha yüksek performans ve daha az emisyon elde edilebileceğini ifade etmiştir. Ayrıca çalışmada izobütanol-benzin karışımlarına benzer karışım oranları ve motor çalışma koşullarında n-bütanol-benzin karışımları test edilmiş ve benzin ile kıyaslanmıştır. Düşük motor devirlerinde n-bütanol-benzin karışımı izobütanol-benzin karışımından daha az CO emisyonu,

yüksek motor hızlarında ise daha fazla CO emisyonu elde edildiğini belirtmiştir. HC emisyonu düşük motor hızları için izobütanol-benzin karışımlarından daha yüksek, yüksek motor hızlarında ise daha az HC emisyonu gözlemlendiğini ifade etmiştir [25].

Yusoff vd. çalışmalarında, bütanol izomerleri (n-bütanol, sec-bütanol, tert-bütanol ve izobütanol) ile hacimsel olarak %20 oranında benzine karıştırmışlardır. Buji ateşlemeli bir motorda tam gaz durumunda 1000-5000 d/d aralığında motor testleri gerçekleştirmişlerdir. Motor torku, motor fren gücü ve fren özgül yakıt tüketiminin önemli ölçüde arttığını belirtmişlerdir. Bütanol izomerleri-benzin karışımları, daha yüksek motor devirlerinde saf benzine kıyasla biraz daha yüksek fren termal verimliliği ve egzoz gazı sıcaklığı sağladığı belirtmişlerdir. Ayrıca iBu20 yakıtının (%20 izobütanol-%80 benzin karışımı) test yakıtları içerisinde en yüksek motor torku, fren gücü ve fren termal verimliliği verdiğini belirtmişlerdir. İzobütanol ve n-bütanol karışımının en düşük CO ve HC emisyonlarına yol açtığı belirlenmiştir [26].

Zaharin vd., dört silindirli buji ateşlemeli bir motorda hacimce %10 etanol içeren etanol-benzin (E10) yakıtı içerisine hacimce %5, %10, %15 izobütanol ilave edildiğini ve bu yakıt karışımlarının motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkilerini incelediklerini ifade etmişlerdir. Etanol-benzin karışımına izobütanol katkısı ile tam yanma sağlandığı, en yüksek fren gücünün 68,93 kW değerinde E10B15 yakıtı ile üretildiğini, HC ve CO emisyonlarının karışımlardaki alkol oranı ve motor yükü arttıkça azaldığını belirlemişlerdir [15].

Sayın vd., yaptıkları çalışmada tek silindirli buji ateşlemeli bir motorda izobütanol (%10, %30 ve %50) karışimli benzin yakıtlarının motorun emisyon, performans ve yanma karakteristikleri üzerinde SO'nun etkisini incelemişlerdir. Testler üç farklı SO (9:1, 10:1 ve 11:1) için 2600 d/d'da ve tam gaz gaz kelebeği açıkken gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, tüm SO'larda yakıt karışımındaki izobütanol miktarının artmasıyla FÖYT'nin, FEV'nin ve CO<sub>2</sub> emisyonlarının arttığını, HC'nin ve CO emisyonlarının ise azaldığını göstermiştir. FÖYT, FEV, CO ve HC emisyonları için en iyi sonuçlar artan SO'larda gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, silindir içi gaz basıncı (SİGB) genel olarak yakıt karışımındaki izobütanol miktarının artmasıyla

birlikte artmış, SİGB ve İÇÖ değerleri ise benzindeki değerlerden daha erken yükseldiğini ifade etmişlerdir [27].

Zhao vd. çalışmada, kısmi yükte izobütanol-benzin (B33) ile beslenen buji ateşlemeli motorda termal verimini artırmak amacıyla, hava seyreltme koşulları altında hidrojen ilavesinin etkisini araştırmışlardır. Hidrojenin, havanın seyreltilmesi sırasında uzun süren yanma ilerlemesi üzerinde olumlu etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Hidrojenle zenginleştirilmiş karışım koşulları altında, fren termal verimliliğinin yaklaşık %4 arttığını ayrıca yanma kararsızlığının azaltıldığını ve fakir yanma sınırı hidrojen ilavesinden sonra B33 motoru için 1,4'ten 1,8'e çıktığını sunmuşlardır. Fakir yanma koşulları altında, ilk alev oluşumu ve hızlı yanma süreleri, hidrojen tarafından önemli ölçüde kısaldığını ve her ikisi de hava seyreltmesi ile uzatıldığını belirtmişlerdir. Hidrojen ilavesinden sonra, izobütanol-benzin karışımının yanmamış HC emisyonlarını önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca karbon monoksit (CO) emisyonlarında bir miktar düşme kaydedilmiştir [28].

Sayın vd., dört silindri dört zamanlı benzinli motorda yapay sinir ağları ile egzoz gaz sıcaklığı, özgül yakıt tüketimi, ısıl verim ve emisyonların tahmini üzerine yaptıkları çalışmada çıktı sonuçları 0,983-0,996 aralığındaki korelasyon katsayılarıyla oldukça iyi değerler verdiğini, bunun sonucu olarak klasik modelleme tekniklerine alternatif olarak YSA yaklaşımının içten yanmalı motorların performansını ve emisyonlarını doğru bir şekilde tahmin etmek için kullanılabileceğini bildirmişlerdir [29].

Çay; özgül yakıt tüketimini, motorun etkin gücünü ve egzoz sıcaklığını tahmin etmek için bir benzinli motorun yapay sinir ağı (YSA) modellemesi ile ilgilenmiştir. Eğitim için bazı deneysel veriler kullanılarak, motor için standart geri yayılma algoritmasına dayanan bir YSA modeli geliştirilmiştir. Daha sonra YSA tahminlerinin performansı, tahminler ile deney sonuçları karşılaştırılarak ölçüldüğünü ifade etmiştir. Giriş hızı olarak motor hızı, motor torku, yakıt akış hızı, emme manifoldu ortalama sıcaklığı ve soğutma suyu giriş sıcaklığı kullanılmıştır. Özgül yakıt tüketimi ile etkili güç ve egzoz sıcaklığı da çıkış katmanı olarak ayrı ayrı kullanılmıştır. Eğitim ve test verileri için  $R^2$  değerlerinin yaklaşık 0,99 olduğu gösterilmiştir; RMS değerleri 0,02'den küçüktür ve MEP test verileri için %2,7'den küçük çıkmıştır. Klasik modelleme tekniklerine

alternatif olarak YSA yaklaşımının içten yanmalı motorların performansını, sıcaklığını ve diğer parametrelerini doğru bir şekilde tahmin etmek için kullanılabileceğini ifade etmiştir [30].

Atık vd., metan ve hidrojeni değişen oranlarda karıştırarak farklı hava fazlalık katsayıları için farklı motor hızlarında buji ateşlemeli bir motorda performans ve egzoz emisyonlarını Visual Basic dilinde yapay sinir ağları YSA ile tahmin modeli geliştirmişlerdir. YSA'da Üç katmanlı standart geri yayılım algoritması kullanıldığını giriş katmanında üç hücre giriş parametrelerini ( $H_2$ , hava fazlalık katsayısı ve motor hızını), çıkış katmanında ise sekiz hücre çıkış parametreleri ( $CO_2$ ,  $O_2$ , CO ve HC emisyonlarını ve motor torku, motor gücü, özgül yakıt tüketimi ve egzoz gaz sıcaklığını) olarak tanımladığını belirtmişlerdir. Gizli katmanda ise 28, 29, 30, 31, ve 31 hücreli YSA modellerinin eğitimde başarılı olduğunu ifade etmişlerdir. En iyi sonuçların 28 gizli hücreli yapıda elde edildiğini ve YSA'nın BA motorlar için emisyon ve performans tahmininde alternatif bir yöntem olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir [31].

Uslu çalışmasında i-AA'nın buji ateşlemeli motorlarda alternatif yakıt olarak kullanımı incelenmiştir. Bu kapsamda, dört ayrı motor hızında (2600, 2800, 3000 ve 3200 d/d) ve üç farklı sıkıştırma oranında (8,0:1, 8,5:1 ve 9,0:1) saf benzin ve i-AA-benzin karışımları (A10, A20 ve A30) kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin sonuçları, motor performansı, yanma özellikleri ve egzoz emisyonu üzerinde yapılan analizlerle incelenmiştir. Ayrıca, deney verileri ile geliştirilen bir yapay sinir ağı (YSA) modelinin performansı, deneysel verilere göre değerlendirilmiş ve YSA'nın etkinliği değerlendirilmiştir. Elde edilen deneysel verilere göre i-AA-benzin karışımlarının buji ateşlemeli motorlarda yapısal bir değişiklik yapılmadan %20 alkol oranına kadar verimli bir şekilde kullanılabileceğini bildirmiştir. Motor performans parametreleri için YSA'dan elde edilen sonuçlardaki MRE değerleri FOEB, FÖYT ve FEV için sırasıyla %1,546, %2,419 ve %6,688 olduğunu tespit etmiştir. Bu oranların birim bazında değerlerini gösteren RMSE ise yine sırasıyla 5,608 kPa, 10,619 g/kWh ve %0,376 olduğunu bildirmiştir. Deneysel sonuçlara yakınsamanın ölçütlerinden biri olan  $R^2$  değerleri ise 0,966, 0,979 ve 0,947 olarak tespit edilmiştir. Egzoz emisyonunun tahmin sonuçlarına bakıldığında ise MRE

değerleri HC, CO ve NO<sub>x</sub> için sırasıyla %3,069, %2,927 ve %7,01 olarak bulunurken, RMSE değerleri 2,526 ppm, %0,014 ve 47,702 ppm olduğunu bildirmiştir. R<sup>2</sup> değerlerini ise 0,9665, %0,989 ve %0,9447 olduğunu tespit etmiştir. Motor performans ve emisyonlarının tahmini için YSA'nın uygulanabilir bir yöntem olduğunu belirtmiştir [10].

Bashir vd. çalışmalarında, tek silindirli BA bir motorda yakıt olarak benzin ve HHO karışımlarını kullanmışlardır. Motor çalışmasını tahmin etmek ve optimize etmek için YSA ve Gradient tabanlı makine öğrenmesi (MÖ) tekniklerini birleştirmişlerdir. YSA modelinde giriş katmanı olarak yakıt oranı, motor devri ve motor yükü parametrelerini, çıkış katmanında motor torku, motor gücü, fren özgül yakıt tüketimi, fren termal verimi, CO<sub>2</sub>, CO, HC ve NO<sub>x</sub> emisyon parametrelerinin seçildiğini belirtmişlerdir. Gizli katmanda ise her biri 10 hücreli 2 adet gizli katman kullanılmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen verilerin %70 eğitim, %15 doğrulama ve %15 test olacak şekilde Levenberg-Marquardt algoritması kullanarak YSA modeli oluşturmuşlardır. Mevcut çalışma, ANN ve Gradient tabanlı optimizasyonu kullanarak yenilenebilir yakıtın performans ve emisyonlar üzerindeki etkisini başarılı tahmin ve optimizasyonla birlikte değerlendirmişlerdir. Tahmin modellemesi durumunda, optimum 2HL-10N mimarisi 0,99481 eğitim, 0,9781 doğrulama, 0,96914 test, genel olarak 0,98819 yüksek R değerleri sağlandığını belirtmişlerdir. Ardından gradient tabanlı optimizasyon uygulaması ile HHO ile benzin kullanılarak motor çalışması için 3,7 l/m HHO hacim akış hızı, 3700 d/d ve %100 motor yükü olarak optimum çalışma şartlarını belirlendiğini ifade etmişlerdir. Optimize edilmiş giriş değişkenleri ile benzine kıyasla motor gücü ve fren termal veriminin sırasıyla %11,4 ve %7,1 oranında iyileştiğini, FÖYT, CO, CO<sub>2</sub> ve HC emisyonlarının sırasıyla %11,5, %27,1, %7,6 ve %36,6 oranında azaldığını ifade etmişlerdir [32].

Uslu vd. çalışmalarında, buji ateşlemeli bir motorda i-amil alkol/benzin yakıt karışımlarının motor performansı ve emisyonları üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Deney sonuçları yapay sinir ağı (YSA) ile tahmin edilmiş ve yüzey yanıt metodolojisi (YYM) ile optimize edilmiştir. Test motoru, farklı motor devirlerinde ve çeşitli sıkıştırma oranlarında (SO) farklı oranlarda saf benzin ve benzin-izoamil alkol (izopentanol) yakıt karışımları ile çalıştırılmıştır. Deneylerden

elde edilen verilerle geliştirilen YSA modeli ile çıkış parametresi olarak, fren ortalama etkin basıncı, fren özgül yakıt tüketimi (FÖYT), fren termal verimi (FEV), azot oksitler (NO<sub>x</sub>), hidrokarbon emisyonu (HC) ve karbon monoksit (CO) gibi çıktıları, SO, yakıt karışım oranı ve motor hızı girişi parametrelerine göre tahmin uygulamasında kullanıldığını belirtmişlerdir. Ek olarak, uygun motor çalışma koşullarını bulmak için RSM uygulanmıştır. Sonuçlara göre, YSA modeli motorun performans ve emisyon parametrelerini R<sup>2</sup> 0.94 ile 0,99 arasında bir korelasyon katsayısı ile tahmin edebildiğini belirtmişlerdir. Yüzey yanıt metodu çalışması, 8,31 SO ve 2957,58 d/d motor devrinde %15'lik i-AA oranının optimum motor çalışma parametreleri olduğunu göstermiştir. YYM desteğine sahip YSA modeli ile minimum test ile motor çıkışlarını tahmin etmek ve optimize etmek için etkili bir araç olduğunu ifade etmişlerdir [33].

Balki vd. çalışmalarında, metanol/benzin karışımı (M5, M10, M15 ve M20) ile çalışan küçük buji ateşlemeli (BA) bir motor için en iyi çalışma parametrelerinin belirlenmesine odaklanmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında farklı yüklerde (10 ve 20 Nm) ve sıkıştırma oranlarında (CR) (7:1, 8:1 ve 9:1) motor testleri gerçekleştirilmiş ve motor performansı ve egzoz emisyonlarındaki değişimler incelenmiştir. Ayrıca bu deneysel sonuçlar optimizasyonda kullanılmıştır. Motor test sonuçlarına göre, küçük BA motorunun performansı ve emisyonları, tüm deney koşullarında karışım yakıtlarındaki metanol oranının artırılmasıyla genel olarak iyileştirildiği belirtilmiştir [34].

Balki vd. çalışmada ilk olarak, saf etanol ile beslenen buji ateşlemeli bir motorda sıkıştırma oranı (SO), hava fazlalık katsayısı (HFK) ve ateşleme zamanlamasının (AA) performans ve egzoz emisyonları üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Motor testleri dört farklı SO, üç farklı HFK ve üç farklı AA için 2400 rpm'de gerçekleştirilmiş ve motorun performansı ve egzoz emisyonu kaydedildiğini belirtmişlerdir. Saf etanol ile elde edilen sonuçlar benzin ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. İkinci olarak, aynı test koşulları için motorun performansı ve egzoz emisyonu bir geri yayımlı yapay sinir ağı (YSA) modeli ile tahmin edilmiştir. YSA modeli C# programlama dili kullanılarak oluşturulmuştur. YSA modeli deneysel çalışmadan elde edilen verilerle eğitilmiştir. Motor torku, fren özgül yakıt tüketimi,

hidrokarbon emisyonu ve karbondioksit emisyonu geri yayımlı YSA modeli ile tahmin edilmiştir. Deneysel veriler tahmin edilen değerlerle karşılaştırıldığında aradaki farkın hata yüzdelerinin kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür. Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, AA'nın düşürülmesi ve SO'nun artırılmasında saf etanol kullanımının performansı ve egzoz emisyonlarını iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, YSA modelinin alternatif yakıt kullanan bir SI motorun performansını ve emisyonlarını tahmin etmek için kullanılabileceği görülmüştür [35].



## BÖLÜM 3

### BUJİ ATEŞLEMELİ MOTORLARDA KULLANILAN ALKOL YAKITLAR

Buji ateşlemeli motorlar, geleneksel olarak benzin ile çalıştırılırlar. Ancak, fosil yakıtların sınırlı olması ve çevresel kaygılar nedeniyle, alternatif yakıtlar üzerindeki çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Bu alternatif yakıtlar, motor performansı, emisyonlar ve yakıt ekonomisi gibi farklı parametrelerde değişikliklere neden olmaktadır.

Alkoller, özellikle metanol, etanol ve bütanol gibi türleri, içten yanmalı motorlarda kullanılan yakıtlara ek olarak veya tek başına kullanılabilen organik bileşiklerdir. Bu maddeler, moleküler yapılarındaki oksijen sayesinde motorlarda daha temiz bir yanma sağlayarak egzoz emisyonlarını azaltıcı etkileriyle bilinirler. Aynı zamanda, motor yakıtlarında bulunan zararlı maddeleri içermemeleri de bu avantajlarını destekler. Bu özelliklerinden dolayı, alkol, gıda, temizlik ve kozmetik sanayinin yanı sıra otomotiv sektöründe de geniş bir kullanım alanına sahiptir [36].

#### 3.1. ETANOL

Yenilenebilir bir alkol olan etanol, sera gazı emisyonlarını ve fosil yakıtlara bağımlılığı azaltma potansiyeli nedeniyle bir biyoyakıt ve kimyasal hammadde olarak büyük ilgi görmüştür. Etanol ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ) berrak, renksiz bir sıvıdır. Etil alkol, tahıl alkolü ve EtOH olarak da bilinir. Etanol; mısır tanesi, şeker kamışı gibi nişasta veya şeker bazlı hammaddelerden veya selülozik hammaddelerden (odun yongaları veya mahsul artıkları gibi) üretilip üretilmediğine bakılmaksızın aynı kimyasal formüle sahiptir. Etanol benzinden daha yüksek bir oktan sayısına sahiptir ve üstün karışım özellikleri sağlar. Benzinli motorda vuruntu dayanımını artırmak için kullanılabilir [37].

Etanol, benzine göre daha düşük alt ısıl değere sahiptir, dolayısıyla yanma verimi de düşüktür. Ancak içerdiği oksijen nedeniyle CO emisyonlarını; yüksek gizli buharlaşma ısısı nedeniyle de NOx emisyonlarını azaltma eğilimindedir [38]. Etanolün 1 litresi 1 litre benzinden yaklaşık %30 daha az enerji içerir. Etanolün yakıt ekonomisi üzerindeki etkisi, yakıttaki etanol içeriğine ve bir motorun benzine mi yoksa etanolla mi çalışacak şekilde optimize edildiğine bağlıdır [39].

Etanol benzinden daha yüksek bir oktan sayısına sahiptir ve üstün karışım özellikleri sağlar. Bu nedenle daha yüksek sıkıştırma oranlarında motorun çalışmasını sağlar ve verim artışı sağlayabilir [40]. Çizelge 3. 1’de benzin ve etanolün özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3. 1. Benzin ve etanolün özellikleri [41].

Özellikler	Benzin	Etanol
<b>Kimyasal Formül</b>	C <sub>8</sub> H <sub>15</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH
<b>Molekül Kütlesi (kg/kmol)</b>	97,66	46
<b>C/H Oranı</b>	0,497	0,333
<b>Donma Noktası (K, 0.1 MPa)</b>	243-263	155
<b>Kaynama Noktası (K, 0.1 MPa)</b>	305-490	351
<b>Yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>)</b>	750,8	809,9
<b>Alt Isıl Değer (MJ/kg)</b>	42,6	26,7
<b>Hava-Yakıt Oranı</b>	14,73	9,1
<b>Tutuşma Sınırları (hacimsel %)</b>	1-6	4,3-18
<b>Buhar Basıncı (23,5°C, kPa)</b>	60-90	17
<b>Araştırma Oktan Sayısı</b>	95	108,6
<b>Motor Oktan Sayısı</b>	85	89,7
<b>Buharlaşma Isısı (kJ/kg)</b>	490	921,1
<b>Kendi Kendine Tutuşma Sıc. (°C)</b>	257	425

### 3.2. METANOL

Metanol, kimyasal formülü  $\text{CH}_3\text{OH}$  olan ve birçok endüstriyel uygulamada kullanılan renksiz, uçucu, yanıcı ve zehirli bir alkol türüdür. Geçmişte odunun damıtılmasıyla elde edildiği için odun alkolü ya da odun ruhu olarak da adlandırılır. Genellikle metil alkol olarak da bilinir.

Metanol hem enerji kaynağı olarak hem de kimyasal bir madde olarak önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle, metanolün alternatif yakıt olarak kullanımı, fosil yakıtların yerini alabilecek potansiyeli ile dikkat çekmektedir. Metanol, yüksek oktan sayısı ve oksijen içeriği sayesinde motor performansını artırmakta ve zararlı emisyonları azaltmaktadır [42].

Ayrıca, metanolün kullanımı, dizel motorlarda da araştırılmakta olup, metanol katkılı dizel yakıtlarının titreşim ve gürültü üzerindeki etkileri incelenmektedir [43].

Metanolün sağlık üzerindeki etkileri de önemli bir konudur. Metanol, vücutta hızlı bir şekilde emilmekte ve metabolitleri toksik etkilere yol açabilmektedir. Metanol zehirlenmesi, ciddi sağlık sorunlarına neden olabilir ve bu nedenle dikkatli bir şekilde kullanılmalıdır [44]. Metanol, enerji üretimi ve kimyasal sentez süreçlerinde önemli bir bileşen olarak öne çıkmaktadır. Hem çevresel hem de ekonomik açıdan sağladığı avantajlar, metanolü alternatif bir enerji kaynağı olarak cazip kılmaktadır. Ancak, metanolün toksik etkileri ve sağlık üzerindeki riskleri, kullanımında dikkatli olunması gerektiğini göstermektedir. Çizelge 3. 2'de benzin ve metanol özellikleri görülmektedir.

Çizelge 3. 2. Benzin ve metanol özellikleri [45].

Özellikler	Benzin	Metanol
Kimyasal Formül	C <sub>8</sub> H <sub>15</sub>	CH <sub>3</sub> OH
Kompozisyon (C, H, O) (kütleli%)	86; 14; 0	37,5; 12,5; 50
Alt Isıl Değeri (MJ/kg)	43,5	20,1
Buharlaşıma Isısı (kJ/kg)	223,2	920,7
Stokiyometrik Hava/Yakıt Oranı	14,6	6,4
Oksijen İçeriği, kütleli %	0	49,9
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	760	796
Parlama Noktası (°C)	-45, -38	11,1
Kendiliğinden Yanma Sıcaklığı (°C)	420	470
Kaynama Noktası(°C)	25-215	64,5
Suda Çözünürlük (ml/100 ml H <sub>2</sub> O)	<0,1	Tamamen
Araştırma Oktan sayısı	96,5	112
Motor Oktan Sayısı	87.2	91

### 3.3. BÜTANOL

Bütanol, dört izomer olarak bulunan dört karbon atomlu bir alkoldür. (n-bütanol (normal-bütanol), 2-bütanol (ikincil-bütanol), i-bütanol (izo-bütanol) ve t-bütanol (tert-bütanol)). Tüm izomerler yaklaşık aynı enerjiyi üretir, ancak her birinin üretim yöntemleri tamamen farklıdır. Dört izomer de aynı formüle ve aynı miktarda ısı enerjisine sahiptir ancak özelliklerini etkileyen farklı moleküler yapıları vardır. Benzer moleküler ağırlıklarına ve fonksiyonel gruplarına rağmen farklı çözünürlüklere sahiptirler.

n-Butanol doğrusal bir alifatik alkoldür. Renksiz, yanıcı, hafif hidrofobik bir sıvı olup belirgin muz benzeri aroması ve güçlü alkolik kokusu vardır. Doğrudan temas gözlerde ve ciltte tahrişe neden olabilir ve buharları mukoza zarları üzerinde tahriş edici bir etkiye ve yüksek konsantrasyonlarda solunduğunda narkotik bir etkiye sahiptir. En yaygın organik çözücülerle tamamen karışabilir, ancak suda çok az çözünür.

İzobütanol tatlı küf kokulu renksiz bir sıvıdır. Tüm yaygın organik çözücülerle karışabilir ve suda çok az çözünür, sek-bütanol (2-bütanol) ise suda çok az çözünen ve polar organik çözücülerle tamamen karışabilen yanıcı, renksiz bir sıvıdır. t-Butanol (3-bütanol) kafur benzeri kokuya sahip berrak bir sıvıdır. Suda yüksek oranda çözünür ve etanol ve dietil eter ile karışabilir. Oda sıcaklığında katı olma eğilimindedir (erime noktası 25 °C'nin biraz üzerindedir) [46].

### 3.3.1. İzobütanol Üretimi

İzobütanol, ikinci nesil biyoyakıt olarak umut verici bir adaydır ve biyoetanolle kıyasla çeşitli avantajlara sahiptir [47]. İzobütanol, endüstriyel olarak önemli bir alkol türüdür ve çeşitli üretim yöntemleri ile elde edilmektedir. Bu yöntemler genel olarak biyoteknolojik, kimyasal ve biyokatalitik süreçler olarak sınıflandırılabilir. İzobütanol üretiminde kullanılan başlıca yöntemler arasında fermentasyon, kimyasal sentez ve biyokatalitik süreçler yer almaktadır.

İzobütanol, çeşitli yöntemlerle üretilen bir alkoldür ve bu üretim yöntemleri hem kimyasal hem de biyolojik süreçleri içermektedir. İzobütanol üretiminde en yaygın yöntemlerden biri, biyokütle kaynaklarının fermentasyonu ile gerçekleştirilen biyolojik süreçlerdir. Bu yöntem, özellikle mısır ve şeker pancarı gibi tarımsal ürünlerin kullanılmasıyla gerçekleştirilir ve bu süreçte mikroorganizmalar, şekerleri alkole dönüştürür. Biyokütle dönüşümü, sürdürülebilir enerji üretimi açısından önemli bir yöntem olarak öne çıkmaktadır [48].

Diğer bir üretim yöntemi ise kimyasal sentez yöntemleridir. Bu yöntem, genellikle propilenin hidrojen ile reaksiyona girmesiyle izobütanol üretimini içerir. Bu süreç, yüksek sıcaklık ve basınç altında gerçekleştirilir ve genellikle katalizörler kullanılarak verimlilik artırılmaktadır. Ayrıca, propilenin alkilasyon süreçleri ile izobütanol üretimi de mümkündür. Bu yöntemler, endüstriyel ölçekte yaygın olarak kullanılmaktadır ve yüksek verimlilik sağlamaktadır [49]. Benzin, bütanol ve bütanol izomerlerinin bazı özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3. 3. Benzin ve bütanol özellikleri [46,50].

Özellikler	Benzin	n- Bütanol	2- Bütanol	İzo- bütanol	Tert- bütanol
<b>Kimyasal Formül</b>	$C_8H_{15}$	$CH_3-CH_2CH_2CH_2OH$	$CH_3CH_2CHOHCH_3$	$C_4H_9OH$ $((CH_3)_2CHCH_2OH)$	$(CH_3)_3COH$
<b>Kompozisyon (C, H, O) (Kütleli %)</b>	86;14; 0	65; 13,5; 21,5	65; 13,5; 21,5	65; 13,5; 21,5	65; 13,5; 21,5
<b>Alt Isıl Değeri (MJ/Kg)</b>	43,5	33,2	33,0	33,3	32,6
<b>Buharlaştırma Isısı (kJ/Kg)</b>	223,2	430	670	474,3	-
<b>Stokiyometrik Hava/Yakıt Oranı</b>	14,6	11,2	6,16	11,1	-
<b>Oksijen İçeriği, Kütleli %</b>	0	21,6	21,6	21,6	21,6
<b>Yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>)</b>	760	810	808	802	789
<b>Parlama Noktası (°C)</b>	-45, -38	35	24	28	11
<b>Kendiliğind en Yanma Sıcaklığı (°C)</b>	420	343	406	427	478
<b>Kaynama Noktası(°C)</b>	25-215	118	99	108	83
<b>Suda Çözünürlük (ml/100 ml H<sub>2</sub>O)</b>	<0,1	7,7	12,5	8-10,6	Karışabilir.
<b>Araştırma Oktan Sayısı</b>	96,5	98	101	113	105
<b>Motor Oktan Sayısı</b>	87,2	78	9	94	89

## BÖLÜM 4

### BUJİ ATEŞLEMELİ MOTORLARDA PERFORMANS VE EMİSYONLAR

Bu bölümde BA motorlarda sıkıştırma oranının motor performansına etkisi ve BA motorlarda oluşan egzoz emisyonları açıklanmıştır.

#### 4.1. SIKIŞTIRMA ORANI

İçten yanmalı motorlarda performansa etki eden parametrelerden bir geometrik sıkıştırma oranıdır. Sıkıştırma oranı bir içten yanmalı motordaki pistonun en alt konumdayken silindir içindeki hacim ile en üst konumdayken silindir içindeki hacim arasındaki orandır. Sıkıştırma oranını ideal motorda aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır [51].

$$SO = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_c + V_h}{V_c} = 1 + \frac{V_h}{V_c} \quad (4.1)$$

Burada,

$V_h$ : kurs hacmini

$V_h$ : yanma odası hacmini ifade etmektedir.

Gerçek motorda ise sıkıştırma A.Ö.N.'de değil, emme supabı kapandıktan sonra başlamaktadır. Bu nedenle motorun gerçek sıkıştırma oranı;

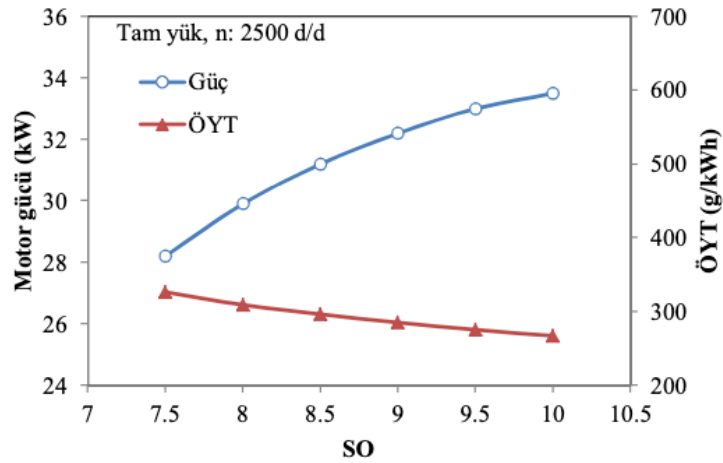
$$SO = \frac{(V_h - V_k) + V_c}{V_c} \text{ dir. Burada; } \quad (4.2)$$

$V_k$ : AÖN'den sonra emme subaplarının kapanmasına kadar pistonun süpürdüğü hacimdir.

## 4.2. SIKIŞTIRMA ORANININ FREN EFEKTİF GÜCÜNE VE FREN ÖZGÜL YAKIT TÜKETİMİNE ETKİSİ

Benzin motorlarında sıkıştırma oranı, yakıtın kendi kendine yanmadan dayanabileceği maksimum noktaya göre ayarlanır. Bu sayede, motorun performansı artırılırken aynı zamanda vuruntu gibi istenmeyen bir durumun önüne geçilir.

Buji ateşlemeli motorlarda sıkıştırma oranı, motorun performansı ve emisyonları üzerinde önemli etkilere sahiptir. Sıkıştırma oranı, motorun silindirinde hava-yakıt karışımının sıkıştırıldığı orandır ve genellikle buji ateşlemeli motorlar için 8:1 ile 12:1 arasında değişmektedir. Yüksek sıkıştırma oranları, motorun termal verimliliğini artırırken, aynı zamanda emisyon seviyelerini de etkileyebilir. Yüksek sıkıştırma oranları, yanma sonu basıncını artırır ve daha fazla güç üretimi sağlar. Bununla birlikte, yüksek sıkıştırma oranları, NO<sub>x</sub> emisyonlarının artmasına neden olabilir. Bu durum, yüksek sıcaklıkların oluşmasıyla ilişkilidir; çünkü yüksek sıcaklıklar, azot oksitlerin (NO<sub>x</sub>) oluşumunu teşvik eder [52]. Dolayısıyla, buji ateşlemeli motorlarda sıkıştırma oranının optimize edilmesi hem performans hem de emisyon kontrolü açısından kritik bir öneme sahiptir. Şekil 4. 1'de sıkıştırma oranının motor gücüne etkisi görülmektedir.



Şekil 4. 1. Sıkıştırma oranının motor gücüne etkisi [53]

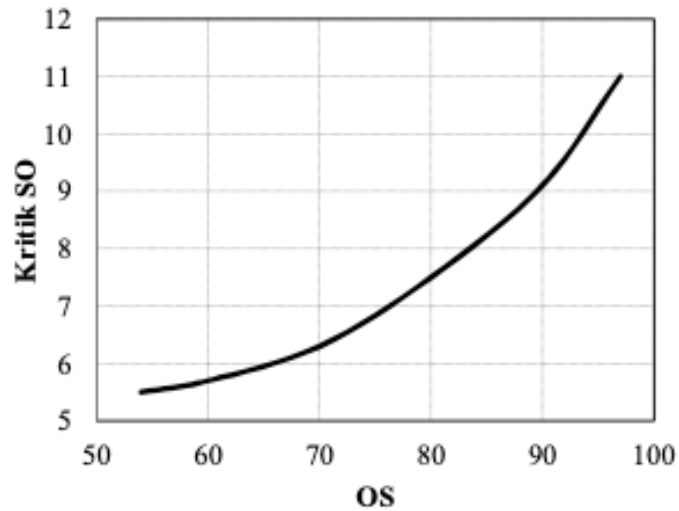
BA motorlarda oluşan işlemleri en iyi açıklayan model olan Otto çevrimi, çevrim termik veriminin SO ile arttığını gösterir [54].

$$\eta = 1 - \frac{1}{SO^{k-1}} \quad (4.3)$$

#### 4.2.1.Oktan Sayısı

Yakıtın vuruntuya karşı ne kadar dayanıklı olduğunu gösteren ölçüye oktan sayısı (OS) denir. Yüksek oktanlı yakıtlar, motorun sıkıştırılmasına daha fazla dayanabilir ve kendiliğinden tutuşmaz. BA motorlarda yakıt buji ile ateşlendikten sonra alev ilerlemeye başlar. Diğer taraftan silindirin herhangi bir yerindeki yanmamış karışım kendi kendine tutuşarak yanmaya başlar. Bu iki alev çarpışarak ani basınç, sıcaklık artışına ve gürültüye neden olur. Bu olaya vuruntu denir. Bu durum, motorun performansını düşürür ve zarar görmesine neden olur [55].

Erken ateşleme ise, yakıtın buji ateşlemeden önce yanmasıdır ve motorun verimini düşürür. Yüksek oktanlı yakıtlar, bu sorunları önleyerek motorun daha verimli ve güvenli çalışmasını sağlar. Bu sayede, motorun gücü artırılabilir ve yakıt tüketimi azaltılabilir. Şekil 4. 2’de oktan sayısına bağlı vuruntu sınırının değişimi verilmiştir.



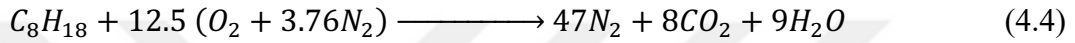
Şekil 4. 2. Oktan sayısına bağlı vuruntu sınırının değişimi [56]

Yakıtın kimyasal ve fiziksel özellikleri vuruntu üzerinde önemli etkiye sahiptir. Yakıtlar hidrokarbonların değişik fiziksel ve kimyasal özellikleri içermesinden dolayı,

bazı yakıtların vuruntulu yanmaya eğilimleri çok, bazılarının ise azdır. Şekil 4.2’de görüldüğü gibi oktan sayısı arttıkça vuruntu olmadan SO’nun yükseltilmesi mümkün olmaktadır [56].

### 4.3. BUJİ ATEŞLEMELİ MOTORLARDA YANMA VE EMİSYONLAR

BA motorlarda benzin ve oksijenin reaksiyonu sonucu yanma olayı gerçekleşir. Motorlarda emme zamanında silindir içerisine sadece oksijenle birlikte bulunan azot yanma sürecine dahil olur. Benzin için tam yanma denklemi aşağıda verilmiştir.



İçten yanmalı motorlarda meydana gelen yanma reaksiyonu, hava ile yakıt moleküllerinin oksitlenmesinin tamamlanıp tamamlanmadığına göre dört kısma ayrılmaktadır [57].

#### 4.3.1. Tam Yanma

Yanma reaksiyonu için gerekli hava miktarının normalden fazla olması durumudur. Yani HFK>1 olduğu durumdur. Bu yanma türünde egzoz gazı içerisinde CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> ve özellikle O<sub>2</sub> bulunur.

#### 4.3.2. Teorik Tam Yanma

Teorik tam yanma için gerekli hava miktarı normal değerinde olduğundan egzozda O<sub>2</sub> görülmez. Bu yanma türünde gerekli hava miktarına teorik hava veya stokiyometrik hava adı verilir.

#### 4.3.3. Eksik Yanma

Yanma reaksiyonu için gerekli hava miktarının gerekenden az olduğu durumdur. Yani HFK<1 olduğu durumdur. Oksidasyonun tam olmadığı için egzoz gazında CO, HC, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O ve N<sub>2</sub> bulunan yanma şeklidir.

#### **4.3.4. Kısmi Eksik Yanma**

Hava fazlalık katsayısı  $>1$  olmasına rağmen, yanma odasındaki karışım, sıcaklık değişimi ve kalış süresindeki yetersizlikler sonucu  $O_2$ 'nin yanında bazı eksik yanma ürünleri görülmektedir. Bu durumun tek nedeni yakıt-hava karışımının yanlış olmasından kaynaklanmamaktadır. Tam gerçekleşmeyen yanma ve kimyasal parçalanmalar sonucunda oluşan ara ürünler; HC, CO,  $NO_x$  gibi zararlı maddelerin oluşmasına sebep olmaktadır [58].

#### **4.3.5. Buji Ateşlemeli Motorlarda Egzoz Emisyonları**

BA motorlarda yanma sonucu açığa çıkan zararlı egzoz emisyonları azot oksitler, karbonmonoksit ve yanmamış hidrokarbonlardır. Egzoz emisyonlarının oluşumu ve miktarları, motorun çalışma şartlarına ve motor tasarım özelliklerine göre değişmektedir [59].

##### **4.3.5.1. HC Emisyonları**

Hidrokarbonlar kısmen yanmış veya hiç yanma olayına dahil olmadan oluşan emisyonlardır. Hava/yakıt karışım oranının uygun olmaması, silindir içerisinde dengeli sıcaklık dağılımının olmaması, sıkıştırma zamanında ve yanma sırasında silindir içi basıncın yükselmesi sonucu yakıt buharının yanma odasında ve silindir içerisindeki boşluklara girmesi sonucu yanma reaksiyonuna girmeden silindir dışarısına atılması gibi nedenlerden HC emisyonu oluşmaktadır. Ayrıca silindir içerisinde yağ film tabakası içerisine yakıt buharını alması ve basıncın düşmesiyle yakıt buharını geri bırakması olayı da HC emisyonu oluşmasının nedenlerindedir [60]. Yanma odası yüzey alanı HC emisyonunun oluşumun önemli nedenlerindedir. Alev yüzeye yakın bölgelerde soğuması sonucu söner ve HC eksik yanma ürünü olarak ortaya çıkar. Sıkıştırma oranının artması sonucu yüzey/hacim oranının artması ile HC emisyonlarında artış gözlenmektedir.

#### 4.3.5.2. CO Emisyonları

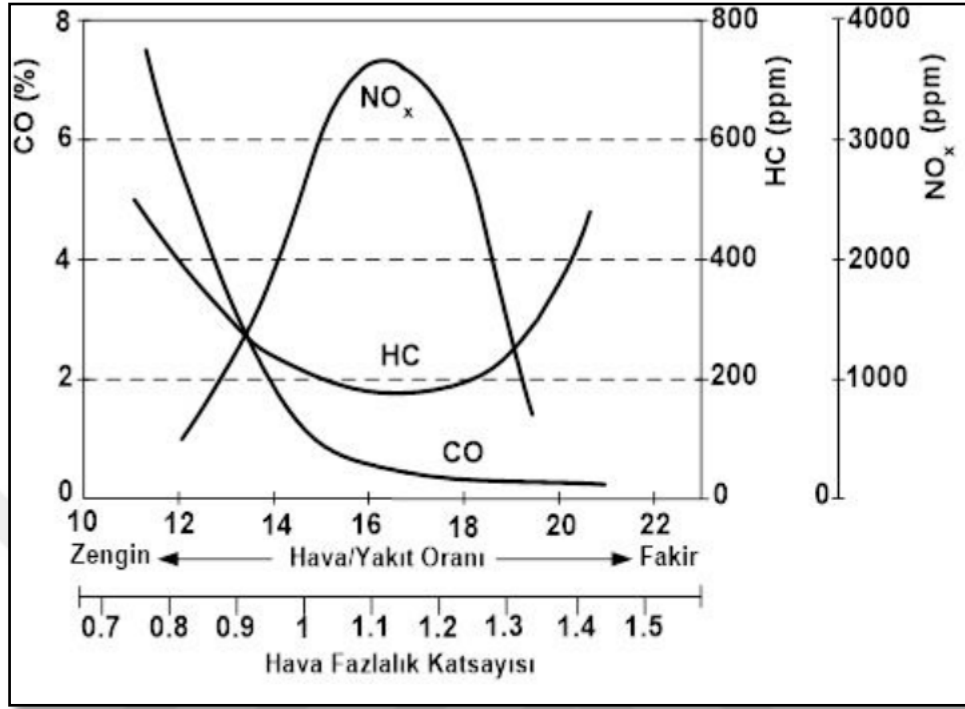
Silindir içerisinde yakıtın eksik oksijen ile yanması sonucu CO emisyonu oluşur [61]. BA motorlar yakıt tüketimini düşürmek amacıyla stokiyometrik yakıt/hava karışım oranından bir miktar fakir karışım oranıyla çalışmaktadır. Ayrıca tam yükte emilen havanın tamamını kullanmak için zengin yakıt/hava karışım oranları ile çalışmaktadırlar. Bu durumlar CO emisyonunu oluşumunu etkilemektedir. Bu nedenle HFK karbonmonoksit emisyonunu etkileyen en önemli parametredir. Yakıt/hava karışımının zenginleşmesi sonucu yakıtın içerisindeki karbonun yetersiz oksijen bulunması nedeniyle hızla artmaktadır. Motorun ilk çalıştırma CO emisyonları önemli ölçüde artmaktadır. Yanma odası sıcaklığının düşük olması ve yeterli oksijen olmaması nedeniyle gerçekleşmeyen tepkimeler CO emisyonunun artmasına yol açmaktadır. Yakıtın içeriğinde oksijen bulunması CO emisyonu olumlu etkilemektedir [62].

#### 4.3.5.3. NO<sub>x</sub> Emisyonları

Emme zamanında silindire alınan hava içerisinde hacimce en fazla azot bulunur. Yanma zamanında silindir içi sıcaklığın 1800 °C'den daha yüksek sıcaklık değerlerine ulaşması sonucu O<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub> tepkimeye girerek azotoksitleri oluşturur. Bunun sonucunda NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi çeşitli gazlar ortaya çıkar ve bunların hepsine birden "azot oksitler" denir ve NO<sub>x</sub> olarak ifade edilir [63]. Bu gazların içerisinde en zararlı olanlar NO ve NO<sub>2</sub>'dir.

Motorun çalışma sıcaklığı, NO<sub>x</sub> emisyonlarının en önemli belirleyicilerinden biridir. Yüksek silindir sıcaklıkları, azot oksitlerin (NO<sub>x</sub>) oluşumunu artırır. Bu bağlamda, ateşleme zamanının doğru ayarlanması, yanma sürecinin verimliliğini artırarak NO<sub>x</sub> emisyonlarını azaltabilir [64]. Ayrıca, hava-yakıt karışım oranının zengin veya fakir olması, yanma odasında meydana gelen sıcaklık değişikliklerine neden olarak NO<sub>x</sub> emisyonlarını etkileyebilir. Zengin karışımlar, genellikle daha düşük NO<sub>x</sub> emisyonları ile ilişkilendirilirken, fakir karışımlar yüksek sıcaklıklara ve dolayısıyla daha fazla NO<sub>x</sub> oluşumuna yol açabilir [65].

Şekil 4. 3, hava fazlalık katsayısına göre emisyonların değişimini göstermektedir.



Şekil 4. 3. Hava fazlalık katsayısına göre emisyonların değişimi [54].

Hava fazlalık katsayısı ( $\lambda$ ), içten yanmalı motorların performansı ve emisyonları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Hava fazlalık katsayısı, yanma odasındaki hava miktarının, yakıt miktarına oranını ifade eder ve bu oran, motorun yanma verimliliğini ve emisyon karakteristiklerini doğrudan etkiler. Hava fazlalık katsayısının artırılması, genellikle daha düşük yanma sıcaklıkları ve dolayısıyla daha az NO<sub>x</sub> emisyonu ile ilişkilendirilir. Ancak, bu durum aynı zamanda karbon monoksit (CO) ve hidrokarbon (HC) emisyonlarının artmasına neden olabilir [66].

Hava fazlalık katsayısının optimum seviyelerde tutulması, emisyonların kontrolü açısından kritik öneme sahiptir. Aşırı zengin veya fakir karışımlar, yanma verimliliğini olumsuz etkileyebilir ve istenmeyen emisyonların artmasına yol açabilir [67].

Hava fazlalık katsayısının etkisi, farklı yakıt türleriyle de değişiklik göstermektedir. Örneğin, etanol ve benzin karışımlarının kullanıldığı çalışmalarda, hava fazlalık katsayısının artırılmasıyla birlikte NO<sub>x</sub> emisyonlarının azaldığı, ancak HC emisyonlarının arttığı bildirilmiştir [68]. Ayrıca, alternatif yakıtların kullanımı, hava

fazlalık katsayısının artırılmasıyla birlikte NOx emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olabilir [69].



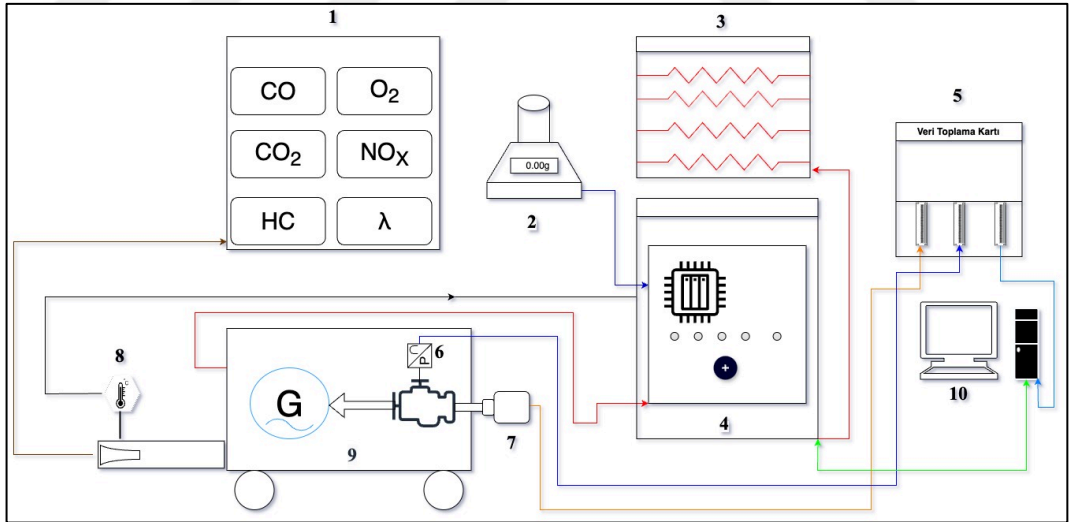
## BÖLÜM 5

### MATERYAL YÖNTEM

Bu bölümde, deneysel çalışmada kullanılan materyaller ve yöntemler detaylı olarak anlatılmıştır.

#### 5.1. DENEY DÜZENEGİ

Deney düzeneği; deney motoru ve jeneratör, yükleme dirençleri, PLC kontrol ünitesi, veri toplama kartı, elektronik terazi, ısıl çift, silindir içi gaz basıncı, egzoz gaz emisyon ölçüm cihazı ve bilgisayardan oluşmaktadır. Deney setinin şematik görünümü Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5. 1. Deney setinin şematik görünümü

1-Emisyon cihazı 2- Elektronik terazi 3- Yük dirençleri 4- Programlanabilir lojik kontrolör (PLC) 5- NI-USB-6341 DAQ Kart, 6- Basınç Sensörü 7- Enkoder 8- Termokupl, 9- Jeneratör Motor Grubu, 10-Bilgisayar

### 5.1.1. Jeneratör ve Deney Motoru

Deneysel çalışmada orijinal SO 8,2:1 olan ve 389 cm<sup>3</sup> silindir hacmine sahip olan, düşük güçlü, tek silindirli ve hava soğutmalı HONDA GX390 marka bir buji ateşlemeli motor kullanılmıştır. Deney motoru genel görünümü Şekil 5.2' de verilmiştir. Deney motoruna ait teknik özellikler Çizelge 5.1' de görülmektedir.



Şekil 5. 2. Jeneratör ve deney motoru

Çizelge 5. 1. Deney motoru teknik özellikleri

<b>Teknik Özellikler</b>	
Motor Tipi	4 Zamanlı, Üstten Valfli, Tek Silindirli
Çap x Stork mm	88 x 64
Silindir Hacmi (cm <sup>3</sup> )	389,25
Sıkıştırma Oranı	8,2:1
Maks. Çıkış Gücü	13 BG/3.600 d/dk
Net Çıkış Gücü (BG)	11,7
Maks. Tork	2,7 kgm/2500 d/d
Maks. Net Tork	2,56 kgm/2500 d/d
Ateşleme Sistemi	Elektronik Ateşlemeli
Çalıştırma Sistemi	Otomatik Mekanizmalı / Elektrik Marşlı
Hava Filtresi	Yarı Kuru, Yağ Banyolu, Çift Elemanlı
Soğutma Sistemi	Hava Soğutmalı
Ölçüler (mm) UxGxY	405 x 450 x 443

### 5.1.2. PLC Kontrol Ünitesi

Motorun yüklenmesi için resesif dirençlerden oluşan yük bankasından yararlanılmıştır. Deney esnasında verilerin daha doğru ve sistematik toplanabilmesi için yük bankasındaki kademeler PLC aracılığı ile sıralı bir şekilde devreye alınmıştır. Aynı zamanda motor üzerinden sensörler aracılığı ile okunan veriler PLC'nin analog kartı üzerinden toplanıp istenilen formatta kaydedilmiştir. Hazırlanan deney seti kontrol panosu Şekil 5.3' de gösterilmiştir.

Özgül yakıt tüketimi verileri için hassas teraziden alınan zamana bağlı yakıt durum bilgileri PLC üzerinden bilgisayara aktarılmıştır. Ayrıca egzoz gaz sıcaklığının ölçümü için kullanılan ısı çift verileri anlık olarak deney ekranına ve veri dosyalarına kaydetmek amacıyla PLC kullanılmıştır.



Şekil 5. 3. Deney seti kontrol panosu

### 5.1.3. Veri Toplama Kartı (Daq Card)

Motor üzerinden sensörler aracılığı ile okunan veriler Daq Card vasıtasıyla toplanıp istenilen formatta kaydedilmiştir. Veri toplama (DAQ), bir olayı voltaj, akım, basınç, sıcaklık veya ses açısından ölçme işlemidir. Bir DAQ sistemi, yüksek hızlı veri toplama ölçüm donanımdır. Hazırlanan deney seti kontrol panosu ve verileri

toplamada kullanılan DAQ Card Şekil 5.4' de gösterilmiştir.



Şekil 5. 4. Veri toplama kartı (Daq card)

#### 5.1.4. LabVIEW Yazılımı

Deneyle esnasında jeneratör ve motor düzeneğinden gelen verilerin izlenmesi (yakıt tüketimi, yüklerin devreye alınıp çıkartılması) ve kayıt altına alınması için bir kontrol panosu tasarlanmış ve bu işlemler Vipa CPU 313SC PLC aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Deney sürecindeki değişkenleri kontrol etmek ve izlemek amacıyla LabVIEW yazılımı ile bir arayüz tasarlanmıştır. Bu ara yüz ile jeneratörün yüklenmesi, yakıt tüketim değerleri ve silindir içi basınç değerleri her deney için ayrı ayrı excel formatında kayıt altına alınabilmektedir. Silindir içi basınçları, 0 ile 3000 psi arasında ölçüm değerlerine sahip fiber optik 1,35 mV/bar çözünürlüğünde (Optrand marka H32394-CSTM modeli) kullanılarak ölçülmüştür. Silindir içi basınç verileri her çevrim için 1°'lik krank mili açısından 720° krank mili açısına kadar 10 çevrim boyunca kaydedilmiştir. Bu verilerin işlenip okunup işlenmesi için NI-USB6341 veri toplama kartı (DAQ) kullanılmıştır. Bu karttan gelen veriler yine labview yazılımı ile excel formatında kaydedilmiştir. Şekil 5. 5' de yakıt tüketimi ölçümlerine ait LabVIEW blok diyagram görüntüsü verilmiştir.





Şekil 5. 6. Elektronik terazi

#### 5.1.6. Emisyon Ölçüm Cihazı

Emisyon değerlerinin ölçülmesinde Amasya Üniversitesi Teknik Bilimleri Meslek Yüksek Okulu Laboratuvarında bulunan K Test marka egzoz emisyon ölçüm cihazı kullanılmıştır, Şekil 5.7. Bu çalışmada CO, HC ve NO<sub>x</sub> emisyonu ölçümleri yapılmıştır. Emisyon ölçüm cihazının teknik özellikleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5. 7. Emisyon ölçüm cihazı

Çizelge 5. 2. Emisyon ölçüm cihazı teknik özellikleri

Değişkenler	Ölçüm Aralıkları	Hassasiyet
O <sub>2</sub> (%)	0-25	±0,1
CO <sub>2</sub> (%)	0-20	±0,01
CO (%)	0-15	±0,01
HC (ppm)	0-20.000	±0,12
NO <sub>x</sub> (ppm)	0-5000	±5

### 5.1.7. Silindir İçi Gaz Basıncı Ölçüm Sistemi

Çalışmada motor performans değerlerinin desteklenmesi amacıyla silindir içi gaz basınçları ölçülmüştür. İçten yanmalı motorlar üzerine yapılan çalışmalarda silindir içi basıncın ölçülmesi performans sonuçlarının desteklenmesi bakımından önemli olmaktadır [70–72].

Silindir içi gaz basınç değerlerinin ölçümü Optrand marka fiber optik basınç sensörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Basınç sensörü 0-3000 psi ölçüm kapasitesi ve 1.35mV-psi hassasiyete sahiptir. Şekil 5.8’ de OPTRAND fiber-optik basınç sensörü görülmektedir.



Şekil 5. 8. OPTRAND fiber-optik basınç sensörü

Silindir içerisindeki anlık konum değişikliklerinin tespit edilebilmesi için krank miline bir enkoder bağlanmıştır. Bu sayede krank mili açısı eş zamanlı olarak silindir içi gaz basıncı ile tespit edilmiştir. Şekil 5. 9’da krank mili enkoder bağlantısı görülmektedir.



Şekil 5. 9. Krank mili enkoder bağlantısı

Basınç sensörünün ve enkoderin teknik özellikleri Çizelge 5.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 5. 3. Basınç sensörü ve enkoderin teknik özellikleri

<b>Basınç Sensörü</b>		<b>Enkoder</b>	
Marka	Optrand	Marka	ATEK
Modeli	H32394-CSTM	Modeli	ARC S 50
Tip	OtoPSI-A	Gövde çapı (mm)	50
Basınç aralığı (Bar)	0–200	Mil çapı (mm)	8
Giriş gerilimi (V DC)	5	Besleme gerilimi (VDC)	5
Çıkış voltajı (VDC)	0,5–4,5	Dönüş başına darbe sayısı	360
Hassasiyet (mV/psi)	1.35	Çıkış tipi	Hat sürücüsü
Bant Genişliği (Hz)	0,1–20000	Ölçüm aralığı (rpm)	3000- 6000
		Çıkış sinyalleri	A, /A, B, /B, Z, /Z

Silindir içi gaz basıncının ölçülmesi amacıyla kullanılacak basınç sensörünün motor silindir kapağında üzerindeki yeri belirlenmiştir. Basınç sensörünün yerini belirleme çalışmalarında supapların, bujinin konumu ve silindir kapağının konstrüksiyonu dikkate alınmıştır. Silindir içerisinden ölçüm alınacak şekilde basınç sensörüne uygun 4,5 mm HSS matkap ile delme işlemi gerçekleştirilmiş olup M5X0,5 kılavuz ile dış açılmıştır. Daha sonra basınç sensörünün montajı sağlanmıştır. Şekil 5. 10'da silindir kapağı delme ve montaj işlemi gösterilmiştir.



Şekil 5. 10. Silindir kapağı delme ve montaj işlemi

## 5.2. SIKIŞTIRMA ORANI

İdeal motorda, sıkıştırma başlangıcındaki silindir hacminin ( $V_1$ ), sıkıştırma sonu hacmine ( $V_2$ ) oranı şeklinde tanımlanan SO;

$$SO = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_h + V_c}{V_c} = 1 + \frac{V_h}{V_c} \quad (5.1)$$

ile hesaplanır. Burada;

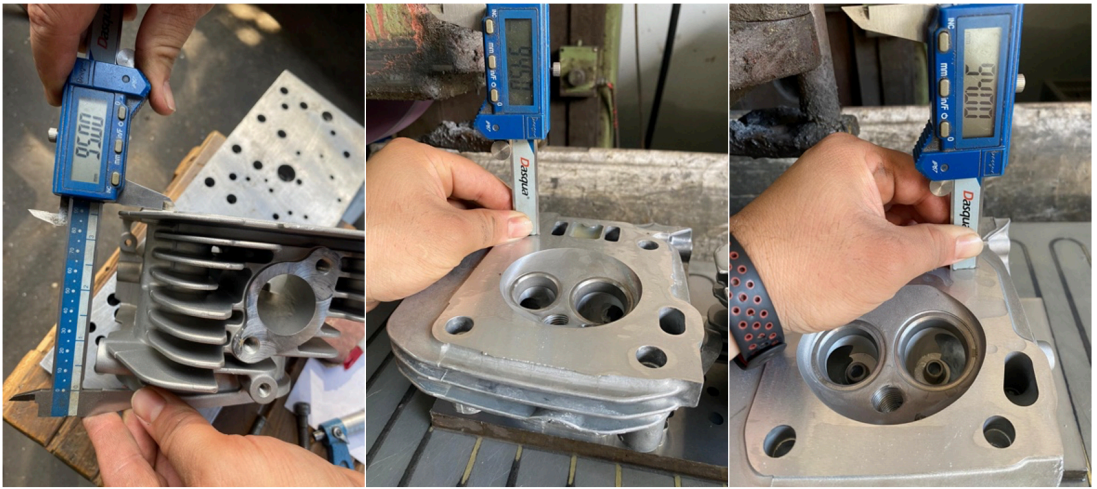
$V_h$  : kurs hacmini

$V_c$  : yanma odası hacmini; ifade etmektedir.

Deney motorunda farklı sıkıştırma oranları elde etmek amacıyla iki adet deney motoruna ait silindir kapağı ve contaları temin edilmiştir. Standart silindir kapağı yanma odası hacminin belirlenmesi amacıyla hassas terazi üzerinde yoğunluğu bilinen bir madeni yağ ile aşağıdaki şekilde doldurulmuştur. Belirlenen değere silindir kapak contası hacmi ilave edilerek yeni yanma odası hacimleri hesaplanmıştır. Şekil 5. 11’de standart motor yanma odası hacmi görülmektedir. Şekil 5. 12’de ise silindir kapak taşlama işlemleri verilmiştir.



Şekil 5. 11. Standart motor yanma odası hacmi



Şekil 5. 12. Silindir kapak taşlama işlemleri

Temin edilen silindir kapakları 0,5 mm ve 1 mm taşlanarak iki farklı sıkıştırma oranı değerleri elde edilmiştir. Ek olarak çift silindir kapak contası kullanılarak sıkıştırma oranı düşürülmüştür. Standart motorun sıkıştırma oranı 8,2:1 olarak üretici firma tarafından katalogda belirtilmiştir. Bu değere göre yapılan hesaplamalarda standart motor yanma odası hacmi, yeni elde edilen yanma odası hacimleri ve sıkıştırma oranları Çizelge 5.4’te verilmiştir.

Çizelge 5. 4. Sıkıştırma oranları

<b>Silindir kapağına yapılan işlem</b>	<b>Silindir hacmi</b>	<b>Yanma odası hacmi</b>	<b>Sıkıştırma oranı</b>
<b>Çift conta</b>	389,25 cm <sup>3</sup>	60,75 cm <sup>3</sup>	7,4:1
<b>Standart</b>	<b>389,25 cm<sup>3</sup></b>	<b>54,06 cm<sup>3</sup></b>	<b>8,2:1</b>
<b>0.50 mm taşlama</b>	389,25 cm <sup>3</sup>	51,06 cm <sup>3</sup>	8,62:1
<b>1.00 mm taşlama</b>	389,25 cm <sup>3</sup>	46,56 cm <sup>3</sup>	9,36:1

### 5.3. DENEYLERDE KULLANILAN HESAPLAMALAR

Deneysel çalışmadan edilen veriler yardımıyla birlikte motor performansının değerlendirilmesi amacıyla aşağıdaki formüller kullanılarak fren özgül yakıt tüketimi, fren efektif verimi, silindir içi gaz basıncı değerleri belirlenmiştir.

#### 5.3.1. Fren Özgül Yakıt Tüketimi (FÖYT)

Deneysel çalışmalar esnasında birim zamanda harcanan yakıt miktarı PLC tarafından okunan deneyin başlangıç ve bitiş zamanları ile yakıt miktarları değerleri ile birim zamanda tüketilen yakıt miktarı Eş. 5.2 ve Eş. 5.3 kullanılarak LabVIEW yazılımı aracılığı ile hesaplanmıştır.

$$\dot{m}_y = \frac{m_{yakıt} \cdot 10^{-3} \cdot 3600}{\Delta t} \quad (kg/h) \quad (5.2)$$

Burada;

$\dot{m}_y$  : kütleli yakıt debisi (kg/h)

$\Delta t$  : yakıtı tüketme süresini (s) göstermektedir.

Bulunan değerler aşağıdaki formülde yerine yazılarak FÖYT hesaplanmaktadır;

$$FÖYT = \frac{\dot{m}_y}{P_e} \times 10^3 \quad (g/kWh) \quad (5.3)$$

### 5.3.2. Fren Efektif Verim (FEV)

Fren efektif verimin hesaplanması için Eş. 5.4 kullanılmıştır.

$$\eta_e = \left( \frac{1}{FÖYT \times H_u} \times 1000 \times 3600 \right) \times 100 \quad (\%) \quad (5.4)$$

Burada;

$H_u$  : yakıtın alt ısı değeri (kJ/kg).

### 5.3.3. Silindir İçi Gaz Basıncı (SİGB)

Silindir kapağına monte edilen basınç sensöründen elde edilen mV cinsinden veriler LabVIEW yazılımı aracılığıyla kaydedilmiş ve sensörün teknik veri tablosunda belirtilen 5.5 eşitliği kullanılarak silindir içi basınç değerlerine dönüştürülmüştür. Elde edilen veriler, silindir içindeki yanma sürecinin analizinde kullanılmak üzere grafiksel olarak sunulmuştur.

$$SİGB = (V - V_{min}) / S \quad (5.5)$$

Burada;

V : Çıkış voltajı

$V_{min}$  : Minimum çıkış voltajı

S : Sensör hassasiyeti

Örnek veri basınç dönüşümü:

Sensör hassasiyeti: 1,35 mV/psi (0,00135 V/psi)

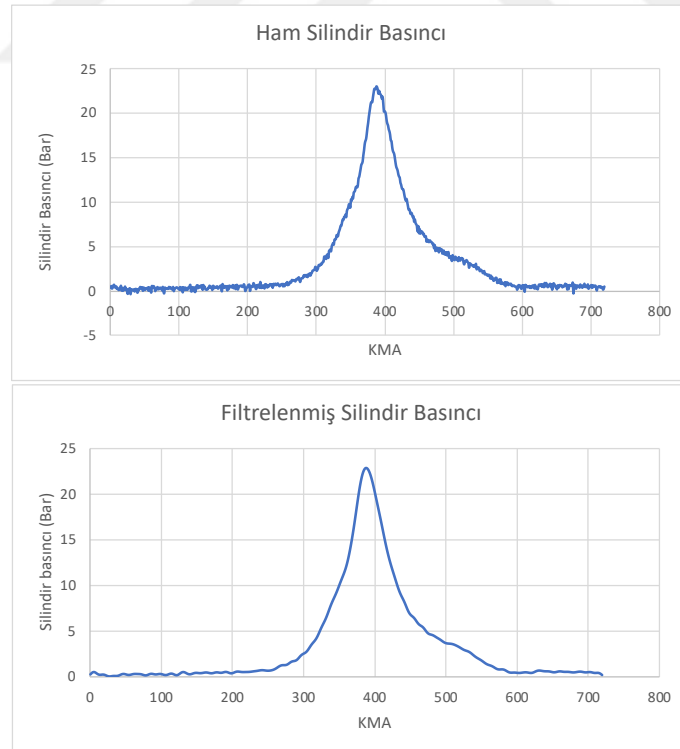
Measured sensor output: 5,0 V

Measured sensor minimum voltage: 0,5 V

$P = (5V - 0,5V) / 0,00135 \text{ V/psi} = 3333,33 \text{ psi} (229,82 \text{ Bar})$

Silindir içindeki basıncı ölçmek için sürekli olarak analog sinyaller alınır ve bu sinyaller sayısal olarak çevrilir. Ancak, krank açısı değişimine göre bu sinyallerin türevi alındığında gürültülü sonuçlar elde edilir.

Bu gürültüyü azaltmak için, dijital low-pass filtre kullanılmıştır [73]. Elde edilen bilgisayar ortamına aktarılan ham ve filtrelenmiş silindir basıncı verileri Şekil 5.13'te görülmektedir.



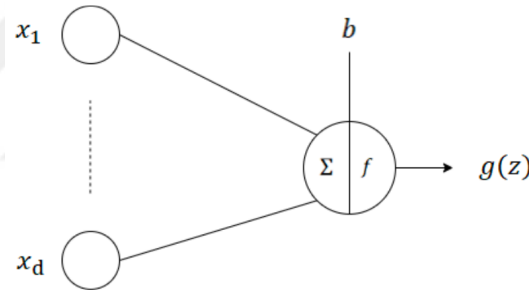
Şekil 5. 13. Filtreli ve filtresiz silindir basınç verileri

## 5. 4. YAPAY SİNİR AĞLARI

İnsan beyninin bilgi işleme süreçlerinden esinlenerek tasarlanmış matematiksel modellerdir. Karmaşık veri ilişkilerini modelleme, desen tanıma, sınıflandırma, regresyon ve diğer görevler için kullanılabilirler [74].

Bir sinir ağı, nöronlar veya düğümler adı verilen birbirine bağlı birkaç birim işlemciden oluşturulur. Her nöron, bağlantılar yoluyla diğer nöronlardan dürtüler alır. Bir bağlantı üzerindeki bir dürtünün gücü, ağırlık adı verilen ayarlanabilir bir skaler tarafından büyütülür veya sönümlenir. Ağırlıklar doğrusal regresyondaki eğime benzer; bir nöronun diğerini ne kadar güçlü etkilediğini gösterirler [75,76].

Şekil 5. 14'te yapay sinir ağı görülmektedir.



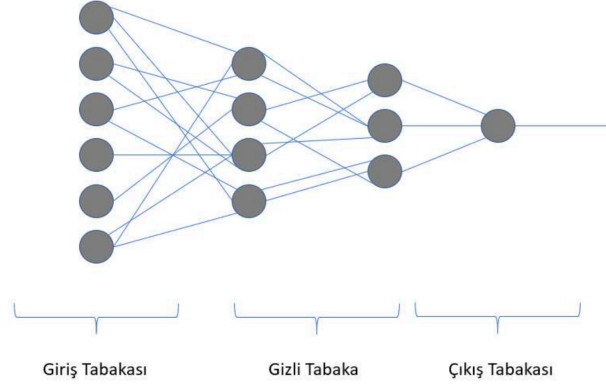
Şekil 5. 14. Yapay sinir ağı

Burada X fonksiyonun girdilerini İlk kısım, her bir girdiyi karşılık gelen bağlantı ağırlıklarıyla çarpar ve önyargı (bias) adı verilen bir ofset ekler [76]. Bu doğrusal girdi kombinasyonunun çıktısına ağırlıklı toplam, z denir, burada:

$$z = \sum_{i=1}^n W_i X_i + b \quad (5.26)$$

Yapay sinir hücrelerinin katmanlar şeklinde bağlanmasıyla veri tabanlı sistemler oluşturulur ve bu sistemler ile insan beynindeki öğrenme, tepki ve karar verme gibi yeteneklerin kazanılması hedeflenmiştir. Yapay sinir ağlarının hepsi yapısal olarak

birbirine benzemektedir. Şekil 5.15'te çok katmanlı yapay sinir ağı örneği görülmektedir.

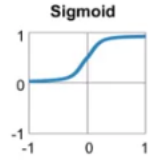
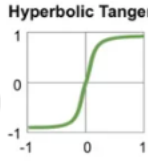
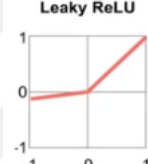
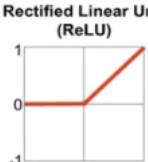


Şekil 5. 15. Çok katmanlı yapay sinir ağı örneği

Çizelge 5.5' de yapay sinir ağlarında kullanılan aktivasyon fonksiyonları verilmiştir.

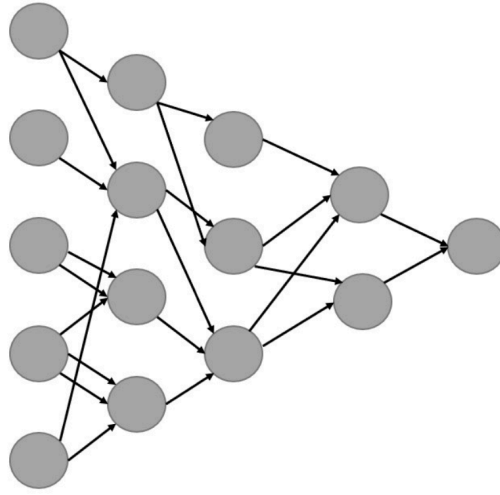
Yapay sinir ağlarında, nöronların aldığı girdileri belirli bir çıktıya dönüştürmek için kullanılan matematiksel fonksiyonlara aktivasyon fonksiyonları denir. Bu fonksiyonlar, ağın doğrusal olmayan davranış göstermesini sağlar ve daha karmaşık problemleri çözmesine olanak tanır. Çizelge 5.5' de aktivasyon fonksiyonları gösterilmiştir.

Çizelge 5.5. Yapay sinir ağlarında kullanılan aktivasyon fonksiyonları [77].

Fonksiyon	Formül	Grafik	Açıklama
Sigmoid	$f_{NET} = \frac{1}{1 + e^{-NET}}$		Doğrusal değildir, giriş değerlerine göre (0,1) arası çıktı üretir.
Hiperbolik	$f_{NET} = \frac{e^{NET} + e^{-NET}}{e^{NET} - e^{-NET}}$		Doğrusal değildir. Giriş değerlerine göre (-1,1) çıktı üretir.
Eşik	$f_{NET} = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$		Ya 1 ya da 0 üreten, mantıksal bir fonksiyondur.
Lineer	$f_{NET} = A \times f_{NET}$		Doğrusaldır. Lineer problemlerde kullanılır.

### 5.4.1. İleri Beslemeli Ağlar

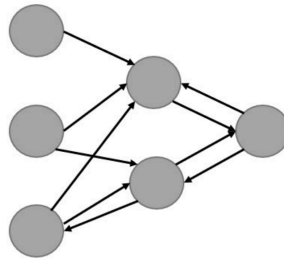
Giriş katmanından alınan işaretler çıkış katmanına tek yönlü olarak iletilir. İleri beslemeli ağlarda hücreler katmanlar şeklindedir ve hücre çıkışları sonraki katmana ağırlıklar üzerinden iletilir. İletilen hücre çıkışları bir sonraki katmana giriş olarak gelmektedir. Giriş katmanı gelen bilgiyi olduğu gibi gizli katmana iletir. Giriş katmanı olarak adlandırılan ilk katman, herhangi bir veriyi işlemez, sadece özellikleri aktarmaya hizmet eder. Her nöron, çıkışları ağ üzerinden besleyerek bir sonraki katmana tamamen bağlıdır. Giriş ve çıkış katmanı arasında, gizli katmanlar bir dizi matematiksel ve matris işlemi aracılığıyla girdiler ve hedefler arasındaki ilişkiyi eşler. Son olarak, son katmandaki nöronlar sistem çıktılarını verir [77]. Şekil 5.16'de ileri beslemeli tek katmanlı yapay sinir ağı örneği görülmektedir.



Şekil 5. 16. İleri beslemeli tek katmanlı yapay sinir ağı örneği

#### 5.4.2.Geri Beslemeli Ağlar

Geri beslemeli yapay sinir ağları, en az bir nöronun çıktısının kendisine veya başka bir nörona geri beslendiği, dolayısıyla ağda döngülerin olduğu mimarilere sahiptir. Bu döngüler, ağın daha karmaşık ve dinamik davranışlar sergilemesini sağlayarak, doğrusal olmayan problemlerin çözümünde etkili olmasını sağlar. Geri yayılım algoritması, bu tür ağların ağırlıklarını güncelleyerek öğrenmesini sağlayan temel bir algoritmadır [78]. Şekil 5.17’de geri beslemeli tek katmanlı yapay sinir ağı örneği verilmiştir.



Şekil 5. 17. Geri beslemeli tek katmanlı yapay sinir ağı örneği

### 5.4.3.Yapay Sinir Ağları Performans Ölçümleri ve Hata Hesaplamaları

Ortalama mutlak hata (mean absolute error-MAE), kök ortalama karesel hata (root mean square error-RMSE) ve MRE, YSA'nın uygulanması üzerine yapılan çalışmada üretilen modellerin tahmin performanslarını değerlendirmek için kullanılmıştır [79].

#### 5.4.3.1. Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error – MAE)

Bir modelin tahminlerinin gerçek değerlerden ne kadar uzakta olduğunu ölçen bir hata metriğidir. Başka bir deyişle, modelin yaptığı tahminler ile gerçek değerler arasındaki ortalama farkı ifade eder.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - X_i|}{n} \quad (5.27)$$

MAE: Ortalama Mutlak Hata

$Y_i$ : Tahmin değeri

$X_i$ : Gerçek değer

$n$ : Veri sayısı

#### 5.4.3.2. Ortalama Mutlak Yüzdese Hata (Mean Absolute Percentage Error- (MAPE))

Bir modelin tahminlerinin gerçek değerlerden ne kadar uzakta olduğunu yüzde olarak ifade eden bir hata ölçüsüdür. Başka bir deyişle, modelin tahminlerinin ortalama olarak gerçek değerlerden ne kadar saptığını gösterir.

MAPE, farklı ölçekteki veri setlerindeki modellerin performansını karşılaştırmak için kullanışlıdır. Çünkü sonuçlar yüzde olarak verildiği için, farklı birimlerde ölçülen değerler arasında daha anlamlı bir kıyaslama yapılmasını sağlar.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|A_t - F_t|}{A_t} \quad (5.28)$$

MAPE = Ortalama mutlak yüzdesel hata

$n$ : Toplama işlemi sayısı

$At$ : Gerçek değer

$Ft$ : Tahmin değeri

#### 5.4.3.3. Kök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Square Error – Rmse)

Bir modelin tahminlerinin gerçek değerlerden ne kadar uzakta olduğunu ölçen bir hata metriğidir. Başka bir deyişle, modelin yaptığı tahminler ile gerçek değerler arasındaki ortalama farkın kareköküdür. Makine öğrenmesi ve istatistik alanında en sık kullanılan hata metriklerinden biridir. RMSE, büyük hataları daha fazla ağırlıklandırır. Bu, modelin büyük hatalar yapma eğiliminde olup olmadığını anlamayı sağlar.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n}} \quad (5.29)$$

RMSE: Kök ortalama kare hatası

$Y_i$ : Tahmin değeri

$X_i$ : Gerçek değer

$n$ : Veri sayısı

#### 5.4.3.4. Ortalama Kare Hatası (Mean Square Error – MSE)

Bir modelin yaptığı tahminlerin gerçek değerlerden ne kadar uzakta olduğunu ölçen istatistiksel bir metriktir. Başka bir deyişle, modelin tahminleri ile gerçek değerler arasındaki farkların karelerinin ortalamasıdır. MSE, büyük hataları daha fazla ağırlıklandırır. Bu sayede, modelin büyük hatalar yapma eğiliminde olup olmadığını hakkında bilgi için kullanılır.

$$MSE = \sum_{i=1}^n \frac{(Y_i - X_i)^2}{n} \quad (5.30)$$

MSE: Ortalama kare hatası

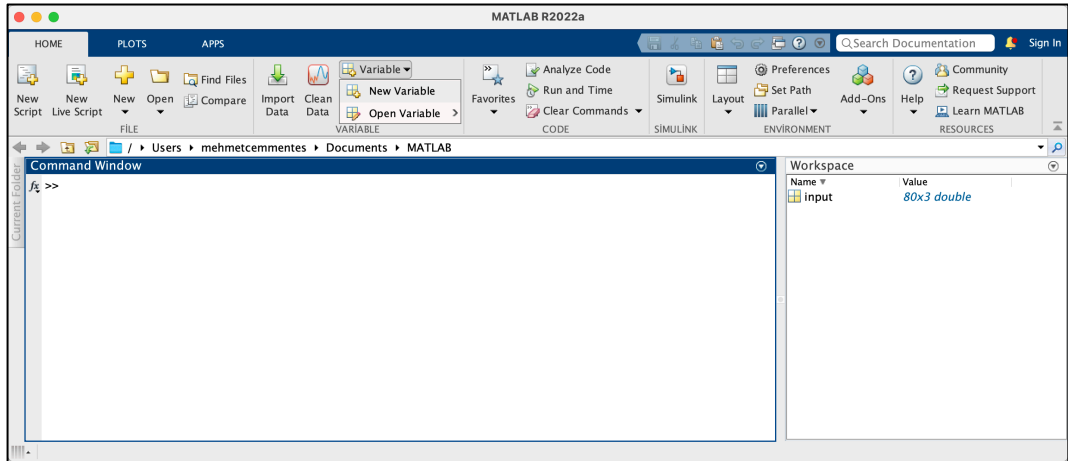
$Y_i$ : Tahmin değeri

$X_i$ : Gerçek değer

$n$ : Veri sayısı

## 5.5. MATLAB YAPAY SİNİR AĞLARI UYGULAMASI (NN TOOLBOX)

Deneylerde kullanılan motor yükü, sıkıştırma oranı ve yakıt karışım oranları giriş değişkenleri (input), deneylerde elde edilen emisyon ve motor performans değerleri çıkış değişkenleri (output) olacak şekilde MATLAB\_2022a paket programındaki yapay sinir ağı arayüzü kullanılarak tahmin algoritması oluşturulmuştur. Şekil 5.18’de Matlab 2022a arayüzü üzerinde girdi ve çıktıların workspace aktarılması görülmektedir.



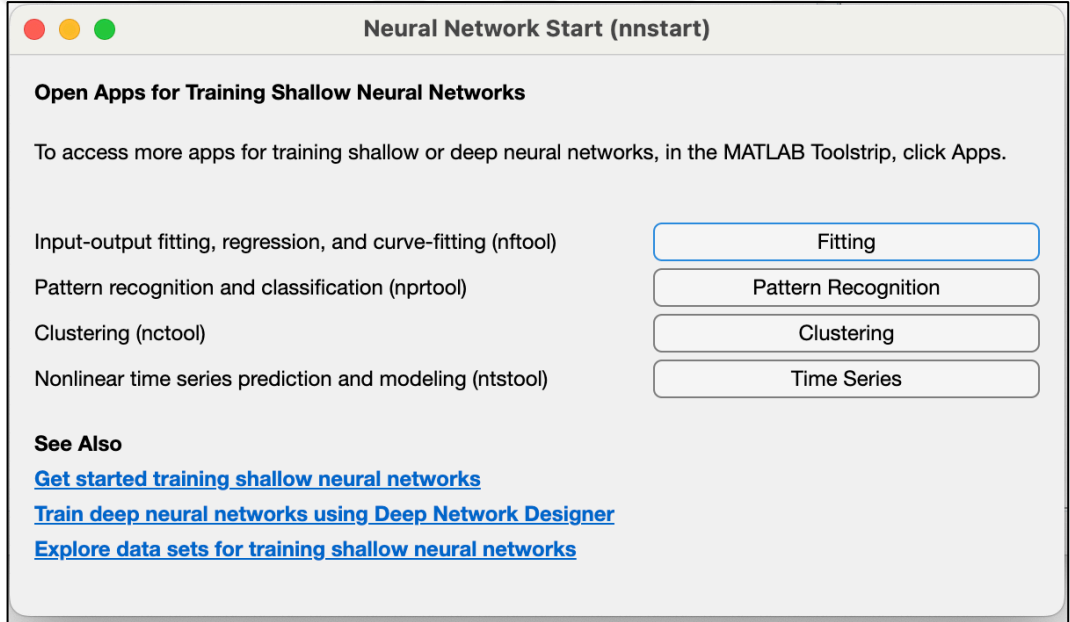
Şekil 5. 18. Matlab 2022a arayüzü üzerinde girdi ve çıktıların workspace aktarılması

Programda Variable butonu kullanılarak input ve output olacak şekilde veriler workspace’ eklenmiştir. Yapay sinir ağı arayüzü “nnstart” komutu ile çalıştırılması aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Şekil 5.19’da Neural network uygulamasının açma komutu (nnstart) gösterilmiştir.



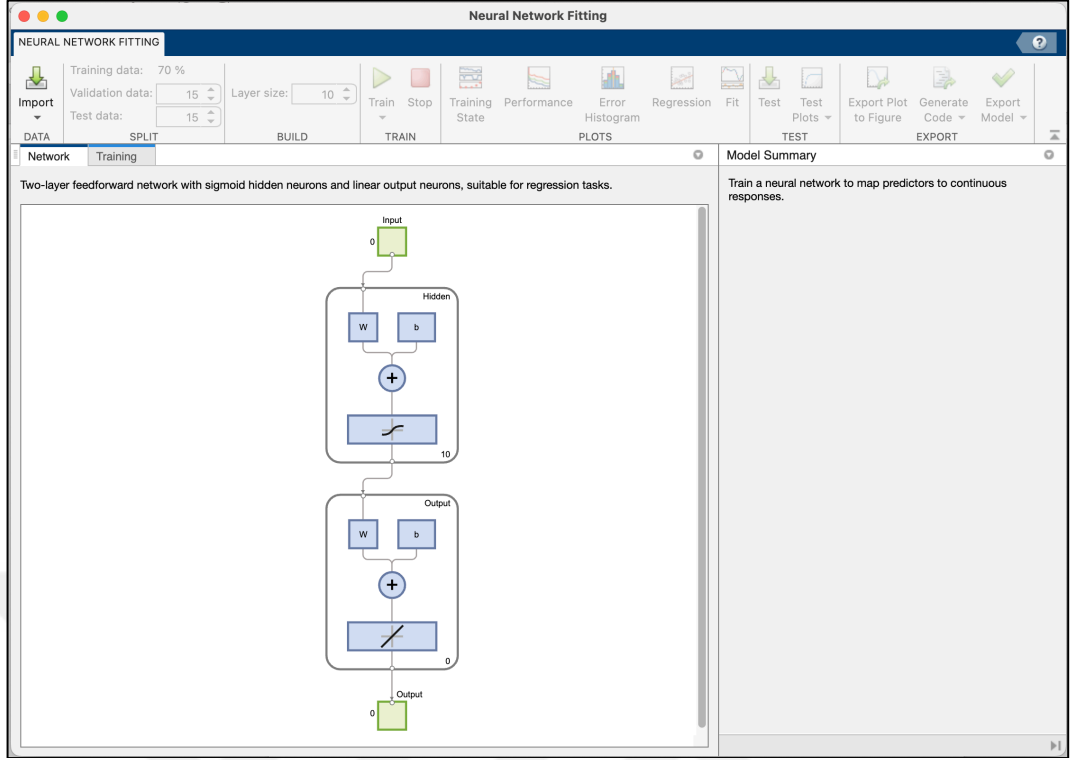
Şekil 5. 19. Neural network uygulamasının açma komutu (nnstart)

Şekil 5.20’de Input-output fitting, regression and curve-fitting (nftool) görülmektedir.



Şekil 5. 20. Input-output fitting, regression, and curve-fitting (nftool)

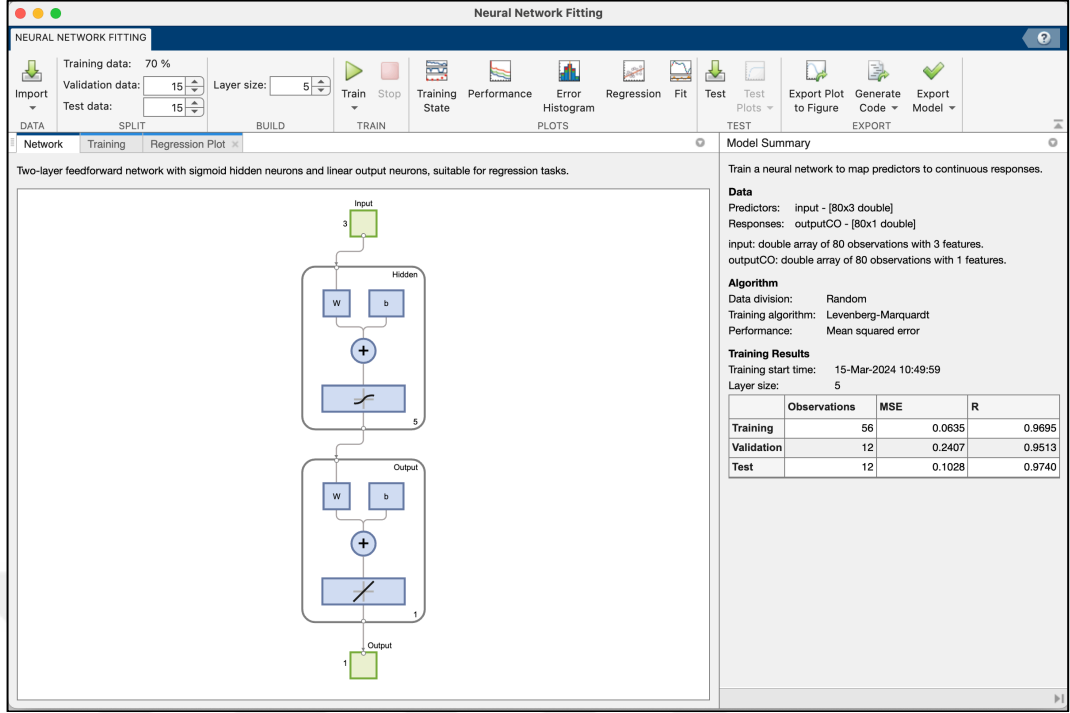
Tahmin algoritması oluşturmak amacıyla Fitting seçeneği kullanılarak tahmin modeli oluşturulmuştur. Şekil 5.21’de yapay sinir ağının genel yapısı gösterilmiştir.



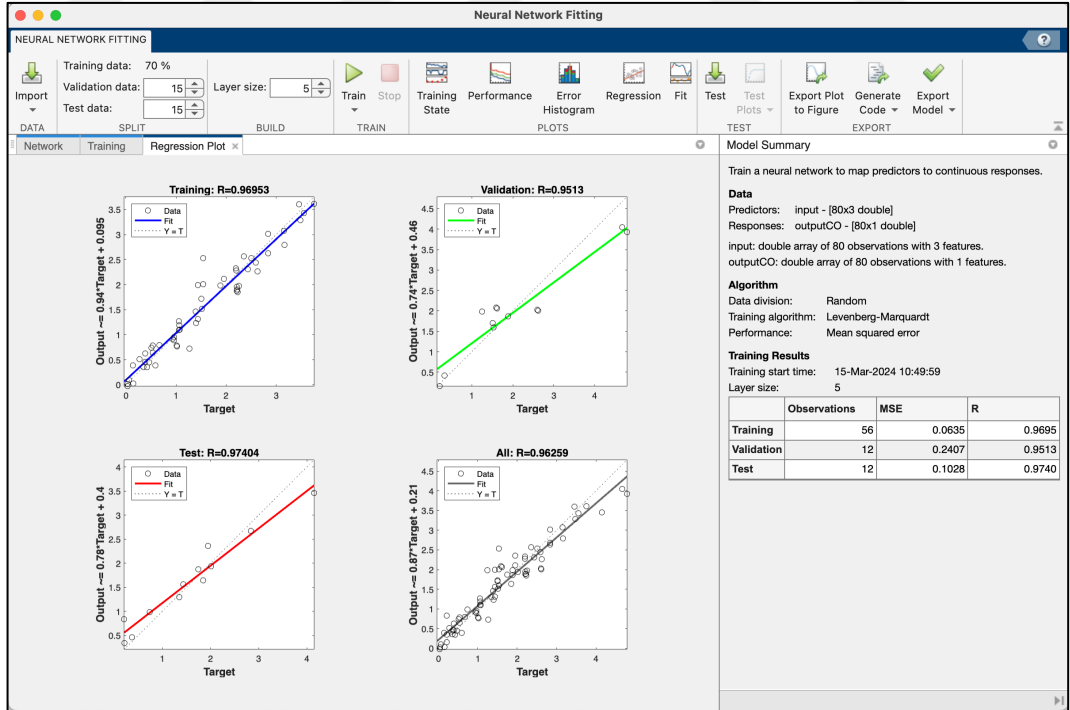
Şekil 5. 21. Yapay sinir ağının genel yapısı

Buradan workspace' e aktarılan veriler import butonu kullanılarak input ve output olacak şekilde tanımlanmıştır. Veri seti aktarıldıktan sonra veriler split bölümünden training, validation ve test bölümlerine yüzdesel olarak seçilmiştir. Build bölümünden Layer size ile katman seçimi ayarlanmıştır. Model oluşturulduktan sonra Train butonu ile model eğitimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.22'de yapay sinir ağının eğitiminde sonra model özeti verilmiştir.

Şekil 5.23'te eğitim sonucu elde edilen regresyon eğrileri Regression Plot sekmesinde program tarafından sunulmaktadır. Oluşturulan modelin özetinde Training, Validation ve Test verilerinin MSE ve R değerleri görülmektedir.

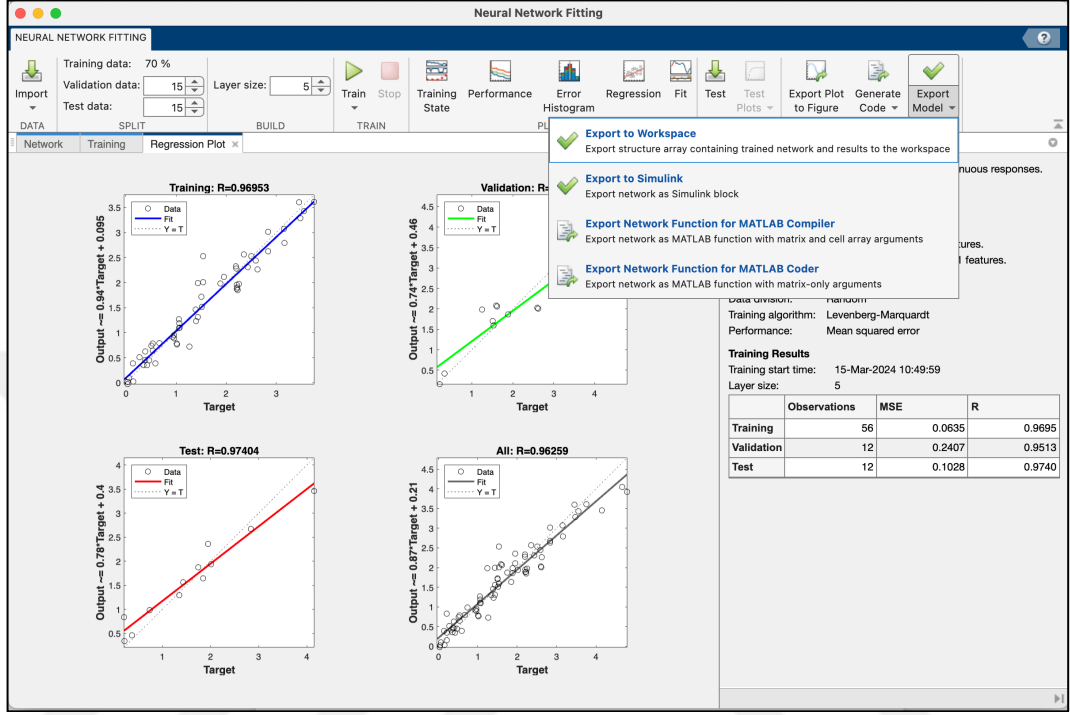


Şekil 5. 22. Yapay sinir ağının eğitiminde sonra model özeti



Şekil 5. 23. Yapay sinir ağının regresyon eğrileri

Export menüsünde bulunun export model butonundan oluşturulan yapay sinir ağı modelinde elde edilen tüm çıktılar workspace aktarılabilir. Şekil 5.24'te yapay sinir ağı ile elde edilen çıktılarının aktarılması görülmektedir.



Şekil 5. 24. Yapay sinir ağı ile elde edilen çıktılarının aktarılması

Oluşturulan YSA modelinden elde edilen tahmin çıktıları ve deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ile YSA performans ölçüleri ve hata ölçütleri bölümünde açıklanan metrikler ile değerlendirilmiş ve bulgular bölümünde sunulmuştur.

## BÖLÜM 6

### BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, performans ve emisyonları iyileştirmek amacıyla tek silindirli 4 zamanlı benzinli bir motorun sıkıştırma oranı artırılmış ve benzin içerisine belirli oranlarda izobütanol eklenmiştir. İzobütanol-benzin karışımları İ5, İ10, İ15, İ20 olacak şekilde oluşturulmuştur. Deney motoru; 4 farklı sıkıştırma oranıyla (7,4/1; 8,2/1; 8,62/1 ve 9,36/1) benzin/izobütanol karışımları ve saf benzin yakıtıyla test edilmiştir. Motor deneyleri, sabit devirde (3000 d/d) ve 5 farklı yükte (1 kW, 2 kW, 3 kW, 4 kW, 5 kW) gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler grafiğe dökülmüş ve irdelenmiştir.

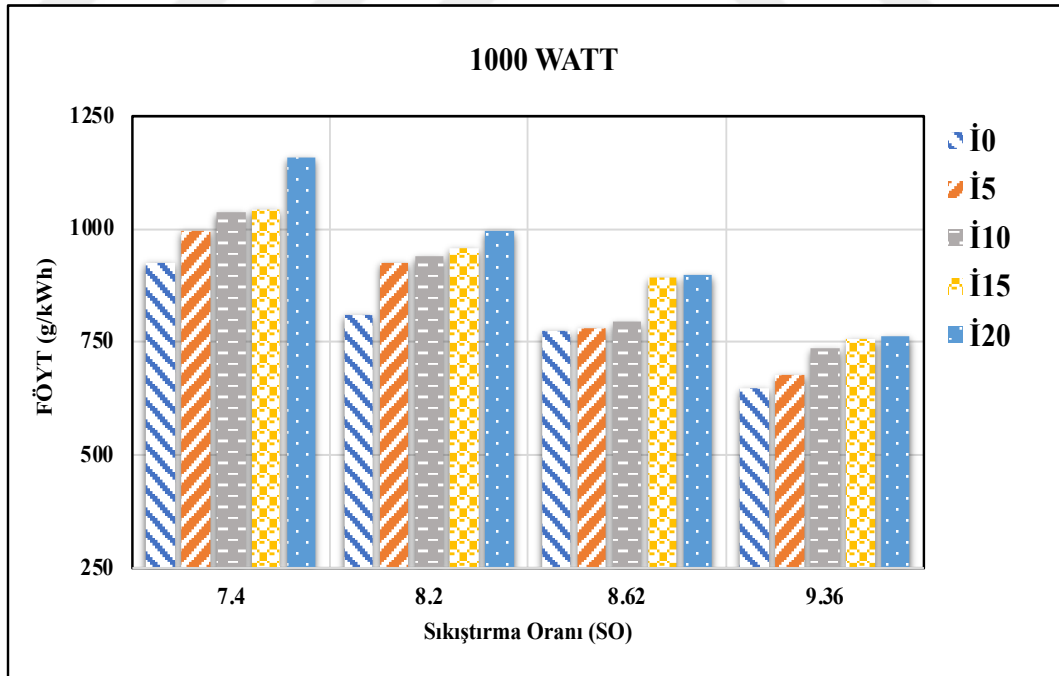
#### 6.1. MOTOR PERFORMANSI

Deneyler sırasında elde edilen veriler hesaplamalar neticesinde elde edilen sonuçlar bu bölümde grafikler yardımıyla verilmiştir.

##### 6.1.2. Fren Özgül Yakıt Tüketimi

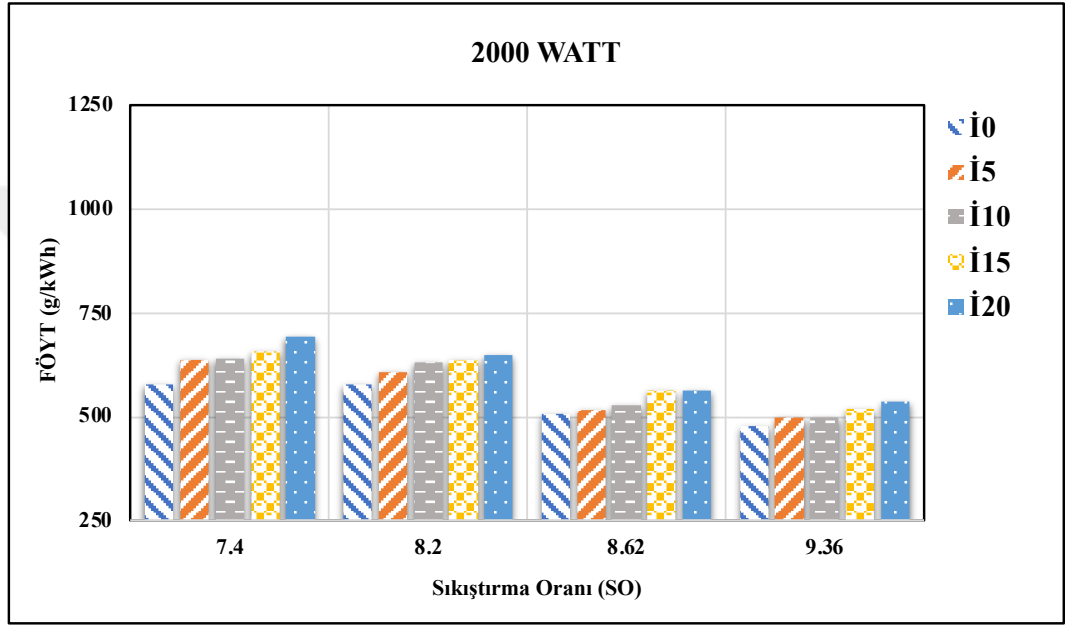
FÖYT birim güç başına tüketilen yakıt miktarını gösteren bir parametredir[80]. İzobütanol-benzin karışımları ve benzin ile yapılan çalışmaların farklı motor yükleri ve SO' lardaki FÖYT üzerindeki etkisi Şekil 6.1'den Şekil 6.5'e kadar 1000W motor yükünden 5000W motor yükü için sırasıyla sunulmuştur. Motor yükünün artması ile tüm yakıt karışımları ve SO'ları için FÖYT azalmaktadır. Yük artışıyla beraber silindir basınç ve sıcaklığı artmakta yanma hızı yükselmektedir. Yanma hızının artmasıyla ısı kayıplar azalmakta ve yük arttıkça FÖYT de azalmaktadır. Artan sıkıştırma oranı motor gücünü artırdığı için SO arttıkça motorun yakıt tüketimi de azalmaktadır [5]. Grafik incelendiğinde, tüm yükler ve yakıtlar için artan SO ile FÖYT'nin de azaldığı görülmektedir.

En düşük özgül yakıt tüketim değerlerinin elde edildiği motor yükü olan 5000W için izobütanol kullanımı ile tüm SO'larda FÖYT benzine göre artış göstermiştir. Minimum FÖYT 342,09 g/kWh olarak 9.36:1 SO'da ve 5000W yükte İ0 yakıtının kullanımı ile elde edilmiştir. Aynı motor yükü ve SO'da maksimum FÖYT ise 399,96 g/kWh olarak İ20 yakıtının kullanımı ile elde edilmiştir. Bu artış aynı SO ve motor yükünde benzine kıyasla yaklaşık olarak %16,9' dur. Genel olarak bütün yakıtlarda SO arttıkça FÖYT azalmıştır. Ancak alkollerin alt ısıl değerinin benzine göre daha düşük olmasından dolayı aynı çıkış gücünü elde edebilmek için daha fazla yakıt kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle alkollerin yakıt olarak kullanımında FÖYT benzin kullanımına göre yüksek çıkmaktadır [81]. Şekil 6.1'de 1000W motor yükünde elde edilen FÖYT değerlerinin SO'ya bağlı olarak değişimi sunulmuştur. Grafik incelendiğinde SO arttıkça FÖYT'nin tüm yakıtlar için azaldığı gözlenmiştir. En düşük FÖYT'nin SO 9,36:1' de İ0 yakıtı ile 648,18 g/kWh olarak hesaplanmıştır. Aynı sıkıştırma oranı için en yüksek FÖYT'e İ20 yakıtı için 763,92 g/kWh olarak hesaplanmış ve yaklaşık %17,85 oranında artış tespit edilmiştir.



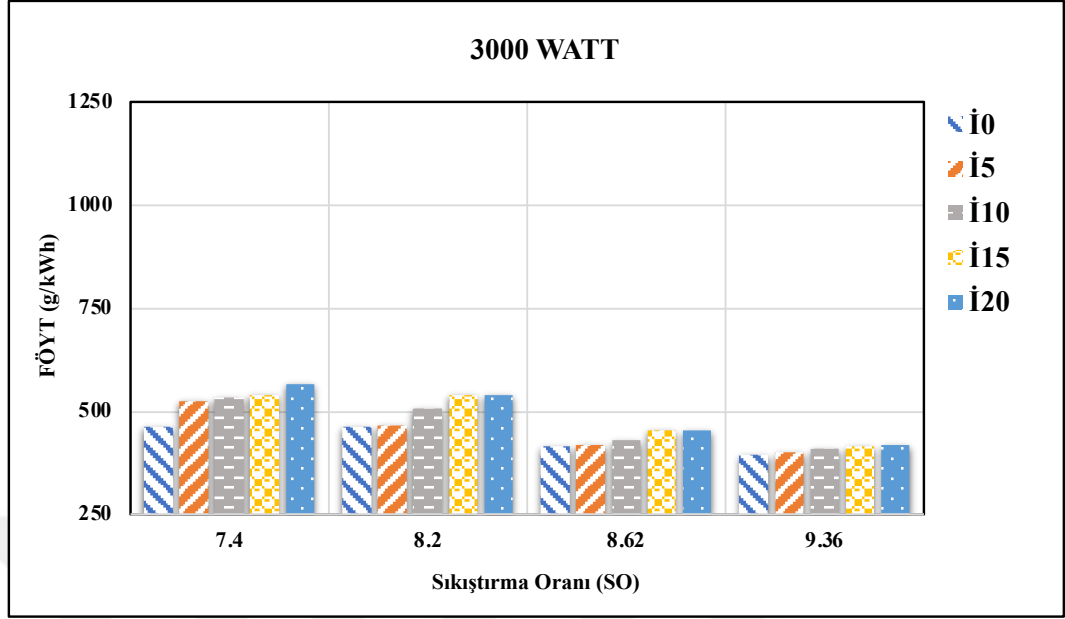
Şekil 6. 1 Sıkıştırma oranına bağlı 1000W FÖYT değerleri

Şekil 6.2’de 2000W motor yükünde elde edilen FÖYT değerlerinin SO’ya bağlı olarak değişimi sunulmuştur. Grafik incelendiğinde SO arttıkça FÖYT’nin tüm yakıtlar için azaldığı gözlenmiştir. En düşük FÖYT’nin SO 9,36:1’ de İ0 yakıtı ile 478,8 g/kWh olarak hesaplanmıştır. Aynı sıkıştırma oranı için en yüksek FÖYT’e İ20 yakıtı için 538,2 g/kWh olarak hesaplanmış ve yaklaşık %12,4 oranında artış tespit edilmiştir.



Şekil 6. 2. Sıkıştırma oranına bağlı 2000W FÖYT değerleri

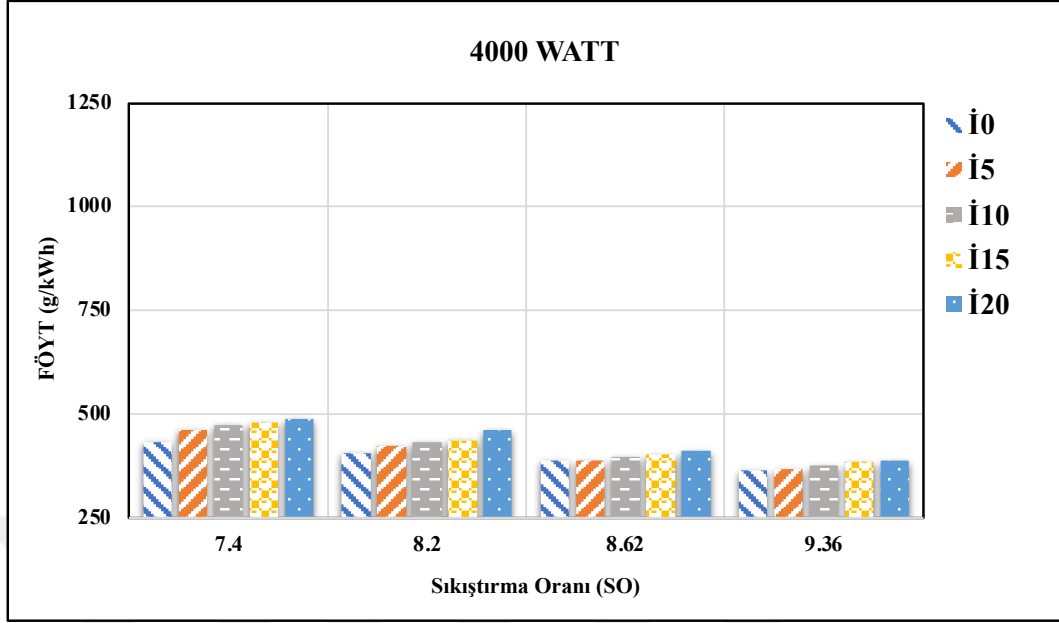
Şekil 6.3’te 3000W motor yükünde elde edilen FÖYT değerlerinin SO’ya bağlı olarak değişimi sunulmuştur. Grafik incelendiğinde SO arttıkça FÖYT’nin tüm yakıtlar için azaldığı gözlenmiştir. En düşük FÖYT’nin SO 9,36:1’ de İ0 yakıtı ile 396 g/kWh olarak hesaplanmıştır. Aynı sıkıştırma oranı için en yüksek FÖYT’e İ20 yakıtı için 417,54 g/kWh olarak hesaplanmış ve yaklaşık %5,4 oranında artış tespit edilmiştir.



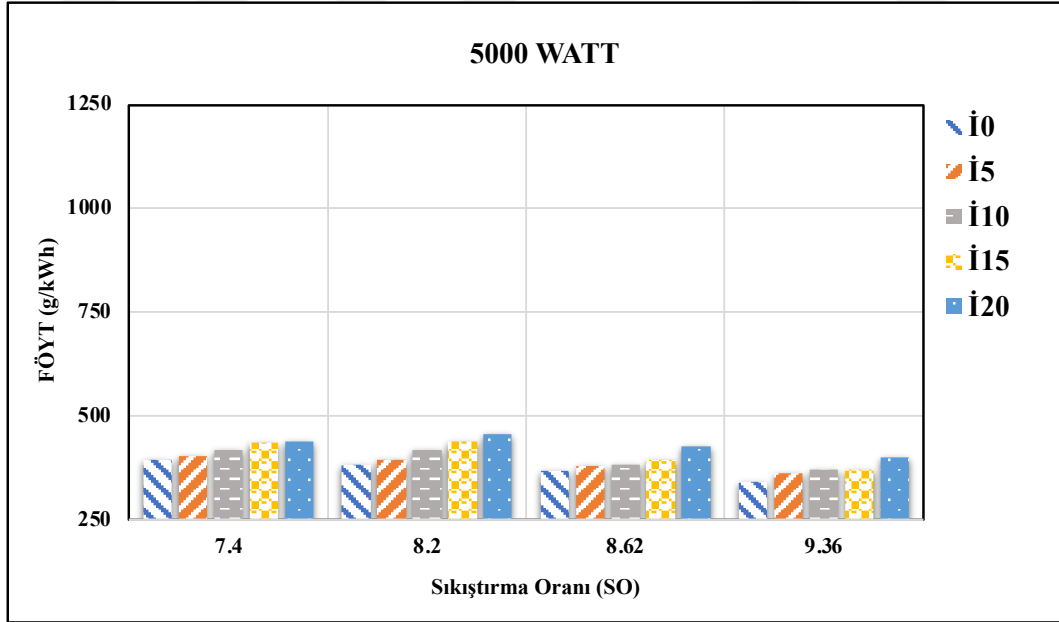
Şekil 6. 3. Sıkıştırma oranına bağlı 3000W FÖYT değerleri

Şekil 6.4'te 4000W motor yükünde elde edilen FÖYT değerlerinin SO'ya bağlı olarak değişimi sunulmuştur. Grafik incelendiğinde SO arttıkça FÖYT'nin tüm yakıtlar için azaldığı gözlenmiştir. En düşük FÖYT'nin SO 9,36:1' de İ0 yakıtı ile 366.26 g/kWh olarak hesaplanmıştır. Aynı sıkıştırma oranı için en yüksek FÖYT'e İ20 yakıtı için 389,41 g/kWh olarak hesaplanmış ve yaklaşık %6,3 oranında artış tespit edilmiştir.

Şekil 6.5'te 5000W motor yükünde elde edilen FÖYT değerlerinin SO'ya bağlı olarak değişimi sunulmuştur. Diğer yüklere benzer değişimler izlenmiştir.



Şekil 6. 4. Sıkıştırma oranına bağlı 4000W FÖYT değerleri



Şekil 6. 5. Sıkıştırma oranına bağlı 5000W FÖYT değerleri

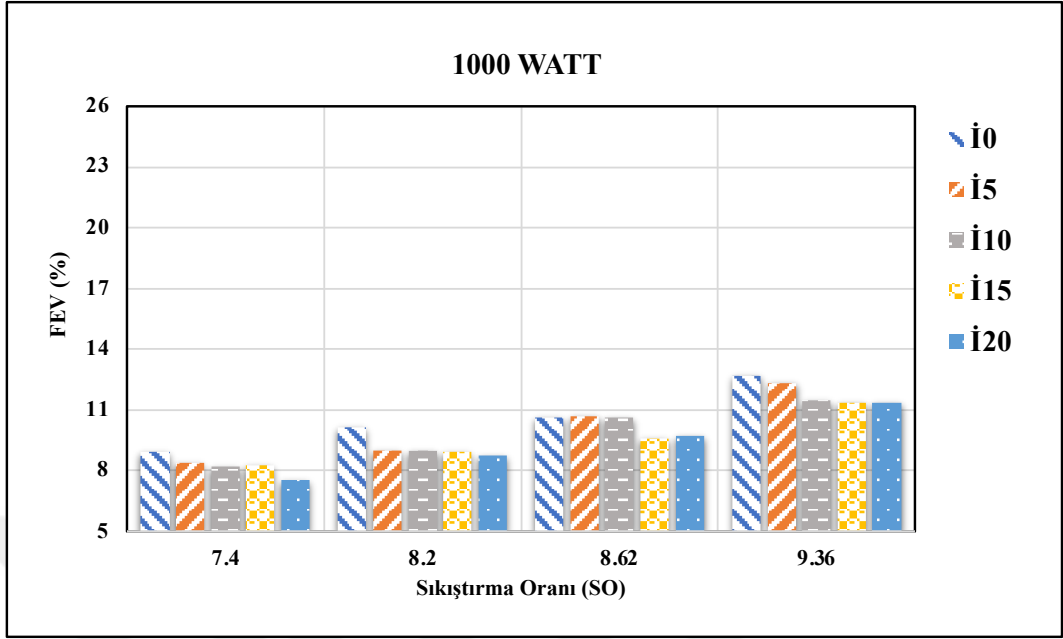
### 6.1.3. Fren Efektif Verim

FEV yakıt enerjisinin ne oranda yararlı işe dönüştüğünün bir göstergesidir. Şekil 6.6-Şekil 6.10'da SO ve motor yükü değişiminin FEV üzerindeki etkisi dört farklı yakıt için gösterilmiştir. BA motorlarda FEV SO'ya bağlı bir fonksiyondur, SO arttıkça belirli bir orana kadar termik verim de artar [82].

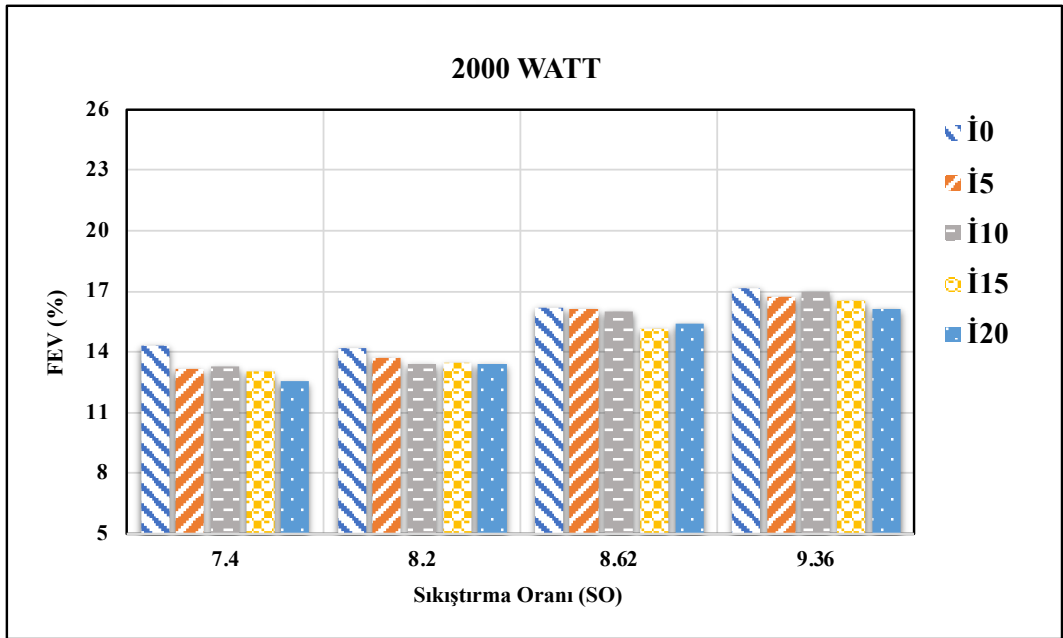
Genel olarak motor yük değerleri arttıkça FEV artış göstermiştir. Maksimum FEV değeri 9,36:1 SO'da ve 5000W' de İ0 yakıtının kullanımı ile %24,02 olarak elde edilmiştir. Aynı SO ve motor yükünde İ20 yakıtı ile FEV %9.53'lik bir azalma meydana gelmiştir. İzobütanol içeren yakıtların genelindeki verimin düşmesinin nedeni, alkollerin buharlaşma ısılarının yüksek olması nedeniyle silindiri soğutması ve sonucunda maksimum çevrim sıcaklığının düşük çıkmasıdır. Maksimum sıcaklığın düşük olması verimin düşmesine neden olmaktadır.

Şekil 6.6'da 1000W motor yükündeki elde edilen FEV değerlerinin SO'ya bağlı olarak değişimi sunulmuştur. Grafik incelendiğinde SO arttıkça FEV değerinin tüm yakıtlar için arttığı gözlenmiştir. En yüksek FEV'nin SO 9,36:1'de İ0 yakıtı ile yaklaşık %12,68 olarak hesaplanmıştır. Aynı sıkıştırma oranı için en düşük FEV'nin İ20 yakıtı için yaklaşık %11,35 olarak hesaplanmış ve %10,43 düşüş belirlenmiştir.

Şekil 6.7'de 2000W motor yükündeki elde edilen FEV değerlerinin SO'ya bağlı olarak değişimi sunulmuştur. Grafik incelendiğinde SO arttıkça FEV değerinin tüm yakıtlar için arttığı gözlenmiştir. En yüksek FEV'nin SO 9,36:1'de İ0 yakıtı ile yaklaşık %17,16 olarak hesaplanmıştır. Aynı sıkıştırma oranı için en düşük FEV'nin İ20 yakıtı için yaklaşık %16,15 olarak hesaplanmış ve yaklaşık %5,88 düşüş belirlenmiştir.



Şekil 6. 6. Sıkıştırma oranına bağlı 1000W FEV değerleri

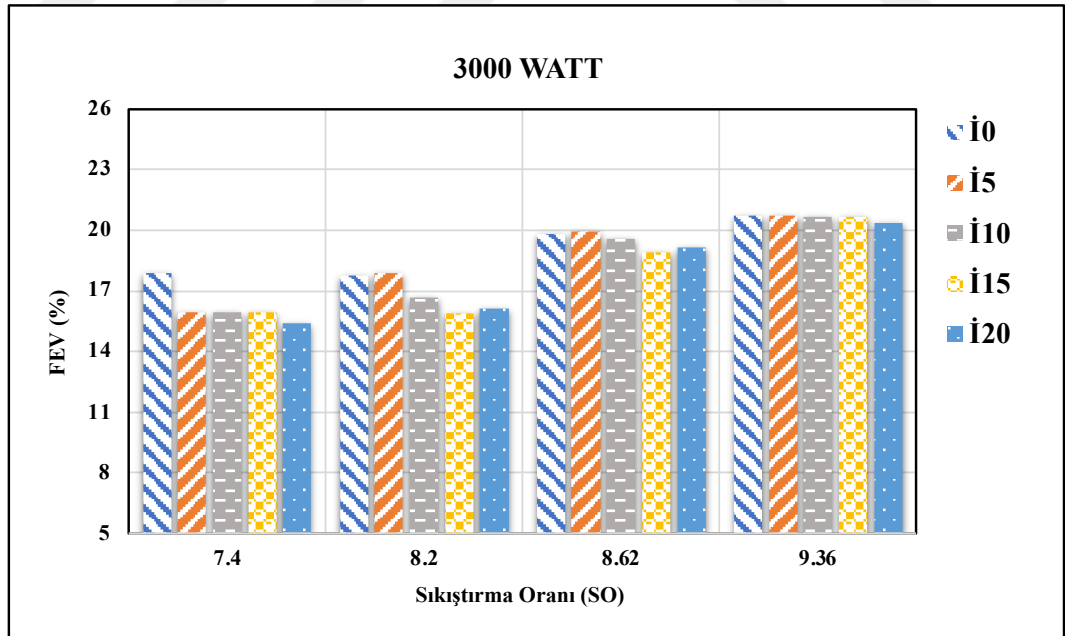


Şekil 6. 7. Sıkıştırma oranına bağlı 2000W FEV değerleri

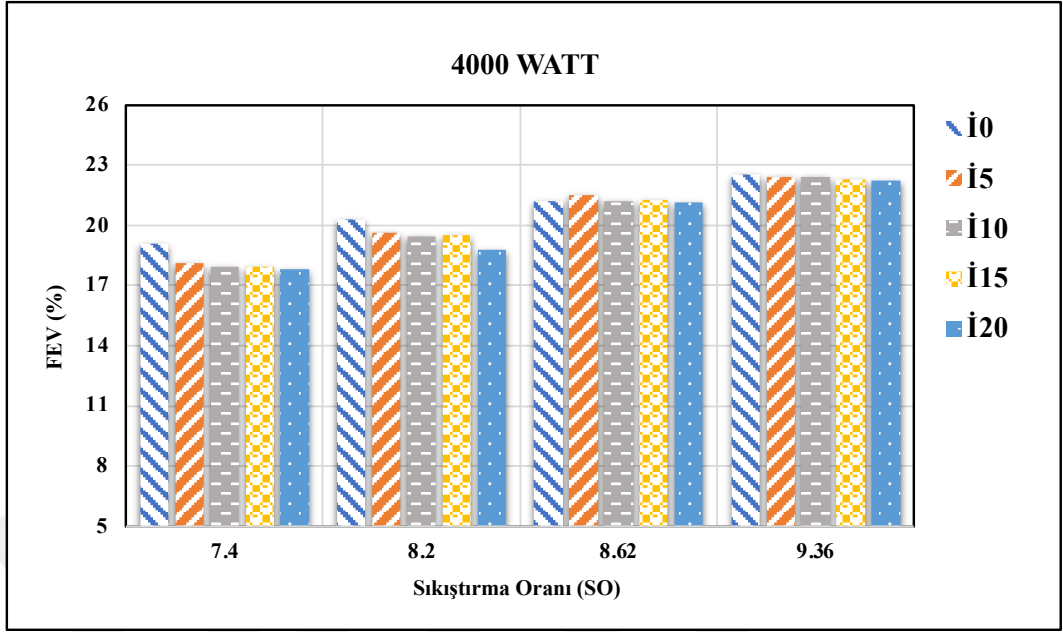
Şekil 6.8’de 3000W motor yükündeki elde edilen FEV değerlerinin SO’ya bağlı olarak değişimi sunulmuştur. Grafik incelendiğinde SO arttıkça FEV değerinin tüm yakıtlar için arttığı gözlenmiştir. En yüksek FEV’nin SO 9,36:1’de İ0 yakıtı ile yaklaşık %20,75 olarak hesaplanmıştır. Aynı sıkıştırma oranı için en düşük FEV’nin İ20 yakıtı için yaklaşık %20,35 olarak hesaplanmış ve yaklaşık %2 düşüş belirlenmiştir.

Şekil 6.9’da 4000W motor yükündeki elde edilen FEV değerlerinin SO’ya bağlı olarak değişimi sunulmuştur. Grafik incelendiğinde SO arttıkça FEV değerinin tüm yakıtlar için arttığı gözlenmiştir. En yüksek FEV’nin SO 9,36:1’de İ0 yakıtı ile yaklaşık %20,75 olarak hesaplanmıştır. Aynı sıkıştırma oranı için en düşük FEV’nin İ20 yakıtı için yaklaşık %20,35 olarak hesaplanmış ve yaklaşık %2 düşüş belirlenmiştir.

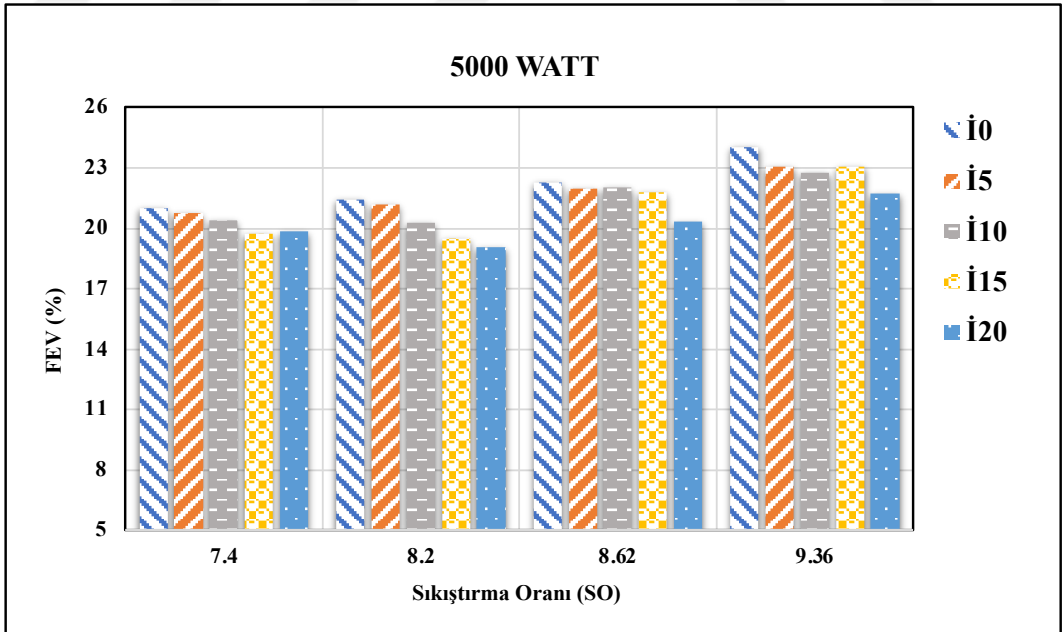
Şekil 6.10’da 5000W motor yükünde elde edilen FEV değerlerinin SO’ya bağlı olarak değişimi sunulmuştur. Diğer yüklere benzer değişimler izlenmiştir.



Şekil 6. 8. Sıkıştırma oranına bağlı 3000W FEV değerleri



Şekil 6. 9. Sıkıştırma oranına bağlı 4000W FEV değerleri



Şekil 6. 10. Sıkıştırma oranına bağlı 5000W FEV değerleri

## 6.2. EGZOZ EMİSYONLARI

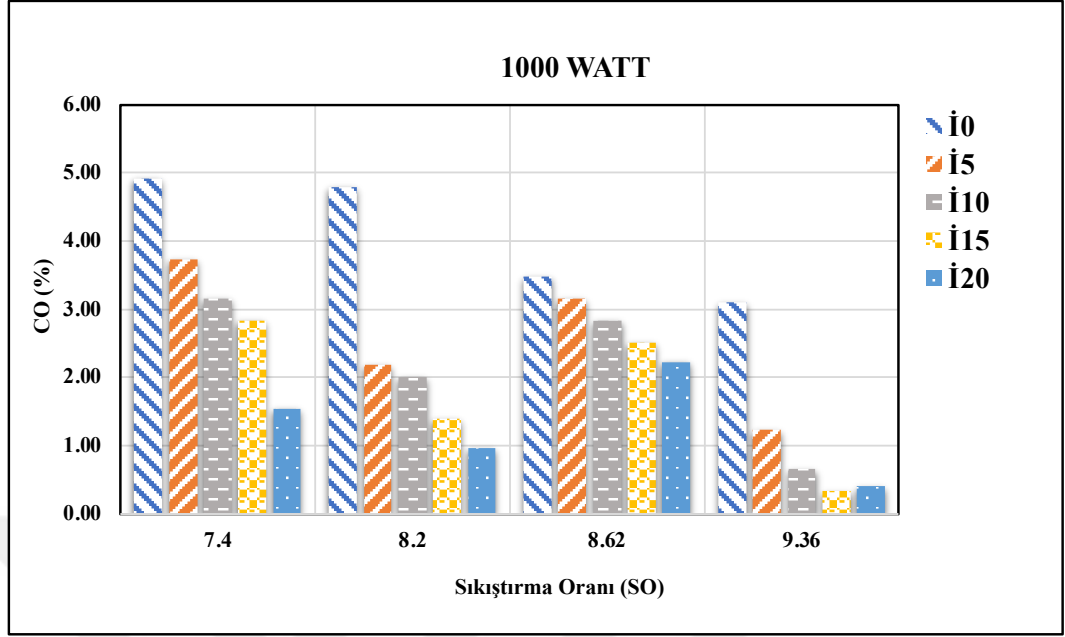
### 6.2.1. Karbonmonoksit

Silindirin içerisinde oksijen yetersizliğinden dolayı meydana gelen eksik yanma sonucu CO emisyonları oluşmaktadır ve yakıtın kimyasal bileşiminde bulunan karbon atomunun sayısı CO emisyonunu doğrudan etkilemektedir [54,83]. Alkol yakıtlarda kimyasal bileşimlerinde bulunan karbon atomu sayısı benzine göre daha azdır ve C/H oranları daha düşüktür [84]. Ayrıca alkollerin yapısında oksijen bulunması da CO emisyonunun azalmasına katkıda bulunmaktadır.

İzobütanol-benzin karışımları ve benzin ile yapılan çalışmaların farklı motor yükü ve SO'lardaki CO üzerindeki etkisi Şekil 6.11-6.15'te gösterilmektedir. İzobütanol ilavesi ile tüm motor yüklerinde CO emisyonu azalmıştır.

Benzine yakıtına oranla yakıt içerisindeki izobütanol miktarı artması CO emisyonlarını azaltmıştır. SO oranının artması oksidasyonu arttırarak CO emisyonlarının azalmasını sağlamıştır. İ20 yakıtı için SO 9,36:1'de 5000W motor yükünde %0,037 olarak elde edilmiştir. Benzine kıyasla aynı SO'da ve motor yükünde en düşük CO değerleri benzine kıyasla İ20 yakıtı için yaklaşık %97 oranında azaldığı görülmüştür.

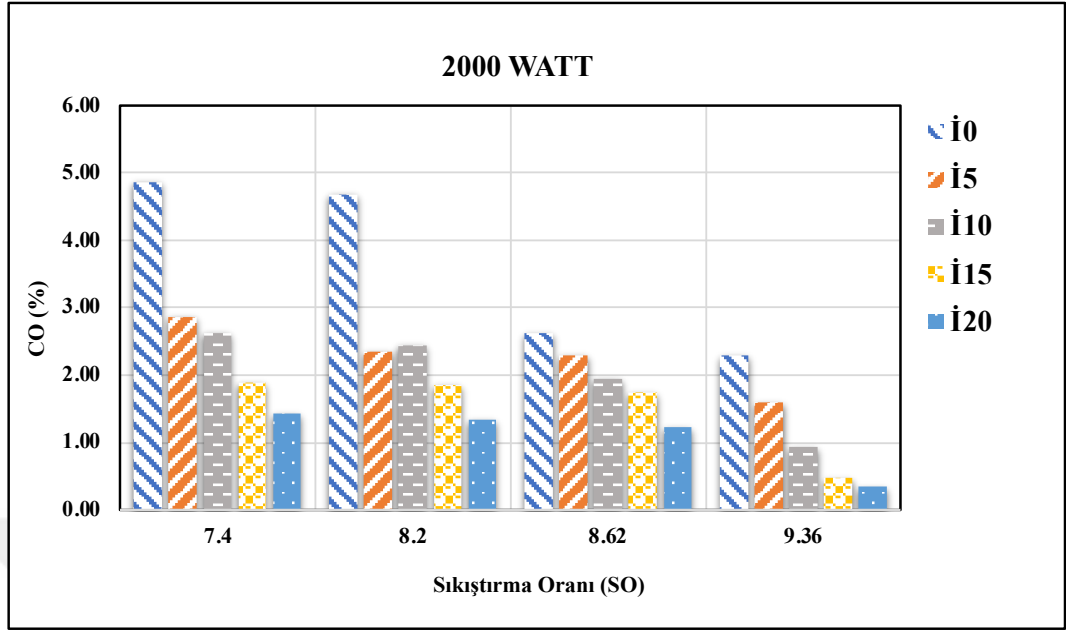
Şekil 6.11'de 1000W motor yükünde elde edilen SO'ya bağlı CO emisyonları verilmiştir. Şekildeki grafik incelendiğinde sıkıştırma oranı arttıkça CO emisyon değerlerinin düştüğü görülmektedir. Ayrıca tüm SO değerleri için yakıtların izobütanol oranı arttıkça CO emisyonlarında düşüş gözlenmiştir. SO 9,36:1 için en yüksek CO emisyon değeri İ0 yakıtı için %3,1 ve en düşük CO değeri İ15 yakıtı ile %0,331olarak elde edilmiştir. Bu değerler kıyaslandığında CO emisyonları yaklaşık %89,32 oranında azalış belirlenmiştir.



Şekil 6. 11. Sıkıştırma oranına bağlı 1000W CO değerleri

Şekil 6.12’de 2000W motor yükünde elde edilen SO’ya bağlı CO emisyonları verilmiştir. Şekildeki grafik incelendiğinde sıkıştırma oranı arttıkça CO emisyon değerlerinin düştüğü görülmektedir.

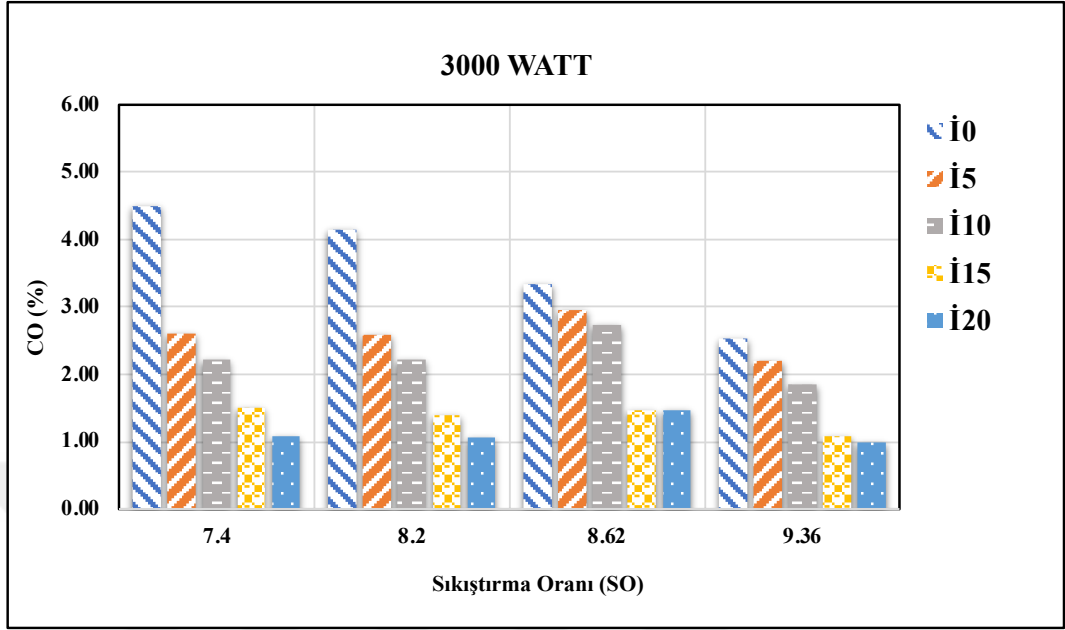
Ayrıca tüm SO değerleri için yakıtların izobütanol oranı arttıkça CO emisyonlarında düşüş gözlenmiştir. SO 9,36:1 için en yüksek CO emisyon değeri İ0 yakıtı için %2,3 ve en düşük CO değeri İ20 yakıtı ile %0,353 olarak elde edilmiştir. Bu değerler kıyaslandığında CO emisyonları yaklaşık %84,65 oranında azalış belirlenmiştir.



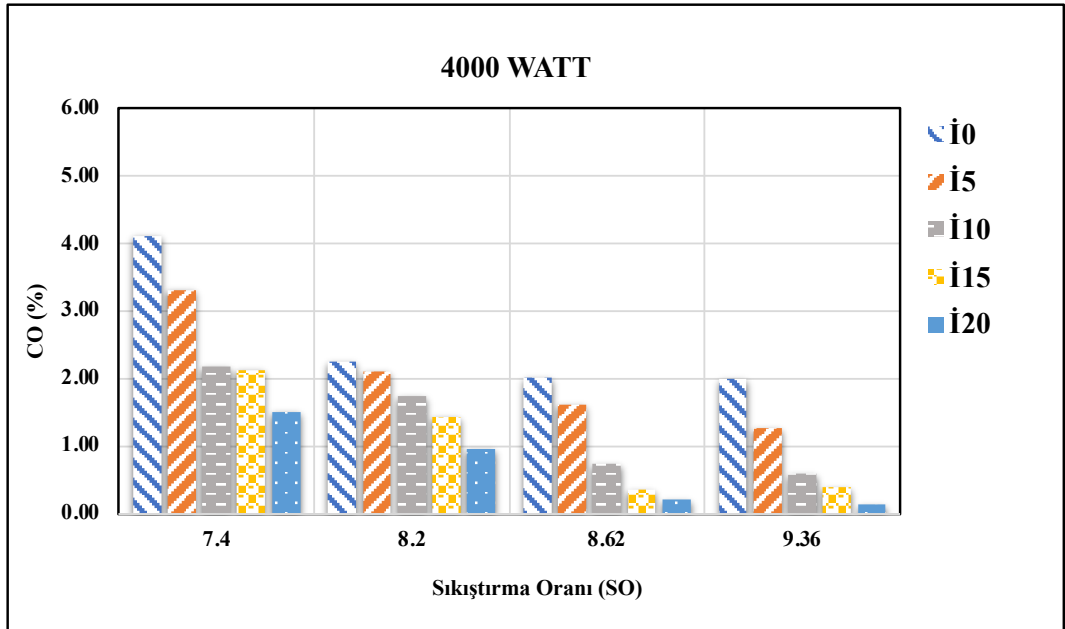
Şekil 6. 12. Sıkıştırma oranına bağlı 2000W CO değerleri

Şekil 6.13'te 3000W motor yükünde elde edilen SO'ya bağlı CO emisyonları verilmiştir. Şekildeki grafik incelendiğinde sıkıştırma oranı arttıkça CO emisyon değerlerinin düştüğü görülmektedir. Ayrıca tüm SO değerleri için yakıtların izobütanol oranı arttıkça CO emisyonlarında düşüş gözlenmiştir. SO 9,36:1 için en yüksek CO emisyon değeri İ0 yakıtı için %2,538 ve en düşük CO değeri İ20 yakıtı ile %0,997 olarak elde edilmiştir. Bu değerler kıyaslandığında CO emisyonları yaklaşık %60,71 oranında azalış belirlenmiştir.

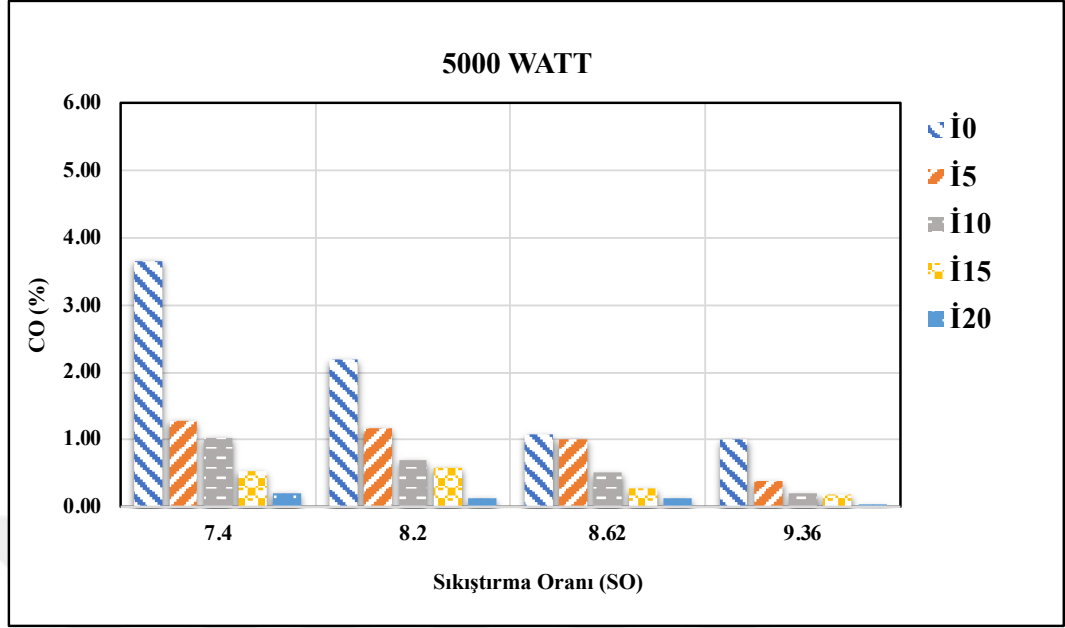
Şekil 6.14'te 4000W motor yükünde elde edilen SO'ya bağlı CO emisyonları verilmiştir. Şekildeki grafik incelendiğinde sıkıştırma oranı arttıkça CO emisyon değerlerinin düştüğü görülmektedir. Ayrıca tüm SO değerleri için yakıtların izobütanol oranı arttıkça CO emisyonlarında düşüş gözlenmiştir. SO 9,36:1 için en yüksek CO emisyon değeri İ0 yakıtı için %2,001 ve en düşük CO değeri İ20 yakıtı ile %0,0138 olarak elde edilmiştir. Bu değerler kıyaslandığında CO emisyonları yaklaşık %93,1 oranında azalış belirlenmiştir. Şekil 6.15'te 5000W motor yükünde elde edilen CO değerlerinin SO'ya bağlı olarak değişimi sunulmuştur. Diğer yüklere benzer değişimler izlenmiştir.



Şekil 6. 13. Sıkıştırma oranına bağlı 3000W CO değerleri



Şekil 6. 14. Sıkıştırma oranına bağlı 4000W CO değerleri



Şekil 6. 15. Sıkıştırma oranına bağlı 5000W CO değerleri

### 6.2.2. Hidrokarbon

HC emisyonları herhangi bir sebepten dolayı silindirde meydana gelen eksik yanma nedeniyle oluşmaktadır. Yanma odasında oluşan yakıt-hava karışımının homojen olmaması, soğuk silindir cidarları, düşük sıkıştırma sonu sıcaklığı, yetersiz oksijen ve yanma odasında artan yüzey/hacim oranı gibi faktörler, HC emisyonlarının ortaya çıkmasına neden olur [85].

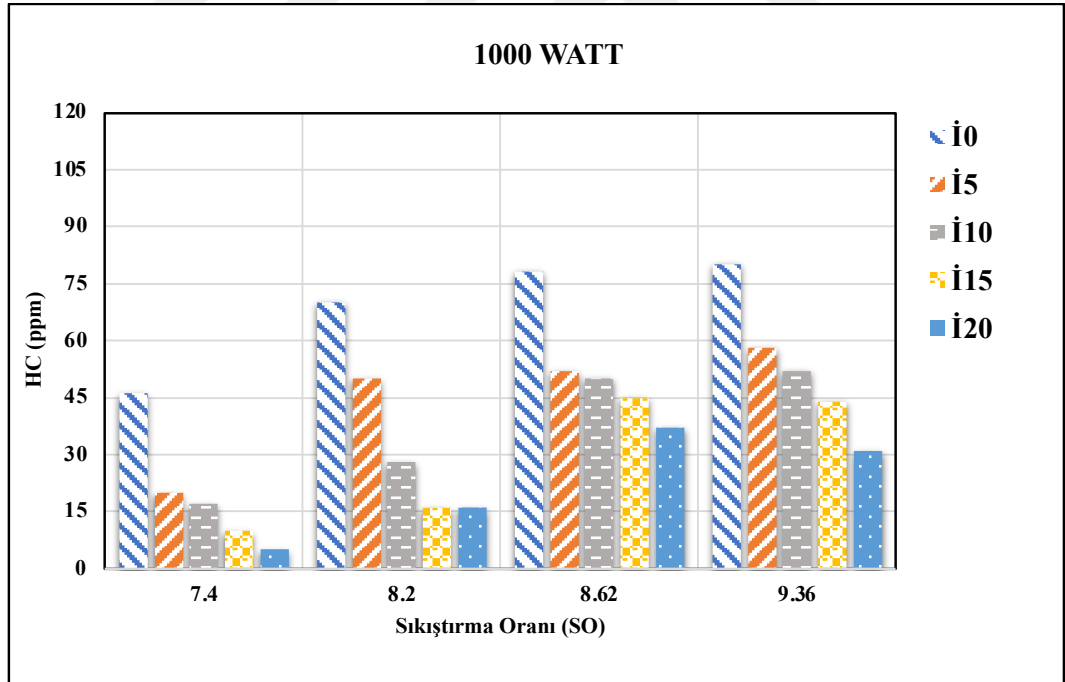
Şekil 6.16-Şekil 6.20’de sıkıştırma oranına bağlı HC değerleri görülmektedir. Grafik incelendiğinde olarak tüm yakıt türlerinde SO arttıkça HC emisyonlarının arttığı görülmüştür. Motorlarda SO arttıkça yanma odası Y/H oranı artmakta bu da HC emisyonlarını artırmaktadır [55].

Tüm motor yükleri için izobütanol ilavesi HC emisyonunu düşürmüştür. Bunun nedeni kimyasal yapısında daha az C bulundurmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Ayrıca oksijenli yakıtlar HC emisyonlarının azaltılmasında etkili olmaktadır [86]. 5000W motor yükünde İ20 yakıtı HC emisyonu İ0 yakıtına kıyasla %74,48 azalmıştır.

Aynı zamanda motor yükü arttıkça da HC emisyonları artmıştır. Artan yükte beraber motora daha fazla yakıt sürülmektedir. Artan yakıtın piston, segman ve silindir boşluklarına girerek HC emisyonunun artmasına neden olduğu değerlendirilmektedir.

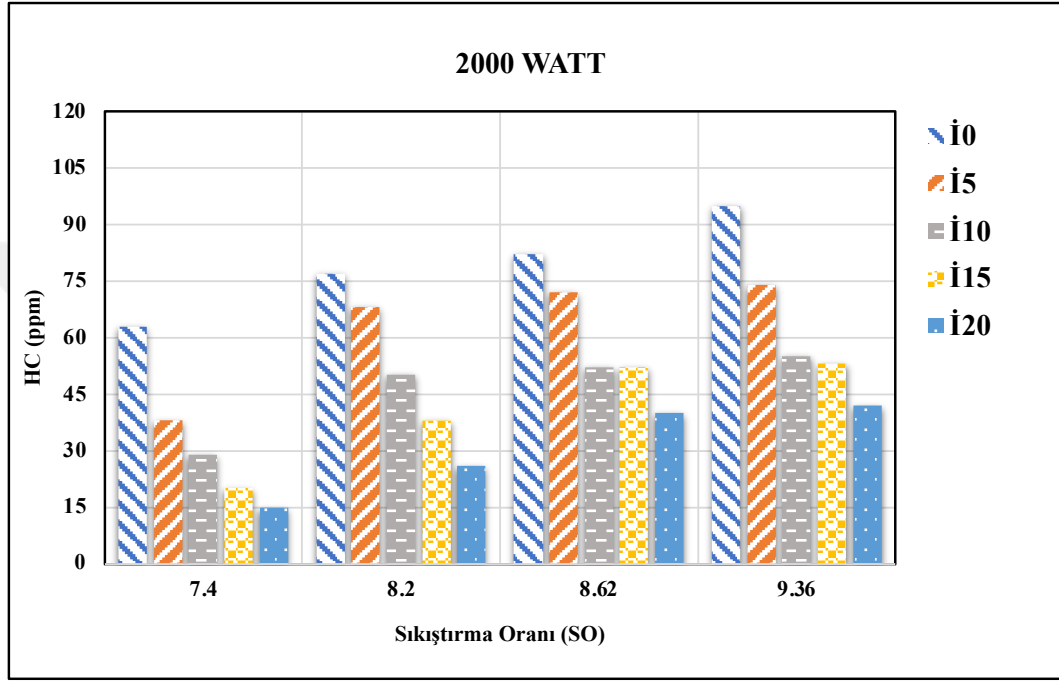
Şekil 6.16'da 1000W motor yükünde SO'ya bağlı HC emisyonları verilmiştir. SO arttıkça emisyonların arttığı ancak aynı SO'larda saf benzine kıyasla izobütanol ilaveli yakıtlarda izobütanol oranının arttıkça HC emisyonlarının azaldığı gözlenmiştir. SO 9,36:1'de en yüksek HC değeri İ0 yakıtı ile 80 ppm olarak elde edilmiştir. Aynı SO için İ20 yakıtı ile 31 ppm olarak belirlenmiştir. Bu değerler için HC emisyonlarının en yüksek izobütanol katkı oranına sahip yakıt olan İ20 yakıtı ile yaklaşık %61,25 oranında azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 6. 16. Sıkıştırma oranına bağlı 1000W HC değerleri

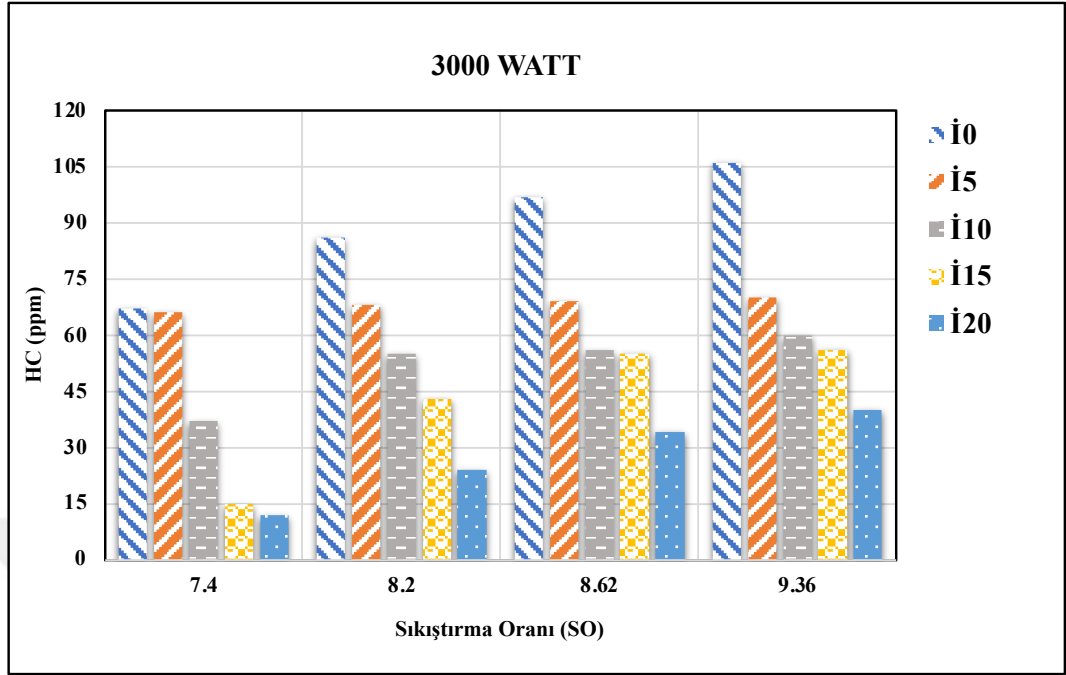
Şekil 6.17'de 2000W motor yükünde SO'ya bağlı HC emisyonları verilmiştir. SO arttıkça emisyonların arttığı ancak aynı SO'larda saf benzine kıyasla izobütanol ilaveli yakıtlarda izobütanol oranını arttıkça HC emisyonlarının azaldığı gözlenmiştir. SO

9,36:1’de en yüksek HC değeri İ0 yakıtı ile 95 ppm olarak elde edilmiştir. Aynı SO için İ20 yakıtı ile 42 ppm olarak belirlenmiştir. Bu değerler için HC emisyonlarının en yüksek izobütanol katkı oranına sahip yakıt olan İ20 yakıtı ile yaklaşık %55,78 oranında azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 6. 17. Sıkıştırma oranına bağlı 2000W HC değerleri

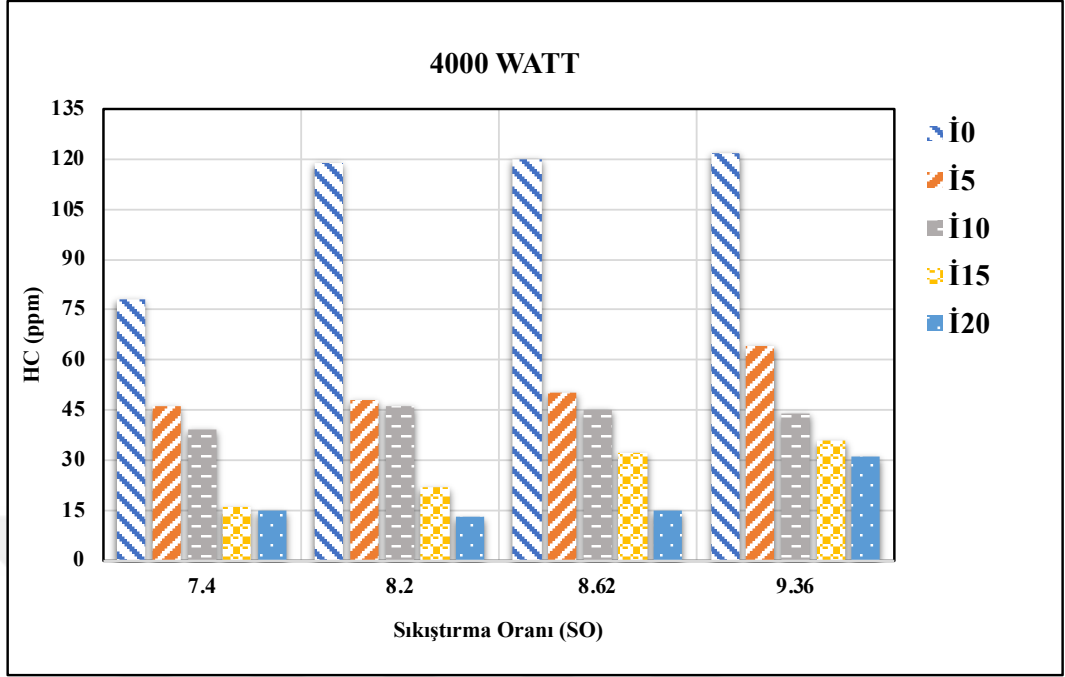
Şekil 6.18’de 3000W motor yükünde SO’ya bağlı HC emisyonları verilmiştir. SO arttıkça emisyonların arttığı ancak aynı SO’larda saf benzine kıyasla izobütanol ilaveli yakıtlarda izobütanol oranını arttıkça HC emisyonlarının azaldığı gözlenmiştir. SO 9,36:1’de en yüksek HC değeri İ0 yakıtı ile 106 ppm olarak elde edilmiştir. Aynı SO için İ20 yakıtı ile 40 ppm olarak belirlenmiştir. Bu değerler için HC emisyonlarının en yüksek izobütanol katkı oranına sahip yakıt olan İ20 yakıtı ile yaklaşık %62,26 oranında azaldığı tespit edilmiştir.



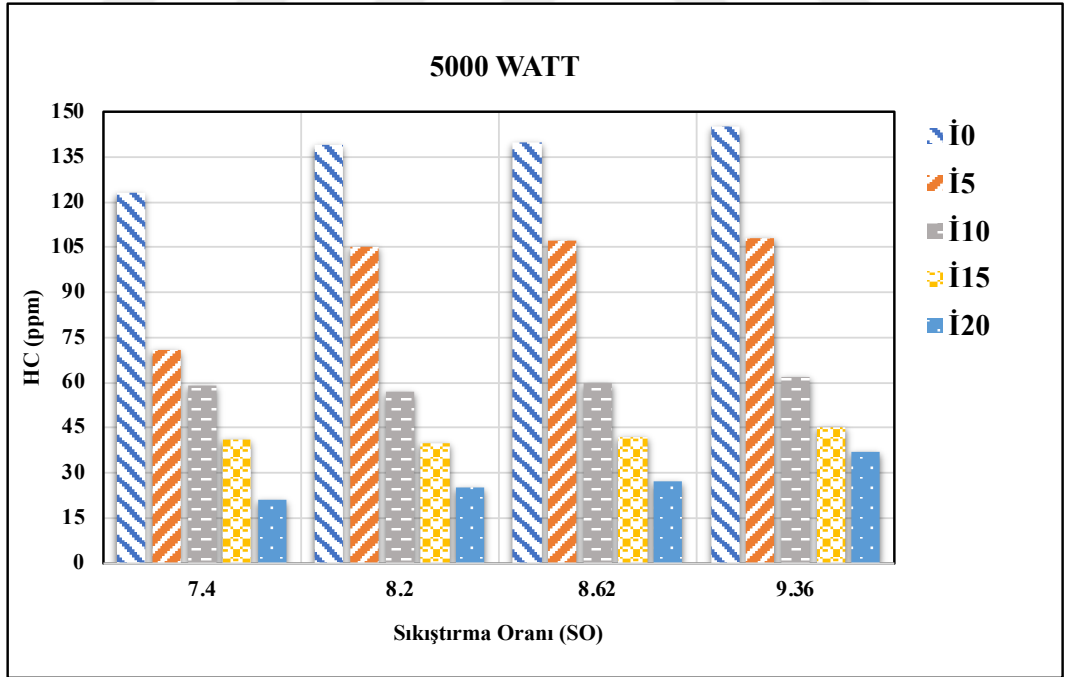
Şekil 6. 18. Sıkıştırma oranına bağlı 3000W HC değerleri

Şekil 6.19'da 4000W motor yükünde SO'ya bağlı HC emisyonları verilmiştir. SO arttıkça emisyonların arttığı ancak aynı SO'larda saf benzine kıyasla izobütanol ilaveli yakıtlarda izobütanol oranını arttıkça HC emisyonlarının azaldığı gözlenmiştir. SO 9,36:1'de en yüksek HC değeri İ0 yakıtı ile 122 ppm olarak elde edilmiştir. Aynı SO için İ20 yakıtı ile 31 ppm olarak belirlenmiştir. Bu değerler için HC emisyonlarının en yüksek izobütanol katkı oranına sahip yakıt olan İ20 yakıtı ile yaklaşık %75,59 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

Şekil 6.20'de 5000W motor yükünde elde edilen HC değerlerinin SO'ya bağlı olarak değişimi sunulmuştur. Diğer yüklere benzer değişimler kaydedilmiştir.



Şekil 6. 19. Sıkıştırma oranına bağlı 4000W HC değerleri



Şekil 6. 20. Sıkıştırma oranına bağlı 5000W HC değerleri

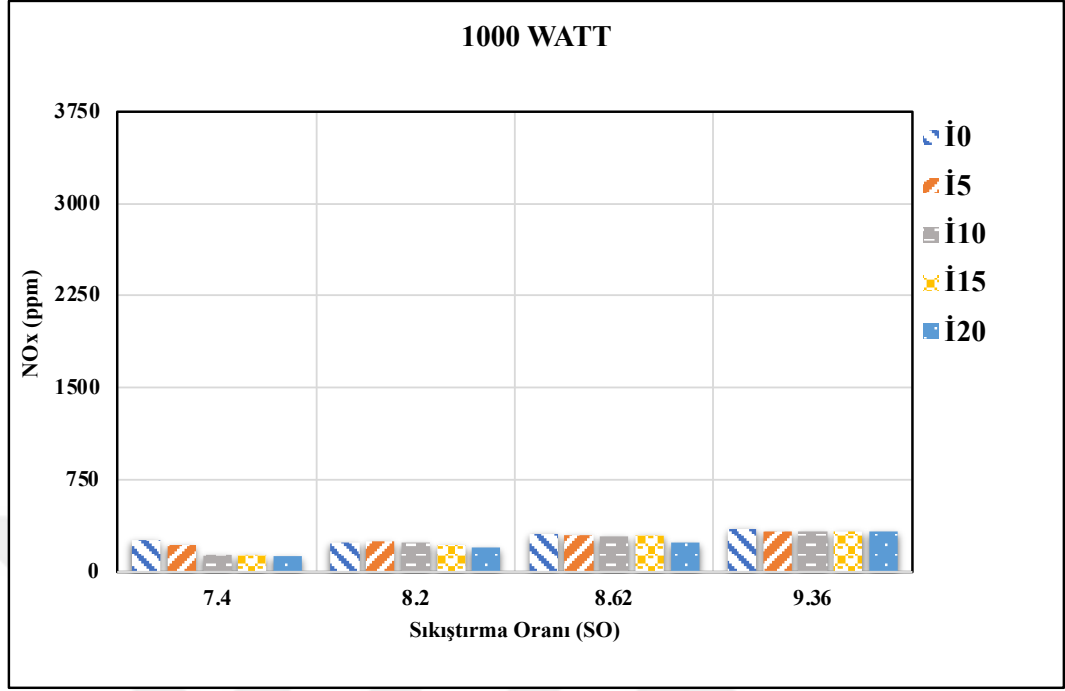
### 7.2.3. Azotoksit

Havanın içeriğinde bulunan azot atomu, silindir içerisindeki sıcaklık 1800 °C'nin üzerine çıktığında oksijen atomuyla birleşerek NO<sub>x</sub> emisyonunu oluşturmaktadır. Sıkıştırma oranına bağlı değişik yüklerde NO<sub>x</sub> değerleri değişimi Şekil 6.21-6.25'te gösterilmiştir.

Sıkıştırma oranı ve motor yükünün artışı ile NO<sub>x</sub> emisyonlarının tüm yüklerde yükseldiği gözlenmiştir. Gerek sıkıştırma oranı gerekse motor yükü arttıkça silindir basınç ve sıcaklığı artmakta bu da NO<sub>x</sub> emisyonlarını artırmaktadır [87].

Motor yükünün ve SO'nun NO<sub>x</sub> üzerindeki olumsuz etkisi izobütanol ile telafi edilmiştir. Karışımdaki izobütanol oranı arttıkça NO<sub>x</sub> emisyonları da azalmıştır. En yüksek motor yükü için NO<sub>x</sub> emisyonu, benzine kıyasla İ20 yakıtı için SO 9,36 için %28,37 azalmıştır. Alkollerin buharlaşma ısısının yüksek olması nedeniyle silindir sıcaklığı azalmakta ve NO<sub>x</sub> emisyonları düşmektedir [88].

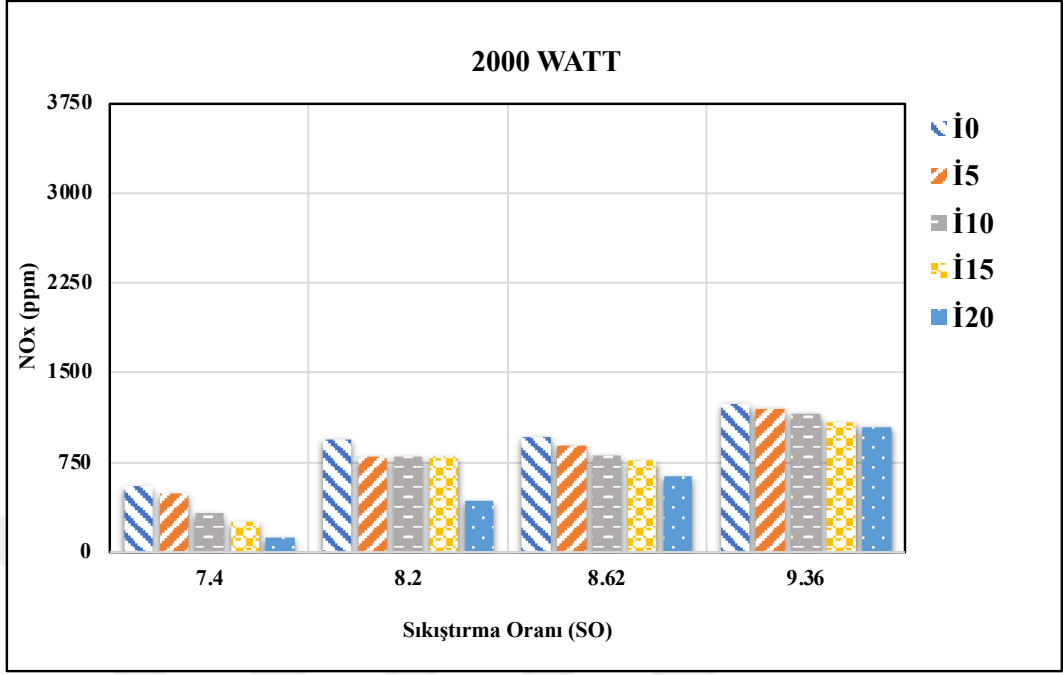
Şekil 6.21'de 1000W motor yükünde SO'ya bağlı NO<sub>x</sub> emisyonları verilmiştir. Grafik incelendiğinde SO'nun artması ile NO<sub>x</sub> emisyonlarının arttığı ve aynı SO'larda yakıtların izobütanol oranı arttıkça NO emisyonlarının düştüğü gözlenmektedir. En yüksek NO<sub>x</sub> emisyonu SO 9,36:1'de İ0 yakıtı ile 350 ppm olarak elde edilmiştir. Aynı SO'da en yüksek izobütanol oranına sahip yakıt olan İ20 yakıtı ile en düşük NO<sub>x</sub> değeri 325 ppm olarak elde edilmiştir. Bu değerler için NO<sub>x</sub> emisyonları İ20 yakıtı ile İ0 yakıtına kıyasla yaklaşık %7,14 azalış belirlenmiştir.



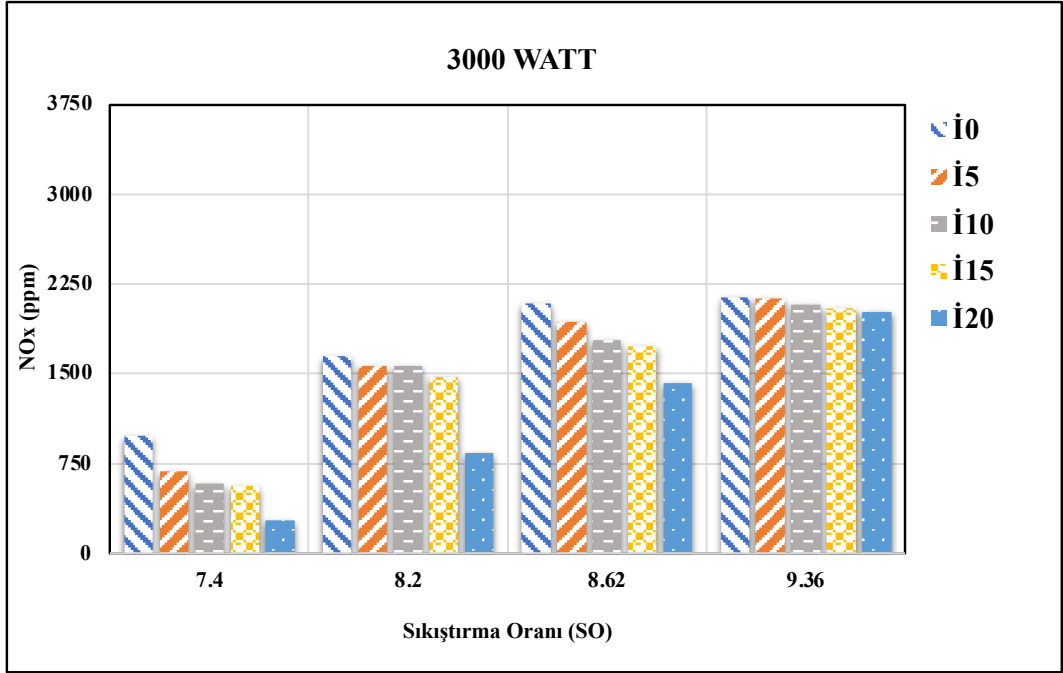
Şekil 6. 21. Sıkıştırma oranına bağlı 1000W NOx değerleri

Şekil 6.22’de 2000W motor yükünde SO’ya bağlı NOx emisyonları verilmiştir. Grafik incelendiğinde SO’nın artması ile NOx emisyonlarının arttığı ve aynı SO’larda yakıtların izobütanol oranı arttıkça NO emisyonlarının düştüğü gözlenmektedir. En yüksek NOx emisyonu SO 9,36:1’de İ0 yakıtı ile 1241 ppm olarak elde edilmiştir. Aynı SO’da en yüksek izobütanol oranına sahip yakıt olan İ20 yakıtı ile en düşük NOx değeri 1042 ppm olarak elde edilmiştir. Bu değerler için NOx emisyonları İ20 yakıtı ile İ0 yakıtına kıyasla yaklaşık %16,03 azalış belirlenmiştir.

Şekil 6.23’te 3000W motor yükünde SO’ya bağlı NOx emisyonları verilmiştir. Grafik incelendiğinde SO’nın artması ile NOx emisyonlarının arttığı ve aynı SO’larda yakıtların izobütanol oranı arttıkça NO emisyonlarının düştüğü gözlenmektedir. En yüksek NOx emisyonu SO 9,36:1’de İ0 yakıtı ile 2139 ppm olarak elde edilmiştir. Aynı SO’da en yüksek izobütanol oranına sahip yakıt olan İ20 yakıtı ile en düşük NOx değeri 2017 ppm olarak elde edilmiştir. Bu değerler için NOx emisyonları İ20 yakıtı ile İ0 yakıtına kıyasla yaklaşık %5,7 azalış belirlenmiştir.



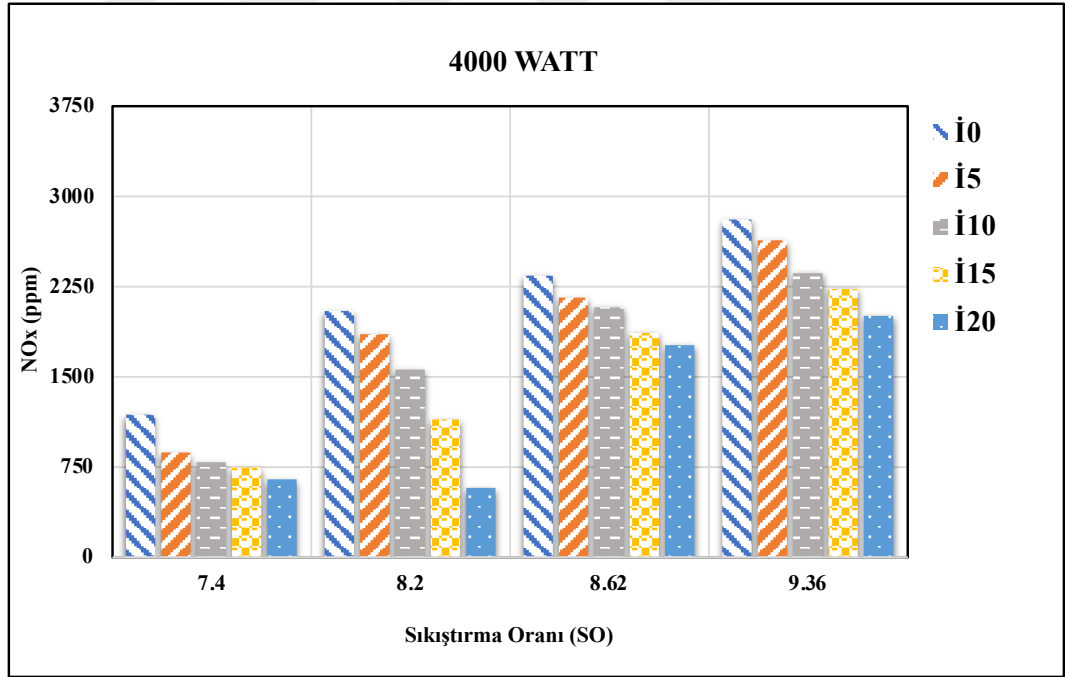
Şekil 6. 22. Sıkıştırma oranına bağlı 2000W NOx değerleri



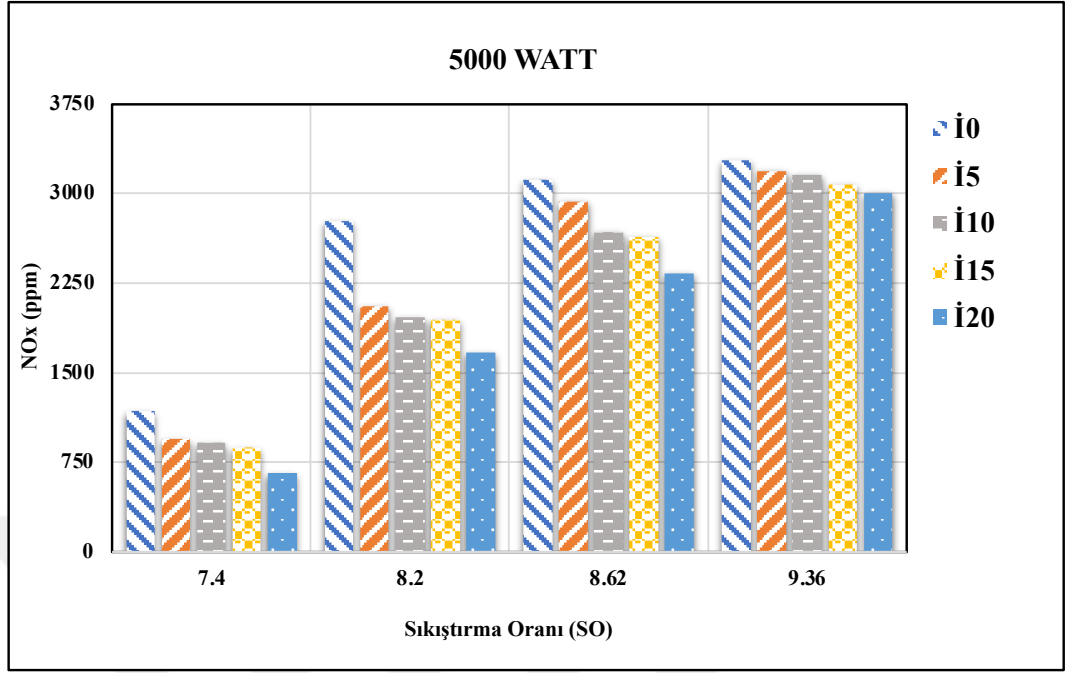
Şekil 6. 23. Sıkıştırma oranına bağlı 3000W NOx değerleri

Şekil 6.24'te 4000W motor yükünde SO'ya bağlı NOx emisyonları verilmiştir. Grafik incelendiğinde SO'nın artması ile NOx emisyonlarının arttığı ve aynı SO'larda yakıtların izobütanol oranı arttıkça NO emisyonlarının düştüğü gözlenmektedir. En yüksek NOx emisyonu SO 9,36:1'de İ0 yakıtı ile 2805 ppm olarak elde edilmiştir. Aynı SO'da en yüksek izobütanol oranına sahip yakıt olan İ20 yakıtı ile en düşük NOx değeri 2009 ppm olarak elde edilmiştir. Bu değerler için NOx emisyonları İ20 yakıtı ile İ0 yakıtına kıyasla yaklaşık %28,37 azalış belirlenmiştir.

Şekil 6.25'te 5000W motor yükünde elde edilen HC değerlerinin SO'ya bağlı olarak değişimi sunulmuştur. Yük artışına paralel olarak benzer değişimler belirlenmiştir.



Şekil 6. 24. Sıkıştırma oranına bağlı 4000W NOx değerleri



Şekil 6. 25. Sıkıştırma oranına bağlı 5000W NOx değerleri

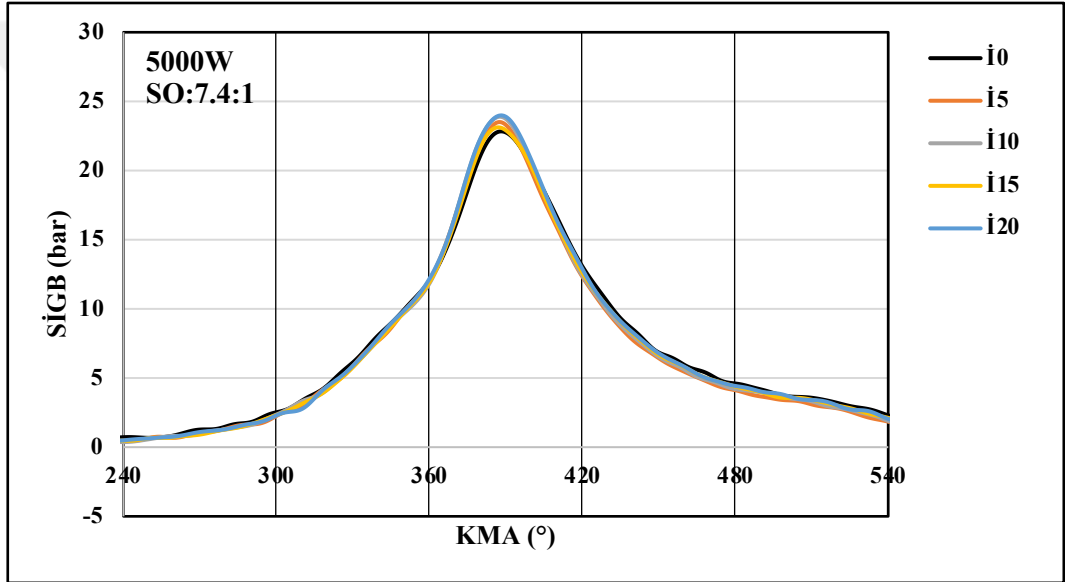
### 6.3. SİLİNDİR İÇİ GAZ BASINCI

Silindir içindeki gaz basıncı, içten yanmalı motorların çalışmasında kritik bir rol oynar. Bu basınç, motorun performansı, verimliliği, emisyonları ve dayanıklılığı üzerinde doğrudan etkiler. Maksimum basınç, motorun üretebileceği gücü doğrudan etkiler. Yüksek maksimum basınç, daha fazla güç anlamına gelir. Silindir içerisinde yakıtın yanması sonucu oluşan mekanik etkinin krank mili açısına göre basınç değişimleri SİGB eğrileri ile analiz edilir. Buji ateşlemeli motorlarda silindir içi gaz basıncını; sıkıştırma oranı, yakıt kalitesi, ateşleme zamanı ve motor hızı etkilemektedir.

FEV değerinin en yüksek olduğu 5000W motor yükünde benzin ve benzin-izobütanol yakıt karışımlarının farklı SO'larda SİGB üzerindeki etkisi Şekil 6.26, Şekil 6.27, Şekil 6.28 ve Şekil 6.29'da gösterilmektedir. Genel olarak sıkıştırma oranı arttıkça tüm yakıt türlerinde SİGB'nin de arttığı gözlenmiştir. Bu durum olarak sıkıştırma sonu

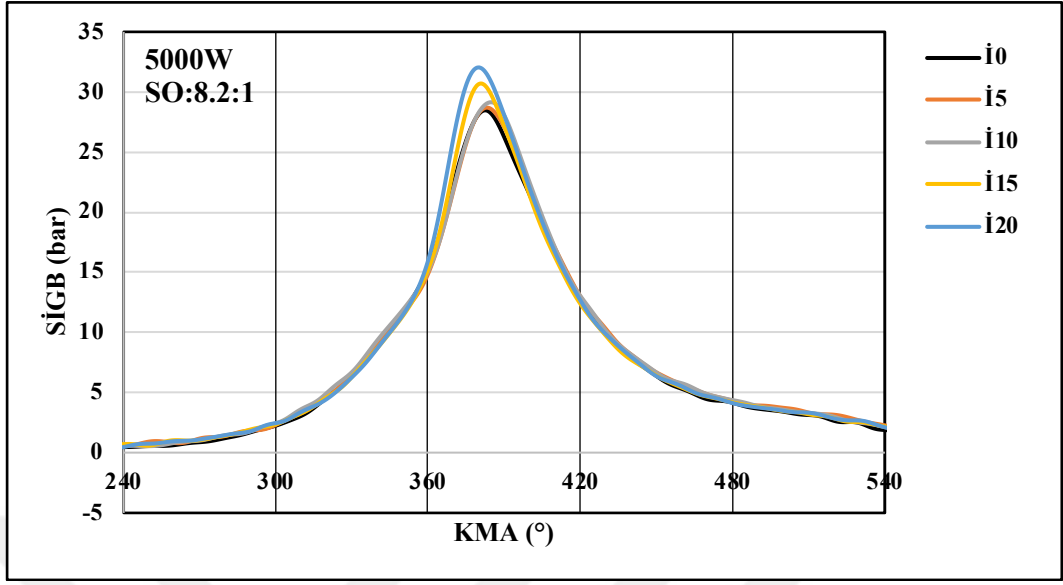
basıncının artmasına bağılı olarak beklenen bir sonuçtur. Çalışmadaki en düşük SO olan 7,4:1 için en yüksek SİGB değeri İ20 yakıtı için 23,97 bar olarak elde edilmiştir.

Aynı sıkıştırma oranı için İ0, İ5, İ10, İ15 yakıtları için sırayla, 22,83 bar, 23,52 bar, 23,89 bar, 23,10 bar olarak elde edilmiştir. Saf benzin olan İ0 yakıtına kıyasla İ20 yakıtı için SİGB değeri yaklaşık %4,9 arttığı gözlenmiştir. SO 7,4:1 için İ15 yakıtı hariç diğer yakıtlar da maksimum SİGB değerleri ÜÖN'den 28° sonra elde edilmiştir. İ15 için SİGB ÜÖN'yi 27° geçte elde edilmiştir.



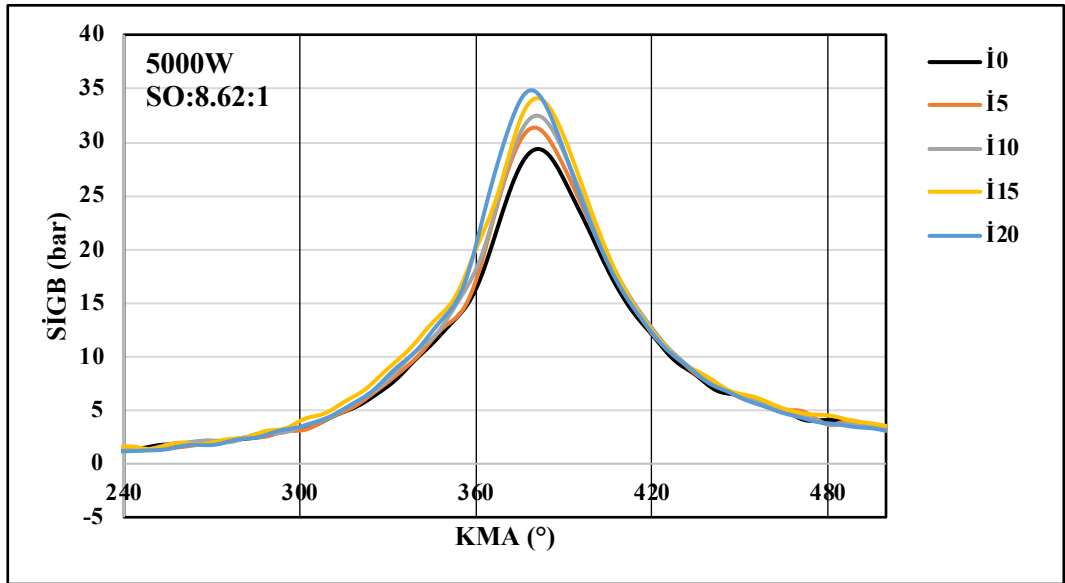
Şekil 6. 26. SO 7,4:1'deki SİGB değişimi

Şekil 6.27 incelendiğinde 8,2:1 SO'da en yüksek SİGB değerinin İ20 yakıtı için en 32,06 bar olarak ÜÖN'dan 20° sonra elde edilmiştir. Bu değer İ0 yakıtı ile kıyaslandığında %12,5 oranında SİGB'nin arttığı ve ÜÖN'ya 8° yaklaşması ile elde edildiği görülmüştür. Aynı SO'da diğer test yakıtları olan İ0, İ5, İ10, İ15 için SİGB değerleri sırasıyla 28,51 bar, 28,70 bar, 29,16 bar, 30,06 bar olarak ÜÖN'dan 23°, 23°, 25° ve 21° sonra elde edilmiştir.



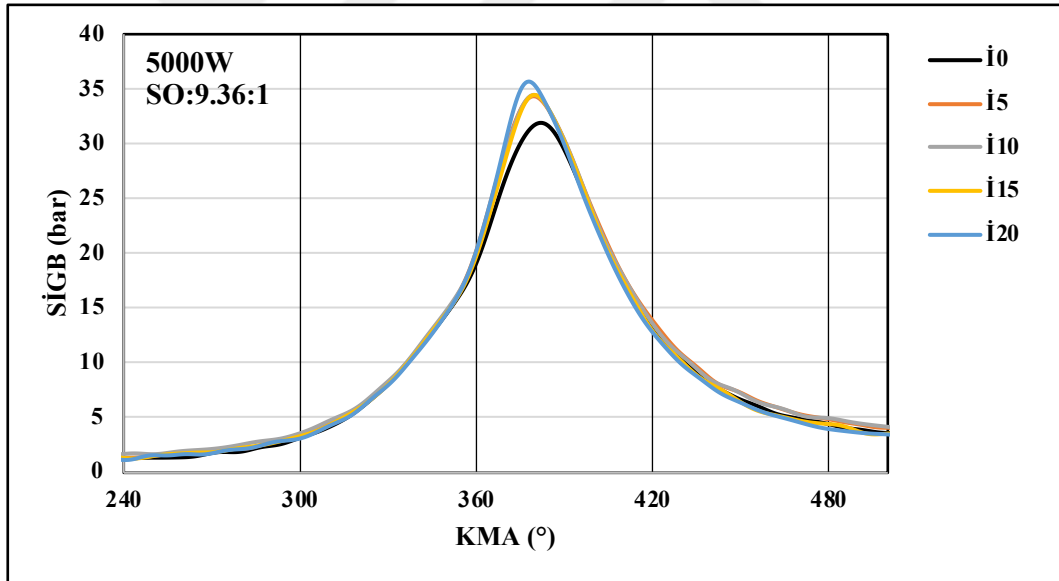
Şekil 6. 27. SO 8,2:1'deki SİGB değışimi

Şekil 6.28 incelendiğinde 8,62:1 SO'da en yüksek SİGB değerin i20 yakıtı için en 34,88 bar olarak ÜÖN'dan 19° sonra elde edilmiştir. Bu değ i0 yakıtı ile kıyaslandığında %18,5 oranında SİGB'nin arttığı ve ÜÖN'ya 2° yaklaşması ile elde edildiği belirlenmiştir. Aynı SO'da diğ er test yakıtları olan i0, i5, i10, i15 için SİGB değ erleri sırasıyla 29,38 bar, 31,37 bar, 32,45 bar, 34,14 bar olarak ÜÖN'dan 21°, 20°, 21° ve 21° sonra elde edilmiştir.



Şekil 6. 28. SO 8,62:1'deki SİGB değışimi

Şekil 6.29 incelendiğinde 9,36:1 SO'da en yüksek SİGB değerinin İ20 yakıtı için en 35,65 bar olarak ÜÖN'dan 18° sonra elde edilmiştir. Bu değer İ0 yakıtı ile kıyaslandığında %11,7 oranında SİGB'nin arttığı ve ÜÖN'ya 4° yaklaşması ile elde edildiği tespit edilmiştir. Aynı SO'da diğer test yakıtları olan İ0, İ5, İ10, İ15 için SİGB değerleri sırasıyla 31,90 bar, 34,25 bar, 34,37 bar, 34,42 bar olarak ÜÖN'dan 22°, 20°, 20° ve 18° sonra elde edilmiştir. Tüm SO değerlerinde genel olarak yakıt karışımlarındaki izobütanol oranı arttıkça maksimum SİGB değerleri ÜÖN'ye yaklaşmıştır. Bu durumun nedeni izobütanol ilaveli yakıtların yanma hızının saf benzine göre daha yüksek yanma hızına sahip olduğu düşünülmektedir. Ayrıca aynı çalışma koşullarındaki yakıt karışımlarındaki SİGB değerinin saf benzine kıyaslandığında maksimum değerinin arttığı gözlenmiştir [27].



Şekil 6. 29. SO 9,36:1'deki SİGB değişimi

## 6.4. YAPAY SİNİR AĞI BULGULARI

### 6.4.1. Deney ve Tahmin Bulgularının Kıyaslanması

Deneysel veriler kullanılarak oluşturulan YSA'dan elde edilen tahmin sonuçları ile deneysel sonuçlar kıyaslanmıştır. Giriş parametresi olarak sıkıştırma oranı, yakıt karışım oranı ve motor yükü seçilirken çıkış parametresi olarak FÖYT, FEV, CO, HC ve NO<sub>x</sub> seçilmiştir. Kıyaslamalarda yakınsamanın bir göstergesi olan R<sup>2</sup> değerleri 0,99 ile 0,86 değerleri arasında çıkmıştır. Deney sonuçları ile YSA tahmin sonuçları arasındaki hata ölçütleri Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6. 1. Hata ölçütleri

Deneysel Sonuçlar ile YSA tahmin sonuçları arasındaki hata ölçütleri

			<b>FÖYT</b>	<b>FEV</b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>HC</b>	<b>CO</b>
			<b>(g/kWh)</b>	<b>(%)</b>	<b>(ppm)</b>	<b>(ppm)</b>	<b>(%)</b>
<b>Eğitim (56)</b>	RMSE	Eğitim	35.22	0.59	139.45	6.72	0.25
	MAPE	Eğitim	0.04	0.03	0.21	0.15	0.29
	r	Eğitim	0.99	0.99	0.99	0.96	0.98
	R2	Eğitim	0.97	0.98	0.98	0.92	0.95
<b>Doğrulama (12)</b>	RMSE	Doğrulama	81.15	0.87	139.44	8.98	0.39
	MAPE	Doğrulama	0.10	0.05	0.17	0.22	0.43
	r	Doğrulama	0.98	0.99	0.99	0.93	0.94
	R2	Doğrulama	0.95	0.97	0.98	0.87	0.88
<b>Test (12)</b>	RMSE	Test	50.67	1.21	248.48	12.36	0.40
	MAPE	Test	0.06	0.11	0.25	0.28	0.74
	r	Test	0.98	0.97	0.97	0.93	0.96
	R2	Test	0.96	0.94	0.95	0.86	0.92
<b>Tümü (80)</b>	RMSE	Tümü	47.34	0.76	160.59	8.16	0.30
	MAPE	Tümü	0.05	0.04	0.21	0.18	0.38
	r	Tümü	0.97	0.98	0.99	0.95	0.97
	R2	Tümü	0.95	0.97	0.97	0.90	0.93

## 6.4.2. Motor Performans Parametreleri için YSA Sonuçları

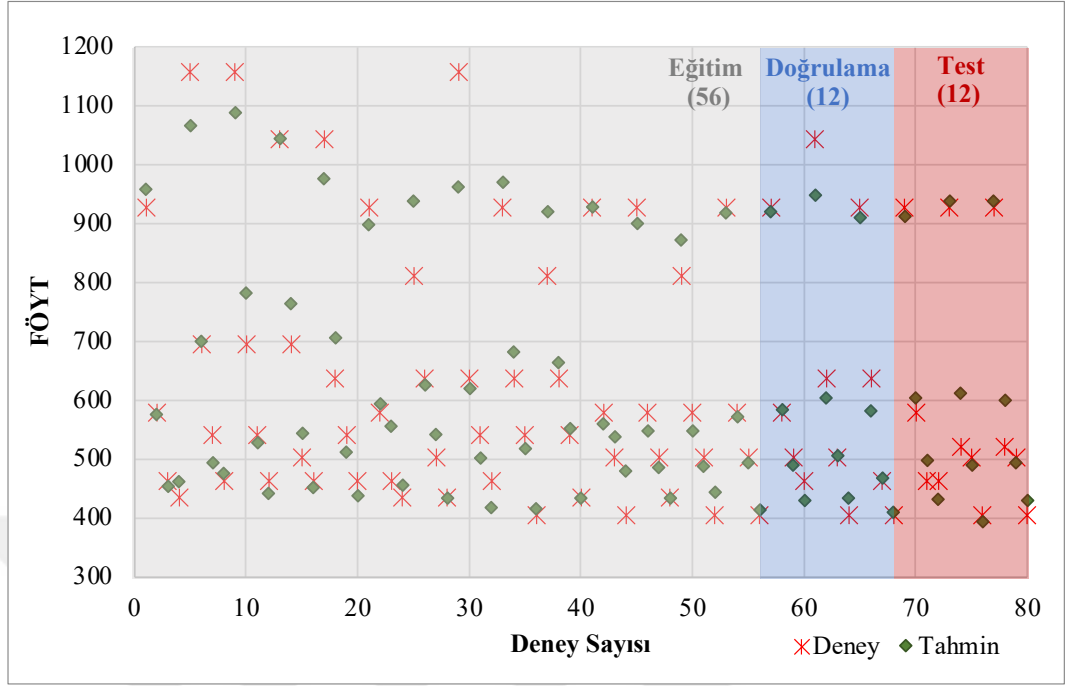
### 6.4.2.1. Fren Özgül Yakıt Tüketimi İçin YSA ile Tahmin

Oluşturulan FÖYT YSA modelinden elde edilen sonuçların özet görseli Şekil 6.30'da verilmiştir.



Şekil 6. 30. FÖYT YSA model özet

FÖYT için YSA tahmin sonuçları ile deneysel verilerin kıyaslanması Şekil 6.31'de gösterilmektedir. Özgül yakıt tüketimi için elde edilen  $R^2$  değeri 0,956 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca MAPE değeri 0,06 R değeri 0,977 olarak hesaplanmıştır.

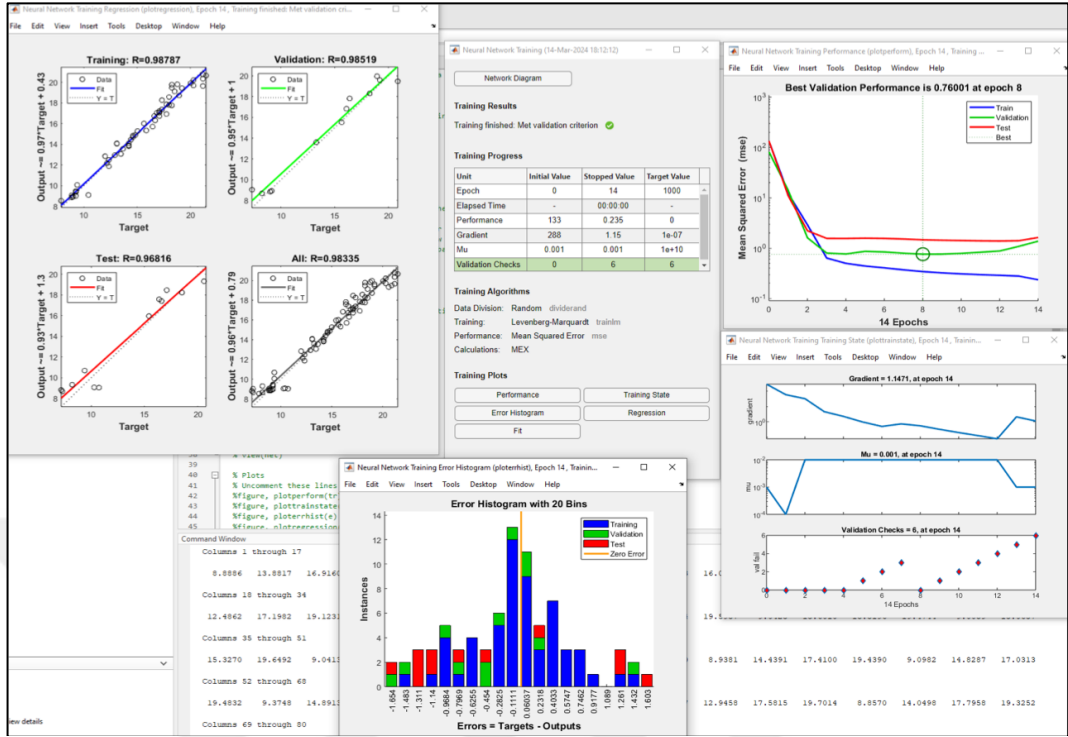


Şekil 6. 31. Deneysel olarak elde edilen FÖYT sonuçları ile YSA ile tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması

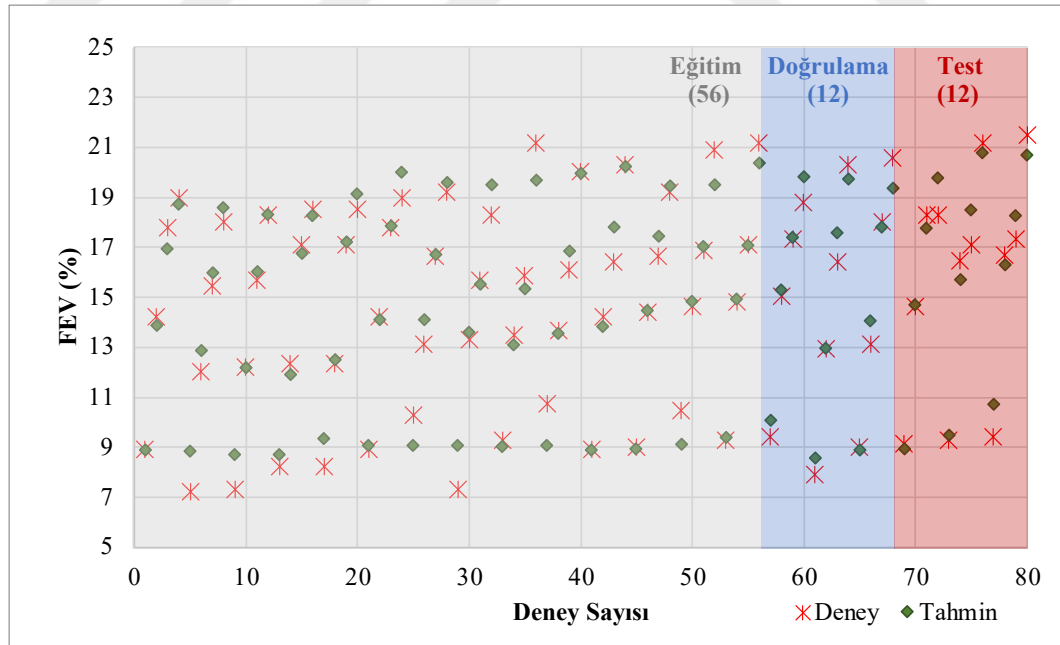
#### 6.4.2.2. Fren Efektif Verim için YSA ile Tahmin

Oluşturulan FEV YSA modelinden elde edilen sonuçların özet görseli Şekil 6.32’de verilmiştir. Fren efektif verimi için elde edilen  $R^2$  değeri 0,937 olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca MAPE değeri 0,105; R değeri 0,968 olarak hesaplanmıştır. Şekil 6. 33’te deneysel olarak elde edilen FEV sonuçları ile YSA ile tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 6. 32. FEV YSA model özeti



Şekil 6. 33. Deneysel olarak elde edilen FEV sonuçları ile YSA ile tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması

### 6.4.3. Emisyonlar için YSA ile Tahmin

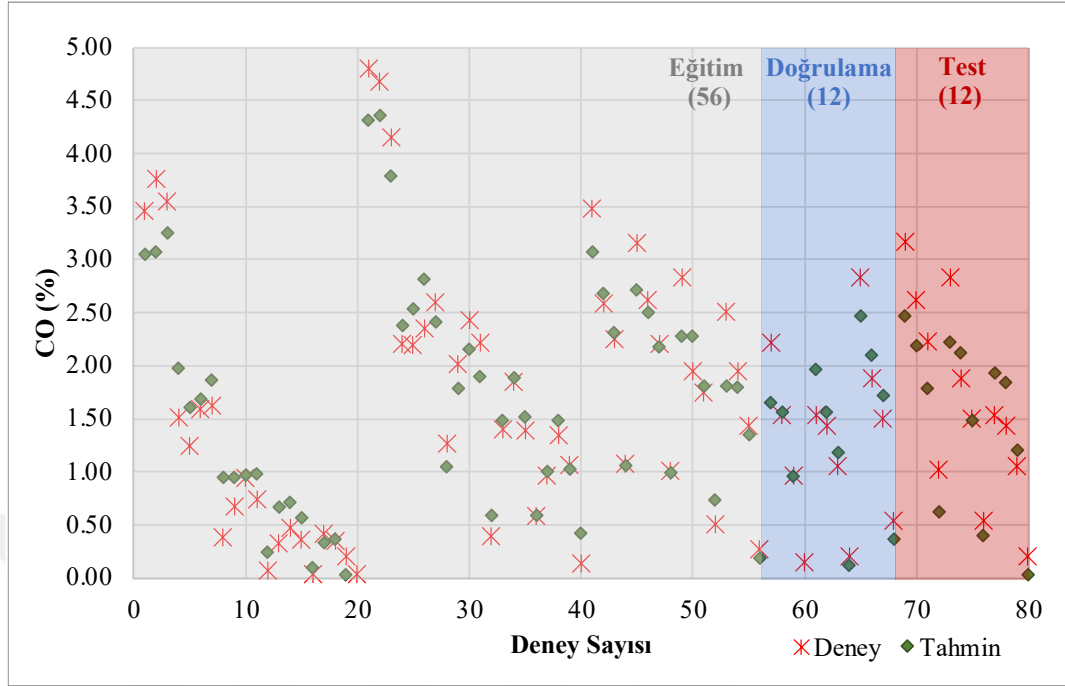
#### 6.4.3.1. Karbonmonoksit Emisyonu için YSA ile Tahmin

Oluşturulan CO YSA modelinden elde edilen sonuçların özet görseli Şekil 6.34'te verilmiştir.

Karbonmonoksit emisyonu için elde edilen  $R^2$  değeri 0,923 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca MAPE değeri 0,741; R değeri 0.961 olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.35'te deneysel olarak elde edilen CO sonuçları ile YSA ile tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 6. 34. CO YSA model özeti



Şekil 6. 35. Deneysel olarak elde edilen CO sonuçları ile YSA ile tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması

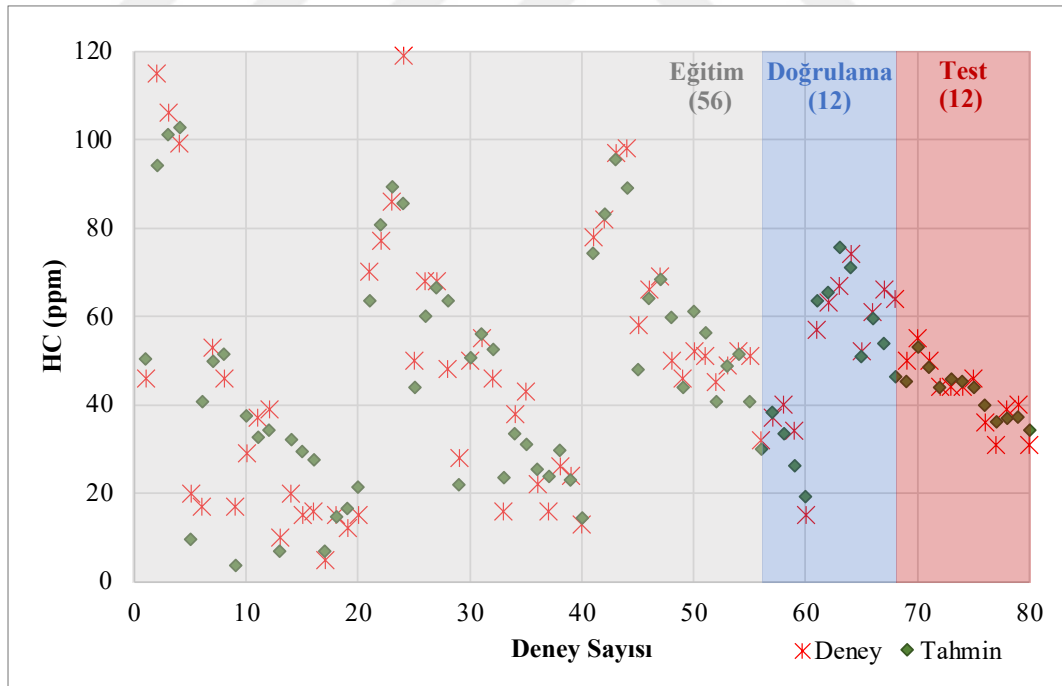
#### 6.4.3.2. Hidrokarbon Emisyonu İçin YSA İle Tahmin

Oluşturulan HC YSA modelinden elde edilen sonuçların özet görseli Şekil 6.36'de verilmiştir. Hidrokarbon emisyonu için elde edilen  $R^2$  değeri 0,858 olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca MAPE değeri 0,277 R değeri 0,926 olarak hesaplanmıştır. Şekil 6. 37'de deneysel olarak elde edilen HC sonuçları ile YSA ile tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 6. 36. HC YSA model özeti



Şekil 6. 37. Deneysel olarak elde edilen HC sonuçları ile YSA ile tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması

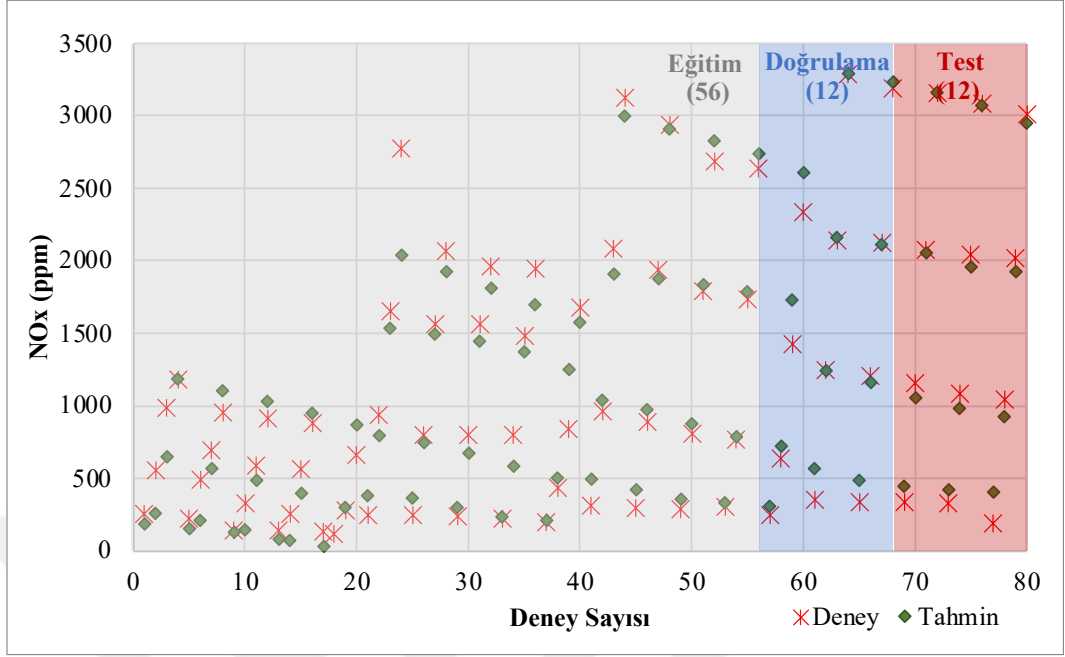
### 6.4.3.3. Azotoksit Emisyonu İçin YSA İle Tahmin

Oluşturulan NO<sub>x</sub> YSA modelinden elde edilen sonuçların özet görseli Şekil 6.38'te verilmiştir.

Azotoksit emisyonu için elde edilen R<sup>2</sup> değeri 0,947 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca MAPE değeri 0,252 R değeri 0,973 olarak hesaplanmıştır. Şekil 6. 39'te deneysel olarak elde edilen NO<sub>x</sub> sonuçları ile YSA ile tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 6. 38. NO<sub>x</sub> YSA model özeti



Şekil 6. 39. Deneysel olarak elde edilen NOx sonuçları ile YSA ile tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması

## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, performans ve emisyonları iyileştirmek amacıyla tek silindirli 4 zamanlı benzinli bir motorun sıkıştırma oranı artırılmış ve benzin içerisine belirli oranlarda izobütanol eklenmiştir. Tek silindirli hava soğutmalı motorların sıkıştırma oranları düşük olmaktadır. Benzin içerisine vuruntu dayanımı yüksek olan izobütanol katılarak sıkıştırma oranının bir miktar daha artırılması sağlanmıştır. Artırılan sıkıştırma oranıyla motor performansının iyileştirilmesine çalışılmıştır.

İzobütanol-benzin karışımları İ5, İ10, İ15, İ20 olacak şekilde oluşturulmuştur. Motorun standart sıkıştırma oranı 8,2/1 dir. Motor 4 farklı sıkıştırma oranıyla (7,4/1; 8,2/1; 8,62/1 ve 9,36/1) benzin/izobütanol ve saf benzin yakıtıyla test edilmiştir. Motor deneyleri, sabit devirde (3000 d/d) ve 5 farklı yükte (1 kW, 2 kW, 3 kW, 4 kW, 5 kW) gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Artan sıkıştırma oranı ile her bir yakıt için FÖYT değerlerinde azalma, FEV değerlerinde artış sağlanmıştır.
- SO arttıkça HC ve NO<sub>x</sub> emisyonu artarken CO emisyonu azalmıştır.
- Benzin-izobütanol karışımları benzin yakıtı göre aynı motor yükleri için FÖYT değerinin artmasına neden olmuştur.
- Benzin yakıtı içerisindeki izobütanol miktarının artması ile CO, HC ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında sırayla benzinli çalışmaya göre yaklaşık %97, %74 ve %28 oranlarında azalmalar sağlanmıştır.
- SİGB değerlerinin artan SO oranına bağlı olarak arttığı gözlenmiştir.

- Deneysel çalışmadan elde edilen veriler ile hazırlanan YSA modelinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde deneysel veriler ile uyumlu olduğu görülmektedir. Motor performans değerleri için gerçekleştirilen YSA ile tahmin uygulamaları sonucunda ortalama mutlak yüzdesel hata (MAPE) FÖYT ve FEV değerleri için sırasıyla 0,06; 0,11 olarak bulunmuştur. Deneysel sonuçlara yakınsamanın bir ölçütü olan  $R^2$  değerleri ise 0,96 ve 0,94 olarak bulunmuştur. Bu değerler ile motor performans değerlerinin tahmini için YSA'nın kullanılabilir olduğu görülmektedir.
- Egzoz emisyon tahmin sonuçlarına bakıldığında CO, HC ve NO<sub>x</sub> emisyonları için MAPE değeri sırasıyla 0,74; 0,28 ve 0,25 olarak hesaplanmıştır.  $R^2$  değerleri ise 0,2; 0,86 ve 0,98 olarak bulunmuştur. Motor performans değerlerinde olduğu gibi egzoz emisyon değerleri için de YSA sonuçlarının kabul edilebilir değerlerde olduğu görülmektedir.

Deney sonuçları, buji ateşlemeli motorlarda yüksek sıkıştırma oranlarında benzin/alkol karışımları kullanıldığında motor veriminde artışla birlikte HC, CO ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında önemli azalmalar sağlandığını göstermektedir.

- Bu çalışmada motorun ateşleme avansı değiştirilememiştir. Ateşleme avansının sıkıştırma oranı ve yakıt türüne göre değiştirilmesiyle performans ve emisyonlar daha fazla iyileştirilebilir.
- Karışım içerisindeki izobütanol oranı daha fazla artırılarak deneyler gerçekleştirilebilir.
- Uzun süreli testler yapılarak izobütanolün yakıt sistemi üzerinde zararlı etkileri olup olmadığı araştırılabilir.
- Tarımsal ürünlerden elde edilebilen çevre dostu olan alkol yakıtlara gereken önem verilerek daha kolay ve ucuz üretim imkânı sağlanabilir.

## KAYNAKLAR

1. Lee, Sunggyu., Speight, J. G., and Loyalka, S. K., "Handbook of Alternative Fuel Technologies", *CRC Press*, 552 (2007).
2. Awad, O. I., Mamat, R., Ibrahim, T. K., Hammid, A. T., Yusri, I. M., Hamidi, M. A., Humada, A. M., and Yusop, A. F., "Overview of the oxygenated fuels in spark ignition engine: Environmental and performance", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 91: 394-408 (2018).
3. Sun, S., Jin, J., Xia, M., Liu, Y., Gao, M., Zou, C., Wang, T., Lin, Y., Wu, L., Mao, H., and Wang, P., "Vehicle emissions in a middle-sized city of China: Current status and future trends", *Environment International*, 137 (September 2019): 105514 (2020).
4. Celik, M. B., "Performance improvement and emission reduction in small engine with low efficiency", *Journal Of The Energy Institute*, 80 (3): 175-180 (2007).
5. Celik, M. B., "Experimental determination of suitable ethanol-gasoline blend rate at high compression ratio for gasoline engine", *Applied Thermal Engineering*, 28 (5-6): 396-404 (2008).
6. Bayrakçeken, H. and Kuş, R., "Alternative fuels used in vehicle", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6 (1): 125-143 (2006).
7. Brownstein, A. M., "Renewable Motor Fuels : The Past, The Present, and The Uncertain Future", *Butterworth-Heinemann* (2015).
8. Avcı, A. and Dönmez, S., "Butanol as biofuel and fermentation production", *Electronic Journal Of Microbiology TR*, 1-12 (2011).
9. Rosenblatt, D., McConnel, S., and Nuottimakie, J., "Particulate measurements: ethanol and isobutanol in direct injection spark ignited engines", *The International Energy Agency Advanced Motor Fuels*, Annex 35-2,24-27 (2015).
10. Uslu, S., "Buji ateşlemeli motorlarda amil alkol kullanımının deneysel ve yapay sinir ağlarıyla incelenmesi", Doktora Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük (2018).

11. Irimescu, A., "Study of cold start air-fuel mixture parameters for spark ignition engines fueled with gasoline-isobutanol blends", *International Communications In Heat And Mass Transfer*, 37 (9): 1203-1207 (2010).
12. Schifter, I., Gonzalez, U., Díaz, L., Mejía-Centeno, I., and Gonzalez-Macias, C., "Performance and emissions of gasoline–dual alcohol blends in spark-ignited single cylinder engine", *International Journal Of Engine Research*, 18 (9): 941-950 (2017).
13. Kılıçaslan, K., "The effect of engine performance and exhaust emissions of isobutanol-diesel blends", Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2010).
14. Elfasakhany, A., "Investigations on performance and pollutant emissions of spark-ignition engines fueled with n-butanol–, isobutanol–, ethanol–, methanol–, and acetone–gasoline blends: A comparative study", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 71: 404-413 (2017).
15. Zaharin, M. S. M., Abdullah, N. R., Masjuki, H. H., Ali, O. M., Najafi, G., and Yusaf, T., "Evaluation on physicochemical properties of iso-butanol additives in ethanol-gasoline blend on performance and emission characteristics of a spark-ignition engine", *Applied Thermal Engineering*, 144: 960-971 (2018).
16. Garayev, A., Güneş, S., and Güldür, Ç., "Performance and emission characteristics of pyridine and isobutanol added gasoline-ethanol-water blends in a single cylinder si gasoline engine", *Isi Bilimi Ve Teknigi Dergisi/ Journal Of Thermal Science And Technology*, 41 (1): 11-21 (2021).
17. Shang, W., Yu, X., Shi, W., Chen, Z., Liu, H., Yu, H., Xing, X., and Xu, T., "An experimental study on combustion and cycle-by-cycle variations of an n-butanol engine with hydrogen direct injection under lean burn conditions", *Sensors*, 22 (3): (2022).
18. Michelbach, C. ve Tomlin, A., "An experimental and kinetic modeling study of the ignition delay and heat release characteristics of a five component gasoline surrogate and its blends with iso-butanol within a rapid compression machine", *International Journal Of Chemical Kinetics*, 53 (6): 787-808 (2021).
19. Zhou, Y., Xie, F., Zhang, B., Sun, P., Zhang, X., ve Meng, X., "Effects of alcohol fuels on SACI engine and analyze of prediction of SACI engine performance by artificial neural networks", *Case Studies In Thermal Engineering*, 61: (2024).
20. Alasfour, F. N., "NOx Emission from a spark ignition engine using 30% iso-butanol-gasoline blend: Part 1 preheating inlet air", *Applied Thermal Engineering*, 18: 245-256 (1998).
21. Alasfour, F. N., "Butanol - a single cylinder engine study: Engine performance", *International Journal Of Energy Research*, 21 (1): 21-30 (1997).

22. Alasfour, F. N., "Effect of using 30% iso-butanol-gasoline blend on hydrocarbon emissions from a spark-ignition engine", *Energy Sources*, 21 (5): 379-394 (1999).
23. Rice, R. W., Sanyal, A. K., Elrod, A. C., and Bata, R. M., "Exhaust gas emissions of butanol, ethanol, and methanol-gasoline blends", *Journal Of Engineering For Gas Turbines And Power*, 113: 377-381 (1991).
24. Irimescu, A., "Fuel conversion efficiency of a port injection engine fueled with gasoline-isobutanol blends", *Energy*, 36 (5): 3030-3035 (2011).
25. Elfasakhany, A., "Experimental investigation on SI engine using gasoline and a hybrid iso-butanol/gasoline fuel", *Energy Conversion And Management*, 95: 398-405 (2015).
26. Yusoff, M. N. A. M., Zulkifli, N. W. M., Masjuki, H. H., Harith, M. H., Syahir, A. Z., Kalam, M. A., Mansor, M. F., Azham, A., and Khuong, L. S., "Performance and emission characteristics of a spark ignition engine fuelled with butanol isomer-gasoline blends", *Transportation Research Part D: Transport And Environment*, 57: 23-38 (2017).
27. Sayin, C. and Balki, M. K., "Effect of compression ratio on the emission, performance and combustion characteristics of a gasoline engine fueled with iso-butanol/gasoline blends", *Energy*, 82: 550-555 (2015).
28. Zhao, L., Wang, D., and Qi, W., "Comparative study on air dilution and hydrogen-enriched air dilution employed in a SI engine fueled with iso-butanol-gasoline", *International Journal Of Hydrogen Energy*, 45 (18): 10895-10905 (2020).
29. Sayin, C., Ertunc, H. M., Hosoz, M., Kilicaslan, I., and Canakci, M., "Performance and exhaust emissions of a gasoline engine using artificial neural network", *Applied Thermal Engineering*, 27 (1): 46-54 (2007).
30. Cay, Y., "Prediction of a gasoline engine performance with artificial neural network", *Fuel*, 111: 324-331 (2013).
31. Atik, K., Kahraman, N., ve Albayrak Çeper, B., "Buji ateşlemeli bir motorda performans ve emisyon değerlerinin yapay sinir ağları ile tahmin edilmesi", *Journal Of Thermal Science And Technology*, 33,2: 57-64 (2013).
32. Bashir, M. N., Usman, M., Riaz, F., Ahmad, T., Fouad, Y., Basha, M. S., Abbas, M. M., and Lee, J. S., "Artificial intelligence based emission and performance prediction, and optimization of HHO-blended gasoline SI engine: A sustainable transition", *Case Studies In Thermal Engineering*, 64: (2024).

33. Uslu, S. and Celik, M. B., "Performance and exhaust emission prediction of a SI engine fueled with i-amyl alcohol-gasoline blends: An ANN coupled RSM based optimization", *Fuel*, 265: (2020).
34. Balki, M. K., Temur, M., Erdoğan, S., Sarıkaya, M., and Sayin, C., "The determination of the best operating parameters for a small SI engine fueled with methanol gasoline blends", *Sustainable Materials And Technologies*, 30: (2021).
35. Kemal Balki, M., Cavus, V., Duran, İ. U., Tuna, R., and Sayin, C., "Experimental study and prediction of performance and emission in an SI engine using alternative fuel with artificial neural network", *International Journal Of Automotive Engineering And Technologies*, 58-64 (2018).
36. Özer, S., "Alkollerin içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılması", *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19: 97-114 (2014).
37. Vargün, M., Hürpekli, M., ve Özsezen, A. N., "Etanol-dizel yakıt karışımları kullanılan bir motorda yakıt püskürtme zamanının yanma üzerine etkisi", *Mühendislikte Yakıtlar, Yangın Ve Yanma Dergisi*, 8: 47-56 (2020).
38. Kapusuz, M., "İçten yanmalı motorların performansının yapay sinir ağları ile modellenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2012).
39. Saridemir, S. ve Eryakali, B., "Etanol-benzin karışımlarının motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisinin incelenmesi", *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 5(1): 72-79 (2016).
40. Kaya, A., "Buji ateşlemeli motorlarda yakıt olarak etanol kullanımının performans ve emisyonlar üzerindeki etkisi", *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik Ve Doğa Bilimleri Dergisi*, (2024).
41. Eyidoğan, M., Çanakci, M., Necati ÖZSEZEN Ertan ALPTEKİN, A., Türkcan, A., ve Kiliçaslan, İ., "Etanol-benzin ve metanol-benzin karışımlarının buji ile ateşlemeli bir motorun yanma parametrelerine ve egzoz emisyonlarına etkisinin incelenmesi", *Fak. Der. J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ. Cilt*, 26 (3): 499-507 (2011).
42. Yakın, A. and Behçet, R., "Performance and emission analysis of sodium borohydride additive methanol-gasoline blended fuels used as fuel in a gasoline engine", *BEU Journal of Science, Vol*, 10(3): 1152-1160 (2021).
43. Karagöz, M., "Dizel-metanol-nanopartikül ile çalışan bir dizel motorda titreşim ve gürültü değişimlerinin incelenmesi", *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 8 (3): 1995-2004 (2020).
44. Koca Tuğçe and Hilal Ahmet, "Methyl alcohol (methanol) intoxication", *The Bulletin Of Legal Medicine*, 25(2): 128-138 (2020).

45. Zhen, X. and Wang, Y., "An overview of methanol as an internal combustion engine fuel", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 52: 477-493 (2015).
46. Kumar, S., Cho, J. H., Park, J., and Moon, I., "Advances in diesel-alcohol blends and their effects on the performance and emissions of diesel engines", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 22: 46-72 (2013).
47. Wess, J., Brinek, M., and Boles, E., "Improving isobutanol production with the yeast *Saccharomyces cerevisiae* by successively blocking competing metabolic pathways as well as ethanol and glycerol formation", *Biotechnology For Biofuels*, 12 (1): (2019).
48. Olson, A. L., Tunér, M., and Verhelst, S., "A review of isobutanol as a fuel for internal combustion engines", *Energies*, 16 (22): (2023).
49. Atsumi, S., Wu, T. Y., MacHado, I. M. P., Huang, W. C., Chen, P. Y., Pellegrini, M., and Liao, J. C., "Evolution, genomic analysis, and reconstruction of isobutanol tolerance in *Escherichia coli*", *Molecular Systems Biology*, 6: (2010).
50. Liu, Y. C., Alam, F. E., Xu, Y., Dryer, F. L., Avedisian, C. T., and Farouk, T. I., "Combustion characteristics of butanol isomers in multiphase droplet configurations", *Combustion And Flame*, 169: 216-228 (2016).
51. M. Bahattin ÇELİK, "Buji ateşlemeli bir motorun sıkıştırma oranının değişken hale dönüştürülmesi ve performansa etkisinin araştırılması", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (1999).
52. Binjuwair, S. A., Alkhedhair, A. M., Alharbi, A. A., and Alshunifi, I. A., "Combustion and emission analysis of SI engine fuelled by saudi arabian gasoline RON91 and RON95 with variable compression ratios and spark timing", *OALib*, 04 (12): 1-21 (2017).
53. Balki, M. K., "Metanol ve etanolün buji ateşlemeli bir motora uygulanmasında performans ve emisyon parametrelerinin incelenmesi", Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2013).
54. Heywood, J. B., "Internal Combustion Engine Fundamentals", *McGraw-Hill Education* (1988).
55. Çelik, M. B. ve Balki, M. K., "Düşük güçlü bir motorda farklı sıkıştırma oranlarında lpg kullanımının performans ve emisyonlara etkisi", *Fak. Der. J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ. Cilt*, 22 (1): 81-86 (2007).
56. Safgönül, B., Ergeneman, M., Arslan, H. E., ve Soruşbay, C., "İçten Yanmalı Motorlar", *Birsan Yayınevi*, İstanbul (2013).

57. Acarođlu, M., Aydođan, H., ve Özçiçek Engin, "Yakıtlar Ve Yanma ", 2. Bs, *Nobel Yayınevi*, Ankara (2019).
58. Stone, R., "Introduction to Internal Combustion Engine", Third Edition. Bs, *Macmillan Press Ltd.*, London (1999).
59. Soruşbay, C., "Karayolu ulaşımından kaynaklanan karbondioksit emisyonlarının çevreye etkisi ve kontrolü", *Mühendis Ve Makina*, 48: (2007).
60. Karamangil, İ. M. ve Yenice, S., "Benzin ve alkol yakıtları için yağ filmi kaynaklı hc emisyonlarının matematik modellemesi", *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18(1): 35-50 (2013).
61. Topgöl, T., Yücesu, H. S., ve Okur, M., "Buji ile ateşlemeli bir motorda çalışma parametrelerinin egzoz emisyonlarına etkilerinin deneysel olarak incelenmesi", *Politeknik Dergisi Journal Of Polytechnic Cilt*, 8 (8): 43-47 (2005).
62. Göktaş, M. ve Sayın, C., "Buji ateşlemeli motorlarda alkol yakıt kullanımının performans, emisyon ve yanma karakteristikleri açısından incelenmesi", *Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 36(1): (2020).
63. Kelen, F., "Motorlu taşıt emisyonlarının insan sağlığı ve çevre üzerine etkileri", *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dersisi*, 19 (2): 80-87 (2014).
64. Fırat, M., "Doğalgazlı buji ateşlemeli direkt enjeksiyonlu bir motorda erken ve geç ateşlemenin yanma ve emisyon oluşumuna etkisi", *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 8 (1): 453-461 (2020).
65. Yılmaz, E., "Hekzan ve N-Heptan yakıt karışımları ile çalışan homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli (hccı) bir motorda hava fazlalık katsayısının yanma ve motor performansı üzerindeki etkileri", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 8 (1): 26-39 (2020).
66. Calam, A. ve İcingür, Y., "Hava fazlalık katsayısı ve oktan sayısı değişiminin hccı yanma karakteristiklerine ve motor performansına etkileri", *Journal Of Polytechnic*, (2018).
67. Koçtürk, D. ve Avcıoğlu Onurbaş, A., "Benzin motorlarında biyoetanol kullanımının çevresel etkilerinin belirlenmesi", *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4(2): 65-74 (2012).
68. Calam, A. ve Halis, S., "Etil alkol yakıtlı HCCI motorun performans, yanma ve emisyon özelliklerinin deneysel olarak incelenmesi", *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13 (1): 221-234 (2020).
69. Demirci, O. K. ve Çınar, C., "HCCI-DI bir motorda doğal gaz kullanımının performans ve egzoz emisyonlarına etkisinin incelenmesi", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 7 (2): 317-330 (2019).

70. Çiftçi, B., Karagöz, M., Aydın, M., and Çelik, M. B., "The effect of fusel oil and waste biodiesel fuel blends on a CI engine performance, emissions, and combustion characteristics", *Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry*, 149 (14): 7783-7796 (2024).
71. Sarıdemir, S., Etem Gürel, A., Ağbulut, Ü., and Bakan, F., "Investigating the role of fuel injection pressure change on performance characteristics of a DI-CI engine fuelled with methyl ester", *Fuel*, 271: (2020).
72. Mukhtar, M., Hagos, F. Y., Aziz, A. R. A., Abdulah, A. A., and Karim, Z. A. A., "Combustion characteristics of tri-fuel (diesel-ethanol-biodiesel) emulsion fuels in CI engine with micro-explosion phenomenon attributes", *Fuel*, 312: (2022).
73. Brown, B. R., "Combustion Data Acquisition and Analysis", Leicester (2001).
74. Bengio, Y., Goodfellow, I. J., and Courville, A., "Deep Learning", *MIT Press*, Cambridge (2015).
75. Türkmen, M., "Prediction of water retention curves using neural networks", Yüksek Lisans Tezi, *Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2020).
76. Rojas, R., "Neural\_Networks", *Springer Science & Business Media*, Berlin (1999).
77. Dizmenler, A., "Enerjisi tüketiminin regresyon analizi ve yapay sinir ağları ile tahmin edilmesi ve karşılaştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *İzmir Bakırçay Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, İzmir (2023).
78. Yıldız, E. ve Özdermir, E., "Esnek geri yayımlı ve geliştirilmiş geri yayımlı sinir ağları performanslarının elektrikli ark ocaklarında karşılaştırılması", *International Journal Of Multidisciplinary Studies And Innovative Technologies*, 3(1): 72-75 (2019).
79. Tütüncü, K., "Yapay zeka teknikleri ile dizel motor performansının modellenmesi ve yakıt optimizasyonu", Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya (2009).
80. Elfasakhany, A., "Engine performance evaluation and pollutant emissions analysis using ternary bio-ethanol-iso-butanol-gasoline blends in gasoline engines", *Journal Of Cleaner Production*, 139: 1057-1067 (2016).
81. Balki, M. K., Sayin, C., and Canakci, M., "The effect of different alcohol fuels on the performance, emission and combustion characteristics of a gasoline engine", *Fuel*, 115: 901-906 (2014).

82. Yaman, H. ve Çelik, M. B., "Benzinli motorlarda egzoz emisyonlarına etki eden faktörlerin deneysel olarak incelenmesi", *Technology*, 3 (4): 681-691 (2004).
83. Ergeneman, M., Kutlar, A., Mutlu, M., ve Arslan, H., "Taşıt Egzozundan Kaynaklanan Kirleticiler", *Birsen Yayınevi*, İstanbul (1998).
84. Sayın, C., Şenbahçe, A., ve Temür, M., "Alkol yakıtların buji ateşlemeli motorlarda kullanımının performans ve emisyonlara etkisinin incelenmesi", *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 26 (1): 20-29 (2014).
85. Yaman, H. ve Çelik, M. B., "Benzinli motorlarda egzoz emisyonlarına etki eden faktörlerin deneysel olarak incelenmesi", *TEKNOLOJİ, Cilt*, 7: 681-691 (2004).
86. Ozsezen, A. N. and Canakci, M., "Performance and combustion characteristics of alcohol-gasoline blends at wide-open throttle", *Energy*, 36 (5): 2747-2752 (2011).
87. Dinesh, M. H. and Kumar, G. N., "Experimental investigation of variable compression ratio and ignition timing effects on performance, combustion, and Nox emission of an ammonia/hydrogen-fuelled Si engine", *International Journal Of Hydrogen Energy*, 48 (90): 35139-35152 (2023).
88. Doğan, B., Erol, D., Yaman, H., and Kodanlı, E., "The effect of ethanol-gasoline blends on performance and exhaust emissions of a spark ignition engine through exergy analysis", *Applied Thermal Engineering*, 120: 433-443 (2017).

## ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Cem MENTEŞ, 2006 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi Keçiborlu Meslek Yüksekokulu Otomotiv Teknolojisi Programına yerleşti. 2008 yılında mezun oldu. 2009 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Otomotiv Öğretmenliği Programına yerleşti. 2012 yılında mezun oldu. 2013 yılında Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programına kabul edildi. 2015 yılında yüksek lisans öğrenimini tamamladı. 2017 yılında Amasya Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Otomotiv Teknolojisi Programında öğretim görevlisi olarak göreve başladı. Halen bu görevine devam etmektedir.