
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ATIK KIZARTMA YAĞI BİYODİZELİ-DİZEL YAKIT KARIŞIMINA FARKLI NANOPARÇACIK (SiO_2 VE TiO_2) EKLENMESİNİN BİR DİZEL MOTORUN TERMODİNAMİK, EKONOMİK VE ÇEVRESEL PARAMETRELERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Soroush GHOLAMI GHANATI

DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Soroush GHOLAMI GHANATI

10/06/2024

ATIK KIZARTMA YAĞI BİYODİZELİ-DİZEL YAKIT KARIŞIMINA FARKLI NANOPARÇACIK (SiO_2 VE TiO_2) EKLENMESİNİN BİR DİZEL MOTORUN TERMODİNAMİK, EKONOMİK VE ÇEVRESEL PARAMETRELERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Soroush GHOLAMI GHANATI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2024

ÖZET

Bu tez çalışması kapsamında, farklı konsantrasyonlarda (25 ppm, 50 ppm ve 100 ppm) silisyum dioksit (SiO_2) ve titanyum dioksit (TiO_2) nanopartiküllerinin atık kızartma yağından elde edilen biyodizel ile dizel karışımına eklenmesinin dizel bir motorun yakıt tüketimi ve emisyonları üzerindeki etkileri sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Motor testleri herhangi bir modifikasyon yapılmadan dört farklı motor yükünde (%25, %50, %75 ve %100), 1700 dev/dk sabit motor devrinde ve 18:1 sabit sıkıştırma oranında gerçekleştirilmiştir. Bu testlerden elde edilen veriler enerji, ekserji, ekserji ekonomik ve ekserji çevresel analizler yapılarak değerlendirilmiştir. Motor deneylerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması amacıyla AVL Boost programı kullanılarak sayısal analiz yapılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, dizel ile biyodizel karışımına (B10) eklenen 100 ppm SiO_2 ve TiO_2 nanopartikülleri, özgül yakıt tüketimini sırasıyla %2,5 ve %1,2 oranlarına kadar azaltırken, ısıl verimde sırasıyla %2,3 ve %1,1'e varan artışlara neden olmuştur. İncelenen tüm yakıtlarda motor yükündeki artışla birlikte ısıl verim, ekserji verimi, ekserji yıkımı ve entropi üretimi artış eğilimi göstermiştir. Aynı zamanda yakıt karışımlarındaki nanopartikül oranının artmasıyla ısıl verim ve ekserji verimi artmıştır. Nanopartikül katkılı yakıt karışımlarında en yüksek sürdürülebilirlik indeksi, %100 motor yükünde B10Si100 yakıtında 1,213 olarak bulunmuştur. Nanopartikül içeren karışımlarının üretilen güç maliyeti, B10 yakıtına göre ortalama %3,1 oranında artmıştır. Nanopartikül oranı arttıkça üretilen güç maliyeti düşmüştür. B10 yakıtına 100 ppm nanopartikül eklenmesi, çevreye salınan CO_2 maliyetini %1,1'e kadar azaltmıştır. Emisyon verileri incelendiğinde, nanopartikül katkılı yakıt karışımlarının CO, HC ve is emisyonlarında, B10 yakıtına kıyasla sırasıyla %66,1, %40,2 ve %55,4'e varan azalmalar gözlenirken, NOx emisyonlarında %36,1'e kadar artışlar tespit edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması neticesinde, elde edilen veriler arasında %1 ile %5 arasında değişen bir farklılık gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu	:	91413
Anahtar Kelimeler	:	Dizel, atık kızartma yağı, SiO_2, TiO_2, ekserji, eksergoekonomik, eksergoçevresel
Sayfa Adedi	:	148
Danışman	:	Doç. Dr. Battal DOĞAN

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF ADDING DIFFERENT NANOPARTICLES (SIO_2 AND TIO_2) TO WASTE COOKING OIL BIODIESEL-DIESEL FUEL BLENDS ON THE THERMODYNAMIC, ECONOMIC, AND ENVIRONMENTAL PARAMETERS OF A DIESEL ENGINE

(Ph. D. Thesis)

Soroush GHOLAMI GHANATI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2024

ABSTRACT

In the scope of this thesis, the effects of adding silicon dioxide (SiO_2) and titanium dioxide (TiO_2) nanoparticles at different concentrations (25 ppm, 50 ppm, and 100 ppm) to a blend of waste frying oil-derived biodiesel and diesel fuel on the fuel consumption and emissions of a diesel engine were experimentally and numerically investigated. The engine tests were conducted without any engine modifications across a quartet of engine load conditions (25%, 50%, 75%, and 100%), maintaining a constant engine velocity of 1700 rpm and a compression ratio steadfast at 18:1. The gathered tests data underwent a rigorous assessment using energy, exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental analyses, complemented by a numerical analysis via AVL Boost software for comparative purposes. The results showed that the addition of 100 ppm SiO_2 and TiO_2 nanoparticles to the diesel-biodiesel blend (B10) reduced specific fuel consumption by up to 2.5% and 1.2%, respectively, while leading to increases in thermal efficiency of up to 2.3% and 1.1%, respectively. Across all fuel blends, an increase in engine load correlated with higher thermal efficiency, exergy efficiency, exergy destruction, and entropy production. Moreover, increased nanoparticle content in the fuel blends resulted in higher thermal and exergy efficiency. The highest sustainability index was observed in the B10Si100 fuel blend at 100% engine load, with a value of 1.213. Although the power generation cost of nanoparticle-containing blends increased by an average of 3.1% compared to B10 fuel, it decreased with higher nanoparticle content. Additionally, adding 100 ppm nanoparticles to B10 fuel reduced the environmental cost of CO_2 emissions by up to 1.1%. Examination of emission data revealed significant reductions in CO, HC, and particulate matter emissions in nanoparticle-containing fuel blends compared to B10 fuel, while NOx emissions increased by up to 36.1%. A comparative analysis between the experimental and computational data revealed a variance ranging from 1% to 5%.

Science Code	:	91413
Key Words	:	Diesel, waste cooking oil, SiO_2, TiO_2, exergy, exergoeconomic, exergoenvironmental
Page Number	:	148
Supervisor	:	Assoc. Prof. Dr. Battal DOĞAN

TEŞEKKÜR

Doktora ve tez çalışması sürecinde beni yalnız bırakmayan, katkılarını ve yardımlarını esirgemeyen ve daimî bir şekilde bana yol gösteren değerli tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Battal DOĞAN'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarım boyunca büyük bir özveri ve sabırla beni destekleyen kıymetli hocalarım Sayın Doç. Dr. Murat Kadir YEŞİLYURT ve Sayın Doç. Dr. Hayri YAMAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, tez çalışmamın değerlendirilmesinde bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ'a, sundukları değerli tavsiyeleri ve katkıları için derin teşekkürlerimi sunarım.

Üniversite Ortaklığı Programı (UPP) kapsamında AVL-Boost programını kullanma fırsatı tanıtan AVL-AST Graz Avusturya'ya ve teknik desteğinden dolayı Sayın Doç. Dr. Fatih AKTAŞ'a teşekkür ederim.

Son olarak bütün eğitim hayatım boyunca hep yanımda olan, beni teşvik eden ve desteklerini esirgemeyen fedakâr aileme gösterdiği sabır ve dayanışma için sonsuz sevgi, saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xiv

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI 17

2.1. Biyodizel Yakıtlar Üzerine Yapılan Araştırmalar 17

2.2. Nanopartikül Katkılı Yakıtlar Üzerine Yapılan Araştırmalar 23

3. MATERYAL VE METOT 33

3.1. Yöntem 33

3.2. Yakıt Karışımlarının Hazırlanması 33

3.2.1. Atık kızartma yağından biyodizel üretimi 33

3.2.2. Yakıt bileşenlerinin karıştırılması 39

3.3. Motor Testleri 41

3.3.1. Motor test düzeneği 42

3.4. Sayısal Modelleme Çalışması 47

3.4.1. Motorun geometrik modellemesi 47

3.4.2. Yanma sürecinin modellenmesi 50

3.4.3. Isı transferi modellenmesi 51

3.4.4. Emisyonların modellenmesi 52

Sayfa

3.4.5. Simülasyon kalibrasyonu ve doğrulaması 56
3.5. Motor Performans Analizleri 57
3.6. Termodinamik Analizler 57
3.6.1. Enerji analizi 58
3.6.2. Ekserji Analizi 61
3.6.3. Sürdürülebilirlik analizi 65
3.6.4. Eksergoekonomik analizi 65
3.6.5. Eksergoçevresel analizi 68
3.6.6. Eksergoçevreekonomik analizi 68
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA 71
4.1. Motor Testleri 71
4.1.1. Motor performansı 71
4.1.2. Egzoz emisyonları 78
4.2. Sayısal Analiz 87
4.2.1. Sayısal motor performansı 87
4.2.2. Sayısal egzoz emisyonları 88
4.3. Deneysel ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması 93
4.3.1. Özgül yakıt tüketimi 93
4.3.2. CO emisyonları 94
4.3.3. CO_2 emisyonları 95
4.3.4. HC emisyonları 96
4.3.5. NOx emisyonları 97
4.4. Termodinamik Analiz Bulguları 98
4.4.1. Enerji analizi bulguları 99
4.4.2. Ekserji analizi bulguları 104
4.4.3. Sürdürülebilirlik analizi bulguları 113

Sayfa

4.4.4. Eksergoekonomik analizi bulguları 114
4.4.5. Eksergoçevresel analizi bulguları 119
4.4.6. Eksergoçevreekonomik analizi bulguları 120
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 123
5.1. Sonuçlar 123
5.2. Öneriler ve Gelecek Çalışmalar 126
KAYNAKLAR 129
EKLER 141
EK-1. AVL Boost modülü 142
ÖZGEÇMİŞ 147

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Scilogex MS7-H550-Pro teknik özellikleri 35

Çizelge 3.2. Metanolün kimyasal özellikleri 36

Çizelge 3.3. Potasyum hidroksitin kimyasal özellikleri 36

Çizelge 3.4. Weightlab WH-2002 terazi teknik özellikleri 37

Çizelge 3.5. Titanyum dioksitin özellikleri 40

Çizelge 3.6. Silisyum dioksitin özellikleri 40

Çizelge 3.7. Çalışmada kullanılan yakıtların bileşen oranları 40

Çizelge 3.8. Çalışmada kullanılan yakıtların teknik özellikleri 41

Çizelge 3.9. Kirloskar TV1 motorun teknik özellikleri 43

Çizelge 3.10. Ölçülen motor parametrelerinin belirsizlik değerleri 45

Çizelge 3.11. Bilsa-Mod 2210 emisyon cihazının teknik özellikleri 45

Çizelge 3.12. Bosch BEA-350 emisyon cihazının teknik özellikleri 46

Çizelge 3.13. Motor modelinde bulunan kısaltmalar 48

Çizelge 3.14. CO yıkımını etkileyen kimyasal reaksiyonlar 52

Çizelge 3.15. NOx üretimini etkileyen reaksiyonlar ve sayısal modellemeleri 53

Çizelge 3.16. Ortam havasındaki gazların mol fraksiyonu 64

Çizelge 3.17. Çalışmada kullanılan yakıtların Türkiye'deki birim fiyatları 67

Çizelge 4.1. Motor yüküne bağlı olarak soğutma suyu giriş-çıkış sıcaklıkları (°C) 76

Çizelge 4.2. Motor yüküne bağlı olarak egzoz giriş-çıkış sıcaklıkları (°C) 77

Çizelge 4.3. Farklı motor yüklerinde yakıtların sürdürülebilirlik indeksi 114

Çizelge 4.4. Farklı motor yüklerinde yakıtların aylık CO_2 maliyeti ($/ay) 120

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Yakıt katkı maddelerinin sınıflandırılması 12

Şekil 2.1. Atık kanola ve ayçiçek yağından biyodizel üretim sürecinin şeması 18

Şekil 2.2. Motor yüküne bağlı CO ve NOx emisyonlarının değişimleri 19

Şekil 2.3. Deney düzeneği ve ölçüm cihazları 21

Şekil 2.4. Farklı yük koşullarındaki özgül yakıt tüketimi ve termal verim 22

Şekil 2.5. Motor yüküne bağlı CO, HC, NOx ve duman emisyonlarının değişimi 24

Şekil 2.6. Deney düzeneği ve ölçüm ekipmanları 26

Şekil 2.7. Termal verim ve özgül yakıt tüketiminin değişimi 27

Şekil 2.8. Motor yüküne bağlı ekserji verimi (ψ) ve krank mili maliyeti 28

Şekil 2.9. Motor yüküne bağlı CO ve HC emisyonlarının değişimi 29

Şekil 2.10. Motor enerji dengesinin şematik gösterimi 30

Şekil 2.11. Yakıt karışımlarının CO ve HC emisyonlarının değişimleri 32

Şekil 3.1. Atık kızartma yağından biyodizel üretimi proses akış şeması 34

Şekil 3.2. Transesterifikasyon reaksiyonun şematik gösterimi 36

Şekil 3.3. Motor test düzeneği ve ölçüm ekipmanlarının şematik gösterimi 42

Şekil 3.4. AVL Boost programı ile oluşturulmuş motor modeli 47

Şekil 3.5. Deney motorunun yakıt ve hava supaplarının zamanlaması 49

Şekil 3.6. Enerji analizlerinde kullanılan kontrol hacmi 59

Şekil 3.7. Ekserji analizlerinde kullanılan kontrol hacmi 62

Şekil 4.1. Motor yüküne bağlı olarak yakıt debisi değişimi 72

Şekil 4.2. Motor yüküne bağlı olarak özgül yakıt tüketimi değişimi 74

Şekil 4.3. Motor yüküne bağlı olarak CO emisyonlarındaki değişim 79

Şekil 4.4. Motor yüküne bağlı olarak CO_2 emisyonlarındaki değişim 80

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.5. Motor yüküne bağlı olarak HC emisyonlarındaki değişim..... 82

Şekil 4.6. Motor yüküne bağlı olarak NOx emisyonlarındaki değişim 84

Şekil 4.7. Motor yüküne bağlı olarak is emisyonlarındaki değişim 86

Şekil 4.8. Simülasyon sonuçlarına göre özgül yakıt tüketimi değişimi..... 88

Şekil 4.9. Simülasyon sonuçlarına göre CO emisyonlarındaki değişim..... 89

Şekil 4.10. Simülasyon sonuçlarına göre CO_2 emisyonlarındaki değişim..... 90

Şekil 4.11. Simülasyon sonuçlarına göre HC emisyonlarındaki değişim..... 91

Şekil 4.12. Simülasyon sonuçlarına göre NOx emisyonlarındaki değişim..... 92

Şekil 4.13. Deneysel ve sayısal çalışmalar arasındaki özgül yakıt tüketimi farkı 94

Şekil 4.14. Deneysel ve sayısal çalışmalar arasındaki CO emisyon farkı 95

Şekil 4.15. Deneysel ve sayısal çalışmalar arasındaki CO_2 emisyon farkı..... 96

Şekil 4.16. Deneysel ve sayısal çalışmalar arasındaki HC emisyon farkı 97

Şekil 4.17. Deneysel ve sayısal çalışmalar arasındaki NOx emisyon farkı..... 98

Şekil 4.18. Motor yüküne bağlı olarak enerji akımı değişimi..... 100

Şekil 4.19. Motor yüküne bağlı olarak egzoz enerjisi değişimi..... 101

Şekil 4.20. Motor yüküne bağlı olarak soğutma suyu enerjisi değişimi..... 102

Şekil 4.21. Motor yüküne bağlı olarak ısıl verim değişimi..... 104

Şekil 4.22. Motor yüküne bağlı olarak yakıt ekserjisi değişimi 105

Şekil 4.23. Motor yüküne bağlı olarak egzoz ekserjisi değişimi 107

Şekil 4.24. Motor yüküne bağlı olarak Isı kayıpların ekserjisi değişimi 108

Şekil 4.25. Motor yüküne bağlı olarak ekserji yıkımı değişimi..... 110

Şekil 4.26. Motor yüküne bağlı olarak entropi üretimi değişimi..... 111

Şekil 4.27. Motor yüküne bağlı olarak ekserji verimi değişimi..... 112

Şekil 4.28. Motor yüküne bağlı olarak üretilen gücün maliyeti değişimi..... 115

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.29. Motor yüküne bağlı olarak eksergoekonomik faktör değişimi 117

Şekil 4.30. Motor yüküne bağlı olarak bağıl maliyet farkı değişimi 118

Şekil 4.31. Motor yüküne bağlı olarak aylık CO_2 salınım değişimi 119

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. SiO_2 ve Al_2O_3 Nanopartiküllerinin FESEM mikrografları 25

Resim 3.1. Scilogex MS7-H550-Pro ısıtıcılı karıştırıcı 35

Resim 3.2. Weightlab WH-2002 hassas terazi 37

Resim 3.3. Ham biyodizel ile gliserol iki fazlı çözeltisi 38

Resim 3.4. Biyodizel düşleme işlemi 38

Resim 3.5. Dizel, biyodizel ve ayçiçek yağı numuneleri 39

Resim 3.6. Tez çalışmasında kullanılan yakıt karışımları 41

Resim 3.7. Motor test düzeneği ve ölçüm ekipmanları 42

Resim 3.8. Kirloskar TV1, deney motoru 43

Resim 3.9. Galen-Tech dinamometre ve Siemens G120 yükleme ünitesi 44

Resim 3.10. Kontrol paneli ve bilgisayar yazılımı 44

Resim 3.11. Bilsa-Mod 2210 emisyon cihazı ve emisyon ekranı 45

Resim 3.12. Bosch BEA-350 duman koyuluğu ölçme ekipmanı 46

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
$	Amerikan doları
°C	Derece santigrat
c	Özgül ekserji maliyeti ($/GJ)
Ċ	Maliyet akışı ($/h)
C_p	Özgül ısıl kapasitesi (kJ/kg.K)
Ė	Enerji akışı (kW)
Ėx	Ekserji akışı (kW)
h	Entalpi (kJ)
Hu	Alt ısıl değeri (MJ/kg)
P	Basınç (Pa)
ppm	Milyonda bir
Q̇	Isı akışı (kW)
s	Entropi (kJ/kg.K)
Sgen	Entropi üretimi (kW/K)
T	Sıcaklık (°C)
Ẇ	Efektif güç (kW)
Ż	İşletme maliyeti ($/h)
$\eta_{ısıl}$	Isıl verim (%)
ψ	Ekserji verimi (%)
φ	Yakıt ekserji faktörü

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
Al_2O_3	Alüminyum oksit
AÖN	Alt ölü nokta

Kısaltmalar	Açıklamalar
BMF	Bağıl maliyet farkı
B10	%90 Dizel + %10 Biyodizel
B10Si25	B10 + 25 ppm SiO_2 Nanopartikül
B10Si50	B10 + 50 ppm SiO_2 Nanopartikül
B10Si100	B10 + 100 ppm SiO_2 Nanopartikül
B10Ti25	B10 + 25 ppm TiO_2 Nanopartikül
B10Ti50	B10 + 50 ppm TiO_2 Nanopartikül
B10Ti100	B10 + 100 ppm TiO_2 Nanopartikül
CH_3OH	Metanol
CO	Karbonmonoksit
CO_2	Karbondioksit
D100	Dizel yakıtı
EF	Eksergoekonomik faktör
GJ	Gigajoule
HC	Hidrokarbon
Kmol	Kilo mol
KOH	Potasyum hidroksit
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt saat
MJ	Megajoule
mm	Milimetre
nm	Nanometre
NOx	Azotoksit
O_2	Oksijen
ÖYT	Özgül yakıt tüketimi
POME	Palm oil methyl ester
SI	Sürdürülebilirlik indeksi
SiO_2	Silisyum dioksit
TiO_2	Titanyum dioksit
ÜÖN	Üst ölü nokta
VCR	Değişken sıkıştırma oranlı
WCO	Atık kızartma yağı

1. GİRİŞ

İçten yanmalı motorlar; termodinamik dönüşüm sistemleri arasında geniş bir uygulama yelpazesine sahip olup özellikle ulaşım, tarım, sanayi ve enerji üretimi gibi çeşitli sektörlerde kritik bir rol üstlenen mekanik sistemlerdir. Bu motorlar; yakıtın yanma sürecinden kaynaklanan termal enerjiyi mekanik enerjiye etkin bir şekilde dönüştürerek kritik bileşenler olan piston, krank mili ve dişli kutusu gibi unsurlar aracılığıyla bu enerjiyi tekerleklere veya diğer cihazlara aktarmaktadır. İçten yanmalı motorlarda yaygın olarak kullanılan yakıt kaynakları arasında benzin, dizel ve doğal gaz yer almaktadır. Bu yakıtlar, milyonlarca yıl önce oluşan bitki ve hayvan kalıntılarının yer altında yüksek basınç ve sıcaklık altında deformasyona uğraması sonucu meydana gelen fosil yakıtlar olarak bilinmektedir.

Fosil yakıtların içten yanmalı motorlarda kullanılmasının birçok avantajı bulunmaktadır. Öncelikle fosil yakıtlar yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir, bu da birim hacim başına oldukça yüksek enerji üretme potansiyeli taşıdıkları anlamına gelmektedir. Böylece motorların genel performansını ve güvenilirliğini arttırarak aynı zamanda motorların yüksek güç, tork ve hız üretme yeteneğini optimize etmektedir. Bununla birlikte, içten yanmalı motorların fosil yakıtlarla çalıştırılmasın birçok dezavantaj neden olmaktadır. Bu dezavantajların en önemlisi, fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan egzoz gazlarının çevresel etki ve insan sağlığı üzerindeki zararlı etkileridir. Egzoz gazları; karbondioksit, karbon monoksit, hidrokarbonlar, nitrojen oksitler, kükürt dioksit, kurum ve asılı parçacıklar gibi çeşitli kirletici maddeleri içermektedir. Bu kirleticiler, atmosferde sera etkisi oluşturarak iklim değişikliğine ve küresel ısınmaya sebep olmaktadır. Aynı zamanda insan sağlığını olumsuz yönde etkileyerek uzun vadede solunum hastalıkları, kalp hastalıkları, kanser ve erken ölümlere yol açabilmektedir. Dolayısıyla fosil yakıtlardan kaynaklanan egzoz gazlarının çevre ve sağlık üzerindeki etkileri sosyal ve ekonomik maliyetleri artırmaktadır. Bununla birlikte fosil yakıtların kısıtlı olması ve kaynakların tükenme riski, içten yanmalı motorlarda fosil yakıt kullanımının bir başka olumsuz yanıdır.

Fosil yakıtlar, milyonlarca yılda oluşan ve yenilenemeyen doğal kaynaklardır. Bu, fosil yakıtların tüketim oranının oluşum oranından çok daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca fosil yakıtların çoğu dünyanın belirli bölgelerinde yoğunlaşmıştır, bu da enerji güvenliği ve jeopolitik sorunlar yaratmaktadır. Böylece fosil yakıt kaynaklarının azalması,

içten yanmalı motorların sürdürülebilirliğini ve ekonomisini tehdit etmektedir. Günümüzde, fosil yakıt rezervlerinin azalması ve bu yakıtların fiyatlarının yükselmesi, yanma sürecinden kaynaklanan kirlilik ve çevresel etkiler, araştırmacılar ve otomobil üreticilerini alternatif yakıt kaynaklarına yönlendirmiştir. Alternatif yakıtlar, fosil yakıtlardan farklı olarak yenilenebilir, temiz ve sürdürülebilir enerji kaynaklarıdır. Bu yakıtlar içten yanmalı motorların performans ve verimlilik özelliklerini geliştirebilmekte olup sera gazı emisyonlarını, hava kirliliğini ve sağlık risklerini azaltabilmektedir. Aynı zamanda, dünyadaki enerjinin güvenliğini ve çeşitliliğini de garanti altına alabilmektedirler.

İçten yanmalı motorlarda alternatif yakıtların kullanılmasına yönelik birçok seçenek bulunmaktadır. Bu seçenekler arasında biyodizel, etanol, hidrojen, doğal gaz, propan gibi yenilenebilir yakıtlar yer almakta olup içten yanmalı motorların çalışma prensipleri, tasarımları ve yapılarına bağlı olarak farklı şekillerde kullanılabilmektedir. Ancak, genellikle alternatif yakıtların kullanılması, içten yanmalı motorların tasarımında ve yapısında önemli değişiklikler gerektirmekte olup yüksek maliyetler ve uzun süreli zaman harcamasına yol açmaktadır. Bunun yanı sıra, farklı sektörlerde geniş bir kullanım alanına sahip olan içten yanmalı motorlar, kısa vadede yeni motorlarla veya modifiye edilmiş modellerle değiştirilebilme olasılığına sahip değildir. Dolayısıyla, enerji alanında çalışan araştırmacılar, mevcut motor teknolojileri ile uyumlu ve önemli yapısal değişikliklere ihtiyaç duymayan alternatif yakıtlara odaklanmışlardır. Bu yakıtlar arasında biyodizel, sıkıştırılmış doğal gaz ve çeşitli alkol türleri yer almaktadır. Üstelik fosil yakıtlara çeşitli yakıt katkı maddelerinin eklenerek bu yakıtların yanma özelliklerinin ve emisyon profillerinin optimize edilmesi, alternatif yakıtlar alanında faaliyet gösteren bilim insanları için kritik bir konu haline gelmiştir.

Son yıllarda, çeşitli yakıt katkı maddeleri arasında öne çıkan nanopartikül içeren yakıt katkı maddelerinin kullanımı, akademik dünyada pek çok araştırmanın merkezinde yer almaktadır. Yapılan araştırmalarda, dizel ve biyodizel gibi yakıtlara çeşitli nanopartiküllerin eklenmesinin içten yanmalı motorların performansı ve emisyonları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu araştırmaların sonuçlarına göre, nanopartiküllü katkı maddelerinin içten yanmalı motorlarda kullanımı, daha etkili bir yanma süreci, yüksek yanma sıcaklıkları ve düşük emisyon seviyeleri gibi avantajlar sağlamıştır. Bu bulgular, nanopartiküllü katkı maddelerinin içten yanmalı motor teknolojilerinde potansiyel bir gelişim alanı

oluşturabileceğini ve sürdürülebilir enerji uygulamalarında önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir.

Bu çalışmada, dizel yakıtı ile biyodizel karışımına eklenen SiO_2 ve TiO_2 nanopartiküllerinin dizel bir motorun performansı, yakıt tüketimi ve emisyonları üzerindeki etkisi sayısal ve deneysel yöntemlerle değerlendirilmiştir. Araştırma kapsamında test edilen yakıt karışımları, atık kızartma yağından elde edilen biyodizelin %10 oranında dizel yakıtıyla karıştırılması ve farklı konsantrasyonlarda (25 ppm, 50 ppm ve 100 ppm) TiO_2 ve SiO_2 nanopartiküllerinin eklenmesiyle oluşturulmuştur. Hazırlanan yakıt karışımları tek-silindirli, sıkıştırma-ateşlemeli, dizel bir motorda dört farklı motor yükleme koşullarında (%25, %50, %75 ve %100) ve 1700 dev/dk sabit motor devrinde test edilmiştir. Ayrıca, farklı yakıt karışımlarının motor testlerinden elde edilen verilerle enerji, ekserji, eksergoekonomik ve eksergoçevresel analizler gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasını özgün kılan unsurlardan biri de ticari bir bilgisayar aracılığıyla gerçekleştirilmiş olan sayısal modellemedir. Bu modelleme, motor testlerinin sonuçlarını doğrulamaya katkıda bulunmanın yanı sıra, yüksek maliyetli motor testlerine ihtiyaç duymadan çeşitli yakıt türlerini değerlendirmek için yenilikçi, hızlı ve ekonomik bir yöntem sunmaktadır. Bu hedef doğrultusunda AVL Simülasyon programı kullanılarak motor testleri sayısal olarak modellenmiştir. Çalışma sonucunda, sayısal ve deneysel çalışmalardan elde edilen motor performansı, yakıt tüketimi ve emisyon sonuçları incelenerek karşılaştırılmıştır.

Biyodizel yakıtı

Biyodizel, biyoyakıtlar kategorisinde öne çıkan önemli bir alternatif olarak kabul edilen, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen ve çevre dostu enerji üretimine katkı sağlayan bir yakıt türüdür. Bu yakıtlar, genellikle bitkisel yağlar, hayvansal yağlar veya atık yağlar gibi çeşitli organik kaynaklardan elde edilmekte olup, içten yanmalı motorlarda geleneksel dizel yakıtlarının yerine kullanılabilen bir alternatif yakıt olarak nitelendirilmektedir. Biyodizel, içten yanmalı motorlarda kullanımının giderek artmakta olup, geleneksel yakıtlara kıyasla sunduğu performans avantajları ve çevresel faydalar nedeniyle alternatif bir yakıt olarak önem kazanmaktadır. Biyodizel yakıtları, karbon salınımını azaltarak iklim değişikliğiyle mücadeleye önemli bir katkı sağlamaktadır. Bu, sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelik küresel bir talebin artışını tetiklemiş ve biyodizel teknolojilerine olan ilgiyi güçlendirmiştir.

Biyodizel yakıtlarının tarihi, 19. yüzyılın başlarına dayanmaktadır ve Rudolf Diesel'in yer fıstığı yağı ile çalışan bir dizel motoru önemli bir dünya fuarında sergilemesiyle başlamıştır. Diesel, sebze yağlarının yakıt olarak kullanılabileceğini kanıtlamıştır. Ancak petrolün daha ucuz ve bolluğu nedeniyle biyodizel yakıtlara olan ilgi zamanla azalmıştır [1]. 1970'li yıllarda petrol krizleri yaşanınca alternatif enerji kaynaklarına yönelik arayışlar artmıştır. Bu dönemde, ABD 1992 yılında biyodizel ismi altında bu yakıtı üretmeye başlamıştır. 1990'lı yıllarda küresel ısınma ve hava kirliliği sorunlarıyla mücadele çabalarının artmasıyla birlikte biyodizel yakıtlara olan ilgi yeniden canlandırılmıştır [2].

Günümüzde biyodizel yakıtları enerji arzı güvenliği, kırsal kalkınma, atık yönetimi ve çevre koruma gibi kritik konularda önemli faydalar sunmakta ve sürdürülebilir enerji politikalarının bir parçası olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, birçok ülke biyodizel üretimini teşvik etmekte ve kullanımını desteklemektedir. Özellikle Almanya, İtalya, Avustralya, ABD, Brezilya, Hindistan ve Çin gibi stratejik öneme sahip ülkeler; biyodizel üretim ve tüketimi konusunda lider konumda bulunmaktadır. Bu ülkeler, biyodizel üretiminde çeşitli bitkisel yağ kaynaklarını kullanmakta olup biyodizel kullanımını yasal zorunluluklar veya vergi indirimleri gibi teşvik mekanizmalarıyla desteklemektedir. Türkiye'de ise biyodizel üretimi ve kullanımı gelişmekte olup 2020 yılında üretilen 100 milyon litre biyodizel yakıt, ekonomiye yaklaşık 600 milyon lira katkı sağlamıştır. Bu gelişmelerle birlikte 2023 yılında ise Türkiye'de planlanan 500 milyon litrelik biyodizel üretimi ile 3 milyar liralık tasarruf hedeflenmektedir [3].

Biyodizelin geniş bir uygulama alanına sahip olması, özellikle ulaşım sektöründe kullanım potansiyelini artırmaktadır. Araçlar, kamyonlar ve diğer ulaşım araçları biyodizel kullanımının artmasıyla birlikte daha sürdürülebilir bir enerji kaynağına yönelmektedir. Bu da fosil yakıtların kullanımının azaltılması ve çevre üzerindeki olumsuz etkilerin minimize edilmesi açısından önemli bir adımdır. Bunun ötesinde, biyodizel üretiminde kullanılan bazı yağlar, özellikle tarım ve endüstri sektörlerinde oluşan atıkların değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu atık yağlar, biyodizel üretim sürecinde geri dönüştürülerek enerji kaynağına dönüştürülmektedir ve bu durum atıkların çevresel olarak duyarlı bir şekilde kullanılmasına imkân tanımaktadır. Bu uygulama, atık yönetimi açısından çevresel sürdürülebilirliği desteklemekte ve biyodizel üretim sürecinin daha geniş bir ekolojik bağlamda değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Biyodizel yakıtlar, içten yanmalı motor sistemlerinde kullanıldığında motor aşınmasını azaltma kabiliyetiyle öne çıkmakta motor ömrünü artırma potansiyeli sunmaktadır. Aynı zamanda, biyodizel yakıtlarının daha yüksek tutuşma noktasına sahip olması, güvenlik açısından bir avantaj sağlamaktadır ve motorun daha düşük bir vuruntu ile daha güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır [4]. Bu özellikler, biyodizel kullanımının sadece motor performansını artırmakla kalmayıp aynı zamanda güvenlik standartlarını da karşılamak adına önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Biyodizel yakıtlarının daha temiz ve verimli yanma süreci; düşük seviyede karbon monoksit, hidrokarbon ve karbon dioksit emisyonlarına yol açmaktadır [5].

Biyodizel yakıtlarının kullanımı, tüm avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Depolama ve stabilite sorunları, bu yakıtların kalitesini etkileyerek motor performansını olumsuz bir şekilde etkileyebilmektedir [6]. Ek olarak saf biyodizelin düşük enerji yoğunluğu, kullanımında zorluklara neden olabilmekte, içten yanmalı motorlardan beklenen performansı düşürerek soğuk iklimlerde kullanımını kısıtlayan daha yüksek bir donma noktasına yol açabilmektedir. Ayrıca, biyodizelin viskozitesinin genellikle dizel yakıta kıyasla daha yüksek olması, yakıtın akışkanlığını azaltma eğiliminde olmasına yönelik önemli bir dezavantajıdır [7]. Ancak, bu dezavantajlara karşı etkili bir çözüm olarak, biyodizel yakıtlarının belirli oranlarda dizel yakıtla karıştırılarak bir yakıt karışımı şeklinde kullanılmasıdır.

Biyodizel-dizel yakıt karışımları, B5, B20 ve B50 gibi terimlerle tanımlanmaktadır. Bu ifadeler, biyodizel ve dizel yakıtların belirli oranlardaki karışımını göstermektedir. Örneğin, B5, %5 biyodizel ve %95 dizel yakıt karışımını ifade etmektedir. Biyodizel-dizel karışımları, depolama ve stabilite sorunlarını azaltabilir, enerji yoğunluğunu artırabilir ve düşük donma noktalarını sağlayarak daha geniş bir iklim aralığında kullanılabilir hale getirebilmektedir. Bu karışımlar, biyodizelin çevresel avantajlarını korurken dizel yakıtın sağladığı performans avantajlarından da yararlanma imkânı sunmaktadır. Ek olarak biyodizel üretiminin maliyetinin yüksek olması sebebiyle, bu yakıtın dizel yakıtla birleştirilmesi ekonomik açıdan oldukça etkili bir stratejidir.

Biyodizel üretimi, genellikle transesterifikasyon adı verilen bir kimyasal dönüşüm sürecini içermektedir. Bu süreç, bitkisel veya hayvansal yağların içinde bulunan trigliserit bileşiklerinin, alkol ile reaksiyona girerek dönüştürülmesini ifade etmektedir.

Transesterifikasyon reaksiyonu sonucunda elde edilen metil esterler, biyodizel olarak adlandırılmaktadır. Biyodizel üretiminde kullanılan ham madde kaynakları oldukça geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Bu kaynaklar arasında, soya, kolza, ayçiçeği, aspir, kenevir, hindistancevizi gibi yağlı tohumlu bitkiler; don yağı ve balık yağı gibi hayvansal yağlar yer almaktadır [8]. Atık yağlar ise biyodizel üretiminde önemli bir sürdürülebilir enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Evsel kızartma yağları, endüstriyel atık yağlar ve hayvansal yağlar gibi çeşitli kaynaklardan elde edilen atık yağlar, biyodizel üretiminde kullanılarak enerji dönüşümüne önemli bir katkı sağlamaktadır. Bu yöntem, atık yağların geri dönüştürülmesi yoluyla çevre dostu ve ekonomik bir enerji alternatifini desteklemektedir; aynı zamanda sürdürülebilir atık yönetimi çözümlerine olanak tanımaktadır [9].

Türkiye, biyodizel hammadde kaynakları açısından zengin bir coğrafyaya sahiptir. Ülkemizde yetiştirilen yağlı tohumlu bitkiler, biyodizel üretimi açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Türkiye'nin iklim ve toprak koşullarında başarıyla yetiştirilebilen bitkiler arasında ayçiçeği, soya fasulyesi, kolza tohumu ve aspir gibi türler bulunmaktadır. Bu bitkiler biyodizel üretiminde etkili bir şekilde kullanılabilmektedir. Ayrıca, ülkedeki zeytin ağaçlarından elde edilen zeytinyağı da biyodizel üretiminde kullanılan bir diğer önemli hammadde kaynağıdır [10].

Biyodizel üretiminde ham madde seçimi

Biyodizel üretiminde ham madde seçimi; biyodizelin fiziksel ve kimyasal özelliklerini, üretim maliyetlerini ve çevresel etkilerini belirleme konusunda temel bir fonksiyona sahiptir. Bu seçim süreci, biyodizel endüstrisinin kalitesini, verimliliğini ve sürdürülebilirliğini belirleyen önemli bir etken olarak karşımıza çıkmaktadır. Fiziksel özellikler, biyodizelin pratik uygulamalardaki performansını belirler ve genellikle viskozite, yoğunluk ve donma noktası gibi kritik parametreleri içermektedir. Kimyasal özellikler ise biyodizelin içsel yapısını şekillendirir; özellikle kullanılan yağların yağ asidi bileşenleri, bu özellikleri belirleyen kritik unsurlardan biridir.

Ham madde seçimi, aynı zamanda üretim maliyetlerini belirleme noktasında stratejik bir rol oynamaktadır. Daha ekonomik ve bolca bulunan hammadde kaynakları, biyodizel üretim maliyetlerini düşürerek endüstrinin rekabet avantajını artırmaktadır. Biyodizel üretiminde ham madde seçimini belirleyen etkili faktörlerden biri de coğrafi konum ve bölgedeki

kaynaklardır. Bu faktörler, biyodizel endüstrisinin sürdürülebilirliği ve ekonomik etkinliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Coğrafi konum, iklim koşulları ve toprak özellikleri gibi faktörler, biyodizel üretiminde kullanılan bitkisel yağların yetişme şartlarını belirlemede etkilidir. Bu nedenle, bir bölgedeki potansiyel biyodizel hammadde kaynakları, coğrafi konumunun yanı sıra iklim koşullarına ve toprak yapısına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Biyodizel üretim yöntemleri

Dizel motorlarda bitkisel ve hayvansal yağların doğrudan kullanılması, viskozite farklılıkları, düşük sıcaklıklarda donma eğilimi, yüksek sıcaklıklarda parçalanma riski, serbest yağ asitleri ve organik bileşenlerin neden olduğu çökelti oluşumu gibi çeşitli teknik sorunları beraberinde getirmektedir. Organik yağlar, genellikle dizel ve benzin yakıtlara kıyasla daha yüksek viskoziteye sahip olduklarından, özellikle düşük sıcaklıklarda, yakıtın püskürtülmesi ve yanma odasında homojen bir karışımın oluşturulması süreçlerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bunun yanı sıra, düşük sıcaklıklarda donma eğilimi gösteren bitkisel yağlar, motorun soğuk hava koşullarında başlatılmasını zorlaştırabilmektedir. Üstelik yüksek sıcaklıklarda parçalanma riski taşıyan organik yağlar, motor performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir ve içerdikleri serbest yağ asitleri ile diğer organik bileşenler, çökelti oluşturabilme potansiyeline sahiptir; bu durum da motorun verimini azaltabilmektedir. Aynı zamanda bitkisel yağların doğrudan kullanılması, yanma özelliklerindeki farklılıklar sebebiyle emisyon sorunlarına yol açabilmekte, çevresel etkileri artırmaktadır.

Bitkisel yağların dizel motorlarda kullanılabilmesi amacıyla genellikle transesterifikasyon, seyreltme, piroliz, mikroemülsiyon ve süper kritik gibi yöntemlerle biyodizel yakıta dönüştürülmesi gerekmektedir. Söz konusu olan kimyasal dönüşüm süreçleri, bitkisel yağların daha uygun viskozite ve yanma özelliklerine sahip biyodizele dönüştürülerek motor performansını ve emisyon kontrolünü iyileştirmeyi amaçlamaktadır [11].

Transesterifikasyon yöntemi

Transesterifikasyon, biyodizel üretiminde yaygın olarak kullanılan bir kimyasal dönüşüm yöntemidir. Bu dönüşüm, trigliserit içeren yağların bir alkol ile reaksiyona girerek metil veya

etil esterlere dönüştürülmesini içermektedir. Elde edilen metil veya etil esterler, biyodizel yakıtı olarak tanımlanmaktadır. Üstelik bu esnada yan bir ürün olarak ortaya çıkan gliserol, genellikle endüstriyel uygulamalarda çeşitli kimyasal işlemlerde kullanılabilmektedir. Transesterifikasyon yönteminin avantajları arasında geniş ham madde çeşitliliğine uygun olması, işlem basitliği, hızlı reaksiyon hızları ve düşük işleme sıcaklıklarında etkili olabilmesi yer almaktadır [12]. Transesterifikasyon işlemi, katalizörlü ve katalizörsüz olmak üzere iki temel yöntemle gerçekleştirilebilmektedir. Katalizörlü transesterifikasyon reaksiyonları genellikle alkali, asidik ve enzimatik katalizörlerin kullanımını içermektedir.

Alkali katalizörler

Alkali katalizörler, transesterifikasyon reaksiyonlarında yaygın bir şekilde tercih edilen katalizörler arasında bulunmaktadır. Örneğin, sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit (KOH), alkali katalizörlerin ana örnekleri arasında yer almaktadır. Bu katalizörler, trigliseridin ester grubunu metil veya etil esterlere dönüştürmek suretiyle biyodizel üretiminde etkili bir rol oynamaktadır. Alkali katalizörlerin kullanımı, reaksiyon hızını artırma ve daha yüksek dönüşüm verimliliği sağlama potansiyeli taşımaktadır [13].

Asidik katalizörler

Asidik katalizörler, transesterifikasyon reaksiyonlarında belirgin bir öneme sahip katalizör sınıfını oluşturmaktadır. Örneğin, sükroz asidi ve metil sülfürik asit gibi asidik katalizörler, özellikle reaksiyon ortamında serbest yağ asitlerinin varlığının etkili bir şekilde yönetilmesine yönelik çözümler sunmaktadır. Bu asidik katalizörler, trigliserit moleküllerinin metil veya etil esterlere dönüştürülme sürecinde katalitik aktivite göstererek reaksiyonun ilerleyişinde kritik bir fonksiyon üstlenmektedirler. Serbest yağ asitleri, biyodizel üretiminde istenmeyen yan ürünler arasında yer aldığından, asidik katalizörlerin kullanımı, bu serbest yağ asitlerinin etkili bir şekilde nötralize edilmesini ve dönüşüm sürecinin istenilen verimlilikte gerçekleşmesini sağlamaktadır [14].

Enzimatik katalizörler

Enzimatik katalizörler, biyolojik kökenli katalizörler olarak kabul edilmekte ve genellikle lipaz ve proteaz gibi özelleşmiş enzimleri içermektedir. Bu katalizörler, biyodizel üretim

sürecinde çevre dostu bir yaklaşım sunmak amacıyla tercih edilen alternatifler arasında bulunmaktadır. Örneğin, lipaz enzimi, trigliserit moleküllerini metil veya etil esterlere dönüştürme reaksiyonlarında özel bir etkileşim sergileyerek biyodizel üretiminde önemli avantajlar sağlamaktadır. Lipazın substrat spesifikliği ve reaksiyon seçiciliği, biyodizel üretiminde istenilen ürün kalitesini elde etme sürecinde belirleyici bir faktör olarak öne çıkmaktadır [15].

Seyreltme yöntemi

Biyodizel üretiminde kullanılan seyreltme yöntemi, genellikle bitkisel ve atık yağların belirli oranlarda dizel yakıt ile karıştırılması sürecini içermektedir. Bu yöntem, biyodizel üretim sürecinde çeşitli avantajlar sunarak özellikle farklı biyodizel kompozisyonlarının elde edilmesine olanak tanımaktadır. Seyreltme yöntemi, biyodizel üretimini daha esnek ve sürdürülebilir hale getirmektedir; aynı zamanda maliyet avantajları sunmaktadır. Seyreltme yöntemiyle üretilen biyodizelin özellikleri incelendiğinde elde edilen karışımın viskozite, yanma özellikleri ve stabilite açısından dizel yakıta kıyasla %2 ile %8 arasında bir iyileşme sağladığı gözlenmektedir. Böylece motor performansını artırabilmesi ve emisyon profillerini optimize edebilmesine katkı sağlamaktadır [16].

Piroliz yöntemi

Piroliz yöntemi, biyodizel üretiminde kullanılan alternatif bir termal dönüşüm sürecidir. Bu yöntem, organik ham maddelerin yüksek sıcaklıkta, düşük oksijen koşullarında termal parçalanma veya çözülme sürecini içermektedir. Bu yöntemde kullanılan yağlar genellikle bitkisel yağlar ve atık yağlardır. Bu süreçte kullanılabilecek çeşitli yağlı biomasselerin bulunması, kaynak çeşitliliğini artırarak sürdürülebilirlik açısından önemli bir katkı sağlamaktadır. Ayrıca piroliz reaksiyonu sonucunda elde edilen biyodizel, geniş bir uygulama yelpazesi içinde kullanılabilmektedir ve düşük sülfür içeriğine sahip olmasıyla da çevresel etkileri azaltmaktadır [17].

Mikroemülsiyon yöntemi

Mikroemülsifikasyon, bitkisel yağlardan biyodizel üretiminde kullanılan bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Bu süreçte, su, yağ, yüzey aktif madde ve ko-surfaktan içeren karışım

belirli oranlarda hazırlanarak homojen bir mikroemülsiyon elde edilmektedir. Mikroemülsiyon, biyodizel üretiminde ideal bir reaksiyon ortamı sunmakta olup, reaksiyon hızını artırarak ürün verimliliğini yükseltmektedir. Üstelik, bitkisel yağların viskozitesini azaltma amacıyla kullanılan bir yöntem olarak dikkat çekmektedir. Transesterifikasyon reaksiyonu sırasında bitkisel yağ içindeki trigliseritler, etanol gibi kısa zincirli alkollerle etkileşime girerek biyodizel ve gliserolü oluşturmaktadır. Mikroemülsifikasyon, bu reaksiyonun daha hızlı ve verimli gerçekleşmesine katkı sağlayarak biyodizel üretim sürecini optimize etmektedir. Ek olarak, transesterifikasyon süreçlerinden kaynaklanan saflaştırılmamış gliserol yan ürünlerini azaltma potansiyeline sahiptir [18].

Süperkritik yöntemi

Süperkritik yöntem, biyodizel üretiminde kullanılan ileri düzey bir teknolojik süreçtir ve genellikle süperkritik karbon dioksit (SC-CO_2) kullanılarak transesterifikasyon reaksiyonunun gerçekleştirildiği bir prosedürdür. Bu yöntemde, süperkritik karbon dioksit belirli bir sıcaklık ve basınç kombinasyonunda sıvı ve gaz halleri arasında bulunarak özellikle çözücü olarak etkili olmaktadır. Sürecin başlangıcında, reaktörde belirli sıcaklık ve basınç altında süperkritik karbon dioksit hazırlanmaktadır. Bu aşamada SC-CO_2, çözücü özellikleri kazanarak reaksiyonun gerçekleşeceği ortamı oluşturmaktadır. Ardından, biyodizel üretiminde kullanılacak olan bitkisel yağlar ve alkol, süperkritik karbon dioksit içine eklenmektedir. Belirli sıcaklık ve basınç koşulları altında transesterifikasyon reaksiyonu başlamakta ve yağ ile alkol, süperkritik karbon dioksit içinde çözülerek biyodizel ve gliserol üretilmektedir. Elde edilen biyodizel ve gliserol, süperkritik karbon dioksit ile ayrıştırılarak saflık ve kalite optimize edilmektedir. Süperkritik yöntemin avantajları arasında yüksek reaksiyon hızı, ürün saflığı ve düşük enerji tüketimi bulunmaktadır. Ancak, yüksek yatırım maliyetleri, operasyonel karmaşıklık ve makine bakımı gibi dezavantajlar da dikkate alınmaktadır [19].

Biyodizelin çevresel etkileri

Dünya genelinde, fosil yakıtların yaygın kullanımı, çevresel sorunların artışına sebep olmuştur. Bu yakıtların atmosfere saldığı karbon dioksit, küresel ısınma sürecini etkilemektedir ve ekosistemlere zarar vererek çevresel etkileri artırmaktadır. Ek olarak fosil yakıtların çıkarılma ve işlenme süreçleri, su kaynaklarının kirlenmesine ve biyoçeşitlilik

kaybına yol açarak çevresel sürdürülebilirlik açısından endişe verici sonuçlara neden olmuştur. Söz konusu olan çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına geçişin sağlanması hedefi doğrultusunda biyoyakıtların kullanımı stratejik bir öneme sahiptir.

Biyodizelin çevresel avantajlarından biri, düşük karbon ayak izine sahip olmasıdır. Biyodizel üretimi sırasında kullanılan bitkisel yağlar, fotosentez yoluyla bitkiler tarafından atmosferden emilen karbon dioksiti içermektedir. Bu durum, biyodizel üretimi esnasında atmosfere salınan karbon miktarının genellikle daha düşük olmasını sağlamaktadır. Bu düşük karbon ayak izi, fosil yakıtlardan kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılmasına ve iklim değişikliğiyle mücadeleye olumlu bir katkı sağlamaktadır [20]. Ayrıca Azot dioksit ve partikül madde emisyonları, geleneksel dizel yakıtlara kıyasla belirgin bir şekilde azalmakta olup hava kalitesinin iyileştirilmesine ve yerel çevre üzerindeki olumsuz etkilerin azaltılmasına katkıda bulunmaktadır [21].

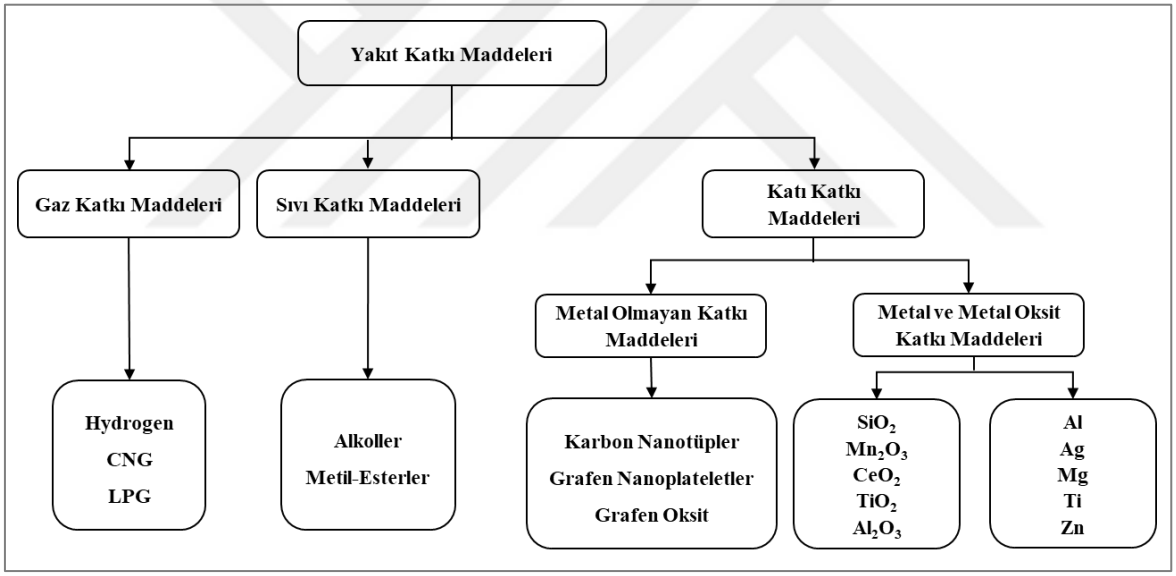
Biyodizelin çevresel dezavantajları da göz önüne alınmalıdır. Özellikle büyük ölçekte bitkisel yağ üretimi için tarım arazilerine duyulan ihtiyaç, gıda üretimiyle rekabeti artırabilmektedir ve gıda güvenliği üzerinde olumsuz bir etkiye neden olabilmektedir. Ayrıca bitkisel yağların üretimi için kullanılan tarım uygulamaları genellikle kimyasal gübre ve pestisit kullanımını içermektedir. Bu uygulamaların yaygın olarak kullanılması, toprak kalitesinde azalmaya, su kaynaklarında kirliliğe ve ekosistemlerde dengesizliğe yol açmaktadır [22]. Bu bağlamda, biyodizel üretimi sektöründeki çevresel zorlukların anlaşılması ve etkili çözümlerin geliştirilmesi kritik bir konu olarak değerlendirilmelidir.

Yakıt katkı maddeleri

Yakıt katkı maddeleri, içten yanmalı motorlarda kullanılan benzin, dizel ve diğer yakıtların özelliklerini optimize etmek ve geliştirmek amacıyla eklenen kimyasal veya diğer malzemelerdir. Bu katkı maddeleri, yakıtın fiziksel, kimyasal ve yanma özelliklerini optimize ederek motor performansını artırmaya yönelik bir dizi avantaj sunmaktadır. Günümüzde gerçekleştirilen araştırmalar, yakıt katkı maddelerinin yakıtların yanma verimliliği, temizlik düzeyi ve emisyon profili üzerinde olumlu etkiler sağladığını mükemmel bir şekilde göstermektedir. Aynı zamanda, motor parçalarının temizliğini artırarak parçalar arasındaki aşınma miktarını düşürme kabiliyetine sahiptir; bu da içten

yanmalı motorların uzun ömürlülüğünü artırmada önemli bir etken olarak değerlendirilmektedir [23].

Yakıt katkı maddeleri; gazlar, sıvılar ve katılar olarak, Şekil 1.1'de görüldüğü üzere sınıflandırılabilmektedir. Üstelik kimyasal yapılarına göre metal bazlı, oksijen içerikli, nanopartiküllü (nano akışkanlar) ve antioksidan katkı maddeleri gibi çeşitli kategorilere ayrılmaktadır. Metal bazlı katkı maddeleri, genellikle kurum oluşumunu engelleyerek motor parçalarını temizler ve aşınmayı azaltır. Oksijen içerikli katkı maddeleri, yanma sürecini optimize ederek daha verimli bir enerji çıkışı sağlamaktadır. Nanopartikül katkı maddeleri, yakıtın yanma özelliklerini iyileştirerek emisyonları düşürmektedir. Antioksidan katkı maddeleri ise yakıtın oksidasyonunu önleyerek depolama sırasında kalitesini korumaktadır [24-26].



Şekil 1.1. Yakıt katkı maddelerinin sınıflandırılması

Son yıllarda yapılan araştırmalarda, hidrojen, alkoller, metil-esterler ve nanopartiküllü katkı maddelerinin geniş bir yelpazede ve farklı motor tiplerinde başarıyla kullanıldığı gözlemlenmektedir. Hidrojen, yakıt hücreli ve hibrit araçlarda kullanılarak çevre dostu bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır ve aynı zamanda yüksek yanma hızı, düşük emisyon değerleri ve sürdürülebilir bir enerji taşıyıcısı olarak avantajlar sunmaktadır. Biyoalkoller ve metil-esterler ise biyobenzin ve biyodizel gibi biyoyakıt formülasyonlarında kullanılarak geleneksel yakıtların yerine geçme potansiyeline sahip olup, biyoçeşitliliğe duyarlı bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Nanopartikül katkı maddeleri ise özellikle motor

yanma süreçlerini optimize ederek emisyonları azaltma ve yanma verimliliğini artırma konularında dikkat çekmektedir. Nanoteknoloji alanındaki gelişmeler, bu katkı maddelerinin yüzey reaktivitesini artırarak yakıtın daha etkili bir şekilde yanmasını sağlamasıyla atmosfere salınan zararlı gazları azaltma potansiyeline sahiptir.

Nanopartiküllü yakıt katkı maddeleri

Nanopartiküller, genellikle 1 ila 100 nanometre arasında değişen boyutlara sahip olan küçük ölçekli parçacıklardır. Bu nano boyuttaki malzemeler, metaller, karbon nanotüpleri ve seramik nanopartiküller gibi çeşitli malzemeleri içermekte olup, özellikle nanoteknoloji disiplinindeki ilerlemelerle birlikte geniş bir endüstriyel ve bilimsel uygulama potansiyeli ortaya koymaktadır. Son yapılan çalışmalarda nanopartikül ve nano akışkanlar içten yanmalı motorlarda yakıt katkı maddesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Nanopartikül katkı maddeleri, hızlı buharlaşma, arttırılmış yüzey alanı/hacim oranı ve daha kısa yanma gecikme süresi gibi özelliklerinden dolayı yakıt özelliklerini iyileştirmek için uygun yakıt katkı maddesidir [27].

Nanopartiküllü yakıt katkı maddelerinin kullanım amaçları arasında ilk olarak yakıtın tam ve daha etkili bir şekilde yanması yer almaktadır. Nano boyuttaki partiküllerin eklenmesi, yanma prosesinin yüzey alanını artırarak daha homojen bir karışım elde edilmesini sağlamakta ve bu da yakıtın verimli bir şekilde yanmasına katkıda bulunmaktadır. Böylece motorun genel performansı artmakta ve yakıtın enerji içeriği daha etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca nanopartiküllü yakıt katkı maddeleri, emisyon kontrolü konusunda da kritik bir rol oynamaktadır. Nano boyutlu katkı maddelerinin eklenmesi, yanma sırasında ortaya çıkan zararlı emisyonları azaltabilmekte ve çevresel etkileri minimize edebilmektedir. Bu durum, özellikle çevre standartlarına uyum sağlama ve daha temiz içten yanmalı motor teknolojileri geliştirme çabalarına destek sağlamaktadır. Isı transferinin iyileştirilmesi, nanopartiküllü yakıt katkı maddelerinin bir diğer önemli kullanım amacını oluşturmaktadır. Nano boyutlu partiküllerin eklenmesi, yakıtın yanma sırasında oluşan ısı enerjisinin daha etkili bir şekilde transfer edilmesini sağlamaktadır. Bu, motorun termal verimliliğini artırarak enerjinin daha verimli kullanılmasına olanak tanımaktadır [28,29].

İçten yanmalı motorlarda kullanılan nanopartiküller, uygulama ve yapılarına bağlı olarak çeşitli malzemeleri içermektedir ve bunlara bağlı olarak değişen özelliklere sahiptir. Metal

olmayan türler arasında karbon nanotüpler, grafen oksit ve Grafen Nanoplateletler bulunmaktadır. Metal katkı maddeleri arasında ise alüminyum, gümüş, mangan, titanyum ve çinko öne çıkmaktadır. Bunun yanı sıra metal oksitleri arasında silisyum dioksit, manganez oksit, seryum oksit, titanyum dioksit ve alüminyum oksit gibi önemli katkı maddeleri bulunmaktadır.

Metal yakıt katkı maddeleri

İçten yanmalı motorlarda kullanılan temel yakıtlara alüminyum, gümüş, manganez, titanyum ve çinko gibi metal katkı maddelerinin ilavesi, yakıtın yanma özelliklerinin iyileştirilmesi ve emisyonların azaltılması amacını taşımaktadır. Bu metal katkı maddeleri, yakıtın yanma sırasında ortaya çıkan enerjinin daha etkili bir şekilde transfer edilmesini sağlayarak motorun genel termal verimliliğini artırmaktadır. Ayrıca bu metal katkı maddelerinin kullanımıyla, motorun dayanıklılığı ve performansı artırılarak daha uzun ömürlü ve güvenilir içten yanmalı motorların elde edilmesi amaçlanmaktadır [30].

Metal oksit yakıt katkı maddeleri

Metal oksitler; örneğin silisyum dioksit, manganez oksit, seryum oksit, titanyum dioksit ve alüminyum oksit gibi nano akışkanlar da içten yanmalı motorlarda kullanılan yakıtlara eklenen katkı maddeleri arasında bulunmaktadır. Bu nanopartiküller, yanma sırasında daha verimli bir ısıl transfer sağladığı için motorun termal verimliliğini artırmaya yönelik olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda bu metal oksit nanopartiküllerin eklenmesi, emisyonların kontrolünü sağlayarak çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sunmaktadır [31].

<u>Silisyum dioksit ve titanyum dioksit nanopartikülleri</u>

Silisyum dioksit ve titanyum dioksit nanopartiküller, metal oksit nanopartiküllerinin öne çıkan örnekleri arasında yer almaktadır. Bu nanopartiküllerin yakıt özellikleri üzerindeki özgün etkileri, motor performansının optimize edilmesi ve emisyonların azaltılması konularındaki benzersiz katkıları, yakıt katkı maddeleri alanında faaliyet gösteren araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Silikon dioksit nanopartiküllerinin yüksek yüzey-hacim oranı ve ısı iletkenliği avantajlarının yanı sıra düşük toksisite seviyeleri, potansiyel olarak dizel yakıtların setan sayısını artırma ve yanma kalitesini etkileme faydalarını

beraberinde getirmektedir [32]. Bunun yanı sıra, titanyum dioksit nanopartiküllerinin sıkıştırmalı yanmalı motorlarda CO, HC ve is azaltılması gibi yararları olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, TiO_2 nanopartiküllerinin dizel yakıtların yanma verimliliğini artırarak yakıt tüketimini optimize edebileceği ve sera gazı emisyonlarını en aza indirebileceği belirtilmektedir [33]. Bu bağlamda, SiO_2 ve TiO_2 nanopartiküllerinin sıkıştırmalı yanmalı motorlarda yakıt katkı maddesi olarak kullanılmasının, alternatif yakıtlar konusunda umut vadeden bir strateji olabileceği sonucuna ulaşılmaktadır. Bu strateji, içten yanmalı motorların performansını artırmayı ve aynı zamanda çevresel etkilerini en aza indirmeyi amaçlayan bir perspektife sahiptir.

Nanopartikül salınımının çevresel ve insan sağlığı üzerindeki etkileri

Fosil yakıtlara nanopartiküllerin eklenmesi alanındaki çalışmaların sonuçları, motor performansında ve zararlı emisyonlarda gözlenen iyileşmeleri doğrulamıştır. Ancak bu yaklaşımın endişe verici bir yönü de bulunmaktadır. Bu partiküllerin silindirden çıkma olasılığı ve egzoz sistemi yoluyla atmosfere dağılma potansiyeline sahip olması bu yaklaşımın endişe verici tarafıdır. Yapılan araştırmalar, bu nanopartiküllerin salınmasının insan sağlığını ve bitki yaşamını olumsuz etkileyebileceğini ortaya koymaktadır. Araştırmacılar tarafından yürütülen çalışmalar, titanyum dioksit nanopartiküllerine maruz kalmanın solunum ve kardiyovasküler problemler, DNA hasarı ve iltihaplanma gibi sağlık sorunlarına neden olabileceğini göstermektedir [34]. Ayrıca, bu nanopartiküllerin toprakta ve suda birikmesi nedeniyle sucul organizmalar üzerindeki zararlı etkilerinden de bahsedilmiştir. California Üniversitesi tarafından yürütülen başka bir çalışma [35], nanopartiküllerin atmosferdeki dağılımının bitkilerin yapraklarına nüfuz edebildiğini, bitki hücrelerine zarar verebileceğini ve büyümelerini ile fotosentezlerini etkileyebileceğini göstermiştir. Aynı şekilde, araba egzoz sistemlerinde yaygın olarak kullanılan seryum oksit nanopartiküllerinin sucul ortamlarda birikerek deniz organizmalarının büyüme ve üremesini etkileyebileceği sonuçlarına ulaşılmıştır. Buna ek olarak nanopartiküllerin egzoz gazları yoluyla çevreye salınmasının çevre ve insan sağlığını önemli ölçüde etkileyebileceği açıkça görülmektedir [36]. Araştırmacılar, nanopartiküllerin atmosfere salınımını azaltmak amacıyla yeni teknolojiler geliştirmektedir ve bu kapsamda nanopartikülleri filtreler aracılığıyla tutma veya katalitik dönüştürücüler kullanma gibi yöntemleri içeren çeşitli stratejiler üzerinde çalışmaktadırlar [37].

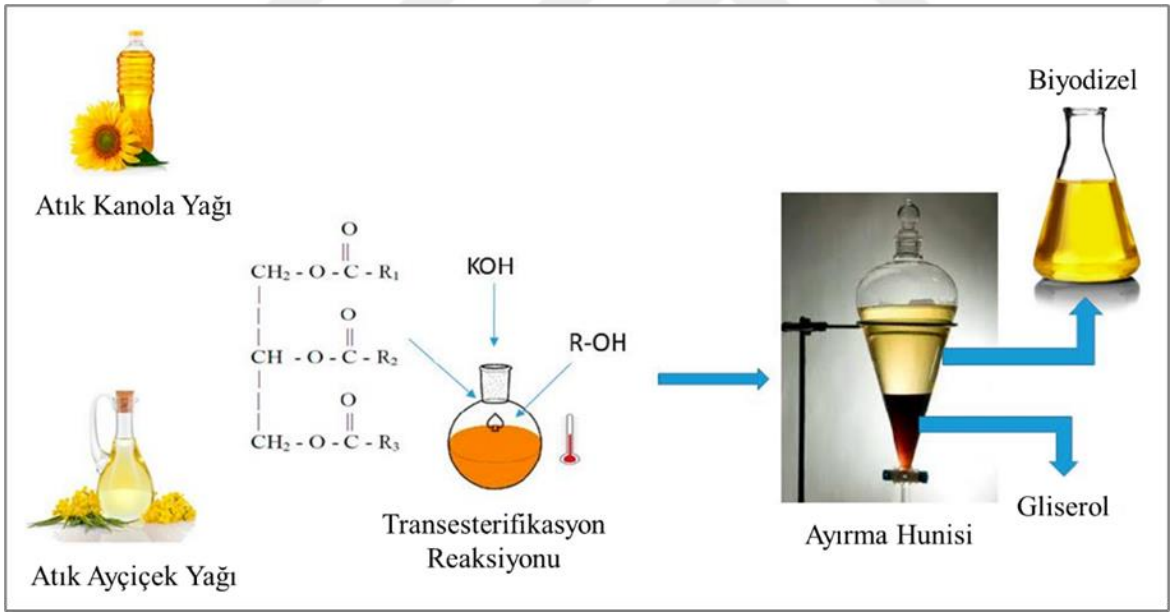
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. Biyodizel Yakıtlar Üzerine Yapılan Araştırmalar

Literatür çalışmaları incelendiğinde, dizel motorlarda alternatif yakıt kaynaklarına yönelik araştırmaların, bitkisel yağlardan elde edilen biyodizelin yenilenebilir ve çevre dostu bir enerji kaynağı olarak büyük bir potansiyel taşıdığını ortaya koymaktadır. Ayrıca biyodizel üretiminde maliyetlerin azaltılmasını hedefleyen çalışmalar kapsamında, bitkisel ve hayvansal yağ atıkları gibi ekonomik ham maddelerin kullanımı defalarca incelenmiştir [38]. Buna karşın biyodizel yakıtının düşük kalorifik değeri, yüksek viskozitesi, yüksek nitrojen oksit emisyonları ve düşük donma noktası gibi dezavantajları, dizel motorların performansını kısıtlayan önemli etkenler arasında bulunmaktadır [39]. Bu bağlamda son yıllarda yürütülen araştırmaların odak noktası, bu dezavantajların aşılması ve dizel motorların veriminin artırılması amacıyla biyodizel yakıtının farklı oranlarda dizel yakıtına katkı maddesi olarak kullanılmasıdır [40].

Uyumaz, fosil yakıtlara olan bağımlılığın ve sera gazı emisyonlarının çevresel etkilerinin azaltılması hedefleri doğrultusunda, keten tohumu yağından üretilen biyodizel (L) ile dizel yakıt (D100) karışımlarının bir dizel motorun yanma, performans ve emisyon özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Motor testleri, değişen motor yükleri altında, 2200 dev/dk sabit devrinde çalışan bir dizel motor üzerinde gerçekleştirilmiş olup, %10, %20 ve %30 oranlarında keten tohumu yağı biyodizel ile dizel yakıtı karışımlarını (L10, L20 ve L30) içermiştir. Araştırma sonuçlarına göre, keten tohumu yağı biyodizelinin eklenmesi, termal verimliliğinde bir azalmaya yol açmıştır. Özellikle, L10 ve D100 karşılaştırıldığında, termal verimliliğinde %7,29'luk bir azalma gözlemlenirken özgül yakıt tüketimi %3,78 oranında artmıştır. Ayrıca biyodizel içeren yakıt karışımlarıyla CO ve duman emisyonlarında önemli bir azalma gözlemlenmiştir. Ancak biyodizelin yüksek oksijen içeriği ve silindir içi gaz sıcaklığının etkisi nedeniyle biyodizel içeriği arttıkça NOx emisyonlarında bir artış meydana gelmiştir. Özellikle, L30 yakıta ait CO emisyonları, D100 yakıtına göre ortalama %36,2 oranında azaltılmıştır. Ancak NOx emisyonlarında, D100'e göre %12,7 oranında artmıştır. Sonuç olarak, motor performansı açısından en uygun yakıt olarak %10 biyodizel içeren yakıt karışımı önerilmiştir [41].

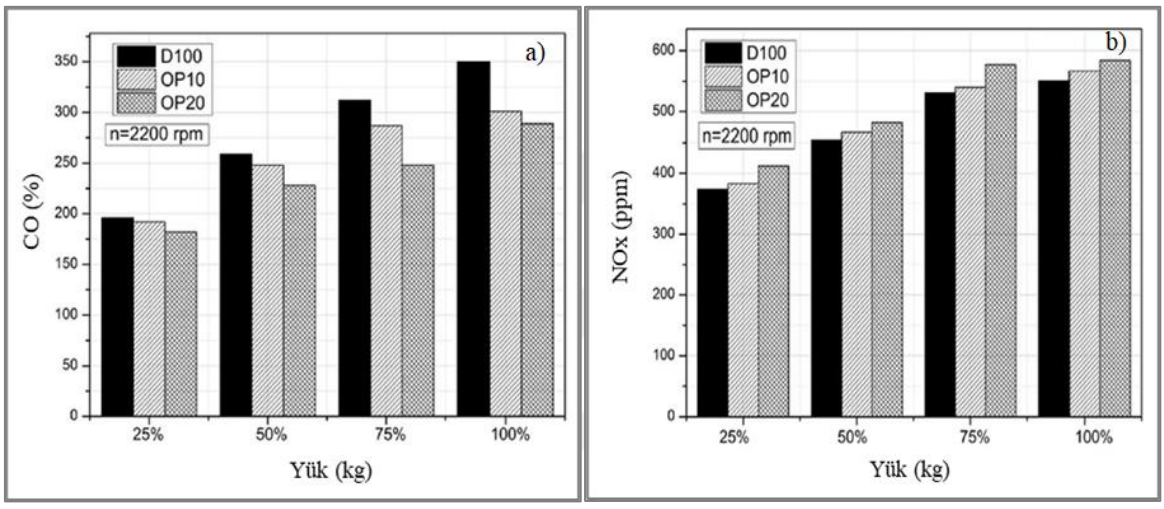
Khan ve çalışma arkadaşları, atık kanola ve ayçiçek yağından üretilen biyodizelin transesterifikasyon koşullarının ve oksidasyon stabilitesinin etkilerini araştırmışlardır. Şekil 2.1'de görüldüğü üzere, araştırmacılar reaksiyon sıcaklığını ve katalizör tipini sabit tutarken metanol ve etanol alkollerin farklı molar oranlarının (6:1, 9:1, 12:1, 15:1 ve 18:1) biyodizel üretim sürecine etkilerini araştırmışlardır. Ayrıca, transesterifikasyon işlemi her bir yağ için 20, 40, 60 ve 90 dakikalık farklı reaksiyon sürelerinde gerçekleştirmişler ve bu parametrelerin biyodizelin yoğunluk, viskozite, kalorifik değer, parlama noktası ve performans özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Araştırmada, alkolün yağa molar oranını 15:1, reaksiyon süresini 60 dakika ve sıcaklığı 50 °C olarak ayarlayarak kolza yağından en yüksek verim ve kaliteyi elde ettiklerini göstermişlerdir. Ayrıca 40 dakikalık reaksiyon süresinde ve 50 °C sıcaklıkta alkolün yağa oranını 18:1 mol olarak belirleyerek ayçiçek yağından en iyi performans ve kaliteye sahip biyodizeli ürettiklerini bulmuşlardır. Ek olarak biyodizel üretim sürecinde metanol kullanmanın, en yüksek biyodizel verimini sağladığını önermişlerdir [42].



Şekil 2.1. Atık kanola ve ayçiçek yağından biyodizel üretim sürecinin şeması

Uyumaz ve arkadaşları, doğrudan enjeksiyonlu, 18:1 sıkıştırma oranına sahip bir dizel motoru kullanarak haşhaş yağından transesterifikasyon yöntemi ile üretilen biyodizel ve dizel karışımının yanma, performans ve emisyon özelliklerini incelemişlerdir. Araştırmacılar, haşhaş yağından üretilen biyodizel ile dizel yakıt karışımları %10 ve %20 karışım oranlarında (OP10 ve OP20), 2200 dev/dk motor hızında ve farklı motor yükleri

altında (%25, %50, %75 ve %100) deneysel olarak değerlendirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, biyodizel yakıt karışımlarının silindir içi basıncı ve ısı salınım hızının motor yükünün artışıyla birlikte arttığını tespit etmişlerdir. Bunun yanı sıra haşhaş yağı biyodizelinin düşük kalorifik değere sahip olmasından dolayı OP10 ve OP20 karışımlarının ısıl veriminde sırasıyla %5,73 ve %13,05 oranlarında bir artış olduğu gözlemlemişlerdir. Ayrıca Şekil 2.2'de görüldüğü gibi OP10 ve OP20 karışımlarının NOx emisyonları, dizel yakıta göre sırasıyla %2,9 ve %5,98 oranlarında artarken CO emisyonlarının sırasıyla %14 ve %17,42 oranlarında azaldığı görmüşlerdir [43].



Şekil 2.2. Motor yüküne bağlı CO ve NOx emisyonlarının değişimleri

Gongora ve arkadaşları tarafından yürütülen deneysel bir çalışmada, Türkiye'de yaygın olarak bulunan aspir yağından üretilen biyodizelinin, turboşarjlı bir dizel motorun performansı ve emisyonları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Araştırma sonuçları, aspir biyodizelinin, ticari dizelden daha yüksek bir setan numarasına sahip olduğunu göstermektedir. Bunun yanı sıra aspir biyodizelinin dizele göre daha düşük kalorifik değere sahip olduğundan dolayı özgül yakıt tüketiminde %1,76 oranında bir artış gözlemlenmiştir. Bununla birlikte aspir biyodizel kullanımı, dizel yakıta kıyasla CO, HC ve duman emisyonlarında sırasıyla %12, %34 ve %10 oranlarında bir azalmaya yol açmıştır [44].

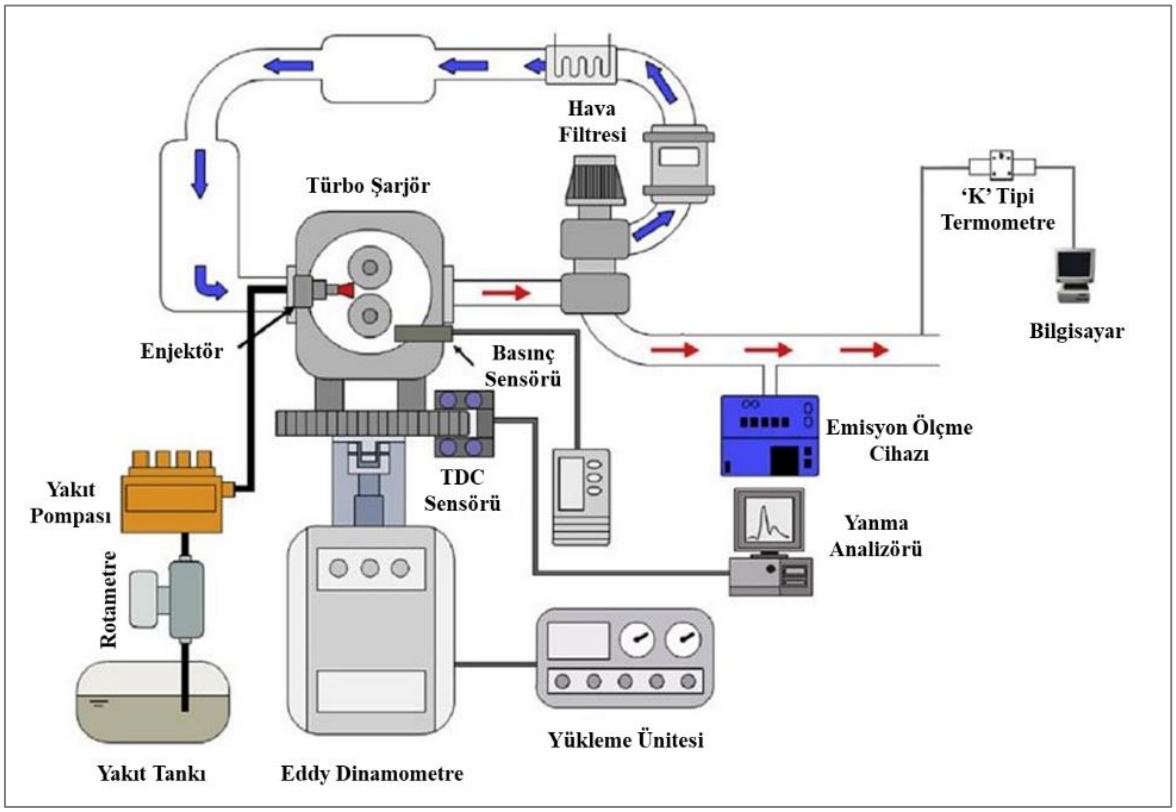
Mohiddin ve arkadaşları, dünya enerji talebini karşılamak için alternatif yakıt kaynaklarını değerlendiren araştırmaları çerçevesinde, biyodizel üretiminde tavuk yağının kullanım potansiyelini araştırmışlardır. Araştırmacılar, incelenen biyodizeli, transesterifikasyon yöntemini kullanarak atık tavuk yağından üretmişlerdir. Çalışmalarında, transesterifikasyon

işlemi, yağ ile metanolün hacimsel olarak 4:1 oranında kullanılması ve %0,5 KOH katalizör konsantrasyonu ile gerçekleştirilmiş olup, biyodizel verimi %96 olarak gözlemlenmiştir. Araştırma sonuçları, tavuk yağı biyodizelinin dizel yakıttan farklı özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Özellikle, kalorifik değeri, viskozitesi ve asit değeri dizel yakıttan daha düşük olduğunu tespit edilmiştir. Motor performans testlerinin sonuçlarına dayanarak biyodizel karışımları dizel yakıtı ile benzer bir performans sergilediği doğrulanmıştır. Bununla birlikte yakıt karışımlarında biyodizel içeriğinin arttırılması, motor çıkış gücünün %1,79 ile %7,43'e kadar azalmasına ve özgül yakıt tüketiminin %0,76 ile %6,13'e kadar artmasına sebep olmuştur [45].

Borugadda ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel bir çalışma, atık mısır yağından biyodizel üretimi tek adımlı alkali katalizli transesterifikasyon reaksiyonu ile gerçekleştirilmiş olup biyodizel ve dizel karışımları doğrudan enjeksiyonlu dizel bir motorda test edilmiştir. Çalışma sonuçları, biyodizel karışımlarının yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin yüksek olması nedeniyle yakıt atomizasyon hızını düşürdüğünü göstermektedir. Böylece termal verimlilikte %1,7 ile %4,14 arasında bir azalmaya ve özgül yakıt tüketiminde %2.18 ile %5,57 arasında bir artışa sebep olmuştur. Ayrıca tüm yakıt karışımlarının CO emisyonlarında %13,67 ile %16,89 arasında, HC emisyonlarında %4.35 ile %11,84 arasında ve CO_2 emisyonlarında %8,34 ile %17,39 arasında bir azalma gözlemlenmiştir. Ancak NOx emisyonlarında %0,3 ile %4,2 arasında bir artış tespit edilmiştir [46].

Gharehghani ve çalışma arkadaşları, atık balık yağından üretilen biyodizel ve dizel karışımlarının yanma özelliklerini, performansını ve egzoz emisyonlarını, geleneksel dizel yakıtı ile karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar, Şekil 2.3'te gösterildiği gibi tek silindirli, doğrudan enjeksiyonlu, turboşarjlı bir Ricardo-E6 motoru kullanarak silindir içi basıncı, egzoz emisyonları ve yakıt tüketimi verilerini kaydederek analiz etmişlerdir. Çalışma sonuçları, atık balık yağından üretilen biyodizelin, dizel yakıtına kıyasla daha yüksek silindir içi basıncı oluşturduğunu ortaya koymuştur. Üstelik, tüm motor yükleri altında biyodizelinin %2,92 oranında daha fazla termal verimliliğe ve %1,1 oranında daha düşük yanma kaybı sahip olduğu gözlemlenmiştir. Biyodizel karışımlarının kullanılması sonucunda, CO emisyonlarında %5,2 ile %27 arasında bir azalma gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, HC emisyonlarında %11,6 ile %70 arasında belirgin bir düşüş kaydedilmiştir. Biyodizelin yüksek oksijen içeriğinin, yanma sürecini daha verimli hale getirdiği, CO_2 emisyonlarında %7,2'lik bir artışa neden olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra, yakıt karışımlarının daha

yüksek setan sayısına sahip olduğundan, NOx emisyonlarında %1,9 ile %12,8 arasında bir artış tespit edilmiştir [47].

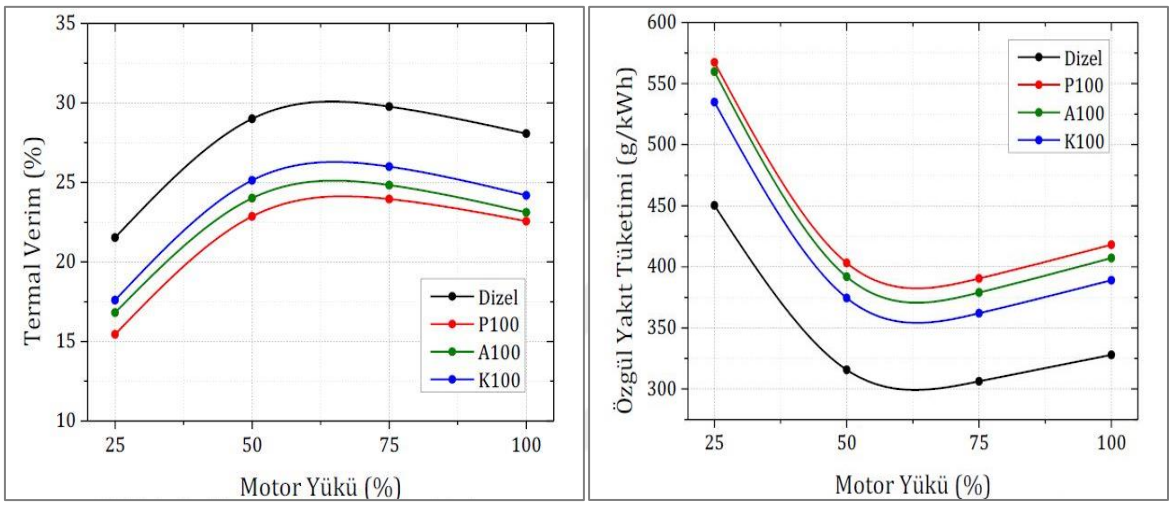


Şekil 2.3. Deney düzeneği ve ölçüm cihazları

Abed ve arkadaşları, atık kızartma yağından transesterifikasyon yöntemiyle üretilen biyodizeli (WCO), tek silindirli bir dizel motorun performans ve emisyonları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmada, kızartma yağından elde edilen biyodizel ile dizel yakıtın farklı oranlarda (%10, %20 ve %30) karıştırılması sonucunda B10, B20 ve B30 karışımları elde edilmiş ve sıfır yükten tam yüke kadar değişen motor yükleri altında test edilmiştir. Araştırma sonuçları, biyodizel karışımlarının termal verimliliğinin dizel yakıta kıyasla daha düşük olduğunu ve özgül yakıt tüketiminin daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, biyodizel karışımlarının NOx ve CO_2 emisyonlarının dizel yakıta kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, CO, HC ve duman emisyonlarının dizel yakıta göre %10 ile %30 arasında daha düşük olduğu gözlemlenmiştir [48].

Örs ve çalışma arkadaşları, atık kızartma yağından üretilen biyodizeli, tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir motorda alternatif bir yakıt olarak kullanılmasının sonucunda, elde edilen performansı, yanma ve emisyon parametrelerini, dizel yakıt, pamuk tohumu yağı biyodizeli

ve aspir yağı biyodizeli ile karşılaştırmışlardır. Araştırma sonuçları, Şekil 2.4'te görüldüğü üzere, kızartma yağından elde edilen biyodizel yakıtın, dizel yakıta kıyasla daha yüksek yakıt tüketimine ve daha düşük ısıl verimine sahip olduğunu göstermiştir. Ancak, pamuk ve aspir biyodizel yakıtlarıyla karşılaştırıldığında, kızartma yağı biyodizelinin daha üstün bir performans sergilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, kızartma yağı biyodizelinin kullanılması, dizel yakıtına göre emisyonlarda belirgin bir azalmaya yol açmıştır. Ancak, pamuk ve aspir biyodizeli ile karşılaştırıldığında, CO ve NOx emisyonlarının sırasıyla %14,1 ve %16 daha yüksek düzeylerde olduğu tespit edilmiştir [49].



Şekil 2.4. Farklı yük koşullarındaki özgül yakıt tüketimi ve termal verim

Üniversite yemekhanesinden toplanan atık kızartma yağlarının biyodizel üretiminde hammadde olarak kullanılma potansiyeli, Yıldızhan ve çalışma arkadaşları tarafından deneysel olarak araştırılmıştır. Araştırmacılar, toplanan yağ örneklerini iki aşamalı bir transesterifikasyon yöntemi ile biyodizel yakıta (WCO) dönüştürmüşler ve dizel ile WCO biyodizel karışımını (B20), VCR bir motorunda alternatif yakıt olarak kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada, motorun performans ve emisyon karakteristikleri, iki farklı sıkıştırma oranlarında (14:1 ve 16:1) ölçmüşlerdir. Araştırmalarının deneysel sonuçları, WCO biyodizelinin termal verimliliğini hafifçe azalttığını ve özgül yakıt tüketimini artırdığını göstermiştir. Bunun yanı sıra biyodizel kullanımı, dizel yakıta kıyasla CO emisyonlarını %21,75'e kadar iyileştirmiştir. Ancak WCO biyodizelinin yüksek yanma sıcaklığı ve yüksek oksijen içeriği, CO_2 ve NOx emisyonlarının artmasına neden olmuştur [50].

2.2. Nanopartikül Katkılı Yakıtlar Üzerine Yapılan Araştırmalar

Literatürde, içten yanmalı dizel motorlarında kullanılan nanopartikül katkılı yakıtların motor performansı, ısıl verimi, yakıt tüketimi ve emisyon üzerindeki etkisini inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır. Literatür çalışmaları incelediğinde sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda dizel ve biyodizel yakıtlara genellikle metal ve metal oksit nanopartikülleri ilave edilerek deneysel araştırmalar yapıldığı görülmektedir [51].

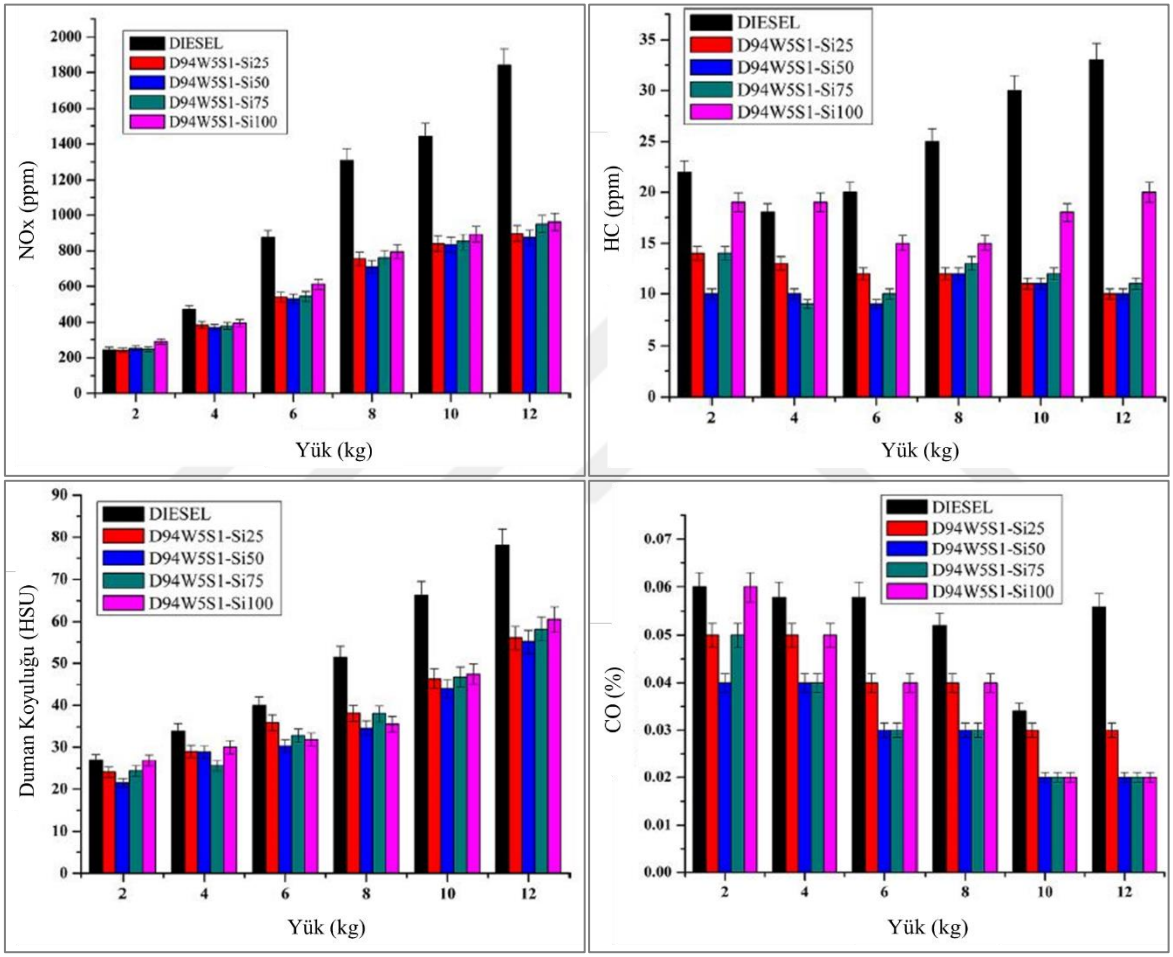
Silisyum dioksit nanopartikülleri ile yapılan çalışmalar

Literatürde yer alan araştırmalara göre, yakıta eklenen SiO_2 nanoparçacıkları, bir katalizör işlevi görmekte olup yanma sürecine oksijen eklenerek, yanma kimyasal reaksiyonlarının hızını artırmaktadır. Bu da ateşleme gecikmesini azalttırarak motor performansını ile emisyon özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmektedir [52,53].

Rangabashiam ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, dizel yakıtına eklenen 10 nm ve 20 nm boyutlarındaki SiO_2 nanopartiküllerinin, su soğutmalı, tek silindirli, dört zamanlı dizel bir motorun emisyon özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Araştırmacılar, 10 nm ve 20 nm boyutlarındaki nanopartikülleri 100 ppm konsantrasyonunda dizel yakıtına ekleyerek ultrasonik yöntemiyle homojen bir şekilde karıştırmışlar ve sırasıyla DS10 ve DS20 olmak üzere isimlendirmişlerdir. Yaptıkları çalışmaların sonucunda, DS10 yakıtının CO, HC emisyonlarının, dizel yakıta kıyasla sırasıyla %3,3 ve %3,7 oranlarında azaldığı gözlemlemişlerdir. Ayni şekilde, DS20 yakıtına ait CO ve HC emisyonlarında %3,2 ve %2,6 oranlarında bir azalma tespit etmişlerdir. Bununla birlikte DS10 ve DS20 yakıtlarının NOx emisyonlarının dizel yakıta göre %1,7 ve %2,6 oranlarında daha yüksek olduğunu görmüşlerdir [54].

Khatri ve Goyal çalışmalarında, tek silindirli, sıkıştırma ateşlemeli dizel bir motorun performansını iyileştirmek ve emisyonlarını azaltmak amacıyla su-dizel emülsiyon yakıtına 25 ppm, 50 ppm, 75 ppm ve 100 ppm konsantrasyonlarında SiO_2 nanopartikülleri eklemişlerdir. Araştırmacılar, DWS temel yakıtını, %94 dizel, %5 su ve %1 SPAN-80 bileşenlerini kullanarak hazırlamışlardır. Bu temel yakıta SiO_2 nanopartikülleri ekleyerek, manyetik karıştırma ve ultrasonik yöntemleriyle homojen bir şekilde karıştırmışlardır. Elde edilen karışımları, 1500 dev/dk sabit motor hızında, 18:1 sıkıştırma oranında ve 19° ÜÖNö,

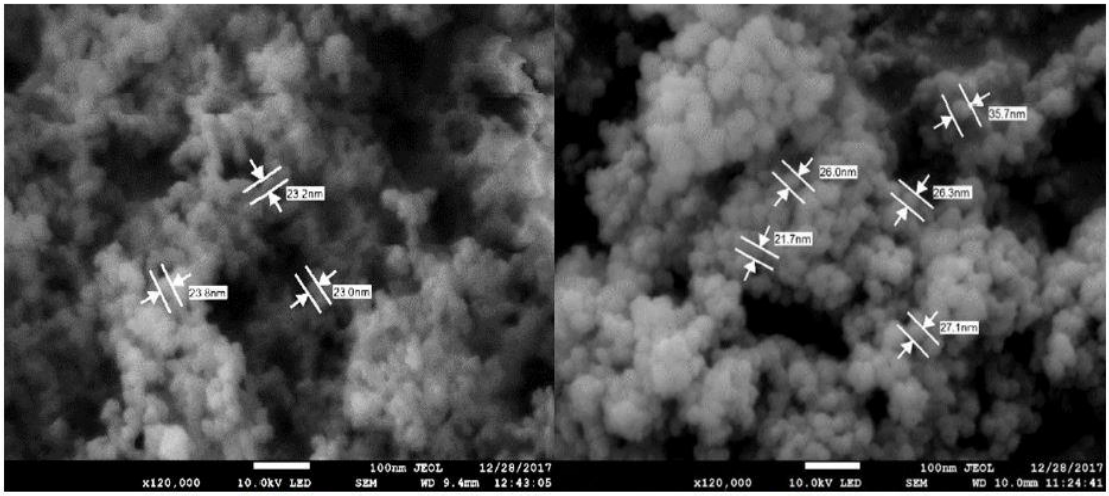
21° ÜÖNö, 23° ÜÖNö ve 25° ÜÖNö olmak üzere dört farklı enjeksiyon zamanlaması altında değerlendirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, Şekil 2.5'te gösterildiği gibi, en üstün performansa sahip olan DWS-Si50 yakıtının, dizel yakıta göre NOx, HC, CO ve duman emisyonlarını sırasıyla %52,52, %29,32, %69,69 ve %64,28 oranlarında azalttığını gözlemlemişlerdir. Üstelik, enjeksiyon zamanlamasının 25° ÜÖNö'ye yükseltilmesi sonucunda, termal verimin %2,61 oranında arttığını ve özgül yakıt tüketiminin %3,7 oranında azaldığını tespit etmişlerdir [55].



Şekil 2.5. Motor yüküne bağlı CO, HC, NOx ve duman emisyonlarının değişimi

Adzmi ve arkadaşları, palm yağından elde edilen biyodizele (POME) farklı oranlarında SiO_2 ve Al_2O_3 nano katkı maddeleri ekleyerek tek silindirli, su soğutmalı dizel bir motorunda ve farklı motor yükleri altında (7 N.m, 14 N.m, 21 N.m ve 28 N.m) test etmişlerdir. Araştırmacılar, Resim 2.1'de görüldüğü üzere, 20 ile 30 nm arasında olan SiO_2 ve Al_2O_3 nanopartikülleri 50 ppm ve 100 ppm oranlarında POME yakıtına ekleyerek ultrasonik yöntemiyle karıştırmışlardır. Araştırma sonuçları, nanopartikül içeren yakıt karışımlarının

ısıl verimini %0,06 oranında, motor torkunu %43 oranında ve motor gücünü %44 oranında artırdığını göstermiştir. Ayrıca nanopartiküllerin eklenmesi, özgül yakıt tüketiminde %19,8 oranında bir azalmaya ve ısıl veriminde %18,8 oranında bir artışa neden olmuştur. Ek olarak SiO_2 içeren yakıt karışımları NOx, CO_2 ve CO emisyonlarını sırasıyla %10, %6,3 ve %0,02 oranlarında azaltmıştır. Araştırmacılar, SiO_2 içeren yakıt karışımlarının Al_2O_3 içeren karışımlara kıyasla yanma basıncı, yakıt tüketimi ve CO emisyonları açısından sırasıyla %2,2, %0,15 ve %0,1'e kadar üstün bir performans sergilediğini belirtmişlerdir [56].



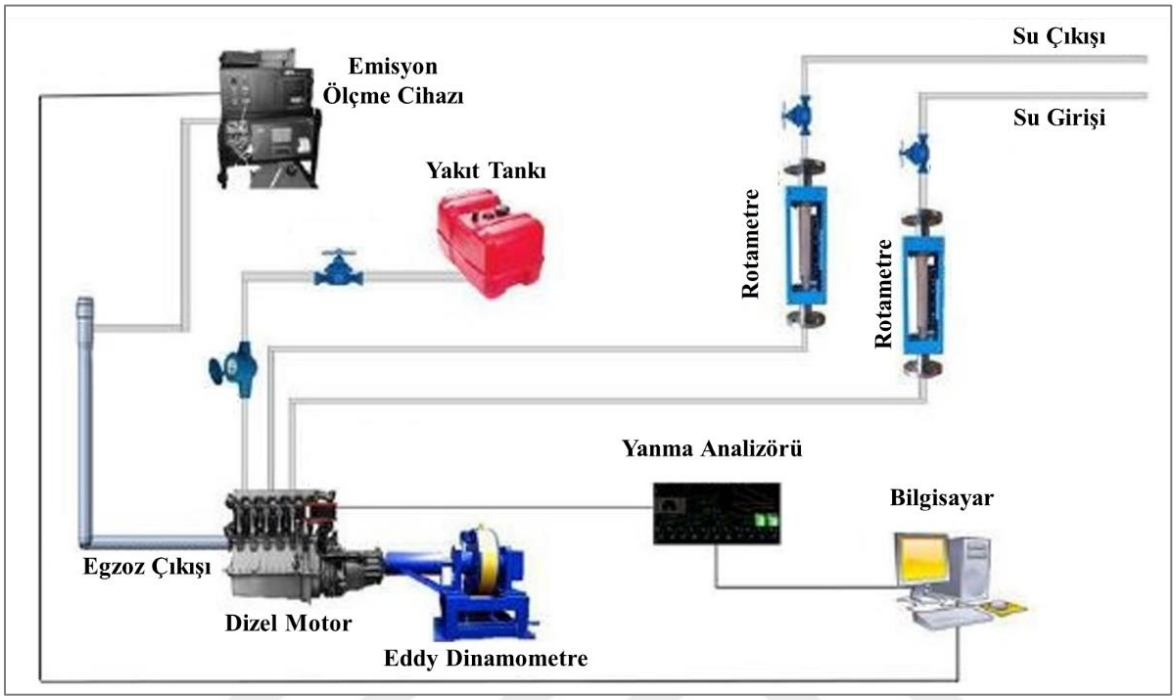
(a) Al_2O_3 (b) SiO_2

Resim 2.1. SiO_2 ve Al_2O_3 Nanopartiküllerinin FESEM mikrografları

Wei ve çalışma arkadaşları, SiO_2 nanopartiküllerinin dizel yakıta ilave edilmesinin dizel bir motorun yanma süreci, performansı ve emisyonları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlar, SiO_2 nanopartiküllerinin ilavesinin termal verimliliği ve özgül yakıt tüketimini sırasıyla %6,2 ve %5,1 oranlarında artırdığını göstermiştir. Ayrıca, CO, HC, NOx ve duman emisyonları sırasıyla %38,5, %55,4, %5,2 ve %55,6 oranlarında azalmıştır. Ek olarak yanma basıncı ve ısı salınım hızı sırasıyla %8,6 ve %4,3 oranlarında artmıştır [57].

Goyal ve arkadaşları, Şekil 2.6'da görülen deney düzeneğini kullanarak dizel yakıtına ilave edilen SiO_2 nanoparçacıklarının tek silindirli, dört zamanlı, dizel bir motorun performans ve emisyon özellikleri üzerindeki etkilerini deneysel incelemişlerdir. Araştırmacılar, SiO_2 nanoparçacıkları 5 ile 25 mg/L konsantrasyonlarda saf dizele ekleyerek farklı motor yükleri altında test etmişlerdir. Çalışma sonucunda, SiO_2 nanoparçacıklarının eklenmesinin termal verimini %15,16 oranında artırdığını ve özgül yakıt tüketimini %14,28 oranında azalttığını

gözlemlemişlerdir. Üstelik, NOx, CO, HC ve duman emisyonları, dizel yakıta göre %77,13, %82,14, %93,94 ve %33,41 oranlarında azalmıştır [58].



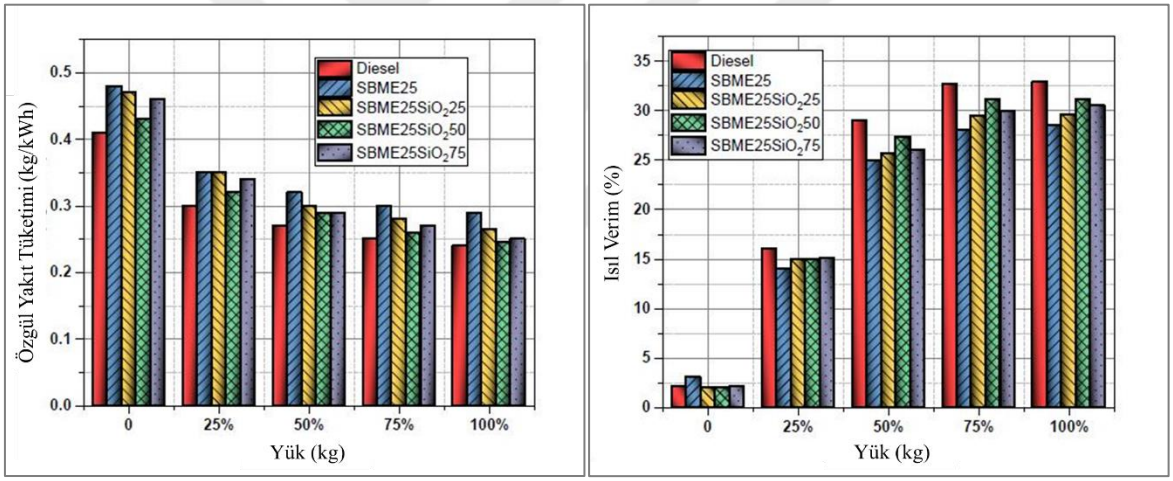
Şekil 2.6. Deney düzeneği ve ölçüm ekipmanları

Chen ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel bir çalışma, SiO_2 nanoparçacıklarının saf dizel ile 20, 50 ve 100 ppm konsantrasyonlarda karıştırılmasının, bir dizel motorun performansı ve emisyonları üzerindeki etkilerini ayrıntılı olarak incelemiştir. Motor testleri, farklı motor yükleri altında ve 1800 dev/dk sabit motor hızında yapılmıştır. Çalışmanın sonuçları, SiO_2 nanoparçacıklarının eklenmesinin, özgül yakıt tüketimini %19,8 oranında azalttığını ve termal verimliliği %18,8 oranında artırdığını göstermiştir. Ayrıca, nanopartiküllerin eklenmesi, saf dizel yakıtla karşılaştırıldığında CO ve HC emisyonlarında belirgin bir düşüşe yol açmıştır [59].

Ramachander, Gugulothu ve Sastry; dizel, mahua metil ester ve pentanol karışımına 40 ppm, 80 ppm ve 120 ppm konsantrasyonlarında SiO_2 nanoparçacıkları ekleyerek TF40, TF80 ve TF120 şeklinde isimlendirdikleri yakıt karışımları dört zamanlı, Kirloskar AV1 markalı, dizel bir motorunda test etmişlerdir. Deney sonuçları incelendiğinde, TF40, TF80 ve TF120 yakıtlarının kullanılması ısıl verimi sırasıyla %1,58, %1,62 ve %2,34 oranlarında artırdığını görmüşlerdir. Ayrıca, SiO_2 nanoparçacıkları içeren tüm yakıt karışımlarının özgül yakıt tüketiminin azaldığını gözlemlemişlerdir. Üstelik CO, HC ve duman emisyonlarının

sırasıyla %10,24, %6,39 ve %5,38'e kadar azaldığını tespit etmişlerdir. Araştırmacılar, TF120 yakıtının diğer test edilen yakıtlara kıyasla ısıl verim, özgül yakıt tüketimi ve emisyonlar açısından en etkili sonuçları sergilediğini belirtmişlerdir [60].

Gavhane ve arkadaşları tarafından yürütülen bir araştırmada, dizel ve soya yağı karışımına SiO_2 nanopartiküllerinin eklenmesinin, tek silindirli bir dizel motorun performansı ve emisyonları üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışma sonuçlara göre, SiO_2 nanoparçacıklarının eklenmesi, tutuşma gecikmesini kısaltmıştır. Ayrıca Şekil 2.7'de gösterildiği gibi termal verimi ve özgül yakıt tüketimi sırasıyla %3,48 ile %6,39 arasında ve %5,81 ile %9,88 arasında artmıştır. Dizel/biyodizel yakıt karışımları ile karşılaştırıldığında, nano katkılı yakıt karışımlarının CO, HC ve duman emisyonları sırasıyla %17,5, %20,56 ve %10,16 oranlarında azalmıştır [61].



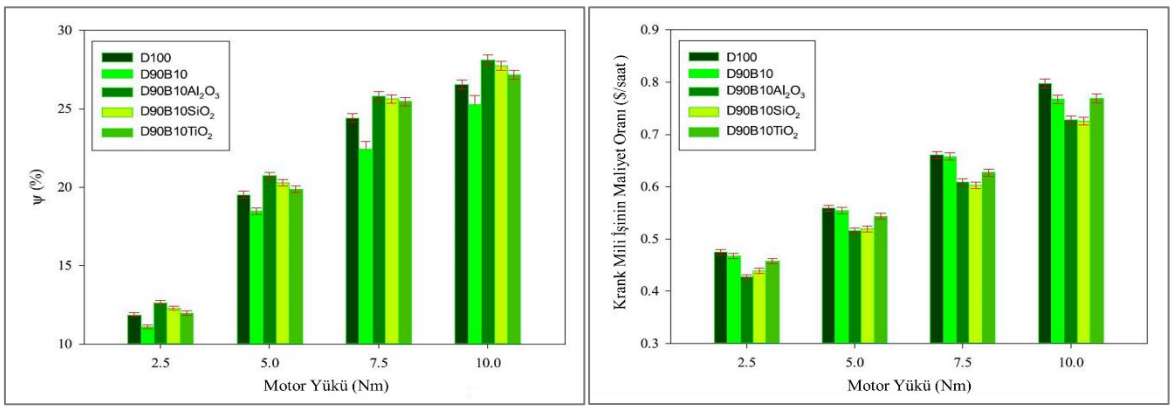
Şekil 2.7. Termal verim ve özgül yakıt tüketiminin değişimi

Titanyum dioksit nanopartikülleri ile yapılan çalışmalar

Literatürde yapılan çalışmalar, dizel yakıta TiO_2 nanopartiküllerin eklenmesinin, dizel motorun performansını, yanma özelliklerini ve emisyonlarını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir [62]. Araştırmacıların yaptıkları çalışmalara göre, TiO_2 nanopartiküllerin dizel yakıtına eklenmesi, içten yanmalı motorun yanma sürecini optimize ederek daha çevre dostu ve yüksek verimli bir yanmaya sebep olmaktadır [63]. Bu nanopartiküller, motordaki yakıtın daha tam bir yanma süreci geçirmesine katkıda bulunmakta olup motorun güç ve tork karakteristiklerini artırmaktadır [64].

Yaşar ve arkadaşları, dizel bir motorun performansını artırmak ve dizel yakıttan kaynaklanan emisyonları azaltmak amacıyla %90 dizel ve %10 bütanol ile oluşturulan yakıt karışımına 25 ve 50 ppm oranlarında TiO_2 nanopartikülleri eklemişlerdir. Araştırmacılar, TiO_2 nanopartiküllerin eklenmesinin dizel bir motorun performansı, yanma parametreleri ve emisyonları üzerindeki etkilerini araştırarak motor testleri, farklı motor yükleme koşullarında ve 1600 dev/dk sabit motor hızında gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, TiO_2 nanopartiküllerinin konsantrasyonunun arttırılmasının, dizel yakıta kıyasla spesifik yakıt tüketimini %6,47 oranında azalttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca nanopartikül içeren yakıt karışımlarında CO emisyonlarının %36,17 oranında ve duman yoğunluğunun %36,73 oranında azaldığını görmüşlerdir. Ancak nanopartikül konsantrasyonun artırılmasının NOx emisyonlarını %20,77 oranında artırdığını tespit etmişlerdir [65].

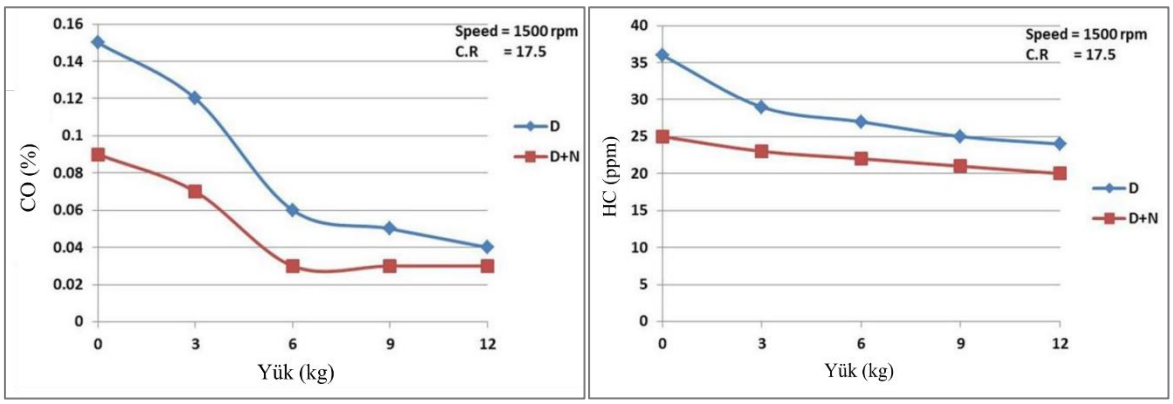
Karagöz ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, dizel yakıta eklenen farklı metal oksit nanopartiküllerinin, tek silindirli, dört zamanlı bir dizel motorun performansı üzerindeki etkileri, ekserji ve eksergoekonomik analizlerle değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, referans yakıt olarak %90 dizel ve %10 atık yağ metil ester karışımı (D90B10) kullanılmıştır. Üstelik, 100 ppm konsantrasyonunda Al_2O_3, SiO_2 ve TiO_2 nanoparçacıkları D90B10 yakıtına eklenerek D90B10Al_2O_3, D90B10SiO_2 ve D90B10TiO_2 olarak adlandırılan yakıtlar üretilmiştir. Şekil 2.8'de görüldüğü gibi, D90B10Al_2O_3, D90B10SiO_2 ve D90B10TiO_2 yakıtlarının kullanımı motorun ekserji verimliliğini dizele göre sırasıyla %1,56, %1,19 ve %0,59 oranlarında artırmıştır. Krank mili işinin en düşük maliyet oranı, D90B10Al_2O_3 yakıtı için 0.42 $/saat ve D90B10$SiO_2$ yakıtı için 0.60 $/saat olarak bulunmuştur. En yüksek ve en düşük sürdürülebilirlik indeksi değerleri sırasıyla D90B10Al_2O_3 için 1.391 ve D90B10 için 1.344 olarak belirlenmiştir [66].



Şekil 2.8. Motor yüküne bağlı ekserji verimi (ψ) ve krank mili maliyeti

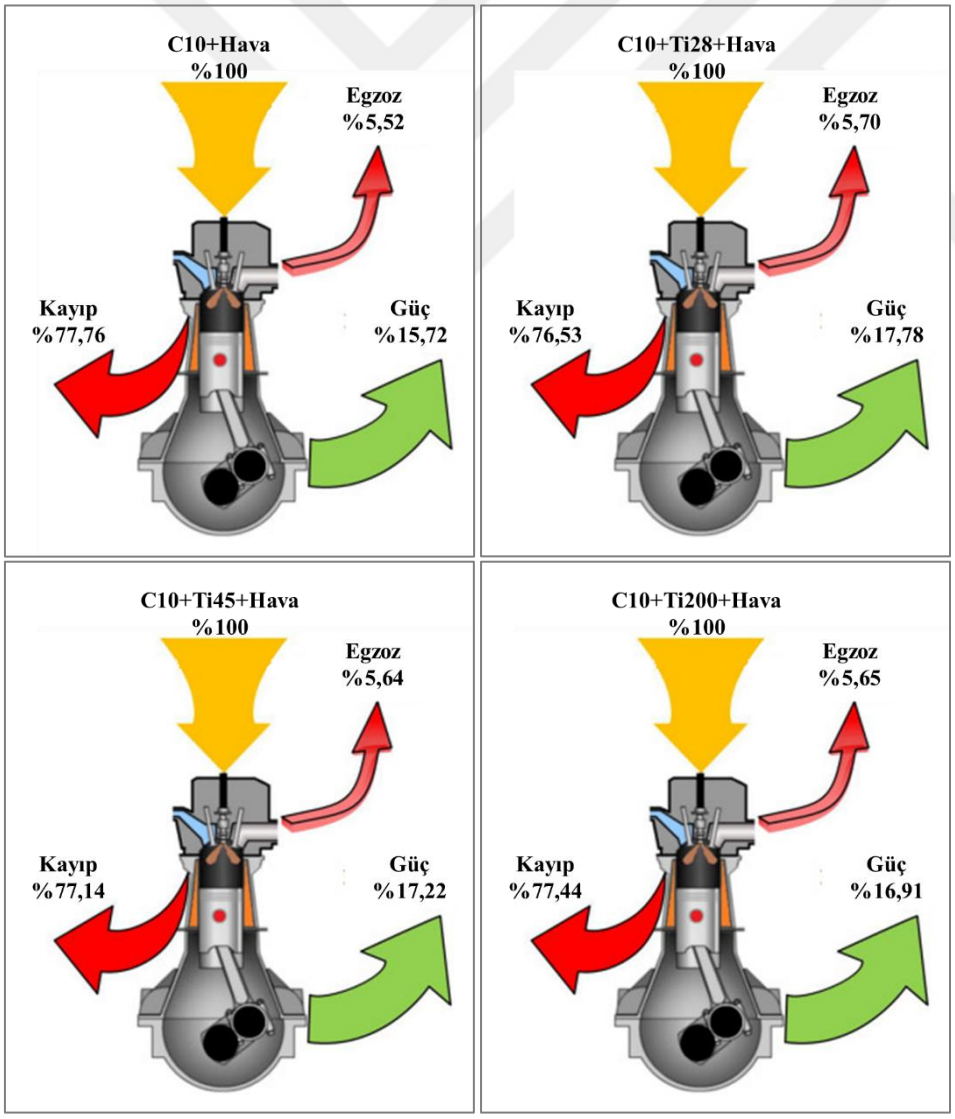
Vigneswaran ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada su ve dizel emülsiyon yakıtı ile nanopartikül katkı maddeleri kullanarak tek silindirli, dört zamanlı, dizel bir motorun performansını iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Bu çalışmada, temel yakıt olarak %89,8 dizel, %10 su ve %0,2 yüzey aktif madde (DWS) kombinasyonunu kullanmışlardır. Ayrıca, temel yakıta 30 ppm, 60 ppm ve 90 ppm konsantrasyonlarında TiO_2 nanopartikülleri ekleyerek DWT1, DWT2 ve DWT3 olarak adlandırılan homojen yakıtları oluşturmuşlardır. Çalışmalarının sonucunda, DWT1 ve DWT2 yakıtlarının performans, yakıt tüketimi ve emisyon özelliklerinin dizel yakınına benzer olduğunu, aynı zamanda DWT3 yakıtının ısıl veriminin, dizel ve DWS yakıtlarına göre sırasıyla %5,65 ve %2,76 arttığını tespit etmişlerdir. Bununla birlikte, DWT3 yakıtının CO, HC ve duman emisyonlarının dizel yakınına göre sırasıyla %30, %28,68 ve %32,98 oranlarında azaldığını ve NOx emisyonlarının %39,68 oranında arttığını gözlemlemişlerdir [67].

Silva, Binu ve Buat tarafından yürütülen deneysel bir çalışma, dizel yakıtın özelliklerini geliştirmeyi ve dizel motorun performansını ve emisyonlarını optimize etmeyi hedeflemiştir. Bu araştırmada, dizel yakıta TiO_2 nanoparçacıkları eklenmiş ve alternatif bir yakıt olarak tek silindirli, dört zamanlı, doğal emişli, dizel bir motor üzerinde test edilmiştir. Üstelik yakıtın viskozitesi, yoğunluğu, yanma noktası ve ısıl değeri gibi özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, dizel yakıtın viskozitesi, yoğunluğu ve kalorifik değerleri sırasıyla 6,17 stok, 0,43 gr/cc ve 0,59 kJ/kg artmıştır. Ek olarak ısıl verimi %0,9 oranında artırırken özgül yakıt tüketimi %21,28 oranında azalmıştır. Ayrıca, egzoz emisyonlarında belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir. Şekil 2.9'da görüldüğü üzere, CO ve HC emisyonları %38 ve %22,38 oranlarında azalırken, NOx emisyonlarında %6,95'lik bir artış kaydedilmiştir [68].



Şekil 2.9. Motor yüküne bağlı CO ve HC emisyonlarının değişimi

Ağbulut, kanola yağı metil esteri ve dizel karışımına (C10) eklenen 28 nm, 45 nm ve 200 nm boyutlarındaki TiO_2 nanoparçacıklarının, bir dizel motorun performansı ve emisyonları üzerindeki etkisini enerji, ekserji ve eksergoekonomik analizler ile değerlendirmiştir. Analiz sonuçlarına göre C10+Ti28, C10+Ti45 ve C10+Ti200 yakıt karışımlarının özel yakıt tüketimi sırasıyla %16,91, %12,97 ve %10,24 oranlarında azalmıştır. Üstelik, Şekil 2.10'da görüldüğü üzere, enerji verimliliği açısından en düşük değerler C10 yakıtında kaydedilirken en yüksek değerler C10+Ti28 yakıtında gözlemlenmiştir. Eksergoekonomik analizleri göre, nanoparçacıkların eklenmesi, yakıtların birim maliyetini ve özgül ekserji maliyetini önemli bir ölçüde artırmıştır. Araştırma sonucuna göre, daha küçük boyutlara sahip nanoparçacıkların kullanılmasının, enerji, ekserji, ekonomik ve sürdürülebilirlik sonuçlarına yönelik daha olumlu sonuçlar elde etmek amacıyla tercih edilebileceği önerilmiştir [69].



Şekil 2.10. Motor enerji dengesinin şematik gösterimi

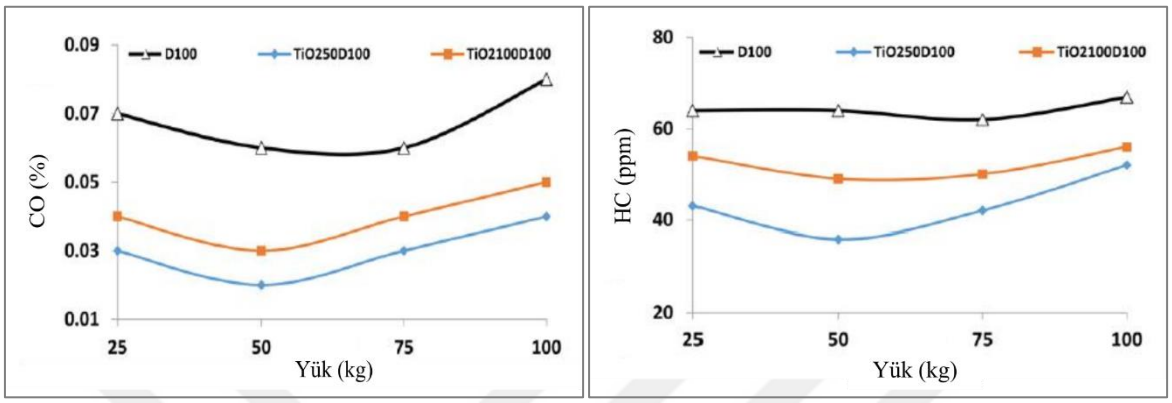
Jafarmadar ve Amini, dizel yakıta TiO_2 nanoparçacıkları ekleyerek dört silindirli, dizel bir motorun performansını, emisyonunu ve ısı kaybını enerji ve ekserji analizler ile değerlendirmişlerdir. Analizlerinin sonucunda, dizel yakıta 2,5 ppm oranında TiO_2 eklenmenin enerji verimliliğini %4,1 oranında artırdığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, ekserji analizine göre, ekserji verimliliğinin %3 oranında arttığını, şaft ekserjisini ve egzoz ekserji kaybının ise sırasıyla %3,4 ve %2,5 oranlarında arttığını tespit etmişlerdir. Aynı zamanda, sistemin tersinmezliğinin ortalama olarak %3,8'e kadar düştüğünü ve özgül yakıt tüketiminin %3'e kadar azaldığını belirtmişlerdir [70].

Karthikeyan ve Prathima, dizel bir motorun performansını artırmak ve emisyonlarını azaltmak amacıyla, yosundan elde edilen biyodizel ile dizel karışımına 50 ppm ve 100 ppm konsantrasyonlarında TiO_2 ve SiO_2 nanopartiküllerini eklemişlerdir. Üstelik, motor testleri tek silindirli, dört zamanlı, dizel bir motoru kullanarak 1500 dev/dk sabit motor hızında ve farklı motor yükleme koşullarında gerçekleştirmişlerdir. Araştırmalarının sonuçları, TiO_2 ve SiO_2 nanoparçacıklarının eklenmesinin tutuşma gecikmesini azalttığını ve yakıt özelliklerini iyileştirerek özgül yakıt tüketiminde bir düşüşe neden olduğunu göstermiştir. Emisyon sonuçların ise CO ve HC emisyonlarının dizele göre yüksek oranlarında düştüğünü, ancak NOx emisyonlarının arttığını göstermiştir [71].

Örs ve çalışma arkadaşları; dizel, kızartma yağı biyodizeli, nbutanol ve TiO_2 nanoparçacıklarından oluşturan yakıt karışımları dört zamanlı, tek silindirli, su soğutmalı, dizel bir motorunda test etmişlerdir. Bu çalışmada, yakıt karışımlarındaki nanopartikül konsantrasyonunun motor performansı, yakıt tüketimi ve emisyonlar üzerindeki etkisini araştırmışlardır. TiO_2 nanopartiküllerinin eklenmesi sonucunda motor torkunun ve gücünün sırasıyla %10,20 ve %9,74 oranlarında arttığını, özgül yakıt tüketiminin ise %1,37 oranında azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, egzoz emisyonlarında önemli bir azalma kaydetmişlerdir. CO ve HC emisyonlarının sırasıyla %38 ve %22,38 oranında azaldığını ve NOx emisyonlarının %6,95 arttığını belirtmişlerdir [72].

Kumar, Bapu ve Gugan, TiO_2 nanopartikülleri dizel yakıtına ekleyerek tek silindirli bir dizel motorun emisyon özelliklerini optimize etmeyi amaçlamışlardır. Araştırmacılar, TiO_2 nanoparçacıklarını 50 ppm ve 100 ppm dozlarında dizel (D100) yakıtıyla karıştırarak $TiO_2$50D100 ve $TiO_2$100D100 yakıt karışımları hazırlamışlar ve farklı motor yükleme koşulları altında test etmişlerdir. Deney sonuçları incelendiğinde, Şekil 2.11'de görüldüğü

üzere, 50 ve 100 ppm TiO_2 nanopartikül eklenmesinin CO emisyonlarını sırasıyla %1,4 ve %2,2 oranlarında, HC emisyonlarını ise sırasıyla %1,7 ve %2,3 oranlarında azalttığını gözlemlemiştir [73].



Şekil 2.11. Yakıt karışımlarının CO ve HC emisyonlarının değişimleri

Literatürdeki çalışmaların incelenmesi sonucunda, nanopartikül ilave edilmiş yakıtlarda genellikle motor performansı ve emisyon değerleri araştırılmıştır. Son yıllarda termodinamik analizler de bu alanda önem kazanmış olup genellikle enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. SiO_2 ve TiO_2 nanopartikülleri içeren dizel yakıt karışımlarının ekserji ekonomik ve ekserji çevresel analizleri üzerine bir çalışma bulunmamaktadır. Bu boşluğu doldurmuş olan bu çalışma, dizel ile biyodizel karışımına eklenen nanopartiküllerin ekonomik ve çevresel etkilerini ekserji açısından değerlendirmiştir. Üstelik bu alanda genellikle deneysel çalışmalar yapılmıştır. Sayısal ve deneysel olarak gerçekleştirilmiş olan bu çalışmada, deneysel sonuçları doğrulamak amacıyla bir simülasyon programı kullanılarak sayısal modelleme analizi yapılmıştır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Yöntem

Bu tez çalışmasında, dizel yakıtı ile %10 oranında atık kızartma yağından elde edilen biyodizel karışımına, farklı konsantrasyonlarda (25 ppm, 50 ppm ve 100 ppm) SiO_2 ve TiO_2 nanopartiküllerinin eklenmesinin, tek-silindirli, sıkıştırma-ateşlemeli bir motorun performansı, yakıt tüketimi ve emisyonları üzerindeki etkileri deneysel ve sayısal olarak değerlendirilmiştir. Motor testleri, dört farklı motor yükleme koşulları altında (%25, %50, %75 ve %100), 1700 dev/dk sabit motor devrinde ve 18:1 sabit sıkıştırma oranında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, motor testlerinden elde edilen veriler kullanılarak enerji, ekserji, eksergoekonomik ve eksergoçevresel analizler gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra, motor deneylerinin güvenilirliği ve bulguların geçerliliği doğrulamak amacıyla AVL Simülasyon programı kullanılarak motor simülasyonları sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen motor performansı, yakıt tüketimi ve emisyon sonuçları incelenerek karşılaştırılmıştır.

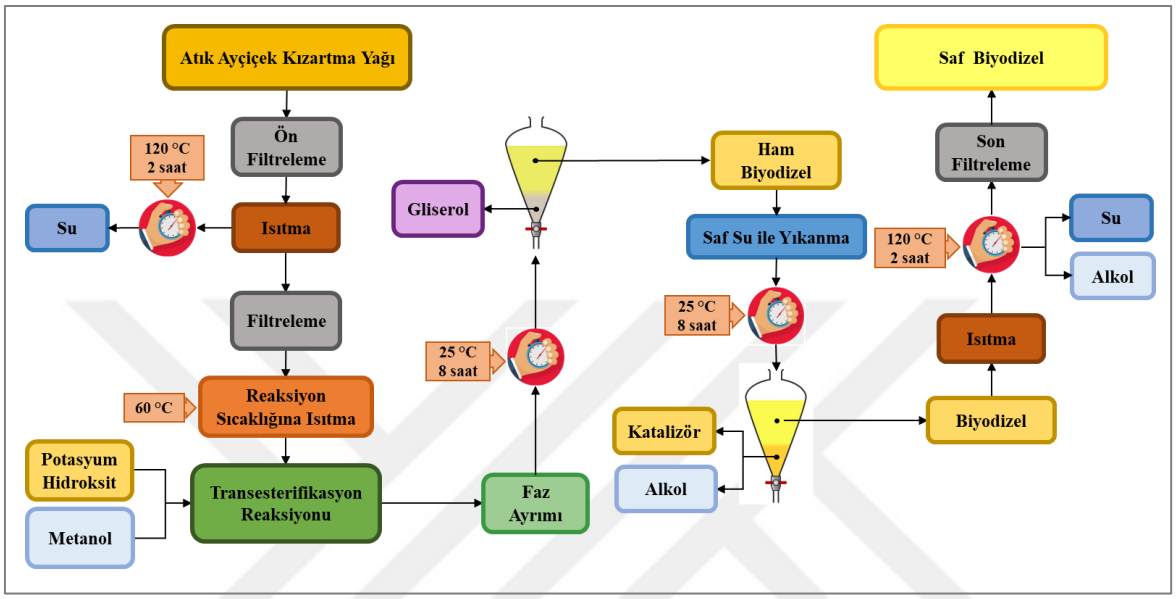
3.2. Yakıt Karışımlarının Hazırlanması

Yapılan tez çalışmasında, dizel ve atık kızartma yağından üretilen biyodizel karışımına, silisyum dioksit ve titanyum oksit nano katkı maddeleri 25 ppm, 50 ppm ve 100 ppm konsantrasyonlarında eklenerek deneyler için kullanılan yakıt karışımları hazırlanmıştır.

3.2.1. Atık kızartma yağından biyodizel üretimi

Bu tez çalışmasında, biyodizel üretimi için evsel atık ayçiçek yağının kullanılması tercih edilmiştir. Akademik literatürde, atık ayçiçek yağının biyodizel üretiminde kullanılmasının faydalarına dair önemli kanıtlar bulunmaktadır. Bu yaklaşım, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji kaynaklarının daha verimli kullanımı açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Düşük karbon salınımı, atık geri dönüşümü ve enerji bağımsızlığının arttırılması gibi faktörler, atık ayçiçek yağının biyodizel üretiminde kullanılmasının çevresel ve enerji politikalarına uygun bir seçenek olduğunu destekleyen ana unsurlardır. [74-76].

Bu çalışmada kapsamında, atık kızartma yağının biyodizele dönüşümü transesterifikasyon yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Biyodizel üretimi, Yozgat Bozok Üniversitesi Mühendislik Bölümü'nde bulunan Biyoyakıt Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Atık kızartma yağından biyodizel üretimi proses akış şeması Şekil 3.1 ile sunulmuştur.



Şekil 3.1. Atık kızartma yağından biyodizel üretimi proses akış şeması

Biyodizel üretim çalışması kapsamında, 3,5 litre atık ayçiçek kızartma yağı Ankara'da bulunan bir restorandan temin edilmiştir. Toplanan yağların katı parçacıklarının ayrılması için ön filtreleme yöntemini kullanılarak yağın temizlenmesi sağlanmıştır. İlerleyen aşamada, yağda bulunan fazla suyun buharlaştırılması amacıyla, yağ ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda iki saat boyunca 120 °C'ye kadar ısıtılmış ve sabit sıcaklıkta tutulmuştur. Yağın aşırı nem içerdiği durumlarda, ilerleyen aşamalarda bazlı bir katalizör eklenirken sabun oluşma riski göz önüne alınmıştır.

İki saatlik bir bekleme sürecinin ardından, yağ çıkarılmış ve soğumaya bırakılmıştır. Ardından, yağda bulunan küçük partiküllerin ayrılması amacıyla, yağ ince filtreden geçirilmiştir. Çalışmada kullanılan ısıtıcılı karıştırıcı, Scilogex marka, MS7-H550-Pro modelidir. Karıştırıcının teknik özellikleri Çizelge 3.1'de özetlenmiş ve görsel olarak Resim 3.1'de gösterilmiştir.

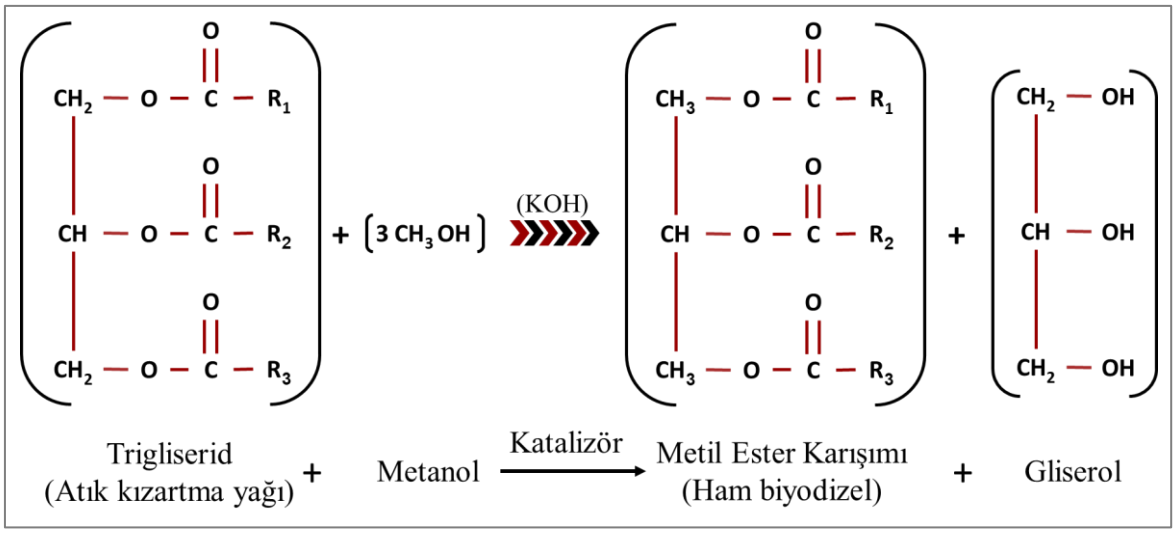


Resim 3.1. Scilogex MS7-H550-Pro ısıtıcılı karıştırıcı

Çizelge 3.1. Scilogex MS7-H550-Pro teknik özellikleri

Boyutlar	215 x 360 x 112 mm
Ağırlık	5,3 kg
Çalışma Plakasının Boyutu	184 x184 mm
Karıştırma Gücü	1050 W
Karıştırma Kapasitesi	20 lt
Hız Aralığı	50-1500 dev/dk
Isıtma Gücü	1000 W
Isıtma Sıcaklık Aralığı	Oda Sıcaklığı-550 °C
Sıcaklık Kontrol Hassasiyeti	±0,1 °C

Transesterifikasyon yöntemi kullanıldığında, Şekil 3.2'de görüldüğü üzere, kızartma yağına bir alkol ve bir baz katalizörü eklenmektedir. Yağdaki trigliseritler, alkol ve bazlı bir katalizör ile etkileşime girerek kimyasal reaksiyonunun başlatılmasını sağlamaktadır [77]. Bu çalışmada, alkol olarak %99,8 saflıkta Lichrosolv markalı metanol (CH_3OH) kullanılmış ve kimyasal özellikleri Çizelge3.2'de verilmiştir. Buna ek olarak reaksiyon hızını artırmak amacıyla %90 saflıkta Tekkim markalı potasyum hidroksit (KOH) kullanılmıştır; bu kimyasalın özellikleri ise Çizelge 3.3'te sunulmuştur. Potasyum hidroksit tercih edilmesinin nedenleri arasında maliyet etkinliği, yüksek reaksiyon hızı ve verimlilik avantajları yer almaktadır [78]. Çalışmada kullanılan metanol ve potasyum hidroksit, Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiştir.



Şekil 3.2. Transesterifikasyon reaksiyonun şematik gösterimi

Çizelge 3.2. Metanolün kimyasal özellikleri

Kimyasal Formül	CH_3OH
Yoğunluk	0,791 gr/cm^3
Molekül Kütlesi	32,04 g/mol
Kinematik Viskozite	0,54-0,59 mm^2/s
Kaynama Noktası	64,7 °C
Tutuşma Sıcaklığı	420 °C
Kırılma İndisi	1,331

Çizelge 3.3. Potasyum hidroksitin kimyasal özellikleri

Kimyasal Formül	KOH
Yoğunluk	2,04 gr/cm^3 (20 °C)
Molekül Kütlesi	56,11 g/mol
Kaynama Noktası	1327 °C
Su İçinde Çözünürlüğü	1130 g/l (20 °C)
Kırılma İndisi	1409 (20 °C)

Bu aşamada, 3,5 litre arıtılmış ayçiçek yağı, tekrar manyetik karıştırıcıya girerek reaksiyon sıcaklığına kadar ısıtılmış ve 500 dev/dk hızında karıştırılmıştır. Metanolün buharlaşma sıcaklığı 64,7 °C olduğundan, reaksiyon sıcaklığı 60 °C olarak ayarlanmıştır. Bir sonraki aşamada, oda sıcaklığında olan metanol ve potasyum hidroksit çözeltisi yağa eklenerek transesterifikasyon reaksiyonu gerçekleştirilmiştir.

Literatür ve optimizasyon çalışmalarına dayanarak, kullanılan yağa göre metanol, 6:1 hacimsel oranında karıştırılmıştır. Bu da her 1000 gram yağ için 167 gram metanol kullanıldığı anlamına gelmektedir. Ayrıca, her 1000 gram yağ için 7,5 gram potasyum hidroksit katalizörü ilave edilmiştir. Ağırlık ölçümleri için kullanılan hassas terazi, Resim 3.2'de gösterilen, Weightlab marka, WH-2002 modelidir ve terazinin teknik özellikleri Çizelge 3.4'te sunulmuştur.

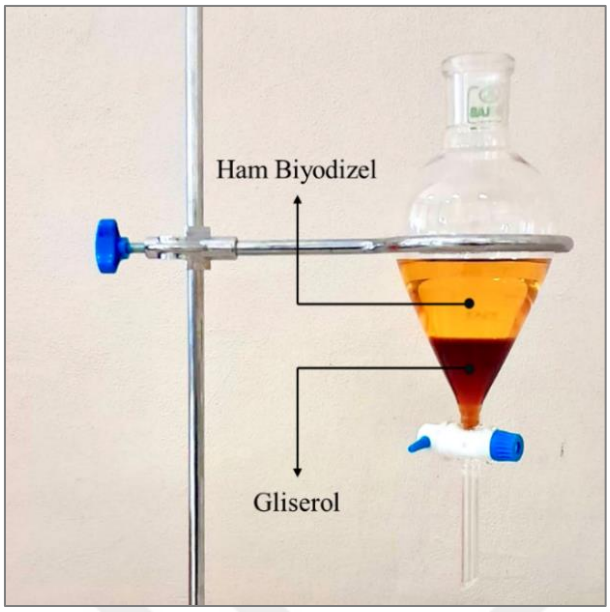


Resim 3.2. Weightlab WH-2002 hassas terazi

Çizelge 3.4. Weightlab WH-2002 terazi teknik özellikleri

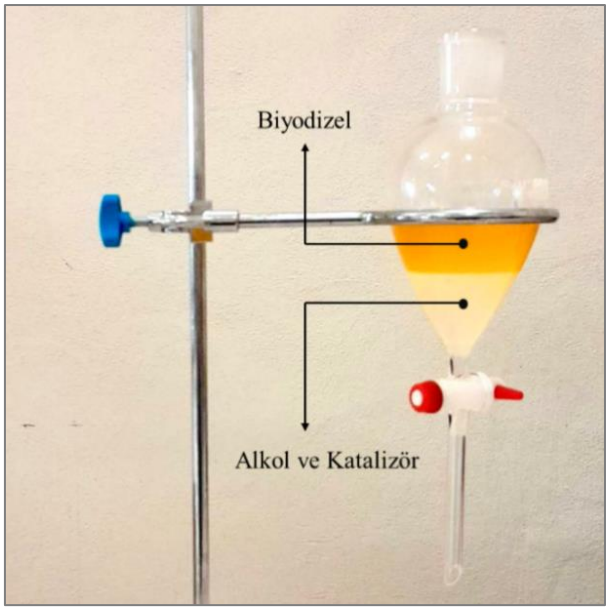
Tartım Kapasitesi	2000 g
Hassasiyet	±0,001 g
Tekrarlanabilirlik	0,001 g
Doğrusallık	±0,02 g
Stabilizasyon	1,5 s
Tartım Kefesi Boyutu	125 x 163 mm
Cihaz Boyutları	225 x 220 x 80 mm
Kalibrasyon	Harici Kalibrasyon
Ağırlık	1500 g

Reaksiyon işlemi sonucunda elde edilen karışım, ayırma hunisine aktarılmış ve 8 saat boyunca bekletilmiştir. Bu sürecin sonunda, Resim 3.3'te gösterilen iki fazlı bir çözelti elde edilmiştir. Söz konusu olan iki fazlı çözelti, ham biyodizel (metil ester) bileşeni ile gliserol bileşenini içermektedir.



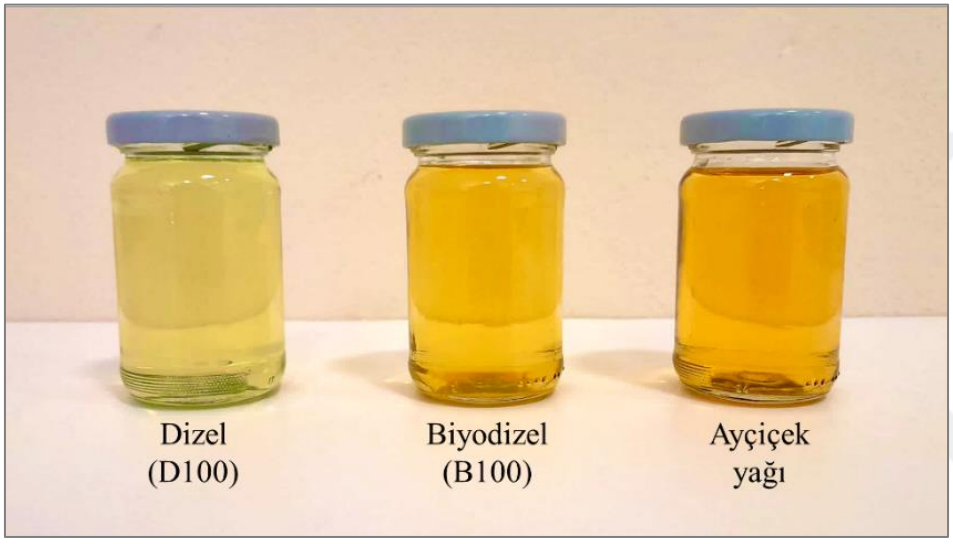
Resim 3.3. Ham biyodizel ile gliserol iki fazlı çözeltisi

Sonrasında, gliserol alttaki vana yardımıyla boşaltılmış ve ham biyodizel tekrar ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda 55 °C'ye kadar ısıtılmıştır. Aynı zamanda başka bir ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda yumuşak su 55 °C'ye kadar ısıtılmıştır. Ardından yağ ayırma hunisine aktarılmış ve %20 oranında yumuşak su ile düşleme (mistleme) yöntemiyle 1 saat boyunca yıkanmıştır. Bu şekilde yağda kalan alkol ve katalizör, yoğunluk farkı nedeniyle, yumuşak su ile yıkanmış ve alt kısmına doğru çökertmiştir. Resim 3.4'te gösterildiği gibi, en az 8 saatlik bir bekleme süresinin ardından atık su alttaki vanadan boşaltılmıştır.



Resim 3.4. Biyodizel düşleme işlemi

Düşleme işlemi sonrasında üstte kalan yağ, yeniden ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda 120 °C'ye kadar ısıtılmış ve iki saat boyunca sabit sıcaklıkta bekletilmiştir. Böylece biyodizelde kalan fazla alkol ve su buharlaşıp uzaklaştırılmıştır. Ardından, biyodizel ocaktan indirilmiş ve ağzı kapalı bir şekilde soğumaya bırakılmıştır. Son aşamasında, hazırlanan biyodizel ince filtreden geçirilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir. Biyodizel, oksitlenmeyi önlemek amacıyla ağzı kapalı şişelerde karanlık bir ortamda saklanmıştır. Ayrıca, Resim 3.5'te gösterilen numuneler laboratuvara gönderilmiştir.



Resim 3.5. Dizel, biyodizel ve ayçiçek yağı numuneleri

3.2.2. Yakıt bileşenlerinin karıştırılması

Tez çalışması kapsamında, motor deneylerinde kullanılan yakıt karışımlarını hazırlamak için öncelikle ayçiçek kızartma yağından üretilen biyodizel ile dizel yakıtı %10 oranında karıştırılarak B10 (%90 Dizel + %10 Biyodizel) yakıt karışımı oluşturulmuştur. Başka bir ifadeyle her bir litrelik B10 yakıt karışımı, 900 ml dizel ve 100 ml biyodizel içermektedir. Çalışmada kullanılan dizel yakıt, laboratuvarın yakınında bulunan bir akaryakıt istasyonundan tedarik edilmiştir. İlerleyen aşamada, B10 yakıtı ile nanopartiküllerin gereken miktarları, laboratuvar koşullarında en yüksek hassasiyetle tartılarak hazırlanmıştır. TiO_2 ve SiO_2 nanopartikül maddeleri, 25 ppm, 50 ppm ve 100 ppm konsantrasyonlarında B10 yakıtına eklenmiştir. Molchem markalı TiO_2 ve SiO_2 nanopartikül katkı maddeleri %99,5 saflığında Nanokar firmasından temin edilmiştir. Nanopartiküllerine ilişkin özellikler Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.5. Titanyum dioksitin özellikleri

Kimyasal Formül	TiO_2
Saflık	99,5 %
Ortalama Parçacık Boyutu	10-15 nm
Özgül Yüzey Alanı	60 m^2/g
Kitle Yoğunluğu	0,19 gr/cm^3
Gerçek Yoğunluk	4,1 gr/cm^3

Çizelge 3.6. Silisyum dioksitin özellikleri

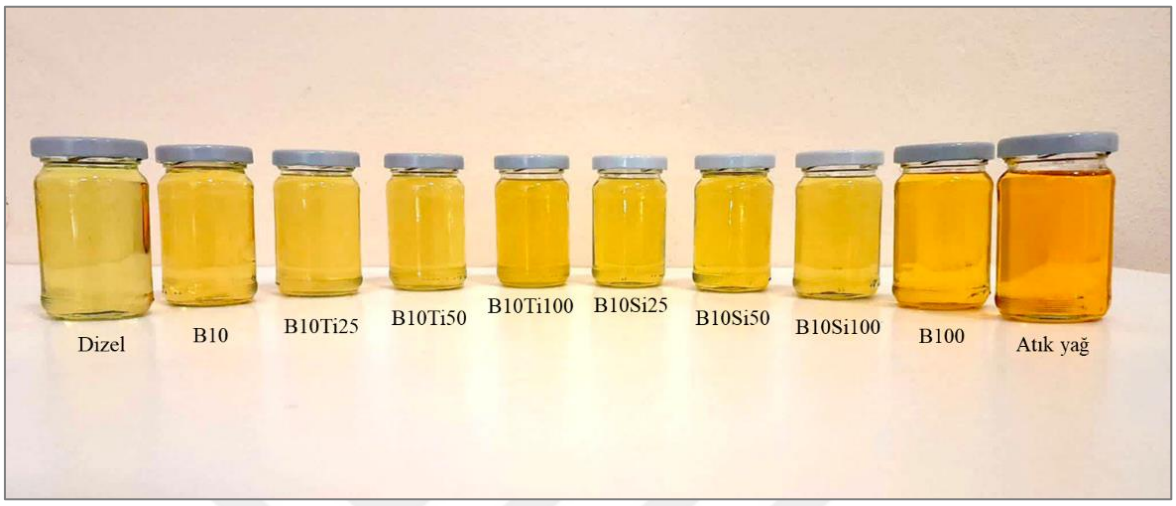
Kimyasal Formül	SiO_2
Saflık	99,5 %
Ortalama Parçacık Boyutu	10-15 nm
Özgül Yüzey Alanı	150-550 m^2/g
Kitle Yoğunluğu	<0,1 gr/cm^3
Gerçek Yoğunluk	2,2 gr/cm^3

Motor deneylerinde kullanılan yakıt kombinasyonları iki aşamalı bir yöntemle karıştırılıp hazırlanmıştır. İlk aşamada yakıt bileşenleri, ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Ardından karışım işlemi, 2 saat boyunca İsolab markalı, ultrasonik karıştırıcı kullanılarak tamamlanmıştır. Ultrasonik karıştırıcı, karışımın homojenliğini artırmak ve nanopartiküllerin yakıt içinde daha etkin bir şekilde dağılmasını sağlamak amacıyla etkili bir yöntem olarak tercih edilmiştir [79]. İşlemin sonunda elde edilen yakıtlar ağzı vida kapaklı şişelerde bekletilmiştir. Motor deneylerinde kullanılan yakıtların ve bileşen oranlarının detayları Çizelge 3.7'de sunulmuştur.

Çizelge 3.7. Çalışmada kullanılan yakıtların bileşen oranları

Yakıt İsmi	Açıklama
D100	%100 Dizel Yakıtı
B10	%90 Dizel Yakıtı + %10 Biyodizel
B10Si25	B10 Yakıtı + 25 ppm SiO_2 Nanopartikül
B10Si50	B10 Yakıtı + 50 ppm SiO_2 Nanopartikül
B10Si100	B10 Yakıtı + 100 ppm SiO_2 Nanopartikül
B10Ti25	B10 Yakıtı + 25 ppm TiO_2 Nanopartikül
B10Ti50	B10 Yakıtı + 50 ppm TiO_2 Nanopartikül
B10Ti100	B10 Yakıtı + 100 ppm TiO_2 Nanopartikül

Yakıt karışımlarının teknik özelliklerini belirlemek amacıyla, Resim 3.6'da görülen numuneler, Bozok Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde yer alan Biyoyakıt Laboratuvarı'nda incelenmiş ve analiz sonuçları Çizelge 3.8'de açıklanmıştır.



Resim 3.6. Tez çalışmasında kullanılan yakıt karışımları

Çizelge 3.8. Çalışmada kullanılan yakıtların teknik özellikleri

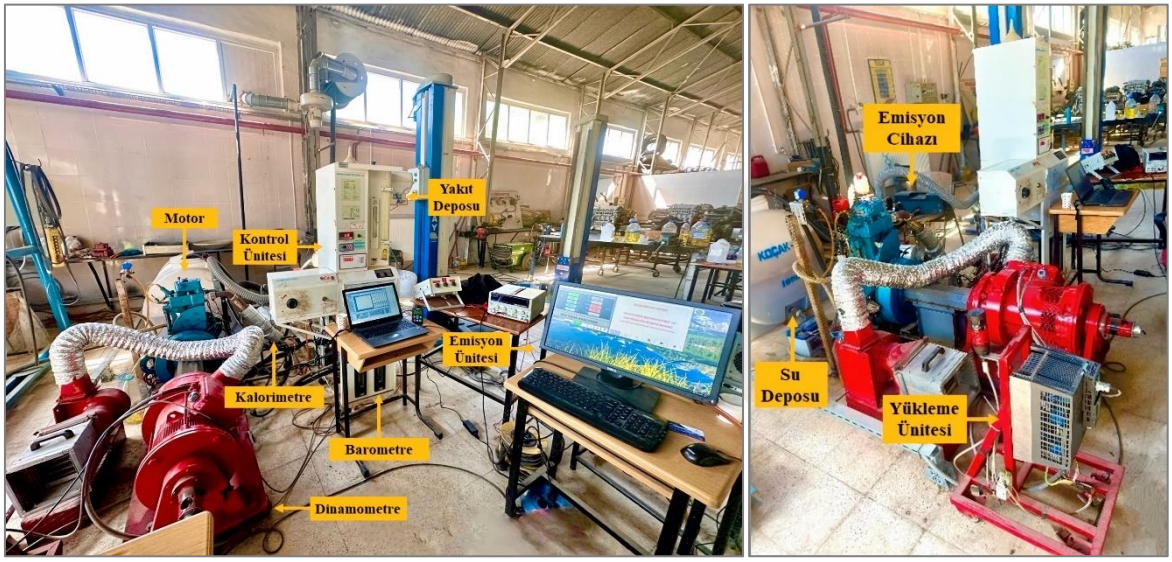
Yakıt İsmi	Yoğunluk (kg/m^3)	Isıl Değer (MJ/kg)
D100	825	46,162
B10	831,1	45,732
B10Si25	831,31	45,457
B10Si50	831,52	45,660
B10Si100	831,93	45,821
B10Ti25	831,31	45,212
B10Ti50	831,52	45,300
B10Ti100	831,93	45,810

3.3. Motor Testleri

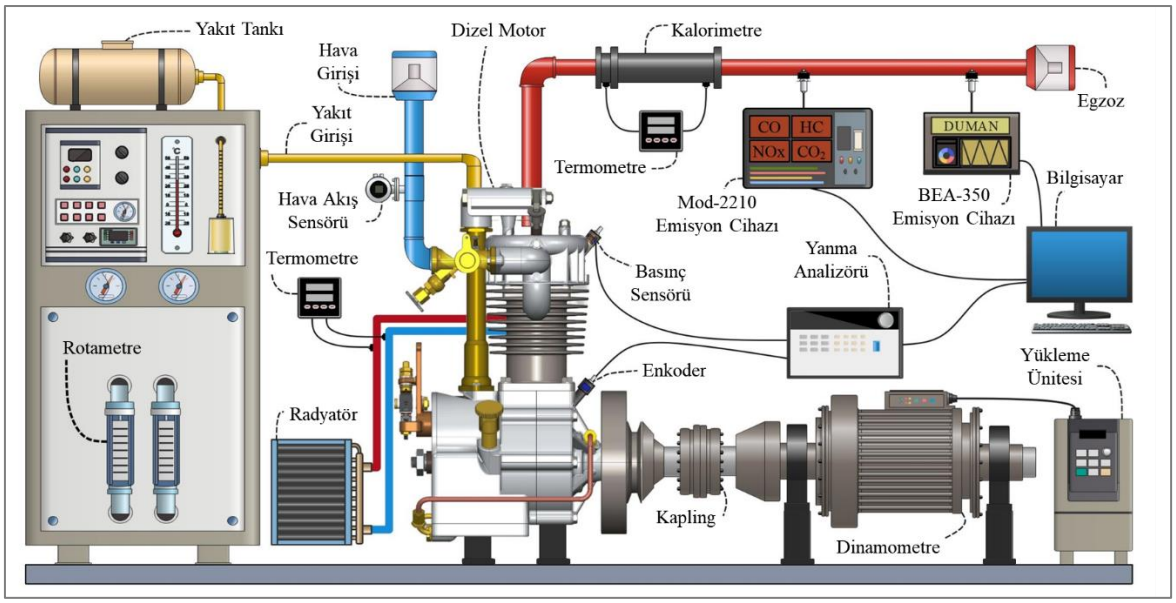
Tez çalışması kapsamında hazırlanan yakıt karışımları, tek silindirli dizel bir motorda test edilmiştir. Deneyler sırasında motor gücü, devir sayısı, tork, yakıt ve hava tüketimi, silindir içi basınç ve sıcaklık, soğutma suyu giriş-çıkış sıcaklıkları, egzoz emisyonları ve egzoz giriş-çıkış sıcaklığı gibi önemli parametreler ölçülmüştür. Deneyler sonucunda elde edilen motor ve emisyon verileri termodinamik analizlerde kullanılmıştır.

3.3.1. Motor test düzeneği

Motor deneyleri Kırıkkale Meslek Yüksekokulu Otomotiv Laboratuvarı'nda yer alan dizel motor test düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Resim 3.7'de görülen deney düzeneği; motor, dinamometre, yükleme ünitesi, kontrol ünitesi, emisyon ve diğer ölçüm cihazlarından oluşmaktadır. Çalışmada kullanılan motor test düzeneği ve ölçüm ekipmanlarının şematik temsili, Şekil 3.3'te gösterilmektedir.

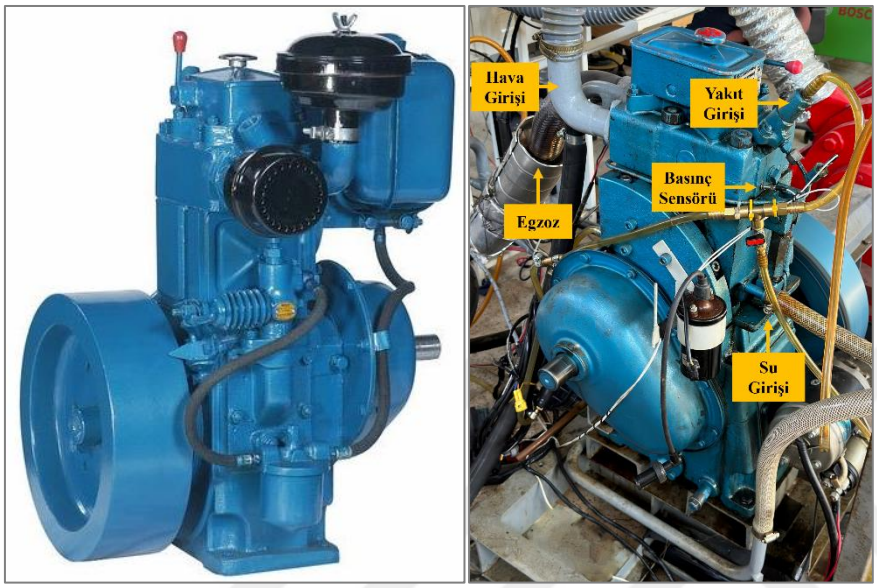


Resim 3.7. Motor test düzeneği ve ölçüm ekipmanları



Şekil 3.3. Motor test düzeneği ve ölçüm ekipmanlarının şematik gösterimi

Test düzeneğinde, Resim 3.8'de gösterilen tek silindirli, dört zamanlı, direkt enjeksiyonlu, su soğutmalı, sıkıştırma ateşlemeli Kirloskar marka, TV1 model dizel motoru yer almaktadır. Deney motoru 1800 dev/dk sabit motor hızında 5.2 kW'lık bir çıkış gücü üretebilmektedir. Motorun teknik özellikleri Çizelge 3.9'da sunulmuştur.



Resim 3.8. Kirloskar TV1, motor görseli

Çizelge 3.9. Kirloskar TV1 motorun teknik özellikleri

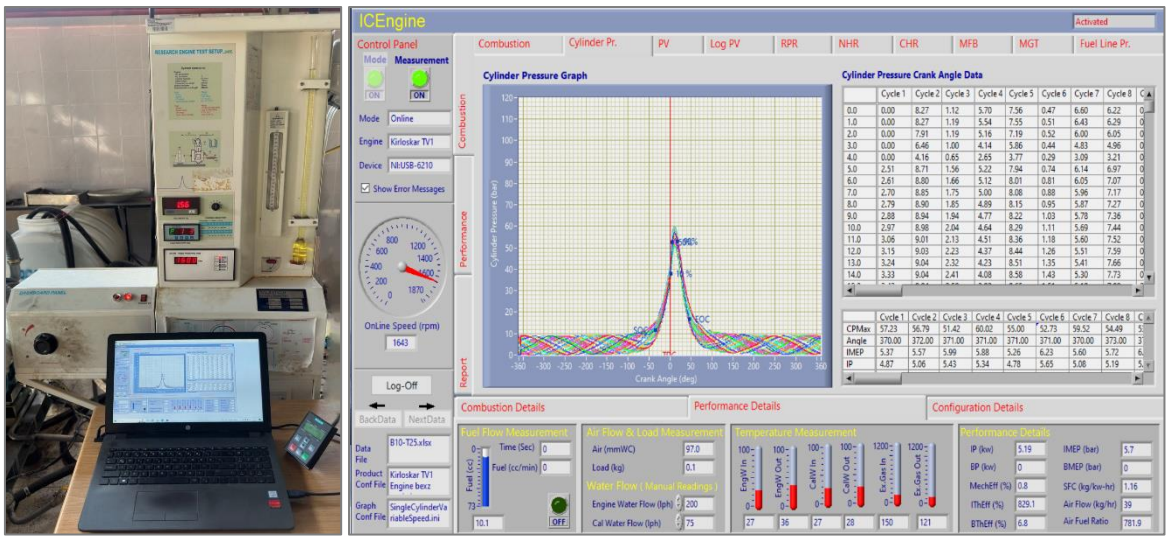
Marka ve Model	Kirloskar Tv1 Dizel Motor
Motor Tipi	Sıkıştırma Ateşlemeli, Dört Zamanlı
Yakıt Enjeksiyon Tipi	Direkt Enjeksiyonlu
Silindir Sayısı	1
Motor Hacmi	661,45 cc
Çap x Stroke x Biyel	87,50 x 110,00 x 234,00 mm
Sıkıştırma Oranı	18:1
Maksimum Motor Gücü	5,2 kW
Maksimum Motor Deviri	1800 dev/dk
Soğutma Sistemi	Su Soğutmalı
Aspirasyon Sistemi	Doğal Emişli

Deney düzeneğinde yer alan deney motoru, Resim 3.9'da gösterildiği üzere Galen-Tech marka, hava soğutmalı, aktif dinamometre ile entegre edilmiştir. Deneyler sırasında gerekli olan farklı motor yük koşulları rejeneratif, sabit hızlı, Siemens marka, G120 model, AC dinamometre yükleme ünitesi yardımıyla uygulanmıştır.



Resim 3.9. Galen-Tech dinamometre ve Siemens G120 yükleme ünitesi

Bu çalışma kapsamında, enerji ve ekserji analizlerinde kullanılan verileri toplamak amacıyla çeşitli sensörler ve ekipmanlar kullanılmıştır. Motor test düzeneğinde bulunan sıcaklık göstergeleri, debi ölçüm sistemi, yakıt tüketimi ölçüm sistemi, hava tüketimi ölçüm sistemi, basınç sensörü gibi parçalardan elde edilen tüm veriler cihazın kontrol paneline aktarılmış ve bilgisayar yazılımı aracıyla kaydedilmiştir. Test düzeneğinde bulunan kontrol paneli ve bilgisayar yazılımın arayüzü Resim 3.10'da gösterilmiştir. Ek olarak, deneyler sırasında ölçülen motor parametrelerin belirsizlik değerleri Çizelge 3.10'da özetlenmiştir.



Resim 3.10. Kontrol paneli ve bilgisayar yazılımı

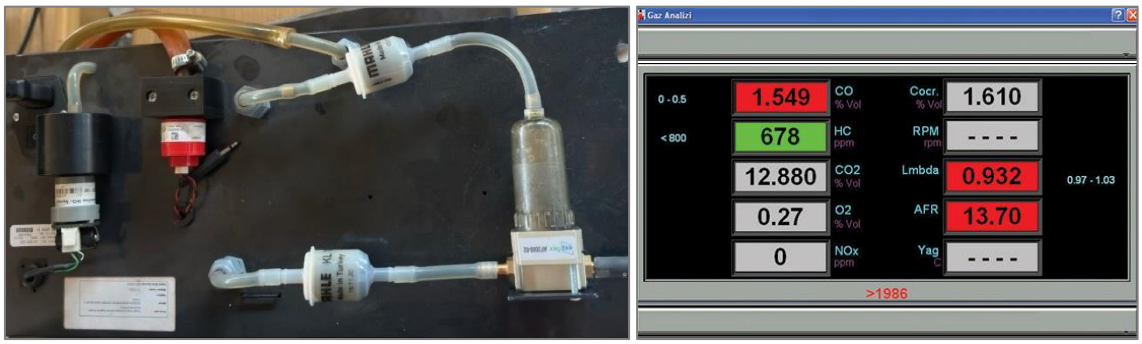
Çizelge 3.10. Ölçülen motor parametrelerinin belirsizlik değerleri

Özellik	Birim	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet	Belirsizlik
Motor Gücü	kW	0-7,5	±0,33	±0,683
Tork	Nm	0-112	±0,1	±0,500
Yakıt Debisi	cc/dk	-	-	±0,563
Hava Debisi	mmSS	-	-	±0,606
Sıcaklık	°C	-	±0,1	±1,0
Motor Yükü	kg	0-20	±0,1	±0,714

Motor deneylerinde, egzoz emisyonlarının ölçümü Bilsa marka Mod-2210 model cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz, egzoz gazlarının bileşimini tespit etmek için infrared ve elektrokimyasal verici yöntemlerini kullanmaktadır. Dağılmayan infrared yönteminde, egzoz gazları infrared ışınlar ile aydınlatılarak gaz molekülleri tarafından ne kadar absorbe edildiği ölçülmektedir. Elektrokimyasal verici yönteminde, egzoz gazları elektrokimyasal hücrelerden oluşan bir sensör dizisine aktarılarak hücrelerdeki elektrik akımı değişimi ölçülmektedir [80,81]. Bilsa markalı emisyon ölçme cihazı, Resim 3.11'de gösterilmiştir. Ayraca, cihazın ölçtüğü bileşenler, ölçüm aralıkları ve hassasiyetleri Çizelge 3.11'de sunulmuştur.

Çizelge 3.11. Bilsa-Mod 2210 emisyon cihazının teknik özellikleri

Özellik	Birim	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet	Belirsizlik
CO	%	0-10	±%0,001	±0,771
HC	ppm	0-10000	±1 ppm	±0,399
NOx	ppm	0–5000	±1 ppm	±0,598
CO_2	%	0–19,99	±%0,001	±0,653
O_2	%	0-25	±%0,01	±0,593



Resim 3.11. Bilsa-Mod 2210 emisyon cihazı ve emisyon ekranı

Egzoz gazlarının duman koyuluğu ise Bosch marka BEA 350 model bir optik hücreli cihaz ile ölçülmüştür. Resim 3.12'de görülen cihaz, egzoz gazları içindeki partikül miktarına bağlı olarak ışık kaybını ölçmekte duman koyuluğunu belirlemektedir [82]. Cihazın teknik özellikleri Çizelge 3.12'de verilmiştir.



Resim 3.12. Bosch BEA-350 duman koyuluğu ölçme ekipmanı

Çizelge 3.12. Bosch BEA-350 emisyon cihazının teknik özellikleri

Marka ve Model	Bosch BEA-350	Hassasiyet
Opaklık Derecesi	0 – 100 %	±0,1 %
Absorbsiyon Katsayısı	0 – 10 m^{-1}	0,01 m^{-1}
Çalışma Sıcaklığı	-20 – +150 °C	0,16 °C

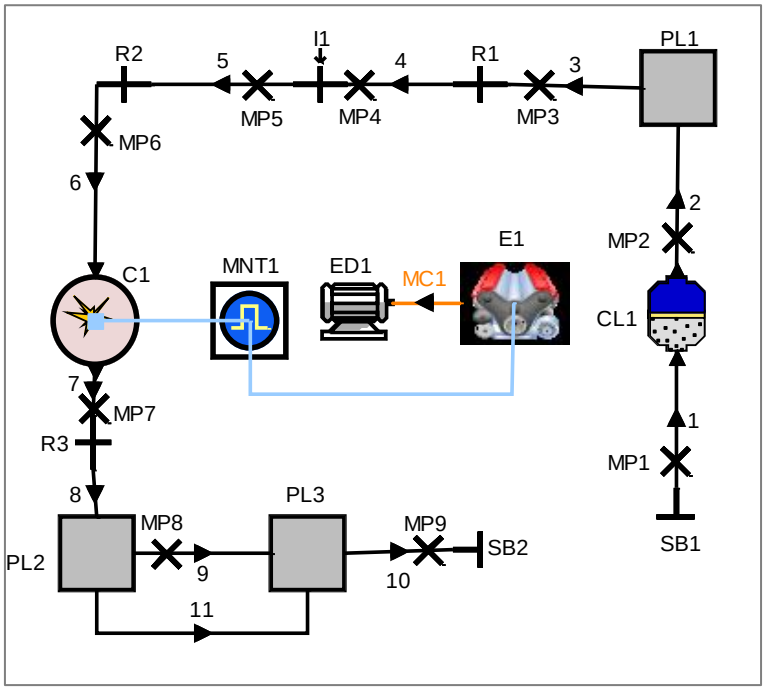
Yapılan deneylerde yakıt karışımlarına ait motor performansı, yakıt tüketimi ve emisyon verileri 1700 dev/dk sabit motor hızında ve dört farklı motor yükleme koşullarında (%25, %50, %75 ve %100) elde edilmiştir. Ayrıca motor deneyleri sırasında sıkıştırma oranı 18:1 oranında sabit tutulmuştur. Deneylere başlamadan önce, tüm ölçüm cihazları üreticilerin talimatlarına göre kalibre edilmiştir. Motor ve ölçme cihazlarının doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamak için ön denemeler, dizel yakıtı ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler, referans verilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Hata riskini azaltmak için tüm yakıt numuneleri üç kez test edilmiştir ve termodinamik analizler için ortalama veriler kullanılmıştır.

3.4. Sayısal Modelleme Çalışması

Çalışmada gerçekleştirilen deneylerde kaydedilen motor performansı ve emisyon verilerinin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla deney koşulları, AVL ticari yazılımı kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışma kapsamında, deneylerde kullanılan motor, ölçüm ekipmanları ve yakıt karışımları, AVL simülasyon uygulamasının Boost alt programı kullanılarak modellenmiştir. Boost uygulaması, içten yanmalı motorların modellemesi ve analizi konusunda literatürde geniş kabul gören bir modelleme aracı olarak tanınmaktadır. İçten yanmalı motorların tüm komponentlerini, yakıt enjeksiyon süreçlerini, yanma işlemlerini ve emisyonları ince ayrıntılarıyla analiz edebilme kapasitesine sahiptir. Ek olarak AVL Boost'un kullanıcı dostu arayüzü, farklı parametrelerin kolayca ayarlanabilmesini ve sonuçların hızla değerlendirmesini sağlamaktadır.

3.4.1. Motorun geometrik modellemesi

Modelleme sürecinin ilk adımında, deneylerde kullanılan motorun geometrik modeli AVL yazılımında oluşturulmuştur. İlk aşamasında, Şekil 3.4'te görüldüğü üzere, motorun temel bileşenleri AVL yazılımının bileşen kütüphanesinden seçilip simülasyon sayfasına yerleştirilmiştir. Modelde bulunan kısaltmalar Çizelge 3.13'te açıklanmıştır.



Şekil 3.4. AVL Boost programı ile oluşturulmuş motor modeli

Çizelge 3.13. Motor modelinde bulunan kısaltmalar

Etiket	Açıklama
SB1-2	Giriş-Çıkış Sınır Şartı
E1	Motor Bloğu
C1	Silindir
I1	Enjektör
ED1	Yükleme Ünitesi
MC1	Yük Bağlantısı
CL1	Hava Filtresi
PL	Plenum
MNT1	Kontrol Ekranı
MP1-6	Ölçüm Noktaları
R1,2,3	Kısıtlamalar

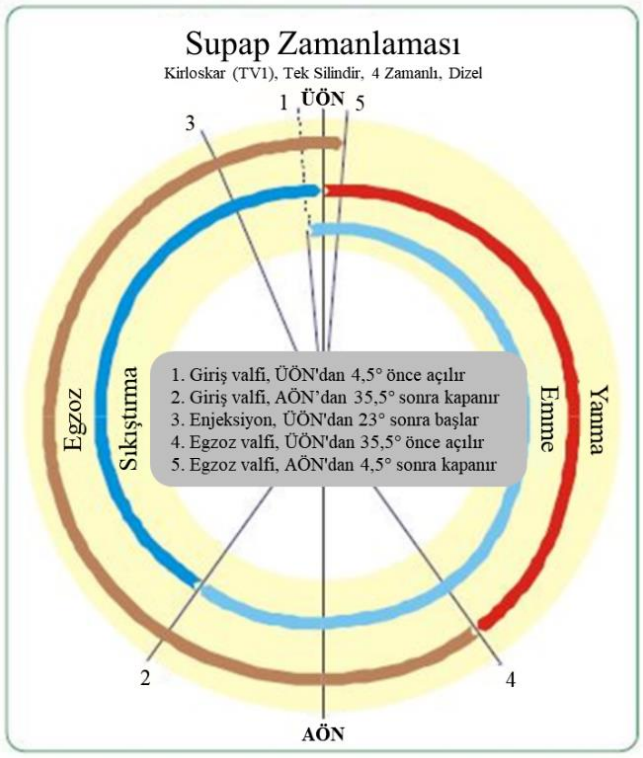
Modelin ana bileşenlerinin arasında motor bloğu, silindir, yakıt enjeksiyon sistemi, hava filtresi ve emme ile egzoz manifoldlarını temsil eden plenumlar yer almaktadır. Ardından dinamometre, ölçüm sensörleri, sistem sınır koşulları ve ölçüm noktaları gibi diğer kontrol ve izleme bileşenleri ilk modeline eklenerek tüm bileşenlerin arasındaki bağlantılar kurulmuştur. AVL Boost programı sayfasında yerleştirilen bileşenlerinin arayüz görünümü Şekil EK-1.1'de gösterilmiştir.

Bir sonraki aşamada, giriş havasının basınç ve sıcaklığı, çıkış gazlarının basınç ve sıcaklığı, giriş havasındaki gaz bileşimi (O_2, N_2, CO ve CO_2) gibi ortam parametreleri gerçek test şartlarına uygun olarak programa girilerek sistemin sınır şartları tanımlanmıştır. Giriş havasındaki gaz bileşimi ve sınır şartları ile ilgili ayarlar Şekil EK-1.2'de verilmiştir. Ayrıca her bileşenin giriş ve çıkışındaki başlangıç basınç ve sıcaklık değerleri, hava ve egzoz manifoldları, hava filtresi ve bağlantı borularına ait boyut ve geometri detayları, programa tanımlanmıştır. İlerleyen aşamada, motor bloğunda bulunan motor hızı, motor tipi, sürtünme profilini içeren veriler gibi motor özellikleri ve parametreleri uygulamaya girilmiştir.

Motor modellemesinin en kritik aşaması, silindirin ayarlanma aşamasıdır. Motor modellemesinin merkezinde yer alan silindir kısmı, silindir boyutlarından başlayarak yanma modellemesi, ısı transferi modellemesi, yakıt ve hava supaplarının zamanlamaları ve emisyon modelleme katsayıları gibi çeşitli bileşenleri içermektedir. Bu aşamada, silindir geometrisi (çap, stroke, biyel uzunluğu, motor hacmi), hava-yakıt oranı, sıkıştırma oranı ve

enjeksiyon parametreleri belirlenmiştir. Silindir ve enjektör ayarlama pencereleri ve ilgili detaylar Şekil EK-1.3 ve EK-1.4'te verilmiştir. Ek olarak yanma, ısı transferi ve emisyonların modelleme süreçleri ilerleyen aşamalarda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Motor modelleme işlemi sırasında, yakıt ve hava supaplarının doğru zamanlanması, yanma sürecinin, ısı transferi ve emisyonların modellemesi üzerinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada supap zamanlamaları, Şekil 3.5'te görüldüğü üzere, deney motorunun kılavuzuna göre ayarlanmıştır.



Şekil 3.5. Deney motorunun yakıt ve hava supaplarının zamanlaması

Deneysel motor testleri bölümünde belirtildiği gibi, incelenen yakıt karışımları farklı motor yükleme koşullarında gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle sayısal modellemede sırasında yükleme koşullarının uygulanabilmesi için AVL yazılım kütüphanesinde bulunan bir elektrik motoru yükleme ünitesi olarak kullanılmıştır. Elektrik motorunun (tüketici olarak) motor bloğuna bağlanması ve motor bloğu üzerinde farklı değerlerde negatif tork oluşturularak testlerde gerekli yükleme koşulları uygulanmıştır. Elektrik motorun ayarlarlar Şekil EK-1.5'te gösterilmiştir.

3.4.2. Yanma sürecinin modellenmesi

Modelleme sürecinin en önemli kısımlarından biri silindirdeki yakıt yanma sürecinin sayısal bir yöntem kullanılarak modellenmesidir. AVL yazılımı, çeşitli koşullara uygun yanma süreçlerinin detaylı modellemesi için son derece kapsamlı bir metodoloji ve analiz araçları yelpazesi sunmaktadır. Böylece yanma parametrelerini hassas bir şekilde hesaplayabilmekte olup farklı yakıt türleri, motor geometrileri ve işletim koşullarına uygun yanma süreçlerini simüle edebilmektedir. Bu çalışmada, literatürdeki araştırmalara ve AVL'nin dizel motorlar için önerdiği yöntemlere dayanarak Vibe modeli tercih edilmiştir [83].

Vibe modeli, dizel motorlarda yanma fenomeninin matematiksel olarak modellenmesi amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemin esasını ısı yayılım fonksiyonunun diferansiyel denklemlerle tanımlanması ve sayısal yöntemlerle çözülmesi oluşturmaktadır. Modelde, yakıt enjeksiyon zamanlaması, yanma odası geometrisi, yakıt özellikleri ve hava-yakıt karışım oranı gibi kritik faktörler göz önünde bulundurulmaktadır [84]. Böylece dizel motorlarda yanma gecikmesi, yanma süresi, ortalama silindir basıncı, yanma verimi ve yanma sonucunda meydana gelen gaz bileşenleri gibi parametrelerin tahmini yüksek bir doğrulukla gerçekleştirilebilmektedir. Vibe modelinin sağladığı avantajlardan biri, dizel motorların yanma süreçlerini ve yanma ürünlerini oldukça yüksek bir hassasiyetle simüle edebilme yeteneğidir [85]. Bu sayede, motor performansının kritik parametrelerini, özellikle yakıt tüketimi, yanma verimi, egzoz gazı sıcaklığı ve emisyonlar gibi önemli faktörleri ayrıntılı bir şekilde inceleme imkânı sunmaktadır. Dizel bir motorun yanma sürecini Vibe modeli ile modellendiğinde, aşağıdaki Vibe fonksiyonu (Eş. 3.1) kullanılmaktadır [83,86].

$$\frac{dx}{d\alpha} = \frac{a}{\Delta\alpha_c}.(m+1).y^m.e^{-a.y^{(m+1)}} \tag{3.1}$$

$$dx = \frac{dQ}{Q} \tag{3.2}$$

$$y = \frac{\alpha-\alpha_0}{\Delta\alpha_c} \tag{3.3}$$

Burada "Q" [J] toplam yakıt ısısı, " m " [-] Vibe fonksiyonunun şekil parametresi, "a" [-] Vibe parametresini ifade etmektedir. Ayrıca, " α " [derece], "α_0" [derece] ve "$\Delta\alpha_c$" [derece] sırasıyla krank açısı, yanmanın başlangıcındaki krank açısı ve yanma süresidir.

Böylece, yanma sırasında motor içindeki yakıtın yanması sonucunda ortaya çıkan ısı, yanma hızı ve motor içindeki basınç artışı Vibe fonksiyonu ile hesaplanmaktadır. Yanma sürecinde yakılan yakıt kitlesinin oranı (x), Vibe fonksiyonunun integrali kullanılarak aşağıdaki eşitlikle belirlenebilmektedir.

$$x = \int \frac{dx}{d\alpha}.d\alpha = 1 - e^{-a.y^{(m+1)}} \tag{3.4}$$

Vibe modeli, Şekil EK-1.6'da görüldüğü gibi yazılımın yanma penceresinden seçilmiştir. Yanma işleminin başlangıcındaki krank açısı, yanma süresi ve modelleme katsayıları gibi önemli parametreler, test motorunun özelliklerine ve AVL yazılımının yönergelerine dayanarak yazılıma girilmiştir.

3.4.3. Isı transferi modellenmesi

Motor modellemesinde, yanma odasından çevreye ısı transfer sürecinin doğru bir şekilde modellemesi, başka kritik bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Yanma sürecinin yanma odası duvarlarına, silindir kapağına ve pistonlara ilettiği toplam ısı transferi, aşağıdaki eşitlikten hesaplanmaktadır.

$$Q_d = A_d.K_d.\left(T_g - T_d\right) \tag{3.5}$$

Burada "Q_d" [J] toplam ısı transferi, "A_d" [m^2] silindir duvarı, silindir kapağı ve piston kesitinin toplam alanı, "K_d" ısı transfer katsayısıdır. "T_g" [derece] ve "T_d" [derece] terimleri, silindir içerisinde bulunan gazların sıcaklığını ve silindir duvarının sıcaklığını temsil etmektedir.

Bu çalışmada, ısı transfer katsayısını hesaplanmak için AVL yazılım kütüphanesinde bulunan Woschni 1978 modeli tercih edilmiştir. Bu model, ısı transfer hızının, gaz sıcaklığı ile duvar sıcaklığı arasındaki farka orantılı olduğu ve ısı transfer katsayısının gaz hızı, türbülans yoğunluğu ve gaz ile duvarın fiziksel özelliklerinin bir fonksiyonu olduğu varsayımına dayanmaktadır [87]. Silindir içi ısı transferi ayarlama penceresi, Şekil EK-1.7'de verilmiştir. Woschni 1978 modelinde, ısı transfer katsayısı, silindir basıncı, sıcaklığı ve geometrisine bağlı olarak Eş. 3.6 ile hesaplanmaktadır.

$$K_w = 130 \cdot T_s^{-0,2} \cdot P_s^{0,8} \cdot D^{-0,2} \left[C_m \cdot C_1 + C_2 \cdot \frac{VT_{IVS}}{P_{IVS} \cdot V_{IVS}} \cdot (P_S - P_{s,o}) \right]^{0,8} \quad (3.6)$$

Burada "K_w" Woschni 1978 ısı transfer katsayısını, "T_S" silindir sıcaklığını, "P_S" silindir basıncını, " D " silindir çapını, "C_m" pistonun ortalama hızını, "C_1" ve "C_2" model sabitlerini, " V " gerçek silindir hacmini, "$P_{s,o}$" ters çevrilmiş silindir basıncını temsil etmektedir. "P_{IVS}", "T_{IVS}" ve "V_{IVS}" sırasıyla giriş valfi kapatıldığında silindir basıncı, silindir sıcaklığı ve silindir hacmidir.

3.4.4. Emisyonların modellenmesi

AVL uygulaması, dizel motorların emisyonlarını analiz etmek ve modellemek üzere çeşitli yöntemler sunmaktadır. Bu modelleme süreci, motorun işletme parametreleri ve tasarım özellikleri göz önüne alınarak egzoz emisyonlarının tahmin edilmesini kapsamaktadır. AVL Boost programı, içten yanmalı motorların performans ilkelerini, yakıt özelliklerini ve yanma mekanizmalarını kullanarak karbon monoksit, karbondioksit, hidrokarbon, nitrojen oksit ve partikül madde emisyonlarını simüle edebilmektedir.

AVL Boost yazılımı, CO emisyonlarını hesaplamak için yakıtın yanma sürecindeki CO üretimini etkileyen iki kimyasal reaksiyonun (Eş. 3.7 ve Eş. 3.8) sayısal modellemesini kullanmaktadır [83]. Birinci reaksiyon, karbonmonoksit ile oksijen molekülü arasında gerçekleşen bir oksidasyon sürecini tasvir etmektedir. İkinci reaksiyon ise karbonmonoksit ve hidroksil kimyasal olarak reaksiyona girdiği süreci ifade etmektedir. Her iki reaksiyonun sonucunda karbondioksit üretilmektedir. Bu modelleme süreci, motorun çalışma parametreleri ve yakıt özellikleri dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir. Kimyasal reaksiyonlar ve sayısal modellemeleri Çizelge 3.14'te açıklanmıştır.

Çizelge 3.14. CO yıkımını etkileyen kimyasal reaksiyonlar

Kimyasal Reaksiyon		Sayısal Modelleme	
$CO + OH = CO_2 + H$	(3.7)	$r_1 = 6,76 \cdot 10^{10} \cdot e^{\left(\frac{T}{1102}\right)} \cdot c_{CO} \cdot c_{OH}$	(3.9)
$CO + O_2 = CO_2 + O$	(3.8)	$r_2 = 2,51 \cdot 10^{12} \cdot e^{\left(\frac{-24055}{T}\right)} \cdot c_{CO} \cdot c_{O2}$	(3.10)

Yapılan modellemeler sonucunda, yakıtın yanma işlemi sırasında meydana gelen toplam CO üretim ve yıkım oranları [mol/cm^3.s] Eş. 3.11 ile hesaplanmaktadır.

$$r_{CO} = C_{Const} \cdot (r_1 + r_2) \cdot (1 - \alpha) \quad (3.11)$$

$$\alpha = \frac{c_{\mathrm{CO,act}}}{c_{\mathrm{CO,equ}}} \quad (3.12)$$

Eş. 3.11 ve 3.12'de, "r_{CO}" [mol/cm^3.s] CO üretim/yıkım oranı, "$c_{\mathrm{CO,act}}$" [mol] CO gerçek konsantrasyonu, "$c_{\mathrm{CO,equ}}$" [mol] CO tahmini konsantrasyonu ve "T" (^{o}C) silindir içi ortalama gaz sıcaklığını ifade etmektedir.

AVL Boost yazılımı, NOx üretimi ve yıkımını modellemek için Zeldovich mekanizmasını kullanmaktadır. Zeldovich mekanizması, yanma süreci sırasında NOx oluşumunu açıklayan bir dizi kimyasal reaksiyonu içermektedir [89]. Pattas ve Hafner, Zeldovich mekanizmasını geliştirmişler ve çalışmaları, AVL Boost yazılımındaki NOx üretim modelinin temelini oluşturmaktadır [90]. Bu model, yanma sırasında NOx üretimine katılan altı kimyasal reaksiyonu sayısal olarak simüle ederek NOx emisyonlarını tahmin etmektedir. Çizelge 3.15'te görüldüğü üzere, Eş. 3.14 ile Eş. 3.16 arasındaki kimyasal reaksiyonlar, Zeldovich mekanizmasıyla ilişkilendirilen oksijen ve yakıt varlığında NOx oluşumunun mekanizmasına dayanmaktadır. Eş. 3.17 ve Eş. 3.18 ise, Pattas ve Hafner tarafından önerilen N_2O oluşumunda etkili olan faktörleri temsil etmektedir [83,88].

Çizelge 3.15. NOx üretimini etkileyen reaksiyonlar ve sayısal modellemeleri

Kimyasal Reaksiyon		Sayısal Modelleme		k_0 [mol/cm^{3}s]	a [-]	TA [K]
$N_2 + O = NO + N$	(3.14)	$r_1 = k_1 \cdot c_{N2} \cdot c_O$	(3.19)	4,93·10^{13}	0,047	38048,01
$O_2 + N = NO + O$	(3.15)	$r_2 = k_2 \cdot c_{O2} \cdot c_N$	(3.20)	1,48·10^8	1,5	2859,01
$N + OH = NO + H$	(3.16)	$r_3 = k_3 \cdot c_{OH} \cdot c_N$	(3.21)	4,22·10^{13}	0,0	0.0
$N_2O + O = NO + NO$	(3.17)	$r_4 = k_4 \cdot c_{N2O} \cdot c_O$	(3.22)	4,58·10^{13}	0,0	12130,6
$O_2 + N_2 = N_2O + O$	(3.18)	$r_5 = k_5 \cdot c_{O2} \cdot c_{N2}$	(3.23)	2,25·10^{10}	0,825	50569,7

Denklemlerde kullanılan "k_0", "a" ve "TA" değişkenler, N_2O modellemesi sırasında Patas ve Hafner tarafından incelenen sabitleri ve başlangıç değerlerini ifade etmektedir. Ayrıca, "k_i" değerleri Eş. 3.13 ile hesaplanmaktadır.

$$k_i = k_{0,i} \cdot T^a \cdot e^{\left(\frac{-TA_i}{T}\right)} \quad (3.13)$$

Böylece, NO ve N_2O konsantrasyonları, aşağıdaki eşitlileri kullanarak [mol/cm^3.s] cinsinden hesaplanabilmektedir.

$$r_{NO} = C_{PostProcMult} \cdot C_{KineticMult} \cdot 2.0 \cdot (1 - \alpha^2) \cdot \left(\frac{r_1}{1+(\alpha \cdot AK_2)} + \frac{r_4}{1+AK_4}\right) \quad (3.24)$$

$$r_{N2O} = 1{,}1802 \cdot 10^{-6} \cdot T^{0{,}6125} \cdot e^{\left(\frac{9471{,}6}{T}\right)} \cdot c_{N2} \cdot \sqrt{\rho_{O2}} \quad (3.25)$$

$$\alpha = \frac{C_{\mathrm{NO,act}}}{C_{\mathrm{NO,equ}}} \cdot \frac{1}{C_{KineticMult}} \quad (3.26)$$

$$AK_2 = \frac{r_1}{r_2+r_3} \quad (3.27)$$

$$AK_4 = \frac{r_4}{r_5+r_6} \quad (3.28)$$

Burada "r" [mol/cm^3.s] NOx üretim/yıkım oranı, "$C_{PostProcMult}$" [-] NOx işleme katsayısı, "$C_{KineticMult}$" [-] NOx kinetik katsayısı, "C_{act}" [mol] gerçek NOx konsantrasyonu ve "C_{equ}" [mol] tahmin edilen NOx konsantrasyonu temsil etmektedir. Ayrıca, "ρ" [kg/cm^3] yoğunluk ve "T" [K] silindir içindeki sıcaklığıdır.

AVL uygulamasının HC üretim modelinde, çatlaklar mekanizması, HC emme mekanizması ve HC post-oksidasyon gibi önemli faktörleri dikkate alınmaktadır [83]. Çatlaklar mekanizması, piston ile silindir arasındaki boşluklar gibi yakıt ve havaya sınırlı erişim nedeniyle yanmanın gerçekleşmeyebileceği küçük alanları ifade etmektedir [91]. Bununla birlikte, HC emme mekanizması, HC moleküllerinin silindir ve piston yüzeyleri üzerine absorpsiyonunu içermektedir [92]. HC post-oksidasyon mekanizması ise yanma işleminden kalan oksijen molekülleriyle HC molekülleri arasındaki reaksiyonu dikkate almaktadır [93].

Silindirdeki çatlaklar, alevin etkili bir şekilde yayılamadığı kısıtlı bölgelerdir. Yanma sürecinde, yanmamış yakıt karışımı bu bölgelere girerek HC oluşumunu kolaylaştırmaktadır. AVL Boost, çatlaklar mekanizmasını modellemek için Arrhenius denklemini kullanmaktadır. Çatlaklardaki HC kütlesi Eş. 3.29 yardımıyla tahmin edilmektedir [83].

$$m_{\text{çatlak}} = \frac{P \cdot V_{\text{çatlak}} \cdot M}{R \cdot \mathrm{T}_{\text{piston}}} \tag{3.29}$$

Burada "$m_{\text{çatlak}}$" [kg] çatlaklardaki yanmamış molekülerin kütlesi, "P" [Pa] silindir basıncı, "$V_{\text{çatlak}}$" [m^3] toplam çatlakların hacmi, "M" [kg/kmol] yanmamış molekülerin ağırlığı, "$\mathrm{T}_{\text{piston}}$" [K] piston sıcaklığı ve "R" [J /(kmol.K)] gaz sabitidir.

Yakıtın içinde veya yanma odası duvarlarında yağlama yağının bulunmasından kaynaklanan HC emme mekanizması, yanma işleminde HC miktarının artmasında önemli faktörlerden biridir. Yanma sırasında yakıt buharı konsantrasyonu azaldıkça, yağ tarafından emilmiş olan yakıt buharları açığa çıkmaktadır ve yanma gazlarıyla birleşip HC emisyonlarını artırmaktadır. Aşağıdaki difüzyon denkleminin çözülmesi, yağ filminde bulunan yakıt kütle oranının dağılımının tespit edilmesini sağlamaktadır [83].

$$\frac{\partial w_F}{\partial \mathrm{t}} - D \frac{\partial^2 w_F}{\partial r^2} = 0 \tag{3.30}$$

$$D = 7{,}4 \cdot 10^{-8} \cdot M^{0{,}5} \cdot T \cdot V_f^{-0{,}06} \cdot \mu^{-1} \tag{3.31}$$

Difüzyon denkleminde "w_F" [-], "t" [s], "r" [m] ve "D" [m^2/s], sırasıyla yağ filmindeki yakıt kütlesi, zaman, yağ filmindeki radyal konumu ve difüzyon katsayısıdır. Ayrıca, "M" [g/mol] yağın molekül ağırlığını, "T" [K] yağın sıcaklığını, "V_f" [cm^3/mol] kaynama koşullarında yakıtın molar hacmini ve "μ" [cSt] yağın viskozitesini ifade etmektedir.

AVL yazılımı, hidrokarbonların post-oksidasyon mekanizmasını modellemek için Lavoie ve Blomberg tarafından sunulan Arrhenius denklemini (Eş. 3.32) kullanmaktadır [83].

$$\frac{\mathrm{dC}_{HC}}{dt} = -F_{OX} \cdot f_P \cdot 7{,}7^{12} \cdot exp\left(\frac{-18790}{T}\right) \cdot C_{O2} \cdot C_{HC} \tag{3.32}$$

Arrhenius denkleminde "C" [kmol/m^3] "HC" ve "O_2" konsantrasyonlarını, "F_{OX}" [-] HC post -oksidasyon katsayısını ve "f_P" [-] ise post-oksidasyon ölçekleme faktörünü ifade etmektedir.

İlerleyen aşamalarda, test edilen yakıt karışımlarının özellikleri yazılıma entegre edilmiş ve simülasyon parametreleri ayarlanmıştır. AVL programı, geniş bir yakıt ve kimyasal maddeler veri tabanına sahiptir. Bu veri tabanı, çeşitli yakıt türlerinin ve kimyasal bileşenlerin özelliklerini içermektedir ve genellikle birçok standart yakıt türünü kapsamaktadır. Ancak, belirli bir simülasyon veya analiz için programın mevcut veri tabanında bulunmayan yeni bir yakıtın kullanılmasına ihtiyaç duyulursa, "Gas Property Generator" aracı kullanılarak programa yeni yakıtlar tanıtılabilmektedir. Şekil EK-1.9'da gösterildiği gibi, laboratuvardan elde edilen yakıtların özellikleri kullanılarak çalışma kapsamında incelenen tüm yakıt karışımları oluşturulmuştur.

Modelleme testlerinin gerçekleştirilmesi için iterasyon sayısı, hesaplama hücrelerinin boyutları ve diğer kontrol parametreleri gibi simülasyon ayarları belirlenmiştir. Bu ayarlar, simülasyonun doğruluğunu ve verimini artırmanın yanı sıra elde edilen sonuçların güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir. AVL Boost programının genel simülasyon ayarları Şekil EK-1.8'de gösterilmiştir. Son aşamada, simülasyon deneyleri %25, %50, %75 ve %100 olmak üzere dört farklı motor yükleme koşulunda, 1700 dev/dk sabit motor devrinde ve 18:1 sabit sıkıştırma oranında gerçekleştirilmiştir. Üstelik, elde edilen sonuçların güvenilirliğini artırmak ve hata olasılığını azaltmak amacıyla testler üç kez tekrarlanmıştır.

3.4.5. Simülasyon kalibrasyonu ve doğrulaması

Yapılan tez çalışmasında, AVL yazılımı tarafından sağlanan modelin doğrulanması için modelleme sonuçları ile iki farklı deneysel çalışmanın sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu yaklaşım, simülasyon sonuçlarını değerlendirmek için yaygın bir yöntemdir. Bu yaklaşım kapsamında, tez çalışmasında kullanılan motor ile daha önce gerçekleştirilmiş olan iki pratik deney detaylı bir şekilde değerlendirilmiş olup deneylerin koşulları AVL yazılımıyla oluşturulan model ile modellenmiştir. Ardından, Motor modelinde gerekli kalibrasyonlar yapılarak pratik deneylerin sonuçları ile simülasyon sonuçları detaylı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara dayanarak simülasyon sonuçları kabul edilebilir bir yakınlıkla (%1-%6) pratik çalışmaların sonuçlarıyla uyumlu bulunmuştur. Ek olarak, simülasyonun doğruluğu sağlandıktan sonra elde edilen sonuçlar, SCI indeksli iki dergide makale olarak yayımlanmıştır [88-133].

3.5. Motor Performans Analizleri

Tez çalışması kapsamına, motor deneylerinden elde edilen veriler esas alınarak motor performans hesaplamaları yapılmıştır. Bu doğrultuda, motor momenti, gücü ve özgül yakıt tüketimi verimlerinin hesaplamaları yapılmış ve deneylerin değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Motor momenti (T), krank mili ile dinamometre sensörü arasındaki mesafe (L) ve dinamometre yük ünitesinin krank miline uyguladığı kuvvetin (F_d) çarpımı olarak Eş. 3.33'te verilmiştir.

$$T = \mathrm{F}_d \cdot \mathrm{L} \tag{3.33}$$

Motor gücü, motor momenti ve açısal hızın çarpımı olarak Eş. 3.34 ile hesaplanmıştır.

$$P = \frac{2\pi}{60} \cdot \mathrm{n} \cdot \mathrm{T} \tag{3.34}$$

Burada "P" [kW] motor gücü, "T" [Nm] motor momenti ve "n" [dev/dk] motor devridir.

Özgül yakıt tüketimi, bir motorun ürettiği güç başına tükettiği yakıt miktarını ifade etmektedir. Motor test düzeneğindeki yakıt tüketim ölçüm cihazının verileri temel alınarak özgül yakıt tüketimi Eş. 3.35 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\dot{\mathrm{O}}YT = \frac{\dot{m}_y}{P} \cdot 3600 \tag{3.35}$$

Eş. 3.35'te "$\dot{\mathrm{O}}YT$" [g/kWh] özgül yakıt tüketimi, "P" [kW] motor gücü, "$\dot{m}_y$" [g/s] yakıt tüketimidir.

3.6. Termodinamik Analizler

Bu tez çalışmasında, dizel yakıt ile biyodizel karışımına eklenen silisyum dioksit ve titanyum dioksit nanopartiküllerinin, dizel bir motorun performansı ve emisyonları üzerindeki etkileri enerji, ekserji, eksergoekonomik ve eksergoçevresel analizlerle değerlendirilmiş olup aşağıdaki varsayımlar dikkate alınmıştır.

- Motor deneyleri sürekli rejim koşullarında yapılmıştır.
- Yakıtın kimyasal bileşimi ve yanma verimi sabit olarak kabul edilmiştir.
- Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri analizler sırasında ihmal edilmiştir.
- Yakıt ve hava karışımının, 25 °C sıcaklık ve 1 atm basınçta bulunduğu varsayılmıştır.
- Motorun girişindeki yakıt ve hava karışımının tamamen homojen olduğu kabul edilmiştir.
- Yanma işlemi sonucunda oluşan egzoz gazlarının termodinamik özellikleri ideal gaz olarak kabul edilmiştir.

3.6.1. Enerji analizi

İçten yanmalı motorlarda yapılan enerji analizleri, bu motorların termal verimliliğini, enerji dönüşüm süreçlerini ve genel performansını araştırmaktadır. Bu analizler, motorun içerisindeki termodinamik süreçleri, yakıtın yanma özelliklerini, iç enerji dengesini, ısı transferini, basınç değişimlerini ve diğer önemli faktörleri incelemektedir. Bu çalışmanın enerji analizi çerçevesinde, yakıt karışımlarına ait deney verileri kullanılarak yakıt enerjisi, egzoz enerjisi, soğutma suyunun enerjisi, enerji kayıpları ve ısıl verim hesaplanmıştır. İçten yanmalı motorlarda kütlenin korunumu yasasına göre yanma sonucunda oluşan gazların kütlesi, motora giren yakıt ve hava karışımının kütlesine eşittir. İçten yanmalı motorlarda kütlenin korunumu prensibi, Eş. 3.36 ile temsil edilebilmektedir.

$$\sum \dot{m}_{giriş} = \sum \dot{m}_{çıkış} \tag{3.36}$$

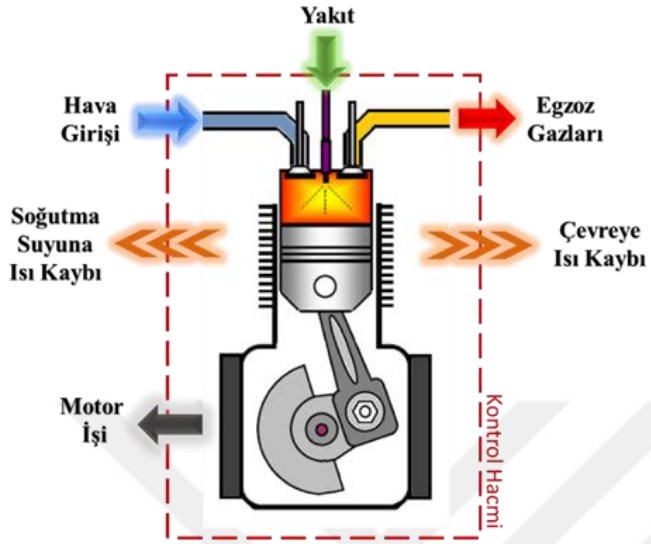
Böylece, motor deneyleri sırasında yakıt ve hava debisi ölçüm verileri kullanılarak yanma sonucunda meydana gelen gazların kütlesinin belirlenmesi mümkün olmaktadır.

Termodinamiğin birinci yasasına göre, içten yanmalı motorlarda kontrol hacmine giren yakıt ve hava karışımının enerjisi, motorun ürettiği güç, egzoz enerjisi soğutma suyunun enerjisi ve enerji kayıplarının toplamına eşittir. Şekil 3.6'da gösterilen kontrol hacmine enerjinin korunumu uygulandığında aşağıdaki eşitliklerle ifade edilmektedir [94].

$$\dot{E}_{giriş} = \dot{W} + \dot{E}_{kayıp} \tag{3.37}$$

$$\dot{E}_{yakıt} + \dot{E}_{hava} = \dot{W} + \dot{E}_{egzoz} + \dot{E}_{su} + \dot{E}_{kayıp} \tag{3.38}$$

Eş. 3.37 ve Eş. 3.38'de "$\dot{E}_{yakıt}$" yakıt enerjisi, "$\dot{E}_{hava}$" giriş hava enerjisi, "$\dot{W}$" motor işi, "$\dot{E}_{egzoz}$" egzoz ısısı, "$\dot{E}_{su}$" soğutma suyu enerjisi ve "$\dot{E}_{kayıp}$" değer ısı kayıplarıdır.



Şekil 3.6. Enerji analizlerinde kullanılan kontrol hacmi

Yakıt enerjisi, içten yanmalı motorlarda yanma reaksiyonları sırasında açığa çıkan enerjiyi ifade etmektedir. Yakıtın enerjisi ($\dot{E}_{yakıt}$), yakıt yakıtın kütlesel debisi ($\dot{m}_{yakıt}$) ile alt ısıl değerinin (Hu) çarpılmasıyla hesaplanmakta olup Eş. 3.39 ile ifade edilmektedir. Bu çalışmada, laboratuvardan elde edilen yakıt karışımlarının alt ısıl değerleri ve test motorun farklı yüklerde yakıt tüketimini kullanılarak yakıtların enerjileri hesaplanmıştır [95].

$$\dot{E}_{yakıt} = \dot{m}_{yakıt} \cdot Hu \tag{3.39}$$

Giriş hava enerjisi, bir içten yanmalı motorun işleyişi esnasında motora giren hava akışının taşıdığı enerjiyi ifade etmektedir. Motor deneyleriyle tespit edilen hava debisi ($\dot{m}_{hava}$), çevre sıcaklığı ($T_{\text{çevre}}$), özgül ısıl kapasitesi (Cp), giriş hava sıcaklığı (T_{hava}) verileri, aşağıdaki eşitliğe dahil edilerek havanın enerjisi ($\dot{E}_{hava}$) hesaplanmıştır [95].

$$\dot{E}_{hava} = \dot{m}_{hava} \cdot Cp \cdot \left(T_{\text{hava}} - T_{\text{çevre}}\right) \tag{3.40}$$

İçten yanmalı motorlarda efektif güç ($\dot{W}$), motor tarafından üretilen gücü temsil etmektedir. Motorun çıkış milinden veya başka bir mekanizma aracılığıyla sağlanan mekanik iş olarak

ifade edilmektedir. Motor deneylerinde belirlenen motor deviri (n) ve moment (T_m) değerleri kullanılarak efektif güç, aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır [96].

$$\dot{W} = \frac{2\pi}{60} \cdot n \cdot T_m \tag{3.41}$$

Egzoz enerjisi, bir içten yanmalı motorun işlemi sırasında egzoz gazları tarafından taşınan enerjiyi ifade etmektedir. Deneylerde kullanılan motorun egzoz enerjisi Eş. 3.42'den hesaplanmıştır [97].

$$\dot{E}_{egzoz} = \dot{m}_{egzoz} \cdot c_{egzoz} \cdot \left(T_{egzoz} - T_{ç}\right) \tag{3.42}$$

Eş. 3.42'de, "$\dot{E}_{egzoz}$" egzoz enerjisini, "$\dot{m}_{egzoz}$" gazların debisini, "c_{egzoz}" egzoz gazlarının özgül ısısını, "T_{egzoz}" egzoz gazların sıcaklığını ve "$T_{ç}$" çevre sıcaklığını temsil etmektedir.

Motorun soğutma suyuna aktarılan enerji, bir içten yanmalı motorun çalışması sırasında soğutma sistemine iletilen ısı enerjisini ifade etmektedir. Bu çalışmada, motordan soğutma suyuna aktarılan enerjisi ($\dot{E}_{su}$), motor deneylerinde ölçülen soğutma suyun debisi ($\dot{m}_{su}$), özgül ısısı (c_{su}) ve giriş ile çıkış sıcaklıkları ($T_{giriş}$ ve $T_{çıkış}$) kullanarak aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır [95].

$$\dot{E}_{su} = \dot{m}_{su} \cdot c_{su} \cdot \left(T_{çıkış} - T_{giriş}\right) \tag{3.43}$$

Isı kayıpları, motorun yanma odasındaki işlem sırasında ve mekanik parçalar arasındaki sürtünme veya silindir duvarından çevreye iletilen ısının yanı sıra diğer çeşitli etkenlerden kaynaklanabilmekte olup aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_{kayıp} = \dot{E}_{yakıt} - \dot{W} - \dot{E}_{egzoz} - \dot{E}_{su} \tag{3.44}$$

Isıl verim, bir süreç içerisinde harcanan ısı enerjisinin yararlı işe dönüşme oranını ölçen kritik bir terimdir. Özellikle içten yanmalı motorlar gibi karmaşık sistemlerin enerji verimliliğini değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Isıl verim ($\eta_{ısıl}$), yararlı işin ($\dot{W}$)

girişteki ısı enerjisi ($\dot{E}_{yakıt}$) ile ilişkisini ifade eden önemli bir orandır ve aşağıdaki eşitlikten elde edilmiştir [98].

$$\eta_{ısıl} = \frac{\dot{W}}{\dot{E}_{yakıt}} \tag{3.45}$$

3.6.2. Ekserji Analizi

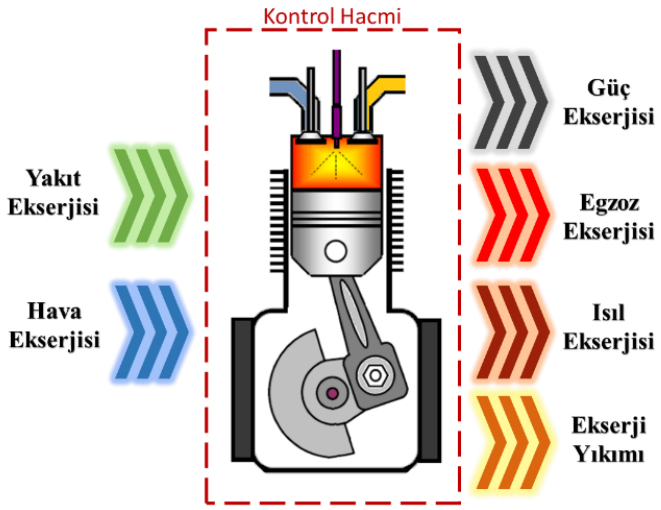
İçten yanmalı motorlarda ekserji analizi, motorların enerji verimliliği üzerine ayrıntılı bir inceleme sunarak enerji kayıplarını tanımlamak, nedenlerini anlamak ve enerji verimliliğini artırmak için kullanılan önemli bir mühendislik yöntemi olarak kabul edilmektedir [99]. Ekserji analizi, motorların işlem sırasında enerji transferlerini ve kayıplarını incelerken enerji dönüşümünün her aşamasını detaylı bir biçimde gözlemlemektedir [100]. Tez çalışması kapsamında, yakıt karışımlarına ait deneysel veriler kullanılarak ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. Ekserji analizi, deneysel verilere dayalı olarak yakıt ekserjisi, hava ekserjisi, efektif güç ekserjisi, egzoz ekserjisi, ısıl ekserjisi, ekserji yıkımı ve ekserji verimi hesaplamalarını içermiştir.

İçten yanmalı motorlarda kontrol hacminde ekserji dengesi, termodinamik bir sürecin veya sistem içerisindeki enerji ve entropi dengesini ifade eden bir kavram olarak kabul edilmektedir. Bu denge, enerjinin girişleri, çıkışları ve içeride üretilen veya yıkılan ekserji miktarını açıklamaktadır. Şekil 3.7'de gösterilen kontrol hacmi için ekserji dengesi aşağıdaki eşitliklerle ifade edilmektedir [101].

$$\sum \dot{E}x_{giriş} = \sum \dot{E}x_{çıkış} + \sum \dot{E}x_{yıkım} \tag{3.46}$$

$$\dot{E}x_{yakıt} + \dot{E}x_{hava} = \dot{E}x_{güç} + \dot{E}x_{egzoz} + \dot{E}x_{ısıl} + \dot{E}x_{yıkım} \tag{3.47}$$

Burada, motor içine giren yakıt ve hava ekserjileri ($\dot{E}x_{yakıt}$ ve $\dot{E}x_{hava}$) toplam ekserji girişini ($\dot{E}x_{giriş}$) temsil etmektedir. Aynı şekilde, motor dışına çıkan efektif güç ekserjisi ($\dot{E}x_{güç}$), ısıl ekserjisi ($\dot{E}x_{ısıl}$) ve egzoz ekserjisi ($\dot{E}x_{egzoz}$), toplam ekserji çıkışını ($\dot{E}x_{çıkış}$) göstermektedir.



Şekil 3.7. Ekserji analizlerinde kullanılan kontrol hacmi

Yakıt ekserjisi, içten yanmalı motorlarda yakıtın içerdiği kullanılabilir enerjiyi ifade etmektedir. Ayrıca, motorun çalışma verimliliği ve performansı ile yakıt tüketimi arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır. Yakıt ekserjisi ($\dot{E}x_{yakıt}$), sisteme giren yakıt debisi ($\dot{m}_{yakıt}$), yakıtın alt ısıl değeri (Hu) ve kimyasal ekserji faktörü (φ) kullanılarak aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır [95].

$$\dot{E}x_{yakıt} = \dot{m}_{yakıt} \cdot Hu \cdot \varphi \tag{3.48}$$

Kimyasal ekserji faktörü (φ), yakıtın kimyasal bileşimini ve enerji içeriğini temsil etmekte olup yakıtın içerdiği kimyasal özelliklere bağlı olarak değişmektedir. Yüksek bir (φ) değeri, yakıtın daha fazla kimyasal ekserjiye sahip olduğunu ifade etmektedir, bu da daha verimli bir yanma süreci ve daha az enerji kaybı anlamına gelmektedir. Tez çalışmasında kullanılan yakıt karışımlarının içerdiği hidrojen (H), karbon (C), sülfür (S) ve oksijen (O) oranları laboratuvar koşullarında tespit edilmiş ve ekserji faktörü, aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır [95].

$$\varphi = 1{,}0401 + 0{,}1728 \cdot \frac{H}{C} + 0{,}0432 \cdot \frac{O}{C} + 0{,}2169 \cdot \frac{S}{C} \cdot \left(1 - 2{,}0628 \cdot \frac{H}{C}\right) \tag{3.49}$$

Hava ekserjisi, motorun hava alım sürecindeki enerji içeriğini temsil etmekte olup girişindeki hava sıcaklığı, basıncı ve nem içeriği gibi faktörlere bağlı olarak Eş. 3.50 ile

hesaplanmaktadır [102]. Bu çalışmada, motora giren hava atmosferden alınmaktadır. Bu bağlamda, havanın ekserjisi sıfır kabul edilmektedir.

$$\dot{E}x_{hava} = \dot{m}\left[C_p\left[T_1 - T_0 - T_0 \ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right)\right]\right] + RT_0 \ln\left(\frac{P_1}{P_0}\right) \quad (3.50)$$

Eş. 3.50'de, "$\dot{m}$" motora giren hava debisi, "C_p" havanın özgül ısısı, "R" özgül gaz sabiti, "T_1" havanın giriş sıcaklığı, "T_0" ortam sıcaklığı, "P_1" havanın giriş basıncı ve "P_0" çevre basıncıdır.

İçten yanmalı motorlarda egzoz ekserjisi, egzoz gazlarının içerdiği kullanılabilir enerji miktarını temsil etmektedir. Egzoz ekserjisi ($\dot{E}x_{egzoz,i}$), hem fiziksel (ε_f) hem de kimyasal ekserjilerin (ε_k) toplamını içeren bir termodinamik terimdir. Kimyasal ekserji, yakıtın kimyasal bileşimine ve enerji içeriğine bağlı olarak değişebilirken, fiziksel ekserji, egzoz gazlarının sıcaklık, basınç ve entropi gibi fiziksel özelliklerine dayalıdır. Tez çalışmasında, egzoz gazlarının her bir bileşeninin ekserjisi, aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır [102].

$$\dot{E}x_{egzoz,i} = \sum\left(\varepsilon_f + \varepsilon_k\right)_i \quad (3.51)$$

Egzoz gazlarının her bir bileşeninin fiziksel ekserjisi, Eş. 3.52'den elde edilmiştir. Aşağıdaki eşitlikte "h_i" egzoz gazların entalpisi, "s_i" egzoz gazların entropisi, "h_0", "s_0" ve "P_0" referans entalpi, entropi ve sıcaklığıdır.

$$\varepsilon_{p,i} = [(h_i - T_0 s_i) - (h_0 - T_0 s_0)] \quad (3.52)$$

Aynı zamanda, egzoz gazların kimyasal ekserjisi, moleküler fraksiyona bağlı olarak Eş. 3.53 ile hesaplanmıştır. Aşağıdaki eşitlikte, "$\bar{R}$" evrensel gaz sabitini ve "y^e" ortam havasındaki gazların mol fraksiyonunu temsil etmektedir. Motor deneyleri sırasında, ortam havasındaki gazların mol fraksiyonu, Çizelge 3.16'da verilmiştir.

$$\varepsilon_k = \bar{R} \cdot T_0 \cdot \ln\left(\frac{1}{y^e}\right) \quad (3.53)$$

Çizelge 3.16. Ortam havasındaki gazların mol fraksiyonu

Referans Bileşeni	Mol Fraksiyonu (%)
O_2	20,3500
CO_2	0,03450
N_2	75,6700
CO	0,00070
H_2O	3,03000
H_2	0,00005
SO_2	0,00020
Değer	0,91455

Tez çalışmasında, motor gövdesinin sıcaklığı ile çevre arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan ısının ekserjisi ($\dot{E}x_{ısıl}$), ısının transfer edildiği yüzey sıcaklığı (T_0), ortam sıcaklığı ($T_ç$) ve ısı transfer miktarı ($\dot{Q}_{kayıp}$) gibi parametreleri kullanılarak Eş. 3.54 ile hesaplanmıştır [101].

$$\dot{E}x_{ısıl} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_ç}\right) \dot{Q}_{kayıp} \tag{3.54}$$

İçten yanmalı motorlarda, enerji dönüşümü sırasında meydana gelen kayıpların sebepleri arasında sürtünme, ısı transferi ve diğer çeşitli faktörler bulunulmaktadır. Bu kayıplar sonucunda ekserji kaybedilmekte olup entropi üretimine yol açmaktadır. Yapılan çalışmada, farklı yakıt karışımları entropi üretimi açısından karşılaştırılmıştır. Üretilen entropi ($\dot{s}_{gen}$), motordaki ekserji kaybı ($\dot{E}x_{yıkım}$) ve ortam sıcaklığına (T_0) bağlı olarak aşağıdaki eşitlikten hesaplanmıştır [97].

$$\dot{s}_{gen} = \frac{\dot{E}x_{yıkım}}{T_0} \tag{3.55}$$

Ekserji verimi, bir motorda enerjinin nasıl dönüştürüldüğünü ve kullanıldığını değerlendiren bir ölçü olarak tanımlanmaktadır. Ekserji verimi (ψ), bir motorun efektif gücü ile motora giren ekserji arasındaki oranla ifade edilmektedir. Yüksek ekserji verimi, enerjinin motorda daha verimli bir şekilde güce dönüştürüldüğünü göstermektedir. Özellikle alternatif yakıt çalışmalarında, ekserji verimi, çeşitli yakıt kombinasyonlarını değerlendirmek için önemli bir kriter olarak kabul edilmektedir. Yapılan tez çalışmasında, her bir yakıt karışımına ait

motorun ekserji verimi aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır [102].

$$\psi = \frac{\dot{E}x_{g\ddot{u}\varsigma}}{\dot{E}x_{yakıt}+\dot{E}x_{hava}} \tag{3.56}$$

3.6.3. Sürdürülebilirlik analizi

İçten yanmalı motorlarda, bir yakıtın etkili olabilmesi için yakıtın ürettiği ekserji, tüm kayıpların ekserji miktarından daha büyük olmalıdır. Bu kritik koşulu ifade eden terim, sürdürülebilirlik indeksi (SI) olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışmada ise motor deneylerinde kullanılan yakıt karışımlarının değerlendirilmesi amacıyla sürdürülebilirlik indeksi hesaplanmıştır. Ekserji verimine bağlı olarak sürdürülebilirlik indeksi, aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır [103].

$$\mathrm{SI} = \frac{1}{1-\psi} \tag{3.57}$$

3.6.4. Eksergoekonomik analizi

İçten yanmalı motorların eksergoekonomik analizi, bir motorun ekonomik açıdan değerlendirilen bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Bu analiz, motorun çalışma verimliliği, enerji kayıpları ve ekserji dengesini ayrıntılı bir şekilde gözden geçirerek motorun ekonomik açıdan ne kadar uygun olduğunu belirlemeye yardımcı olmaktadır. Analiz, özellikle alternatif yakıt çalışmalarında, yakıtların ekonomik verimliliğini ve maliyet etkinliğini değerlendirmek amacıyla etkili bir yöntem olarak kabul edilmektedir.

Bu çalışmanın eksergoekonomik analizi kapsamında motorun işletme maliyetleri, yakıtların maliyeti, yakıtların ekserjisi ve ekserji kayıpları gibi kritik parametreleri kullanarak deneylerde kullanılan yakıtlarının ekonomik değerlendirmesi yapılmıştır. Yapılan analizin maliyet dengesi aşağıdaki eşitlikle ifade edilmiştir. Maliyet dengesinde, "$\dot{C}$" her bir bileşenin maliyetini ve "$\dot{Z}$" motorun yatırım maliyetini temsil etmektedir [104].

$$\sum \dot{C}_{giriş} + \dot{Z} = \sum \dot{C}_{çıkış} \tag{3.58}$$

Giriş maliyetleri, yakıt maliyetini ($\dot{C}_{yakıt}$) ve motora giren hava maliyetini ($\dot{C}_{hava}$) içermekte olup çıkış maliyetleri ise efektif gücün maliyetini ($\dot{C}_{güç}$), egzoz ekserjisi maliyetini ($\dot{C}_{egzoz}$) ve ısıl kayıpların ekserji maliyetini ($\dot{C}_{ısıl}$) içermektedir. Böylece, maliyet dengesinin açıklanmış formu aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir.

$$\dot{C}_{yakıt} + \dot{C}_{hava} + \dot{Z} = \dot{C}_{güç} + \dot{C}_{egzoz} + \dot{C}_{ısıl} \tag{3.59}$$

Üstelik, maliyet dengesindeki her terimin ekserji ve maliyet katsayılarıyla ifade edildiğinde, aşağıdaki şekilde elde edilebilmektedir.

$$c_{yakıt}\dot{E}x_{yakıt} + c_{hava}\dot{E}x_{hava} + \dot{Z} = c_{güç}\dot{E}x_{güç} + c_{egzoz}\,\dot{E}x_{egzoz} + c_{ısıl}\,\dot{E}x_{ısıl} \tag{3.60}$$

Burada "c" her bir bileşenin ekserji birimi başına maliyetini temsil etmektedir.

Bu çalışmada, literatüre dayalı olarak egzoz gazı ve ısı kayıplarının birim ekserji maliyetleri, yakıtın ekserji biriminin maliyetine eş değer kabul edilmiştir [105]. Ayrıca, motorun çalışması sırasında dış ortamdan alınan havanın ekserji değerinin sıfır olduğu varsayılmış, maliyeti ise hesaba dahil edilmemiştir.

$$c_{yakıt} = c_{hava} = c_{ısıl} \tag{3.61}$$

Motor işletme maliyeti ($\dot{Z}$), motorun ilk yatırımı ($\dot{Z}_m$) ve bakım maliyetlerinin ($\dot{Z}_b$) toplamı olarak belirlenmiş olup aşağıdaki eşitlikten hesaplanmıştır [105].

$$\dot{Z} = \dot{Z}_m + \dot{Z}_b \tag{3.62}$$

Çalışmada kullanılan motorun ilk yatırım maliyeti 5000 Amerikan doları olarak belirlenmiştir. Motorun bakım maliyetleri ise Eş. 3.63 ile belirlenmiştir. Verilen eşitlikte, "t" motorun toplam çalışma süresini temsil etmektedir. Çalışma süresi 10 saat/gün ve ömrü ise 20 yıl olarak kabul edilmiştir [106].

$$\dot{Z}_b = 0{,}004t + 71{,}78 \tag{3.63}$$

Eksergoekonomik analizinde, yakıtların üretilen gücün maliyeti, motorların ekonomik performansını değerlendirmek için önemli bir parametredir. Bu parametre, motorun çalışması sırasında kullanılan yakıtın maliyetini ve motor işletme maliyetlerini içermekte olup motorun çalışması sırasında kullanılan yakıtların, üretilen mekanik güç karşılığında oluşturduğu maliyet değerleri temsil etmektedir. Çalışmada kullanılan yakıtlarıyla üretilen gücün birim maliyeti ağalıdaki eşitlikle hesaplanmıştır. Ek olarak çalışmada kullanılan yakıtların Türkiye'deki birim fiyatları Çizelge 3.17'de verilmiştir.

$$c_{g\text{güç}} = \frac{c_{yakıt}\left(\dot{E}x_{yakıt} - \dot{E}x_{egzoz} - \dot{E}x_{ısıl}\right) + \dot{Z}}{\dot{E}x_{g\text{güç}}} \tag{3.64}$$

Çizelge 3.17. Çalışmada kullanılan yakıtların Türkiye'deki birim fiyatları

Yakıt	D100	B10	B10Ti25	B10Ti50	B10Ti100	B10Si25	B10Si50	B10Si100
Fiyat ($/litre)	1,490	1,391	1,402	1,412	1,433	1,395	1,399	1,407

Eksergoekonomik faktör (EF), motorun çalışması sırasında meydana gelen ekserji kayıplarının ekonomik etkisini değerlendiren bir parametre olup motorun performansını hem ekserji hem de ekonomik açısından incelemektedir. Yanma odasındaki enerji dönüşüm süreçlerinden kaynaklanan ekserji kayıpları, eksergoekonomik faktör aracılığıyla ekonomik bir bakış açısına çevrilerek motorun işletme maliyetleri ve enerji verimliliği üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir. Bu faktör, bir motorun işletme maliyetinin (ilk yatırım maliyeti ve bakım maliyeti) toplam maliyete (motor işletme maliyeti ve ekserji kayıpların maliyeti) oranını temsil etmektedir [107]. Dolayısıyla eksergoekonomik faktör, ekserji kayıplarının seviyesi ve yakıtın birim maliyetine dayalı olarak değişmektedir. Bu faktör, farklı yakıtların ekserji kayıpları ve ekonomik performansları açısından karşılaştırılmasında önemli bir kriter olarak değerlendirilmektedir. Çalışmada Kullanılan yakıtların eksergoekonomik faktörü aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır.

$$EF = \frac{\dot{Z}}{\dot{Z} + c_{yakıt}\left(\dot{E}x_{yıkım} + \dot{E}x_{egzoz} + \dot{E}x_{ısıl}\right)} \tag{3.65}$$

Bağıl maliyet farkı, içten yanmalı motorlarda yakıt ve üretilen güç maliyetlerinin karşılaştırılmasında kullanılan bir ölçüdür. Bu terim, üretilen güç maliyeti ile yakıt maliyeti arasındaki bağıl artışı ifade ederek farklı yakıt karışımların ekonomik performansındaki

değişimleri değerlendirmek için kullanılmaktadır. Bu çalışmada, her bir yakıt karışımına ait bağıl maliyet farkı (BMF), aşağıdaki eşitlikten hesaplanmıştır [105].

$$BMF = \frac{c_{g\ddot{u}\varsigma} - c_{yakıt}}{c_{yakıt}} \tag{3.66}$$

3.6.5. Eksergoçevresel analizi

Yapılan tez çalışmasında, motor deneylerinde kullanılan yakıtlardan kaynaklanan karbon dioksit (CO_2) emisyonlarının çevresel etkilerini incelemek için eksergoçevresel analiz yöntemi kullanılmıştır. Eksergoçevresel analiz, bir sistemin çevresel etkilerini değerlendiren, sürdürülebilirlikle ilgili hedeflere uyumlu stratejiler geliştirmeyi amaçlayan bir disiplindir. Bu analizde, her bir yakıt karışımının motor içindeki ekserji akışları ve kayıp değerleri çevreye salınan sera gazları ile ilişkilendirilmiştir. Bu çalışmada, motor deneylerinde kaydedilen CO_2 emisyon verileri ile her bir yakıt karışımının ekserji akış değerleri kullanılarak her bir yakıt karışımına ait aylık CO_2 emisyon miktarı (kg) aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır. Ayrıca hesaplamalara dahil edilen süre, bir ay boyunca günde 10 saat olarak belirlenmiştir [104,105].

$$M_{CO_2} = N_{CO_2} \dot{E}x_{yakıt} t_{\varsigma} \tag{3.67}$$

Eş. 3.67'de, "M_{CO_2}" belirli bir zaman süresinde üretilen CO_2 miktarını (kg/ay), "N_{CO_2}" deneylerde elde edilen CO_2 emisyon değerlerini, "$\dot{E}x_{yakıt}$" giren yakıt ekserjisini ve "t_{ς}" zaman sürecini temsil etmektedir.

3.6.6. Eksergoçevreekonomik analizi

Yapılan tez çalışmasında, motor deneylerinde kullanılan yakıtlardan kaynaklanan CO_2 emisyonlarının çevreye verilen zararın maliyetini hesaplamak için eksergoçevreekonomik analiz yöntemi kullanılmıştır. Eksergoçevreekonomik analizi, içten yanmalı motor sistemlerinde enerji verimliliği, çevresel etkiler ve ekonomik performans arasındaki ilişkileri inceleyen bir analiz metodolojisidir. Bu analiz, içten yanmalı motorların çevresel etkilerinin yanı sıra bu etkilerin maliyetini değerlendirerek hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik etkinlik açısından önemli bilgiler sunmaktadır. Bu çalışmada, eksergoçevresel

analizden elde edilen aylık CO_2 emisyon verileri kullanılarak her bir yakıt karışımının çevreye saldığı karbon dioksitin maliyeti aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır. Ayrıca çevreye salınan karbon dioksitin birim maliyeti 0,0145 $/kg olarak belirlenmiştir [104].

$$E_{CO_2} = F_{CO_2} \cdot M_{CO_2} \tag{3.68}$$

Eş. 3.68'de, "E_{CO_2}" CO_2 emisyonlarının çevreye salınan karbon dioksitin maliyetini ($/ay), "$F_{CO_2}$" çevreye salınan karbon dioksitin birim maliyetini ($/kg) ve "$M_{CO_2}$" belirli bir zaman diliminde üretilen CO_2 miktarını (kg/ay) temsil etmektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Yapılan tez çalışmasında, dizel yakıtı ile atık kızartma yağından üretilen biyodizel yakıtı %10 oranında karıştırıldıktan sonra, 25 ppm, 50 ppm ve 100 ppm konsantrasyonlarında SiO_2 ve TiO_2 nanopartikül katkı maddeleri eklenmiştir. Bu katkıların motor performansı ve emisyonları üzerindeki etkileri hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle değerlendirilmiş olup karşılaştırılmıştır. Ayrıca, çalışma sonucunda farklı yakıt karışımlarının motor testlerinden elde edilen veriler kullanılarak enerji, ekserji, eksergoekonomik ve eksergoçevresel analizleri gerçekleştirilmiştir.

4.1. Motor Testleri

Deneysel çalışma kapsamında, motor testleri tek-silindirli, sıkıştırma-ateşlemeli, dizel bir motorda dört farklı motor yükleme koşullarında (%25, %50, %75 ve %100) ve 1700 dev/dk sabit motor devrinde gerçekleştirilmiş olup farklı yakıt karışımlarına ait performans ve emisyon bulguları elde edilmiştir.

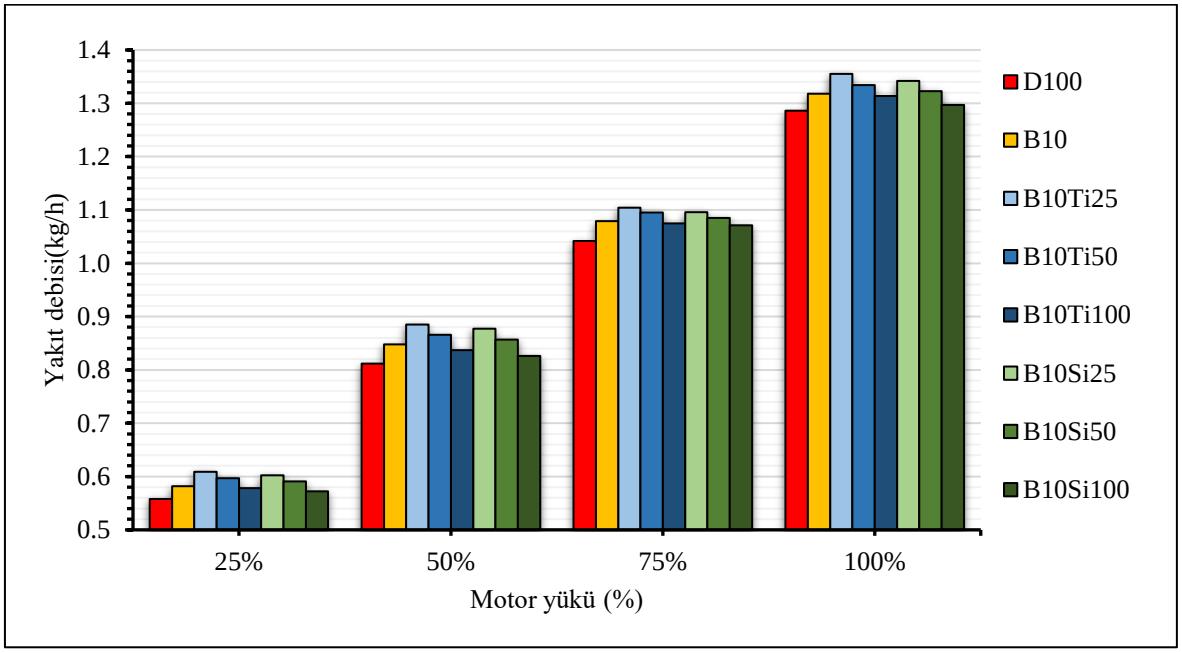
4.1.1. Motor performansı

Motor deneyleri sırasında, termodinamik analizlerde kullanılmak üzere çeşitli parametreler ölçülmüştür. Bu parametreler arasında yakıt ve hava tüketimi, soğutma suyu ve egzoz giriş-çıkış sıcaklıkları gibi performans parametreler yer almaktadır.

Yakıt debisi

Yakıt debisi, motorun bir saat içinde kullanmış olduğu yakıt miktarını belirtmektedir. Bu ölçüm, motorun enerji verimliliğini değerlendirmek ve kullanılan yakıtın miktarını yakıt debisi ölçmek adına kritik bir göstergedir. Motorun yakıt debisi, çalışma koşullarına, yük durumuna ve kullanılan yakıt karışımına bağlı olarak değişebilmektedir. Yapılan motor test denemelerinde, dizel yakıtı, B10 yakıtı ve TiO_2 ile SiO_2 nanopartikülleri içeren yakıt karışımlarına ait yakıt debisi, motor yüküne bağlı olarak Şekil 4.1'de görülmektedir. 1700 dev/dk sabit motor devrinde yapılan deneylerde, artan motor yüküyle birlikte yakıt tüketimi değerlerinin arttığı gözlenmektedir. Tüm motor yük seviyelerinde, D100 yakıtının

kullanımıyla elde edilen yakıt tüketimi değeri, diğer tüm yakıt karışımlarına kıyasla daha düşük olduğu gözlenmiştir. Dizel yakıta %10 oranında biyodizelin eklenmesi, yakıt tüketimini %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla %4,08, %4,21, %3,42 ve %2,16 oranlarında artırmıştır. Literatürde yer alan bitkisel biyodizel yakıtlar üzerine yapılan araştırmalardan elde edilen bulgulara göre, bu artışın temel nedeni, atık yağlardan üretilen biyodizelinin D100 yakıtına göre daha düşük kalorifik değere ve daha yüksek viskoziteye sahip olmasıdır [44].



Şekil 4.1. Motor yüküne bağlı olarak yakıt debisi değişimi

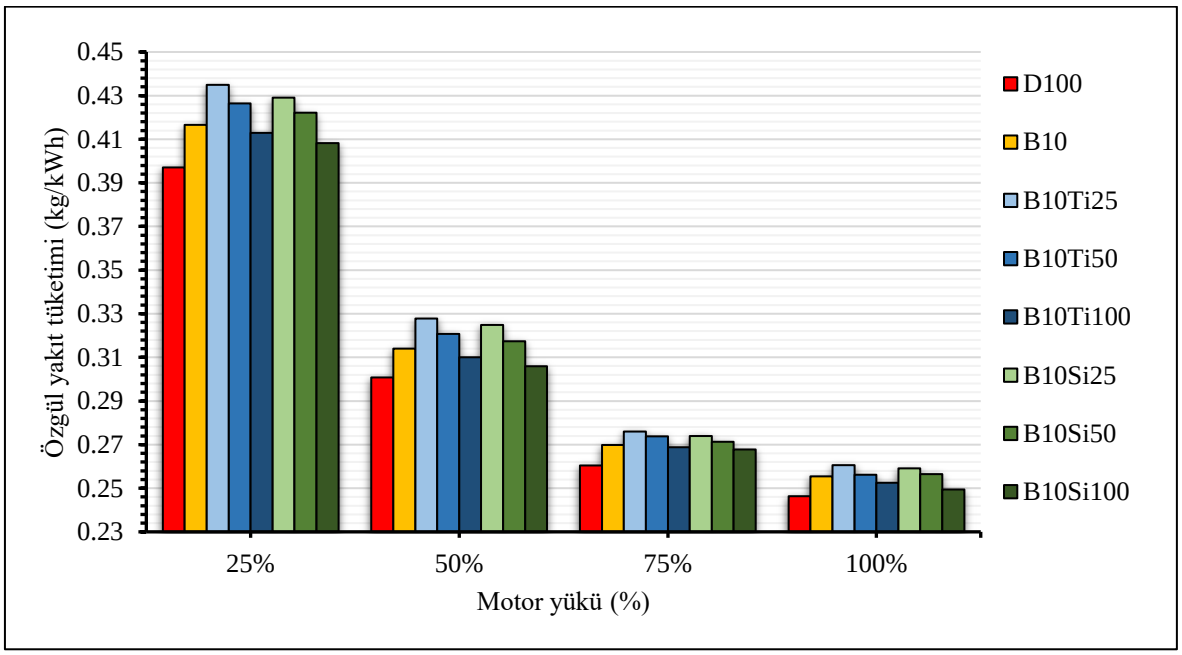
Bunun yanı sıra, B10 yakıtına eklenen farklı miktarlarda TiO_2 ve SiO_2 nanopartiküllerinin yakıt tüketimi üzerinde çeşitli etkilere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Genel olarak, yakıt karışımındaki nanopartikül miktarının arttırılmasının yakıt tüketimini azaltıcı bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Örneğin, 25 ppm ve 50 ppm konsantrasyonlarındaki nanopartikül içeren yakıt karışımları, B10 yakıtına göre yakıt tüketiminde bir artışa neden olmuştur. Diğer taraftan, 100 ppm nanopartikül içeren yakıt karışımları, yakıt tüketiminde bir azalmaya yol açmıştır. Ayrıca, motor testlerinden elde edilen verilere göre, SiO_2 nanopartikülleri içeren yakıt karışımları, TiO_2 nanopartikülleri içeren yakıtlara göre daha yüksek bir yakıt tasarrufu sağlamıştır. Yapılan deneyler neticesinde, en yüksek yakıt tüketimi değerleri %100 motor yükünde B10Ti25, B10Si25, B10Ti50, B10Si50, B10, B10Ti100, B10Si100 ve D100 yakıtları için sırasıyla 1,355 kg/h, 1,342 kg/h, 1,334 kg/h, 1,323 kg/h, 1,318 kg/h, 1,313 kg/h, 1,297 kg/h ve 1,281 kg/h olarak ölçülmüştür. Diğer yandan, en düşük yakıt tüketimi değerleri

%25 motor yüklerinde D100, B10Si100, B10Ti100, B10, B10Si50, B10Ti50, B10Si25 ve B10Ti25 yakıtları için sırasıyla 0,558 kg/h, 0,572 kg/h, 0,579 kg/h, 0,584 kg/h, 0,591 kg/h, 0,599 kg/h, 0,603 kg/h ve 0,612 kg/h olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bulgulara dayanarak yakıt bileşiklerine eklenen nanopartikül miktarının yakıt tüketimini azaltma veya artırmada doğrudan bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, SiO_2 ve TiO_2 nanopartiküllerinin yakıt bileşenlerine eklenmesinin, bu nanopartiküllerin katalitik özelliklerinden kaynaklanan tam yanma sürecini kolaylaştırma ve kontrol edilmiş ısı salınımını artırma yeteneği ile bağlantılı olduğunu göstermektedir [56]. Bu katkı maddeleri, hava ve yakıtın etkili bir şekilde karışmasına yardımcı olup motor bileşenleri arasındaki sürtünmeyi azaltır ve sonuç olarak yakıt tüketimini düşürmektedir [61]. Ancak bu nanopartiküllerin uygun olmayan oranlarda (çok fazla veya çok az) eklenmesi, yakıtın yoğunluğunu, viskozitesini, yanma hızını ve alevlenme noktası gibi özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir [108]. Böylelikle yakıtın atomizasyonunu ve püskürtme özelliklerini etkileyerek hava-yakıt karışımının homojenliğini değiştirebilmektedir. Bu durumda, hava ve yakıtın yetersiz karışımı, verimsiz yanmaya ve artan yakıt tüketimine yol açmaktadır [109]. Bu nedenle, nanopartikül eklemenin miktarının dikkatlice optimize edilmesi, arzu edilen performans artışını sağlamak açısından hayati bir öneme sahiptir.

Özgül yakıt tüketimi

Özgül yakıt tüketimi, bir motorun belirli bir süre zarfında birim güç başına tükettiği yakıt miktarını ifade etmektedir. Özgül yakıt tüketimi, bir motordan elde edilen enerjinin ne kadar verimli kullanıldığını değerlendirmek amacıyla kullanılmakta olup deneysel çalışmalar sırasında elde edilen verilerle analiz edilerek motor performansının objektif bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Yakıtın viskozitesi, yoğunluğu, alevlenme noktası, kalorifik değeri ve kimyasal bileşimi, özgül yakıt tüketimini etkileyen ana parametreler arasında yer almaktadır [110]. Şekil 4.2'de, B10 yakıtına TiO_2 ve SiO_2 nanopartikül katkı maddelerinin eklenmesinin özgül yakıt tüketimine olan etkileri, motor yüküne bağlı olarak görülmektedir. Yapılan motor denemeleri, motor yükündeki artışın özgül yakıt tüketiminde azalmaya neden olduğunu göstermektedir. Motor yükü arttıkça, yanma odasındaki sıcaklık da artmaktadır. Böylece yakıtın daha etkili bir şekilde yanmasını destekleyerek özgül yakıt tüketiminde belirgin bir azalmaya yol açmaktadır [111]. Tüm motor yük seviyelerinde, D100 yakıtının kullanımının diğer tüm yakıt karışımlarına kıyasla daha düşük bir yakıt tüketimi sağladığı tespit edilmiştir. D100 yakıtının, diğer yakıt karışımlarına göre daha düşük özgül

yakıt tüketimi sağlamasının temel nedenleri kimyasal özelliklerin daha homojen olması, yanma verimliliğinin yüksek olması ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasıdır [112]. Üstelik, Şekil 4.2'de gözlemlendiği gibi nanopartikül eklemenin özgül yakıt tüketimini azaltma etkisi, özellikle daha yüksek motor yüklerinde belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Nanopartikül içeren yakıtların daha yüksek oksijen içeriği ve artan motor yüklerindeki yanma sıcaklığı, yanma sürecinin daha etkin bir şekilde optimize edilmesine katkı sağlamaktır. Böylece özgül yakıt tüketiminin daha fazla azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.2. Motor yüküne bağlı olarak özgül yakıt tüketimi değişimi

Yapılan motor denemeleri göre, kızartma yağı biyodizelinin dizel yakıtına ilavesi, %100 motor yükü koşullarında özgül yakıt tüketiminde %3,5'lik bir artışa sebep olmuştur. Aynı motor çalışma koşullarında, B10 yakıtına 100 ppm SiO_2 ve TiO_2 nanopartikül eklenmesi, özgül yakıt tüketiminde sırasıyla %2,5 ve %1,2'e varan azalmalara neden olmuştur. Ancak, 25 ppm ve 50 ppm SiO_2 nanopartikül eklenmesi, özgül yakıt tüketiminde %1,4 ve %0,3'e kadar artışlara yol açmıştır. Benzer şekilde, 25 ppm ve 50 ppm TiO_2 nanopartikül eklenmesi, özgül yakıt tüketimini B10 yakıtına göre sırasıyla %1,9 ve %0,2'ye kadar artırmıştır. Ek olarak, motor deneyleri neticesinde en düşük özgül yakıt tüketimi değerleri %100 motor yükü altında elde edilmiştir. D100 yakıtı kullanıldığında, %100 motor yükünde özgül yakıt tüketimi 0,246 kg/kWh olarak hesaplanırken B10Si100, B10Ti100, B10, B10Si50, B10Ti50, B10Si25 ve B10Ti25 yakıt karışımlarında sırasıyla 0,249 kg/kWh, 0,252 kg/kWh, 0,255 kg/kWh, 0,256 kg/kWh, 0,256 kg/kWh, 0,259 kg/kWh ve 0,261 kg/kWh olarak tespit

edilmiştir. Ayrıca en yüksek özgül yakıt tüketimi değerleri %25 motor yükünde B10Ti25, B10Si25, B10Ti50, B10Si50, B10, B10Ti100, B10Si100 ve D100 yakıtları için sırasıyla 0,435 kg/kWh, 0,429 kg/kWh, 0,426 kg/kWh, 0,422 kg/kWh, 0,417 kg/kWh, 0,413 kg/kWh, 0,408 kg/kWh ve 0,397 kg/kWh olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak uygun miktarlarda SiO_2 nanopartikül eklenmesi, özgül yakıt tüketimini azaltma konusunda TiO_2 nanopartiküllerine göre daha etkili olduğunu göstermektedir. Elde edilen bulgular, SiO_2 nanopartikülleri içeren yakıtların, özgül yakıt tüketiminde TiO_2 nanopartikülleri içeren yakıtlara kıyasla %2,4'e kadar daha fazla azalmaya sebep olduğunu ortaya koymuştur.

Soğutma suyu giriş-çıkış sıcaklıkları

İçten yanmalı motorlarda enerji ve ekserji analizleri, termal verimliliği değerlendirmek ve enerji akışlarını anlamak amacıyla kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, soğutma suyu giriş-çıkış sıcaklıkları, bu analizlerde önemli bir parametre olarak dikkate alınmaktadır. Motor deneylerinde elde edilen soğutma suyu giriş-çıkış sıcaklıkları, motordaki ısının ne kadarının soğutma sistemi tarafından uzaklaştırıldığını göstermektedir. Bu sıcaklık verileri, enerji analizlerinde temel bir girdi olarak kullanılarak motorun enerji tüketimini değerlendirmek üzere öne çıkmaktadır. Aynı zamanda, ekserji analizi için önemli bir veri olarak sistemdeki enerji kayıplarını belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Çizelge 4.1'de, değişen motor yüklerine bağlı olarak motor soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları ile B10 yakıtına SiO_2 ve TiO_2 nanopartiküllerinin eklenmesinin, soğutma suyu giriş-çıkış sıcaklıklarına olan etkileri görülmektedir. Çizelge 4.1'de sunulan verilere göre, tüm test yakıtlarında motor yükü arttıkça motor çıkış suyu sıcaklığının da yükseldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca dizel yakıtına biyodizel eklenmesinin, motor giriş ve çıkış suyu sıcaklığı arasındaki farkı saf dizel yakıta kıyasla %11,2'ye kadar artırdığı tespit edilmiştir. B10 yakıtına 25 ppm ve 50 ppm SiO_2 nanopartikül eklenmesi, motor giriş ve çıkış suyu sıcaklıkları arasındaki farkı sırasıyla %14,2 ve %4,1'e kadar artırırken aynı konsantrasyondaki TiO_2 nanopartikül ilavesi de motor giriş ve çıkış suyu sıcaklıkları arasındaki farkı %15,9 ve %7,8'e kadar artırmıştır. Ancak 100 ppm oranında SiO_2 ve TiO_2 nanopartikülleri içeren yakıtlar kullanıldığında, motor giriş ve çıkış suyu sıcaklıkları arasındaki fark, B10 yakıtına göre sırasıyla %6,5 ve %3,6'ya kadar azalmıştır.

Çizelge 4.1. Motor yüküne bağlı olarak soğutma suyu giriş-çıkış sıcaklıkları (°C)

Yük / Yakıt	Giriş sıcaklığı				Çıkış sıcaklığı			
	%25	%50	%75	%100	%25	%50	%75	%100
D100	28,08	28,98	27,91	28,95	41,60	43,55	45,40	50,47
B10	28,01	29,69	29,44	30,48	42,04	46,10	48,78	53,96
B10Si25	26,60	26,99	27,23	27,36	41,71	46,12	48,28	52,62
B10Si50	28,48	28,43	28,26	28,14	42,65	47,38	48,03	52,63
B10Si100	29,31	29,67	29,79	30,16	42,04	42,91	48,07	52,70
B10Ti25	24,71	25,17	24,96	25,38	40,61	44,68	46,45	50,96
B10Ti50	29,57	28,28	31,36	32,44	43,93	46,08	51,28	57,25
B10Ti100	30,82	31,48	32,11	33,15	44,63	47,33	50,75	56,21

Literatürde yer alan çalışmalara göre, SiO_2 ve TiO_2 gibi nanopartiküllerin optimal oranlarda yakıta ilave edilmesi, ısı transferini artırma ve yakıtın atomizasyonunu geliştirme potansiyeline sahiptir [33]. Böylece daha düşük ateşleme gecikmesi ve daha hızlı yanmaya yol açarak yakıtın daha kısa sürede daha fazla ısı üretebileceği anlamına gelmektedir. Bu etkiler neticesinde, motorun termal verimini artırırken aynı zamanda soğutma sistemine olan ısı kaybını azaltabilmektedir [29]. Dolayısıyla yakıttaki nanopartikül miktarının artması, motor suyu çıkış sıcaklığının azalmasına neden olmaktadır.

Egzoz sıcaklıkları

Egzoz sıcaklığı, motor deneylerinde ve enerji ile ekserji analizlerinde önemli bir parametre olarak kabul edilmektedir. Bu parametre, motorun genel performansını, yanma verimliliğini ve emisyon karakteristiğini belirleyen kritik bir faktördür. Egzoz sıcaklığı, enerji ve ekserji analizleri süreçlerinde motorun ısı kaybını değerlendirmenin yanı sıra, motorun performansını belirlemede kullanılmaktadır. Motorun çalışma koşullarına bağlı olarak değişen egzoz sıcaklıkları, motorun termal verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Yüksek egzoz sıcaklığı, sistemdeki ısı kayıplarının yüksek olduğunu işaret ederken düşük egzoz sıcaklıkları, motordan elde edilen enerjinin daha etkin kullanıldığını ve dolayısıyla daha az

ısı kaybı yaşandığını göstermektedir. Egzoz enerjisi genellikle egzoz çıkışında konumlandırılmış olan bir kalorimetre ve termometreler kullanılarak hesaplanmaktadır. Kalorimetre, sistemden çıkan egzoz gazlarının içerdikleri enerjiyi ölçmek amacıyla kullanılmaktadır. Aynı zamanda termometreler egzozun giriş ve çıkış noktalarındaki sıcaklıkları ölçerek bu süreçte meydana gelen ısıl değişimleri izlemektedir. Bu ölçümler temel alınarak egzoz gazlarının içerdikleri enerji miktarı ve ekserji değerleri tespit edilmektedir. Çizelge 4.2'de, motor yüküne bağlı olarak egzoz kalorimetresinin giriş-çıkış sıcaklıkları ile B10 yakıtına SiO_2 ve TiO_2 nanopartiküllerinin eklenmesinin, egzoz gazlarının sıcaklığı üzerindeki etkileri sunulmaktadır.

Çizelge 4.2. Motor yüküne bağlı olarak egzoz giriş-çıkış sıcaklıkları (°C)

Yük / Yakıt	Giriş sıcaklığı				Çıkış sıcaklığı			
	%25	%50	%75	%100	%25	%50	%75	%100
D100	217,96	304,07	388,11	514,32	186,37	255,80	328,71	418,94
B10	226,59	317,49	401,22	524,97	191,06	265,17	328,43	419,23
B10Si25	228,53	327,30	408,72	545,06	189,73	269,58	331,43	428,57
B10Si50	227,75	324,49	405,98	538,12	191,30	269,94	332,61	429,30
B10Si100	224,56	312,57	395,89	519,81	190,55	261,80	326,14	423,82
B10Ti25	229,47	329,71	409,05	547,77	190,06	269,75	331,07	428,47
B10Ti50	227,91	324,98	406,09	541,19	190,24	268,21	330,82	431,18
B10Ti100	224,72	315,28	397,56	520,67	190,02	263,27	326,16	419,67

Çizelge 4.2'de sunulan verilere dayanarak değerlendirilen tüm yakıtlarda motor yükü arttıkça egzoz gazı sıcaklığının yükseldiği gözlemlenmiştir. Biyodizel katkılı yakıt karışımının (B10), saf dizel yakıtına kıyasla egzoz gazı sıcaklığını %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla %3,8, %4,2, %3,2 ve %2,1 oranında arttırdığı tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, B10 yakıtına 25 ppm ve 50 ppm SiO_2 ve TiO_2 nanopartikül ilavesinin, egzoz gazı sıcaklığını artırdığı gözlemlenmiştir. Örneğin, %100 motor yükünde 25 ppm SiO_2 nanopartikül eklenmesi, egzoz gazı sıcaklığını %5,1 oranında artırırken aynı konsantrasyondaki TiO_2 nanopartikül ilavesi de egzoz gazı sıcaklığını %4,6 oranında

yükseltmiştir. Ancak 100 ppm oranında SiO_2 ve TiO_2 nanopartikülleri içeren yakıtlar kullanıldığında, egzoz gazı sıcaklığı B10 yakıtına kıyasla sırasıyla %1,6 ve %0,9'a kadar azalmıştır. Mevcut literatür verilerine göre, SiO_2 ve TiO_2 gibi metal oksit nanopartiküllerinin yakıta eklenmesi, yanma süreçlerini ve yakıtın yanma özelliklerini optimize ederek enerji dönüşümünü daha etkin bir hale getirmektedir. Bu nanopartiküllerin uygun oranlarda katılması, daha düşük yanma sıcaklıkları, ateşleme gecikmesi ve motordan kaynaklanan ısı kayıplarını neden olarak daha düşük egzoz gazı sıcaklıklarına yol açmaktadır [113].

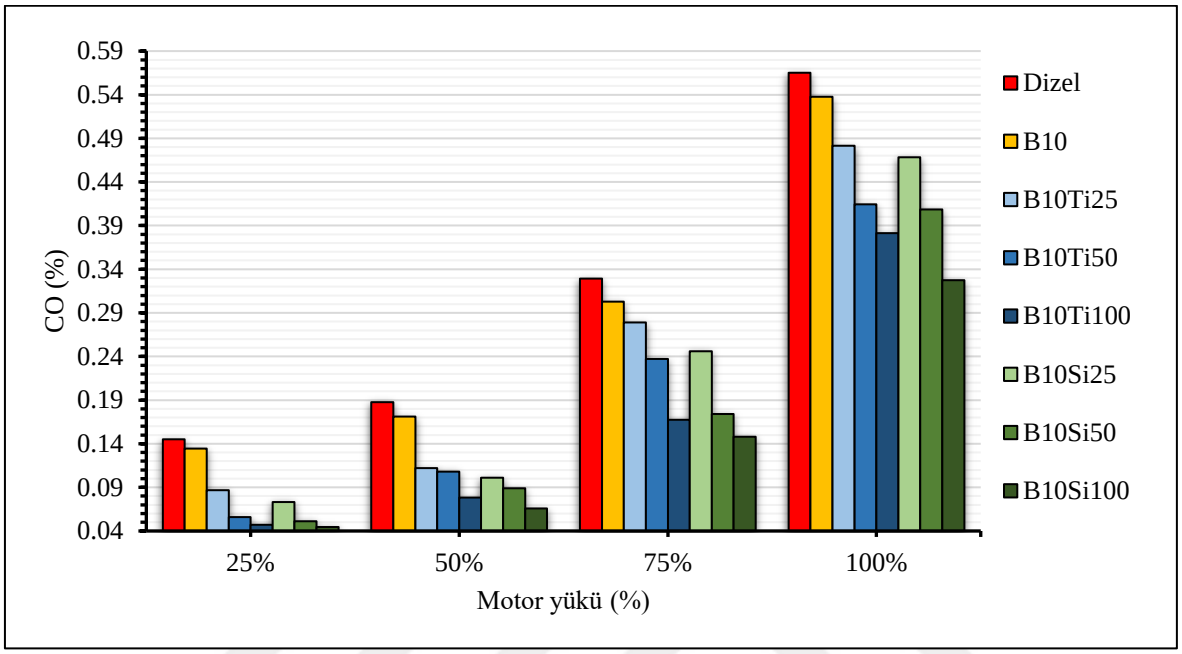
4.1.2. Egzoz emisyonları

Motor denemeleri kapsamında, farklı yakıt karışımlarının CO, CO_2, HC, NOx ve is emisyon değerleri incelenmiştir. Bu emisyon değerleri, dizel yakıtına biyodizel ile çeşitli konsantrasyonlardaki SiO_2 ve TiO_2 nanopartiküllerin katkısıyla, motorun farklı yük koşullarında ürettiği gazların analizini sağlamak amacıyla ölçülmüştür.

CO emisyonları

CO emisyonları, yüksek karbon içeriğine sahip yakıtların tam yanmaması veya yanma sürecindeki oksijen eksikliği gibi faktörlere bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. CO emisyonlarının oluşumunu etkileyen temel faktörler arasında yakıtın oksijen ve karbon içeriği, yanma verimliliği, hava-yakıt karışımı ve yanma sıcaklığı yer almaktadır. Yüksek karbon içeriğine sahip yakıtların kullanılması, CO emisyonlarını artırabilmektedir. Bu durum, yakıttaki karbonun tam anlamıyla CO_2 haline dönüşememesine ve istenmeyen CO emisyonlarının üretimine neden olmaktadır. Ayrıca yanma verimliliği, CO emisyonları üzerinde kritik bir etkiye sahiptir. Verimsiz yanma süreçleri CO emisyonlarının artışına katkıda bulunabilmektedir. Yüksek yanma sıcaklıkları ise özellikle yetersiz oksijenle birleştiğinde, yakıttaki karbon atomlarının karbon monoksite dönüşümünü artıran önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Şekil 4.3'te, dizel yakıtına eklenen biyodizel ile SiO_2 ve TiO_2 nanopartikül katkı maddelerinin CO emisyonları üzerindeki etkileri motor yüküne bağlı olarak verilmiştir. Tüm motor yükleme koşullarında, dizel yakıtına eklenen atık kızartma yağı biyodizelin CO emisyonlarını azalttığı gözlemlenmiş olup saf dizel yakıtına kıyasla, %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla %7,2, %8,7, %7,9 ve %4,8 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Atık kızartma yağından üretilen biyodizel, dizel yakıtına kıyasla daha düşük setan sayısı ve karbon içeriğine sahiptir. Böylece yanma sırasında salınan karbon

miktarını azaltarak CO emisyonlarını düşürmeye neden olmaktadır [114]. Ayrıca biyodizelin yüksek oksijen içeriği, yanma sırasında daha tam bir yakıt oksidasyonunu destekleyerek karbon monoksit oluşumunu azaltmaktadır [115].



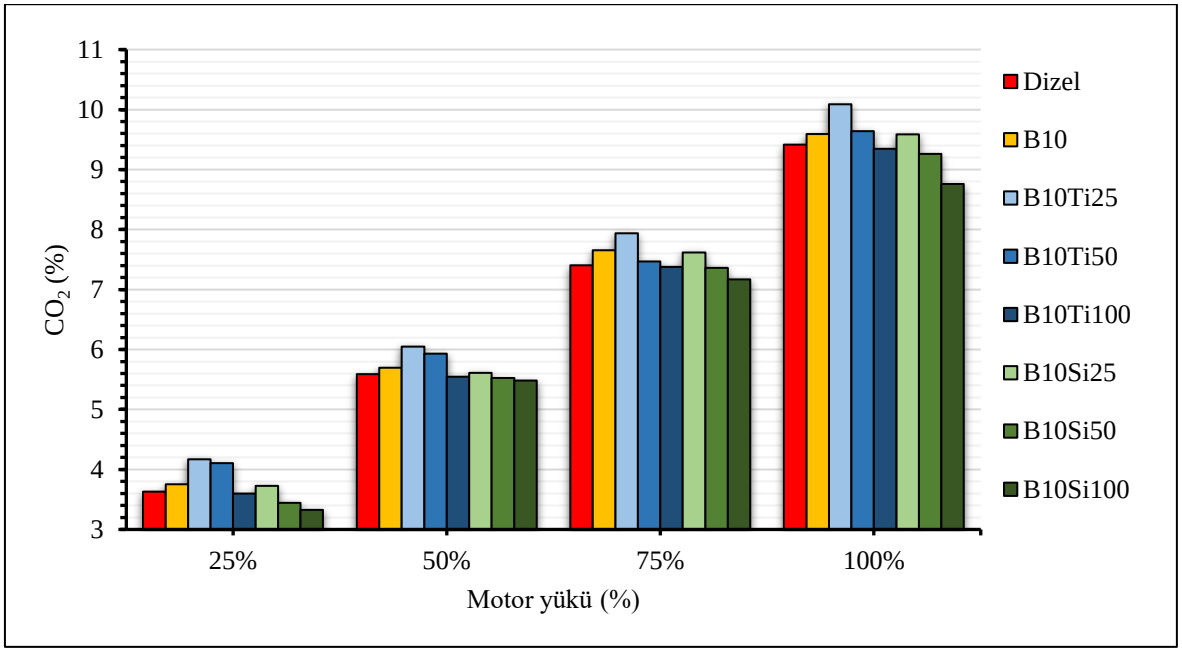
Şekil 4.3. Motor yüküne bağlı olarak CO emisyonlarındaki değişim

Şekil 4.3'te gösterildiği üzere, B10 yakıtına ilave edilen SiO_2 ve TiO_2 nanopartikülleri, CO emisyonlarını belirgin bir şekilde azaltmıştır. Ayrıca tüm motor yüklerinde nanopartikül konsantrasyonunun artmasıyla CO emisyonundaki azalmanın devam ettiği gözlemlenmiştir. SiO_2 nanopartikülleri içeren yakıtlar, TiO_2 nanopartikülleri içeren yakıt karışımlarına kıyasla CO emisyonlarını daha etkin bir şekilde azaltmıştır. B10 yakıtına eklenen 25 ppm, 50 ppm ve 100 ppm oranında SiO_2 nanopartikülleri, CO emisyonlarını B10 yakıtına kıyasla sırasıyla %45, %61 ve %66 oranında azaltırken aynı konsantrasyondaki TiO_2 nanopartikülleri de CO emisyonlarını sırasıyla %35, %58 ve %64 oranlarına kadar azaltmıştır. En düşük CO emisyon değerleri %100 motor yükünde B10Si100, B10Ti100, B10Si50, B10Ti50, B10Si25, B10Ti25, B10 ve D100 yakıtları için sırasıyla %0,32, %0,38, %0,41, %0,42, %0,46, %0,49, %0,53 ve %0,57 olarak bulunmuştur. Literatüre göre, yakıta eklenen SiO_2 ve TiO_2 nanopartiküllerinin CO emisyonlarını azaltma mekanizması, yanma sürecine etkilerine dayanmaktadır. Bu nanopartiküller, yakıtın yanma verimliliğini artırarak tam yanmayı desteklemektedir. SiO_2 nanopartikülleri, yakıtın viskozitesini ve yoğunluğunu düşürerek püskürtme kalitesini ve damlacık boyutunu artırmaktadır. Böylece daha küçük damlacıkların oluşmasını sağlayarak daha etkili bir karışım elde edilmesine ve daha hızlı yanmaya olanak

tanıdığı için CO emisyonlarının azalmasına sebep olmaktadır [116]. Öte yandan, TiO_2 nanopartikülleri, yakıtın termal iletkenliğini ve özgül ısısını artırarak yanma sıcaklığını ve basıncını yükseltmektedir. Böylece, yüksek sıcaklık ve basınç altında daha tam bir yanma gerçekleşmesine katkıda bulunmakta olup CO oluşumunu düşürmektedir [117].

CO_2 emisyonları

Motor yanma sürecinde, yakıtların içerdiği karbon, oksijenle reaksiyona girerek CO_2 oluşmasına neden olmaktadır. Yakıtın karbon içeriği, kısmi eksik yanma ve yanma sıcaklıkları gibi faktörler, motor yanma sürecinde CO_2 emisyonlarını etkileyen faktörler arasında yer almaktadır [118]. Yakıtın karbon içeriği, yanma reaksiyonlarının temel bileşenini oluşturmaktadır ve yakıtın karbon içeriği ne kadar yüksekse yanma sırasında daha fazla CO_2 üretimine neden olmaktadır. Kısmi eksik yanma durumu, yanma sürecinde tam anlamıyla oksijenle reaksiyona girmeyen karbonun CO_2'ye dönüşmesini engelleyerek CO emisyonlarını artırmaktadır. Yanma sıcaklıkları da CO_2 oluşumunu etkileyen bir faktördür. Yüksek yanma sıcaklıkları, karbonun daha etkin bir şekilde CO_2'ye dönüşümüne sebep olmaktadır. Ancak aşırı yüksek sıcaklıklar, yanma süreçlerini kontrolsüz hale getirerek CO_2 emisyonlarının artmasına neden olmaktadır [119]. Yakıt karışımlarına ait CO_2 emisyonlarının değişimi, motor yüküne bağlı olarak Şekil 4.4'te gösterilmektedir.



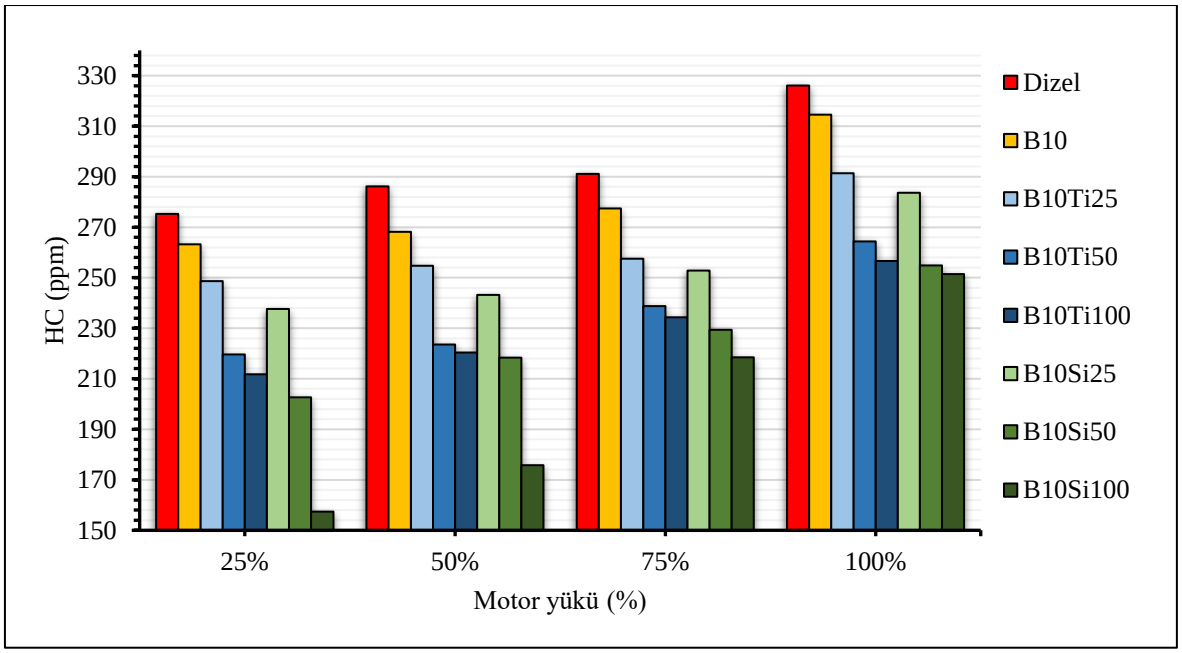
Şekil 4.4. Motor yüküne bağlı olarak CO_2 emisyonlarındaki değişim

Elde edilen veriler incelendiğinde, tüm test yakıtlarında motor yükü arttıkça CO_2 emisyonlarının yükseldiği gözlemlenmiştir. B10 yakıtının kullanımı, D100 yakıtına kıyasla CO_2 emisyonlarını artırmış olup, 25%, 50%, 75% ve 100% motor yükünde sırasıyla %6,4, %2,7, %3,6 ve %1,8 oranında artışlar kaydedilmiştir. Literatürde gerçekleştirilen araştırmalar, kızartma yağından elde edilen biyodizelin, dizel yakıtına kıyasla daha yüksek bir oksijen içeriğine sahip olduğunu göstermektedir. Biyodizelin yüksek oksijen içeriği, karbonun daha hızlı bir şekilde tamamen karbon dioksit dönüşmesine sebep olarak CO_2 emisyonlarının artmasına yol açabilmektedir. Diğer yandan, biyodizelin düşük ısıl değeri, yakıt tüketiminin artmasına ve dolayısıyla CO_2 emisyonlarının daha da yükselmesine neden olmaktadır [120]. Şekil 4.4'te görüldüğü üzere, B10 yakıtına eklenen 25 ppm ve 50 ppm dozlarındaki SiO_2 nanopartiküllerinin CO_2 emisyonlarını azaltıcı bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, aynı dozajdaki TiO_2 nanopartikül ilavesi CO_2 emisyonlarını artırmıştır. Örneğin, %100 motor yükü koşullarında, 25 ppm ve 50 ppm oranlarında TiO_2 nanopartikül eklenmesi CO_2 emisyonlarını sırasıyla %4,9 ve %0,5 oranlarda artırmıştır. Aynı koşullar altında, SiO_2 nanopartikül ilavesinin CO_2 emisyonlarını %0,1 ve %3,5 oranlarında azalttığı gözlemlenmiştir. Üstelik, 100 ppm nanopartikül içeren yakıt karışımları CO_2 emisyonlarını azaltmıştır. Örneğin, 100 ppm oranında SiO_2 ve TiO_2 nanopartikülleri içeren yakıtların kullanılması CO_2 emisyonlarını, B10 yakıtına kıyasla sırasıyla %11,4 ve %3,2 oranlarına kadar azaltmıştır. En yüksek CO_2 emisyon değerleri %100 motor yüklerinde gerçekleşmiş olup B10Ti25, B10Ti50, B10, B10Si25, D100, B10Ti100, B10Si50 ve B10Si100 yakıtları için sırasıyla %10,13, %9,64, %9,59, %9,53, %9,41, %9,32, %9,23 ve %8,76 olarak ölçülmüştür. Ek olarak SiO_2 nanopartikülleri katkılı yakıtların, TiO_2 nanopartikülleri katkılı yakıtlara kıyasla, CO_2 emisyonlarını azaltmada ortalama %62 oranında daha etkili olduğu tespit edilmiştir.

HC emisyonları

HC emisyonları, yakıtın tam olarak yanmaması veya yanma sırasında yan ürünlerin oluşması sonucunda meydana gelmektedir. Yakıtın kısmi olarak yanması durumunda, organik bileşiklerin oluşturduğu gazlar, özellikle hidrojen ve karbon atomları içeren moleküller, HC emisyonlarının temelini oluşturmaktadır [121]. Şekil 4.5'te, motor yüküne bağlı olarak dizel yakıtına eklenen biyodizel ile SiO_2 ve TiO_2 nanopartikül katkı maddelerinin HC emisyonları üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Değerlendirilen tüm yakıtlarda motor yükü arttıkça HC emisyonlarının yükseldiği gözlemlenmiştir. Biyodizel katkılı yakıt karışımı (B10), D100

yakıtına kıyasla HC emisyonlarını %3 ila %6 oranlarında azaltmıştır. Örneğin, %25 ve %100 motor yükü koşullarında D100 yakıtının HC emisyonları sırasıyla 275,2 ppm ve 326,1 ppm olarak belirlenirken aynı koşullarda B10 yakıtına ait HC emisyonları 263,2 ppm ve 314,5 ppm olarak tespit edilmiştir. Literatürdeki araştırmalara göre, biyodizelin daha yüksek oksijen içeriği ve daha düşük karbon içeriği, yanma sürecinde daha tam ve etkili bir reaksiyonu destekleyerek HC emisyon oluşumunu azaltmaktadır. Yanma sırasında, biyodizelde bulunan yüksek oksijen içeriği, karbonun daha etkin bir şekilde tamamen karbon dioksit dönüşmesine katkıda bulunmaktadır. Bu sayede, yanmamış hidrojen ve karbon miktarını azaltarak HC emisyonlarını düşürmektedir [122].



Şekil 4.5. Motor yüküne bağlı olarak HC emisyonlarındaki değişim

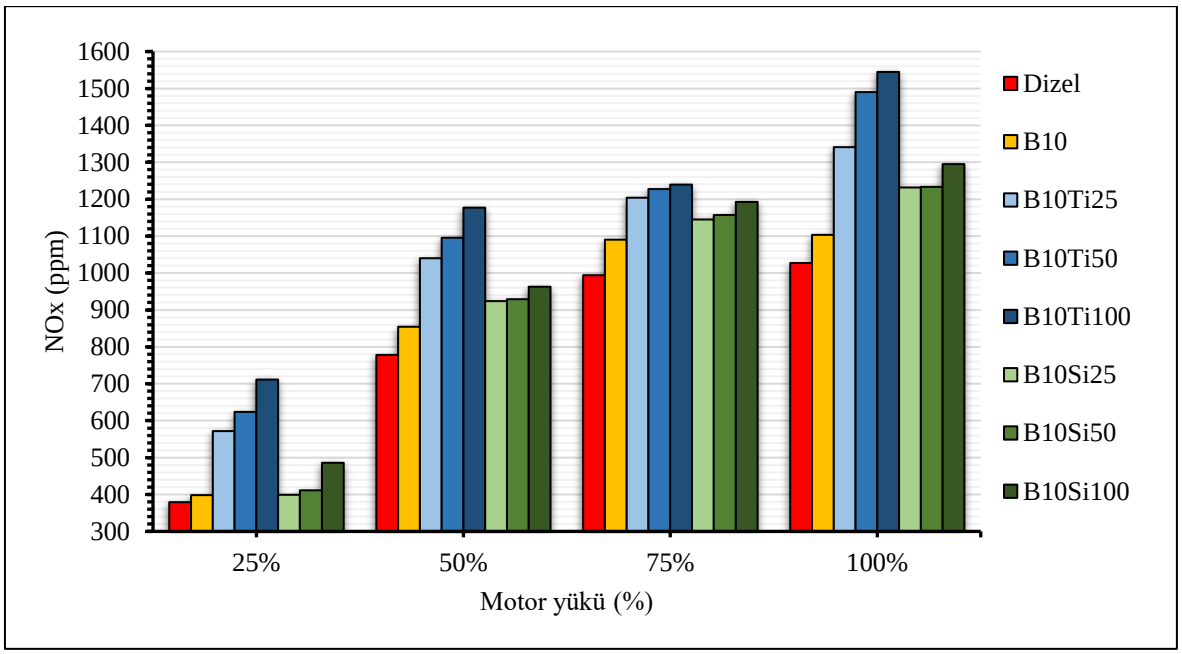
Şekil 4.5'te görüldüğü üzere, B10 yakıtına eklenen SiO_2 ve TiO_2 nanopartikülleri, HC emisyonlarını belirgin bir şekilde azaltmıştır. Yakıt karışımındaki nanopartikül konsantrasyonunun artışı, HC emisyonlarını azaltmıştır. B10 yakıtına eklenen 25 ppm, 50 ppm ve 100 ppm oranında SiO_2 nanopartikülleri, HC emisyonlarını B10 yakıtına göre sırasıyla %9,8, %19,5 ve %40,2 oranlarına kadar azaltırken aynı konsantrasyondaki TiO_2 nanopartikülleri HC emisyonlarını sırasıyla %7,3, %16,6 ve %23,1'e kadar azaltmıştır. Ek olarak, SiO_2 nanopartikülleri katkılı yakıtların HC emisyonlarını azaltmada daha üstün bir potansiyele sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, SiO_2 nanopartikülleri içeren yakıtların, TiO_2 nanopartikülleri katkılı yakıtlara göre HC emisyonlarını azaltmada ortalama %29 oranında daha etkili bulunmuştur. En yüksek HC emisyon değerleri %100 motor

yükünde, D100, B10, B10Ti25, B10Si25, B10Ti50, B10Ti100, B10Si50 ve B10Si100 yakıtları için sırasıyla 326,1 ppm, 314,5 ppm, 291,3 ppm, 283,6 ppm, 264,3 ppm, 256,7 ppm, 253,8 ppm ve 251,4 ppm olarak kaydedilmiştir. Buna karşın, en düşük HC emisyon değerleri %25 motor yükünde gerçekleşmiş olup, B10Si100, B10Si50, B10Ti100, B10Ti50, B10Si25, B10Ti25, B10 ve D100 yakıtları için sırasıyla 157,3 ppm, 202,7 ppm, 211,6 ppm, 219,5 ppm, 237,9 ppm, 248,5 ppm, 263,2 ppm ve 275,3 ppm olarak ölçülmüştür. Metal oksit katkı maddeleri üzerine yapılan araştırmalar, SiO_2 nanopartiküllerinin, yakıtın viskozitesini ve sürtünmesini azaltarak püskürtme ve karışma performansını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Bu etki, yakıtın daha tam yanmasını destekleyerek HC emisyonlarının düşmesine önemli bir katkı sağlamaktadır [123]. Öte yandan, TiO_2 nanopartikülleri, yakıtta bulunan organik bileşiklerin katalitik parçalanmasını gerçekleştirerek yakıtın kalitesini artırmaktadır. Bu sayede, yakıtın daha verimli bir şekilde yanmasını tetikleyerek HC emisyonlarını azaltmaktadır [124].

NOx emisyonları

NOx emisyonları, içten yanmalı motorların yanma reaksiyonları sırasında, atmosferde bulunan moleküler nitrojenin, silindir içindeki yakıtla birleşmesi sonucunda oluşmaktadır. Bu emisyonları arttıran etkili faktörler arasında yüksek yanma sıcaklıkları, yüksek basınç oranları, uzun yanma süreleri ve yüksek hava-yakıt karışım oranları yer almaktadır. Yüksek yanma sıcaklıkları, azot moleküler azot oksitlere dönüşümünü artırırken (Eş. 3.14-Eş. 3.18), yüksek basınç oranları ve uzun yanma süreleri, bu oksidasyon sürecini artırarak NOx emisyonlarını yükseltmektedir. Ayrıca yüksek hava-yakıt karışım oranları, yüksek yanma sıcaklıklarına neden olarak NOx oluşumunu destekleyebilmektedir [125]. Motor denemeleri sırasında, yakıt karışımlarına ait NOx emisyonlarının değişimi, motor yüküne bağlı olarak Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Elde edilen verilerin analizi sonucunda, tüm test yakıtlarında motor yükünün artmasıyla birlikte NOx emisyonlarının arttığı gözlemlenmiştir. B10 yakıtının kullanımı, D100 yakıtına göre NOx emisyonlarını artırmış olup, 25%, 50%, 75% ve 100% motor yüklerinde sırasıyla %4,8, %7,9, %8,3 ve %6,9 oranında artışlara yol açmıştır. Örneğin, %25 ve %100 motor yükü koşullarında D100 yakıtının NOx emisyonları sırasıyla 379,3 ppm ve 1027,1 ppm olarak belirlenirken aynı koşullarda B10 yakıtının NOx emisyonları 398,4 ppm ve 1103,6 ppm olarak ölçülmüştür. Literatürde yer alan araştırmalara göre, biyodizelin dizel yakıtına göre daha yüksek oksijen içeriği, viskozite ve yoğunluğa sahip olması, NOx emisyonlarını artırmaktadır. Bu özellikler, yanma sürecindeki sıcaklık,

basınç ve oksijen konsantrasyonunu artırarak NOx oluşumuna katkıda bulunmaktadır [126]. Bunun yanı sıra, biyodizelin dizel yakıtına göre daha yüksek tutuşma gecikmesi ve adyabatik alev sıcaklığı, yanma odasında daha fazla yakıt birikmesine neden olmaktadır. Dolayısıyla yanma odasının sıcaklık ve basıncının artmasına ve sonucunda NOx emisyonlarının artmasına yol açmaktadır [127].



Şekil 4.6. Motor yüküne bağlı olarak NOx emisyonlarındaki değişim

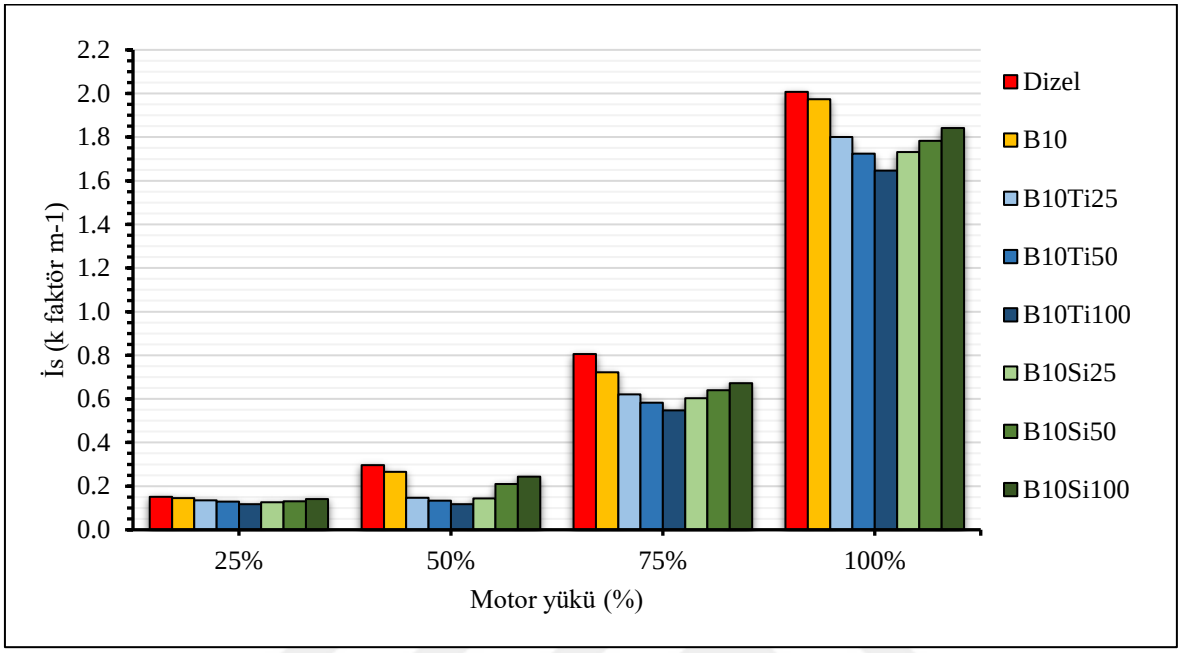
Şekil 4.6'da görüldüğü üzere, tüm motor yüklerinde SiO_2 ve TiO_2 nanopartiküllerinin B10 yakıtına ilavesi, NOx emisyonlarının önemli bir ölçüde artmasına sebep olmuştur. TiO_2 nanopartikülleri içeren yakıtlar, SiO_2 nanopartikülleri içeren yakıt karışımlarına kıyasla NOx emisyonlarını artırmada daha belirgin bir etki sergilemiştir. Ayrıca, yakıt karışımlarındaki nanopartikül konsantrasyonunun artmasıyla NOx emisyonları da artmıştır. Dolayısıyla B10 yakıtına eklenen 25 ppm, 50 ppm ve 100 ppm oranında SiO_2 nanopartikülleri, NOx emisyonlarını B10 yakıtına kıyasla sırasıyla %10,3, %10,5 ve %17,9'a kadar artarken aynı konsantrasyondaki TiO_2 nanopartikülleri NOx emisyonlarını sırasıyla %30,2, %36,1 ve %43,9 oranlarına kadar artırmıştır. En düşük NOx emisyon değerleri %25 motor yükünde elde edilmiş olup D100, B10, B10Si25, B10Si50, B10Si100, B10Ti25, B10Ti50 ve B10Ti100 yakıtları için sırasıyla 379,1 ppm, 398,4 ppm, 399,2 ppm, 411,3 ppm, 485,5 ppm, 571,5 ppm, 623,7 ppm ve 711,1 ppm olarak ölçülmüştür. Diğer taraftan, en yüksek NOx emisyon değerleri %100 motor yükünde gözlemlenmiş olup B10Ti100, B10Ti50, B10Ti25, B10Si100, B10Si50, B10Si25, B10 ve D100 yakıtları için sırasıyla 1544,7 ppm, 1490,5 ppm,

1340,7 ppm, 1295,2 ppm, 1233,5 ppm, 1231,8 ppm, 1103,6 ppm ve 1027,1 ppm olarak kaydedilmiştir. Metal oksit nanopartikülleri konusunda yapılan araştırmalara dayanarak, TiO_2 ve SiO_2 nanopartikülleri, yanma sürecini etkileyerek NOx bileşiklerinin oluşumunu artırmaktadır. Bu partiküllerin yüksek oksijen içeriği, yanma sırasında daha fazla oksijenin tüketilmesine ve buharlaşma süreçlerinin artmasına katkıda bulunarak NOx emisyonlarını artırmaktadır. Ayrıca, yanma reaksiyonlarında katalitik etkiler göstererek azotun oksijenle reaksiyona girmesini hızlandırmaktadır. Ek olarak TiO_2 ve SiO_2 nanopartiküllerinin yüzey özellikleri ve kimyasal etkileşimleri, NOx emisyonların oluşumunu kolaylaştırabilmektedir [115]. Öte yandan, TiO_2 nanopartiküllerinin, SiO_2 nanopartiküllerine kıyasla daha büyük bir oksijen depolama kapasitesi ve geniş bir yüzey alanına sahip olması, yakıtın daha homojen bir şekilde dağılmasını ve daha etkili bir şekilde yanmasını sebep olmaktadır. Böylece, yanma sürecinin sıcaklık ve basınç koşullarını artırarak, NOx emisyonların oluşumunu artırabilmektedir [128].

İs emisyonları

Yakıtın yanma sürecinde ortaya çıkan is emisyonları, yanma sonucunda oluşan katı parçacıklardır ve tamamen yanmamış karbon partiküllerinden kaynaklanmaktadır. Bu emisyonlar, yanma reaksiyonlarının yeterince tamamlanmaması veya yanma ortamındaki oksijen miktarının yetersiz olması durumunda meydana gelmektedir. İs emisyonlarını artıran faktörler arasında yakıtın kalitesi, karışım oranı, yanma sıcaklığı, yanma odası tasarımı ve motor çalışma koşulları bulunmaktadır. Düşük yanma sıcaklıkları, karbon partiküllerinin tamamen oksitlenmemesine ve is emisyonlarının artmasına yol açmaktadır. Aynı zamanda, yanma odasındaki hava-yakıt karışımının homojenliği ve yanma süresi de is emisyonlarını etkilemektedir. Şekil 4.7'de, motor yüküne bağlı olarak dizel yakıtına eklenen biyodizel ile SiO_2 ve TiO_2 nanopartikül katkı maddelerinin is emisyonları üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Tüm motor yükleme koşullarında gerçekleştirilen denemelerde, D100 yakıtının kullanımıyla elde edilen is emisyon değerleri, diğer tüm yakıt karışımlarıyla elde edilen değerlere kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, tüm test yakıtlarında motor yükünün artmasıyla birlikte is emisyonlarının önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Biyodizel katkılı yakıt karışımının, D100 yakıtına kıyasla is emisyonlarını %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla %3,7, %10,9, %10,2 ve %1,8 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Literatüre göre, biyodizelin yüksek oksijen içeriğine sahip olması, daha tam ve verimli bir yanma sürecini destekleyerek karbon partiküllerinin oluşumunu ve dolayısıyla is

emisyonlarını düşürmektedir [129]. Ayrıca, biyodizel kullanımı daha yüksek yanma sıcaklıklarına neden olarak is emisyonlarını azaltabilmektedir [130].



Şekil 4.7. Motor yüküne bağlı olarak is emisyonlarındaki değişim

B10 yakıtına ilave edilen SiO_2 ve TiO_2 nanopartiküllerinin is emisyonlarını azalttığı gözlemlenmiştir. Örneğin, %100 motor yükleme koşulunda 25 ppm, 50 ppm ve 100 ppm SiO_2 nanopartiküllerinin eklenmesi, is emisyonlarını B10 yakıtına göre sırasıyla %46,1, %20,7 ve %8,1 oranında azaltırken aynı konsantrasyondaki TiO_2 nanopartikül ilavesi is emisyonlarını sırasıyla %44,9, %49,81 ve %55,4'e kadar azaltmıştır. Ek olarak yakıttaki TiO_2 nanopartikül konsantrasyonunun artması, is emisyon değerlerinin azalmasına katkı sağlarken, aynı zamanda SiO_2 nanopartikül içeriğinin artması is emisyonlarını artırmıştır. Örneğin, %25 motor yükünde B10Ti25 yakıtına eklenen 25 ppm TiO_2 nanopartikülleri is emisyonlarını %4,7 oranında azaltmıştır. Diğer bir yandan, aynı koşullarda B10Si25 yakıtına eklenen 25 ppm SiO_2 nanopartikülleri is emisyonlarını %3,4 oranında artırmıştır. Literatürde yer alan araştırmalara dayanarak, TiO_2 nanopartikülleri fotokatalitik özelliklere sahip olduğundan, egzoz gazlarındaki zararlı bileşikleri parçalayarak atmosfere salınan is emisyonlarını azaltabilmektedir [131]. Bununla birlikte, SiO_2 nanopartikülleri yüksek sıcaklıklarda oksitlenmeyen bir madde olduğundan, yüksek oranlarda eklenen nanopartiküller yanma işlemi sırasında partikül halinde egzoz gazlarına karışarak is emisyonlarının oluşumuna neden olmaktadır [57].

4.2. Sayısal Analiz

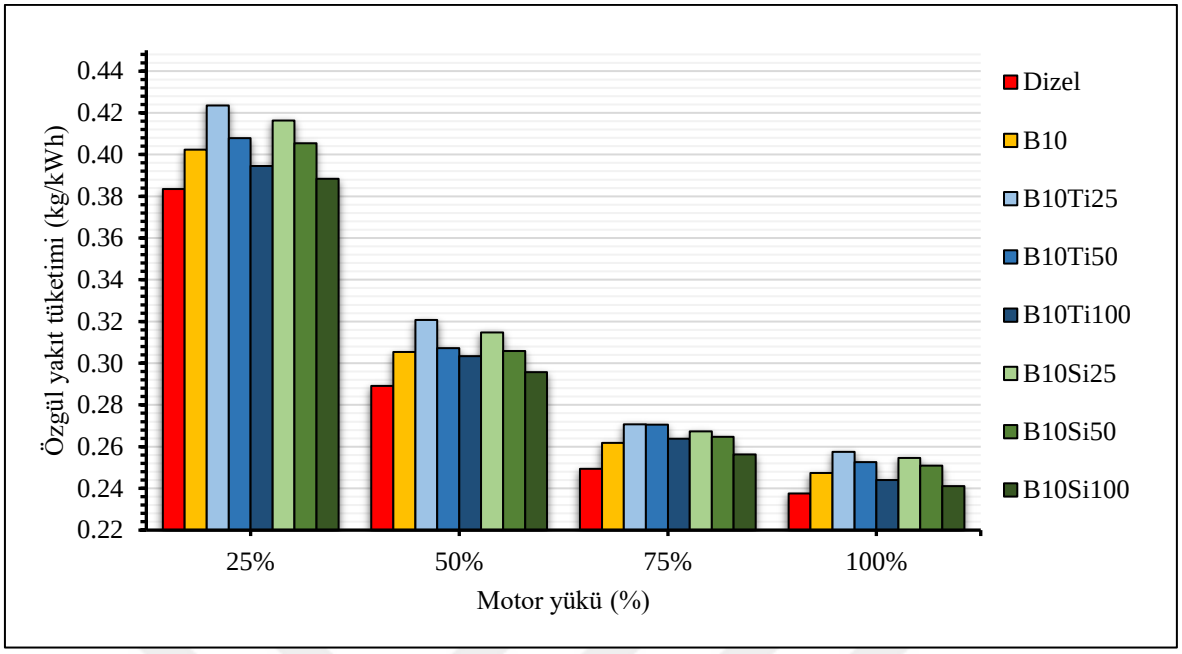
Tez çalışmasının sayısal modellemesi kapsamında, deney motoru, kullanılan yakıt karışımları sınır şartları ve test koşulları, AVL simülasyon uygulamasının Boost alt programı kullanılarak modellenmiştir. Sayısal motor denemeleri, tek-silindirli, sıkıştırma-ateşlemeli, modellenmiş dizel bir motorda gerçekleştirilmiştir. Bu denemeler, dört farklı motor yükleme koşulunda (%25, %50, %75 ve %100) ve 1700 dev/dk sabit motor devrinde yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda, yakıt karışımlarının performans ve emisyon verileri elde edilmiştir.

4.2.1. Sayısal motor performansı

Deney motorunun yanma süreçleri, ısı transfer mekanizması ve test koşulları ile test edilen yakıtların AVL yazılımı kullanılarak modellenmiş ve motor performansına ilişkin sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda, tüm yakıt karışımlarının performans verileri, laboratuvar test sonuçlarıyla karşılaştırılmak üzere elde edilmiştir.

Özgül yakıt tüketimi

Sayısal motor denemeleri sonucunda elde edilen özgül yakıt tüketimi değerleri ile B10 yakıtına eklenen SiO_2 ve TiO_2 nanopartiküllerinin özgül yakıt tüketimine olan etkileri, farklı motor yüklerine bağlı olarak Şekil 4.8'de verilmiştir. AVL programı ile gerçekleştirilen özgül yakıt tüketimi hesaplamalarında, yanma modeli, ısı transfer modeli, enjeksiyon modeli ve supapların zamanlama planı gibi unsurların doğru seçilmesi kritik bir öneme sahiptir. Bu unsurlar, motorun termal ve akışkan dinamik davranışlarını modellemek amacıyla kullanılmaktadır. Yanma modeli, yakıtın motor silindiri içindeki davranışlarını tanımlayarak yakıt tüketimi üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Isı transfer modeli, motorun ısıl davranışlarını simüle ederek, enjeksiyon modeli ise yakıtın püskürtülme sürecini ve karışım oluşumunu yardımcı olmaktadır. Supapların zamanlama planı da motorun genel performansını ve yanma sürecini etkileyen kritik bir faktör olarak yakıt tüketiminin modellemesini etkileyebilmektedir. Şekil 4.8'de görüldüğü üzere, D100 yakıtının kullanımıyla elde edilen özgül yakıt tüketimi değerleri, diğer tüm yakıt karışımlarıyla karşılaştırıldığında daha düşük bulunmuştur. Ek olarak tüm test yakıtlarında motor yükünün artmasıyla birlikte özgül yakıt tüketimi azalmıştır.



Şekil 4.8. Simülasyon sonuçlarına göre özgül yakıt tüketimi değişimi

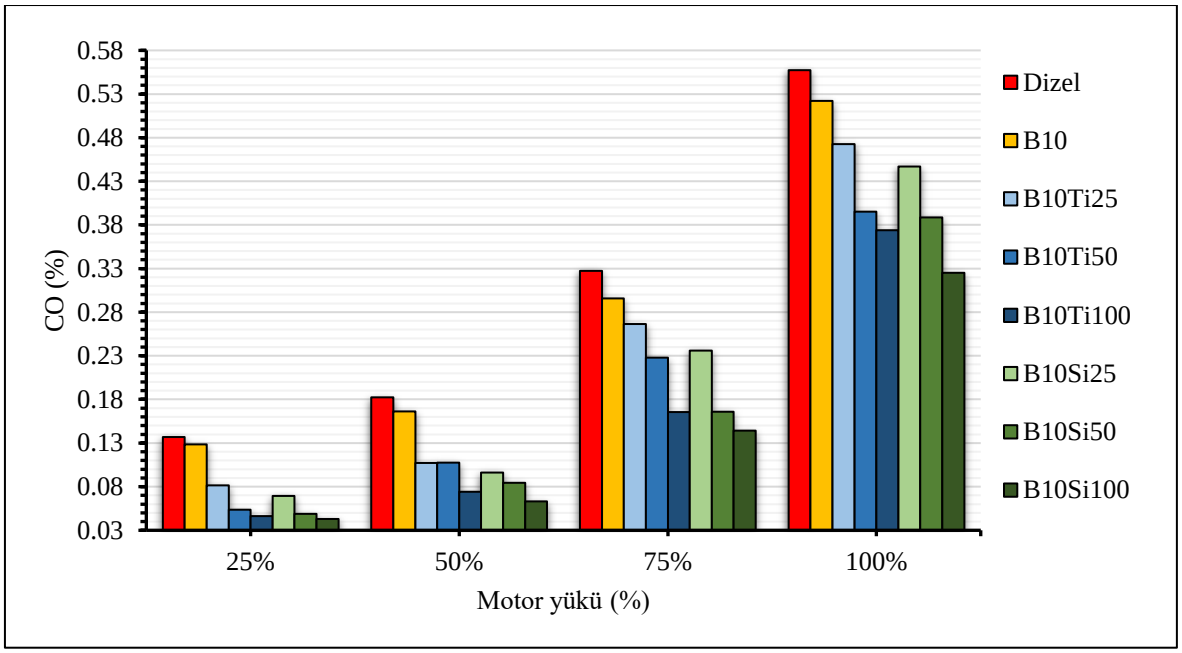
Simülasyon verileri göre, en düşük özgül yakıt tüketimi değerleri, %100 motor yükünde D100, B10Si100, B10Ti100, B10, B10Si50, B10Ti50, B10Si25 ve B10Ti25 yakıtları için sırasıyla 0,237 kg/kWh, 0,241 kg/kWh, 0,244 kg/kWh, 0,248 kg/kWh, 0,251 kg/kWh, 0,253 kg/kWh, 0,256 kg/kWh ve 0,258 kg/kWh olarak elde edilmiştir. Diğer yandan, en yüksek değerler, %25 motor yükünde B10Ti25, B10Si25, B10Ti50, B10Si50, B10, B10Ti100, B10Si100 ve D100 yakıtları için sırasıyla 0,424 kg/kWh, 0,415 kg/kWh, 0,408 kg/kWh, 0,405 kg/kWh, 0,401 kg/kWh, 0,396 kg/kWh, 0,387 kg/kWh ve 0,381 kg/kWh olarak hesaplanmıştır.

4.2.2. Sayısal egzoz emisyonları

AVL simülasyon programı, motorun yanma süreçleri, yakıt enjeksiyonu, ısı transferi ve yakıt karışımlarının karakteristikleri gibi motor parametreleri modelleyerek emisyon tahminlerini gerçekleştirebilmektedir. Üstelik, programın analitik yetenekleri sayesinde, motorun çeşitli çalışma koşullarında ve farklı yakıt kombinasyonları altında muhtemel emisyon profillerini belirleyebilme imkânı sağlamaktadır. Örneğin, motor yükü, motor devri, hava-yakıt oranı gibi parametrelerin değiştirilmesiyle, program farklı operasyonel senaryolar altında motorun performansını ve emisyon çıktısını simüle edebilmektedir. Yapılan sayısal çalışmanın çerçevesinde, kullanılan tüm yakıt karışımlarının CO, CO_2, HC ve NOx emisyon değerleri motor yüküne bağlı olarak elde edilmiştir.

CO emisyonları

AVL Boost yazılımı, CO emisyonlarını tahmin etmek üzere, yakıt bileşimi, hava-yakıt oranı, yanma sıcaklığı ve basıncını içeren bir kimyasal denge modeli kullanmaktadır. Bu model, CO kütle fraksiyonunu hesaplamak için Gibbs serbest enerji minimizasyon yöntemini kullanmakta olup aynı zamanda çıkış gazının genleşme hareketinin tamamlandığı ve denge koşullarına ulaşıldığı varsayımıyla çalışmaktadır [84]. Sayısal motor deneyleri sonucu elde edilen tüm yakıt karışımlarına ait CO emisyonlarını, değişen motor yüklerine bağlı olarak Şekil 4.9'da gösterilmektedir.



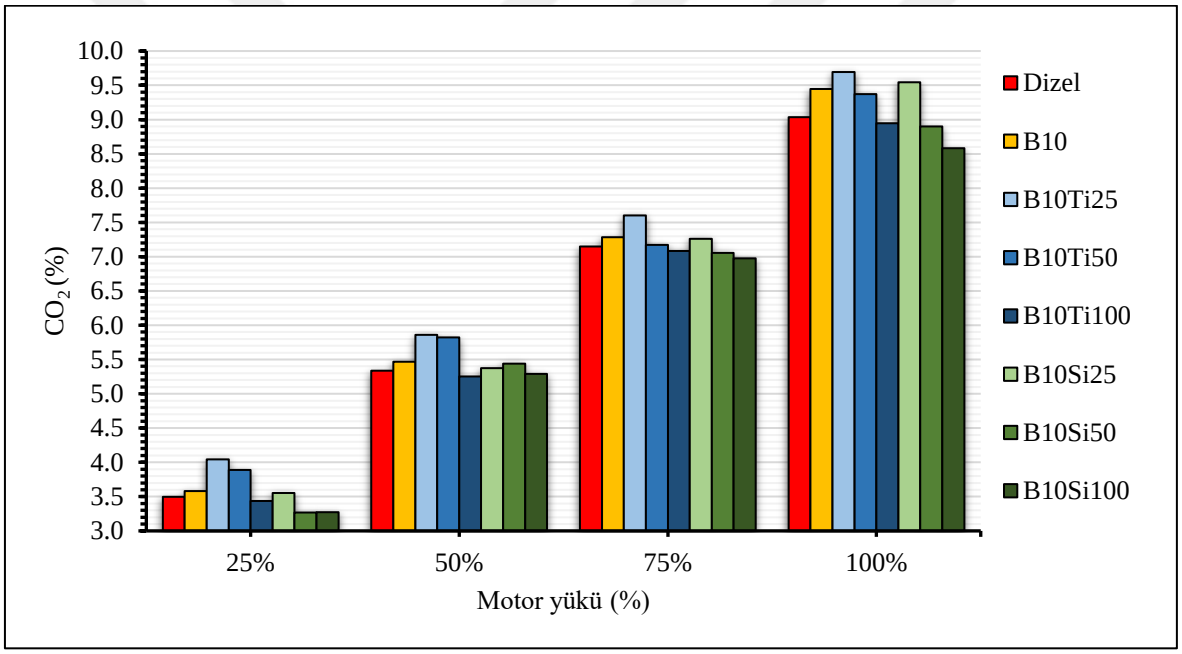
Şekil 4.9. Simülasyon sonuçlarına göre CO emisyonlarındaki değişim

Tüm motor yükleme koşullarında, atık kızartma yağı biyodizelinin dizel yakıtına eklenmesi CO emisyonlarını azaltmıştır. Aynı zamanda, B10 yakıtına eklenen SiO_2 ve TiO_2 nanopartiküllerinin CO emisyonlarını belirgin bir şekilde azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, tüm motor yüklerinde nanopartikül konsantrasyonunun artmasıyla CO emisyonundaki azalmanın devam ettiği gözlemlenmiştir. Simülasyon neticesinde, En düşük CO emisyon değerleri, %25 motor yükünde B10Si100, B10Ti100, B10Si50, B10Ti50, B10Si25 ve B10Ti25, B10 ve D100 yakıtları için sırasıyla %0,043, %0,047, %0,049, %0,054, %0,069, %0,089, %0,129 ve %0,137 olarak elde edilmiştir. Motorun farklı yük koşullarında elde ettiği en yüksek değerler ise %100 motor yükünde D100, B10, B10Ti25, B10Si25, B10Ti50,

B10Si50, B10Ti100, B10Si100 ve yakıtları için sırasıyla %0,55, %0,52, %0,47, %0,44, %0,40, %0,38, %0,37 ve %0,32 olarak kaydedilmiştir.

CO_2 emisyonları

AVL Boost yazılımı, CO_2 emisyon değerlerini tahmin etmek için yakıt kütle akışı, yakıtın karbon içeriği ve yanma verimliliği gibi faktörleri kullanmaktadır. Üstelik, CO_2 emisyon miktarının doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi için türbülans, ısı transferi ve gaz değişiminin etkileri de dikkate alınmaktadır [132]. Şekil 4.10'da tüm yakıt karışımlarına ait CO_2 emisyonları, değişen motor yükleri altında sunulmaktadır.



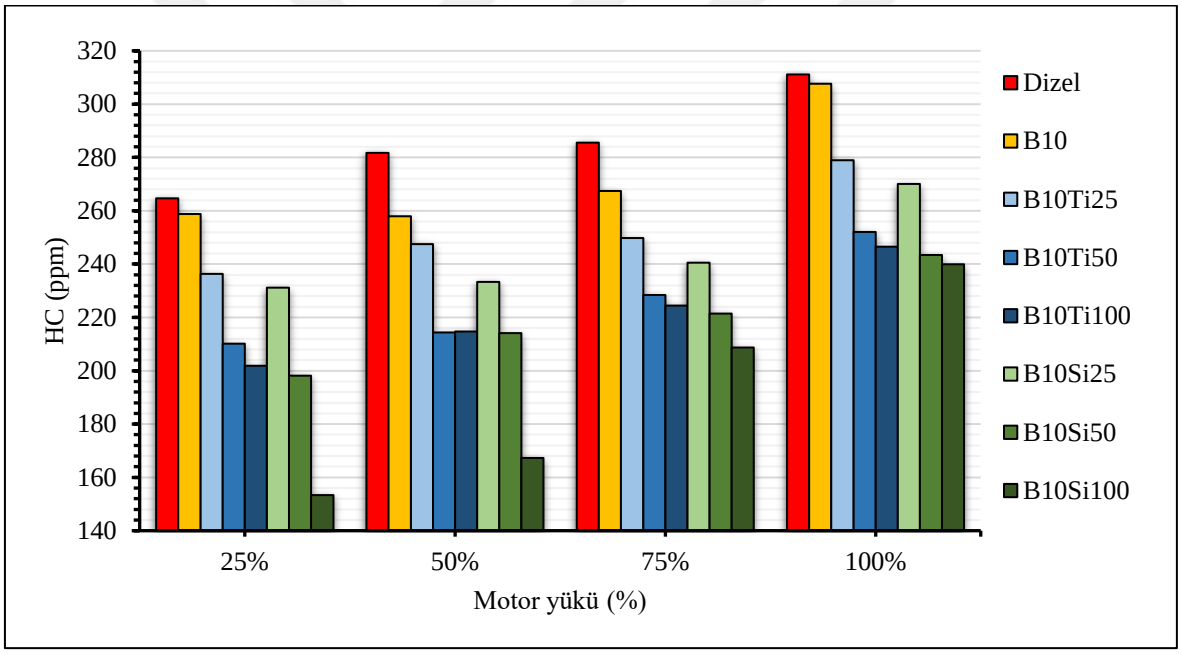
Şekil 4.10. Simülasyon sonuçlarına göre CO_2 emisyonlarındaki değişim

Simülasyon verileri incelendiğinde, tüm test yakıtlarında motor yükü arttıkça CO_2 emisyonlarının yükseldiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, tüm motor yükleme koşullarında, 25 ppm ve 50 ppm TiO_2 içeren yakıtlarının CO_2 emisyon değerleri, diğer tüm yakıt karışımlarına kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. En yüksek CO_2 emisyon değerleri %100 motor yüklerinde B10Ti25, B10Ti50, B10, B10Si25, D100, B10Ti100, B10Si50 ve B10Si100 yakıtları için sırasıyla %9,69, %9,37, %9,46, %9,55, %9,03, %8,94, %8,89 ve %8,58 olarak elde edilmiştir. En düşük değerler ise %25 motor yüklerinde B10Si100, B10Si50, B10Ti100, D100, B10Si25, B10, B10Ti50 ve B10Ti25 yakıtları için

sırasıyla %3,27, %3,26, %3,43, %3,49, %3,55, %3,57, %3,89 ve %4,04 olarak kaydedilmiştir.

HC emisyonları

AVL Boost yazılımında kullanılan HC emisyon modelleme yaklaşımı, yanmamış HC oluşturulması ve uzaklaştırılmasına odaklanan bir matematiksel modelleme yöntemine dayanmaktadır. Bu yaklaşım, HC emilim mekanizması ve HC past-oksidasyon mekanizması ve çatlama mekanizması gibi faktörleri ele almaktadır [83]. Emisyonların modellemesi sonucunda elde edilen tüm yakıt karışımlarına ait HC emisyon değerleri, değişen motor yüklerine bağlı olarak Şekil 4.11'de sunulmaktadır.



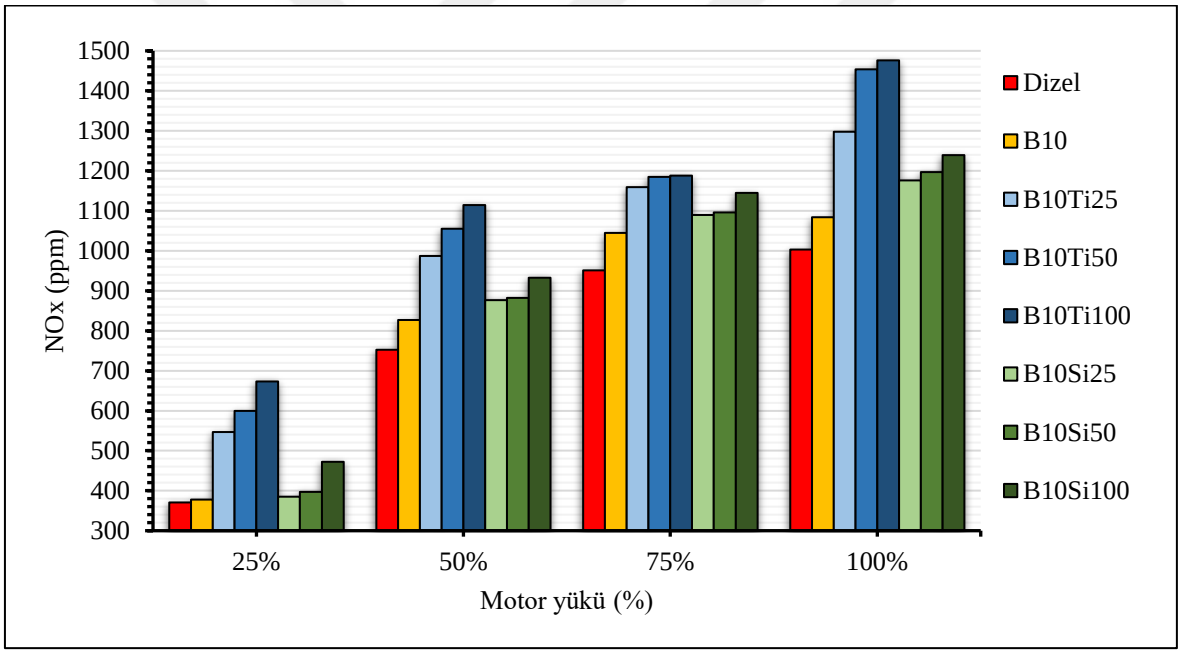
Şekil 4.11. Simülasyon sonuçlarına göre HC emisyonlarındaki değişim

Tüm değerlendirilen yakıtlarda, motor yükü arttıkça HC emisyonlarının arttığı gözlemlenmiştir. Tüm motor yükleme koşullarında atık kızartma yağı biyodizelinin dizel yakıtına eklenmesi HC emisyonlarını hafif bir şekilde azaltmıştır. Ayrıca nanopartikül içeren yakıtlarının HC emisyonlarını belirgin bir şekilde azalttığı görülmüştür. En düşük HC emisyon değerleri %25 motor yükünde gerçekleşmiş olup, B10Si100, B10Si50, B10Ti100, B10Ti50, B10Si25, B10Ti25, B10 ve D100 yakıtları için sırasıyla 153,4 ppm, 198,1 ppm, 201,8 ppm, 210,1 ppm, 231,2 ppm, 236,3 ppm, 258,7 ppm ve 264,6 ppm olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte, en yüksek HC emisyon değerleri %100 motor yükünde, D100,

B10, B10Ti25, B10Si25, B10Ti50, B10Ti100, B10Si50 ve B10Si100 yakıtları için sırasıyla 311,2 ppm, 307,6 ppm, 278,9 ppm, 270,2 ppm, 252,1 ppm, 246,5 ppm, 243,3 ppm ve 239,9 ppm olarak hesaplanmıştır.

NOx emisyonları

AVL Boost yazılımı, yanma süreci esnasında NOx oluşum oranlarını belirlemek için genişletilmiş Zeldovich mekanizmasına dayanan bir matematiksel model kullanmaktadır. Bu model, yanma odasındaki değişken sıcaklık, basınç ve gaz bileşimi parametrelerini dikkate alarak NOx emisyonlarını tahmin etmektedir. Şekil 4.12'de tüm yakıt karışımlarına ait NOx emisyonları, değişen motor yükleri altında göstermektedir.



Şekil 4.12. Simülasyon sonuçlarına göre NOx emisyonlarındaki değişim

Sayısal çalışmanın sonuçlarına göre, D100 yakıtının kullanımı, diğer tüm yakıt karışımlarına kıyasla daha düşük NOx emisyon değerlerine sahiptir. Bununla birlikte, tüm motor yüklerinde SiO_2 ve TiO_2 nanopartiküllerinin B10 yakıtına ilavesi, NOx emisyonlarının önemli ölçüde artmasına sebep olmuştur. Şekil 4.12'de görüldüğü üzere, en düşük NOx emisyon değerleri %25 motor yükünde gerçekleşmiş olup, D100, B10, B10Si25, B10Si50, B10Si100, B10Ti25, B10Ti50 ve B10Ti100 yakıtları için sırasıyla 370,5 ppm, 377,9 ppm, 385,1 ppm, 396,7 ppm, 472,3 ppm, 546,9 ppm, 599,4 ppm ve 673,6 ppm olarak elde edilmiştir. Diğer taraftan, en yüksek NOx emisyon değerleri %100 motor yükünde

gözlemlenmiş olup, B10Ti100, B10Ti50, B10Ti25, B10Si100, B10Si50, B10Si25, B10 ve D100 yakıtları için sırasıyla 1476,5 ppm, 1453,7 ppm, 1297,2 ppm, 1239,1 ppm, 1197,8 ppm, 1175,6 ppm, 1084,2 ppm ve 1002,9 ppm olarak kaydedilmiştir.

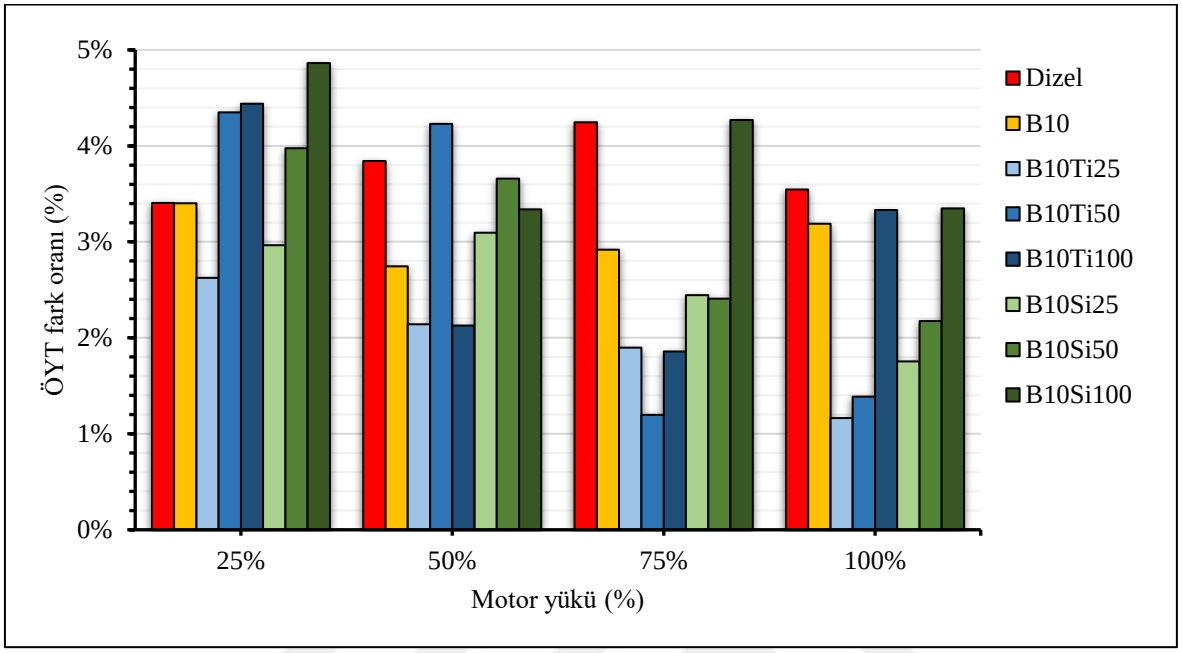
4.3. Deneysel ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması

Bu tez çalışmasında, dizel ile biyodizel karışımına eklenen SiO_2 ve TiO_2 nanopartiküllerinin, dizel bir motorun performansı ve emisyonları üzerindeki etkileri deneysel ve sayısal yöntemlerle araştırılmıştır. Deneysel çalışması, gerçek dünya koşullarında elde edilen sonuçları somutlaştırırken sayısal simülasyonlar bu etkileri farklı bir perspektiften değerlendirme imkânı sunmuştur. Deneysel motor testleri, motorun fiziksel performansını, yakıt tüketimini ve emisyonları doğrudan ölçerek nanopartikül katkılarının etkilerini belirleme konusunda değerli veriler sağlamıştır. Sayısal simülasyonlar, motorun içsel işleyişini daha derinlemesine anlamamıza ve nanopartikül katkılarının etkilerini farklı çalışma koşullarında değerlendirmemize imkân tanımıştır. Deneysel ve sayısal çalışmaların sonuçları arasında yapılan karşılaştırmalarda, sayısal simülasyon sonuçları, %1 ila %5 arasında değişen bir farkla deneysel çalışmaların sonuçlarıyla uyumlu bulunmuştur. Sayısal verilerin, deneysel sonuçlarla uyumlu olması, çalışmanın güvenilirliğini ve geçerliliğini artırırken çalışmanın genel anlamda yüksek bir kaliteye ve doğruluğa sahip olduğunu kanıtlamıştır.

4.3.1. Özgül yakıt tüketimi

Bu çalışmada, dizel ile biyodizel karışımlarına SiO_2 ve TiO_2 nanopartiküllerinin eklenmesinin özgül yakıt tüketimi üzerindeki etkileri hem deneysel hem de sayısal yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Deneysel yöntemde, farklı yakıt karışımlarıyla çalıştırılan dizel motorunun özgül yakıt tüketimi değerleri çeşitli yük seviyelerinde ölçülmüştür. Sayısal yöntemde ise, aynı motorun özgül yakıt tüketimi değerleri bilgisayar simülasyonları kullanılarak tahmin edilmiştir. Deneysel ve sayısal yöntemlerin sonuçları arasındaki farklar, motor yüküne bağlı olarak Şekil 4.13'te grafiksel olarak gösterilmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçları karşılaştırıldığında, elde edilen bulguların %2 ila %5 arasında kabul edilebilir bir fark sergilediği görülmüştür. Örneğin, deneysel çalışmada %100 motor yüklerinde elde edilen özgül yakıt tüketimi değerleri D100, B10Si100, B10Ti100, B10, B10Si50, B10Ti50, B10Si25 ve B10Ti25 yakıtları için sırasıyla 0,246 kg/kWh, 0,249

kg/kWh, 0,252 kg/kWh, 0,255 kg/kWh, 0,256 kg/kWh, 0,256 kg/kWh, 0,259 kg/kWh ve 0,261 kg/kWh olarak belirlenmiştir.



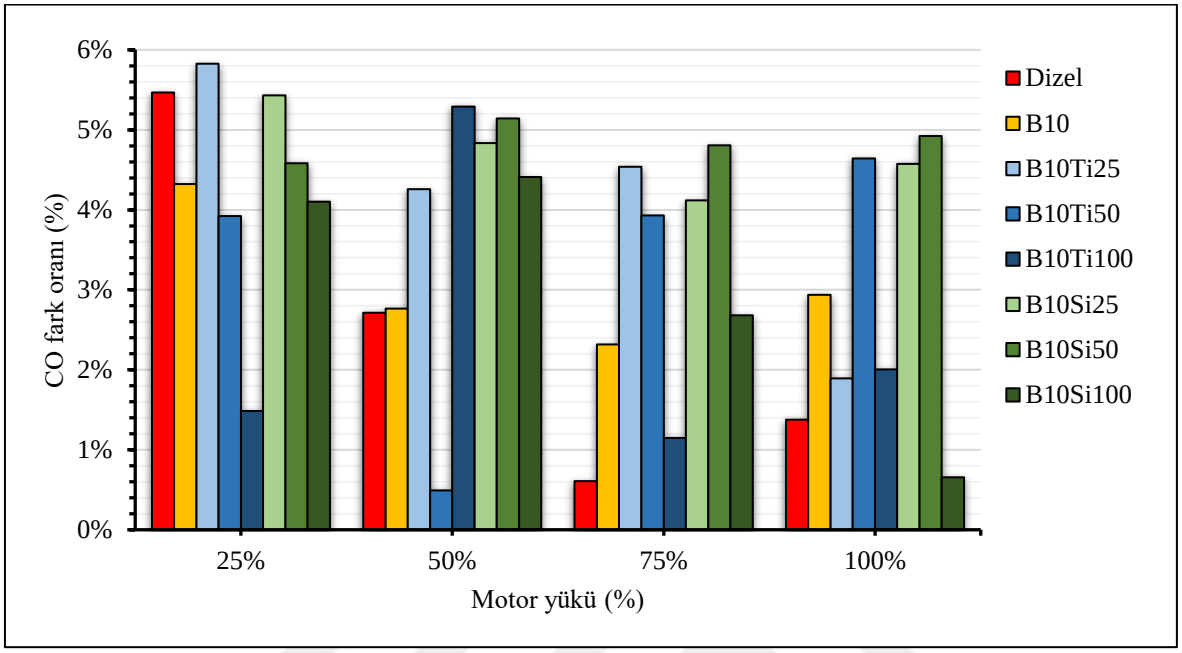
Şekil 4.13. Deneysel ve sayısal çalışmalar arasındaki özgül yakıt tüketimi farkı

Sayısal çalışmada, aynı motor yükü koşullarında bu değerler sırasıyla 0,237 kg/kWh, 0,241 kg/kWh, 0,244 kg/kWh, 0,247 kg/kWh, 0,251 kg/kWh, 0,253 kg/kWh, 0,255 kg/kWh ve 0,258 kg/kWh olarak tahmin edilmiştir. Üstelik, motor yükünün arttırılmasıyla birlikte, elde edilen sonuçlar arasındaki farkın azaldığı gözlemlenmiştir. Örneğin, %100 motor yükünde deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yakıt tüketimi sonuçları arasındaki fark %1,5 ila %3,5 iken, %25 motor yükünde bu fark %5,5'e kadar yükselmiştir. Sayısal çalışmanın sonuçları, motor testleriyle elde edilen özgül yakıt tüketimi verilerini sağlam bir şekilde doğrulamıştır.

4.3.2. CO emisyonları

Tüm yakıt karışımlarına ait CO emisyonlarının deneysel ve sayısal sonuçları, motor yüküne bağlı olarak Şekil 4.14'te karşılaştırılmıştır. CO emisyonlarının deneysel ve sayısal sonuçları arasındaki karşılaştırmada, gözlemlenen farklar genel olarak %0,4 ila %5,8 arasında değişim göstermiştir. Şekil 4.14'te görüldüğü üzere, motor yükünün artmasıyla birlikte, deneysel ve sayısal CO emisyon sonuçları arasındaki farkın azalma eğilimi göstermiştir. Örneğin, %25 motor yükünde, deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen CO emisyon sonuçları

arasındaki fark ortalama %4,33 iken, %100 motor yükünde bu fark ortalama %2,28'e kadar düşmüştür.



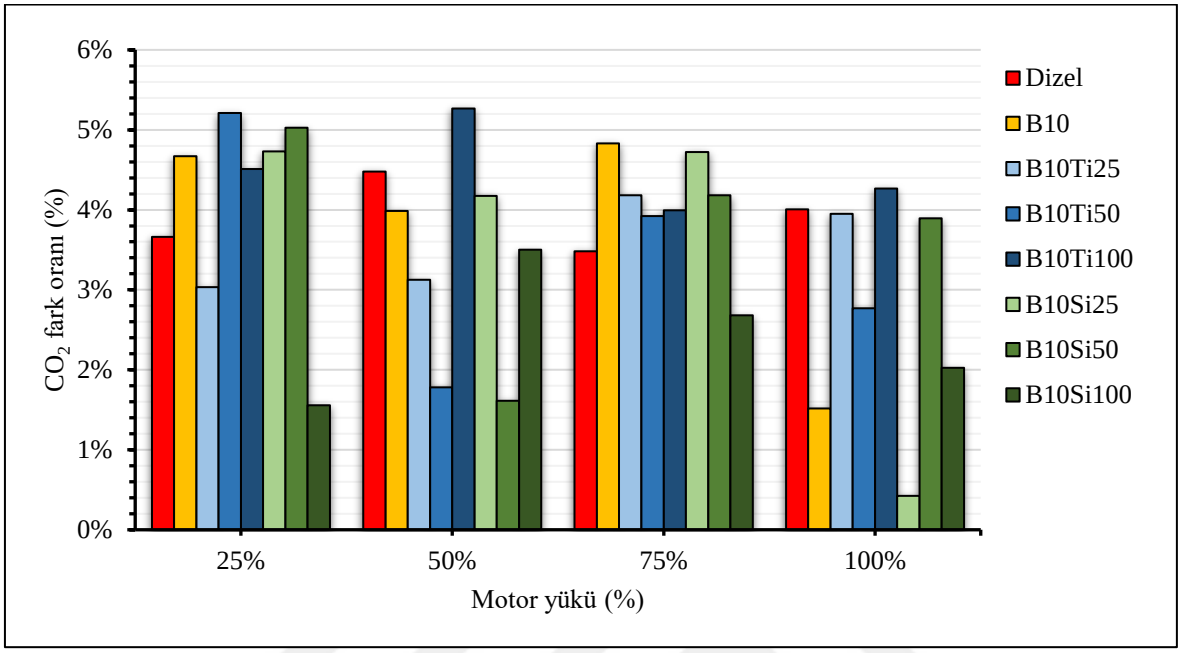
Şekil 4.14. Deneysel ve sayısal çalışmalar arasındaki CO emisyon farkı

Dolayısıyla, deneysel çalışmada %100 motor yüklerinde elde edilen CO emisyon değerleri, B10Si100, B10Ti100, B10Si50, B10Ti50, B10Si25, B10Ti25, B10 ve D100 yakıtları için sırasıyla %0,34, %0,38, %0,41, %0,42, %0,46, %0,49, %0,53 ve %0,57 olarak kaydedilmişken, aynı yükleme koşullarında sayısal çalışmada sırasıyla %0,32, %0,37, %0,38, %0,40, %0,44, %0,47, %0,52 ve %0,55 olarak hesaplanmıştır. Bu bulgular, CO emisyonlarındaki deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki genel uyumu ve kararlılığı göstermektedir.

4.3.3. CO_2 emisyonları

Yapılan deneysel çalışma kapsamında, tüm yakıt karışımlarına ait CO_2 emisyon değerleri, değişen yükleme koşullarında ölçülmüştür. Diğer taraftan, sayısal çalışma kapsamında aynı motorun CO_2 emisyon değerleri, bilgisayar simülasyonları aracılığıyla öngörülmüştür. Tüm yakıt karışımlarına ait CO_2 emisyonlarının deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki farklar, motor yüküne bağlı olarak Şekil 4.15'te gösterilmiştir. CO_2 emisyonlarının deneysel ve sayısal verileri karşılaştırıldığında, %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerindeki ortalama

farklar sırasıyla %4,1, %3,5, %4,2 ve %2,8 olarak tespit edilmiştir. Bu değerler, CO_2 emisyonlarındaki deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki genel tutarlılığı göstermektedir.



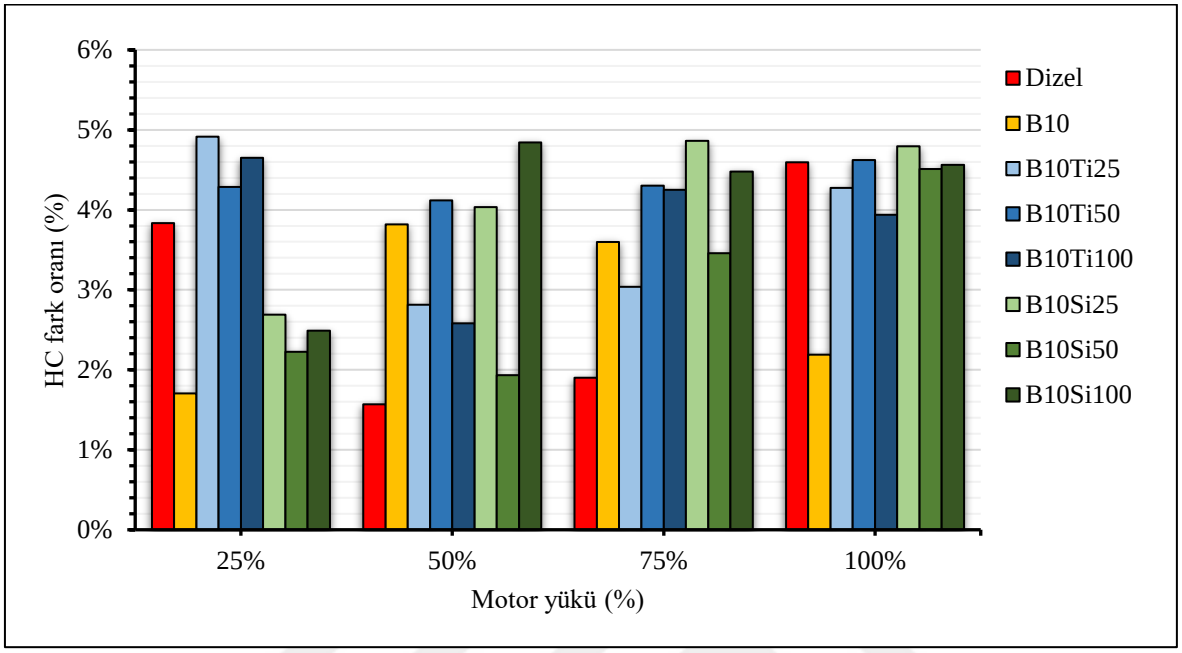
Şekil 4.15. Deneysel ve sayısal çalışmalar arasındaki CO_2 emisyon farkı

CO_2 emisyonlarına ait deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki en büyük fark %75 motor yükünde gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmada %75 motor yükünde elde edilen CO emisyon değerleri B10Si100, B10Si50, B10Ti100, D100, B10Si25, B10, B10Ti50 ve B10Ti25 yakıtları için sırasıyla %7,15, %7,33, %7,37, %7,41, %7,62, %7,65, %7,74 ve %7,93 olarak ölçülmüştür. Sayısal çalışmada ise bu değerler sırasıyla %6,97, %7,05, %7,11, %7,16, %7,25, %7,28, %7,39 ve %7,65 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, sayısal çalışmanın elde ettiği verilerin, motor testleri sırasında ölçülen CO_2 emisyonlarını doğruladığını göstermektedir.

4.3.4. HC emisyonları

Şekil 4.16'da tüm yakıt karışımlarına ait deneysel ve sayısal HC emisyon sonuçları arasındaki farklar, motor yüküne bağlı olarak gösterilmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması sonucunda, %1,5 ila %4,9 arasında değişim gösterilen farklar gözlemlenmiştir. Özellikle motor yükünün artmasıyla birlikte, HC emisyonlarının deneysel ve sayısal sonuçları arasındaki farkların arttığı tespit edilmiştir. Örneğin, %25 motor yükünde, deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen HC emisyon sonuçları arasındaki

farkların ortalama %3,1 olduğu gözlemlenirken %100 motor yükünde bu farkların ortalama %4,2'ye kadar yükseldiği belirlenmiştir.



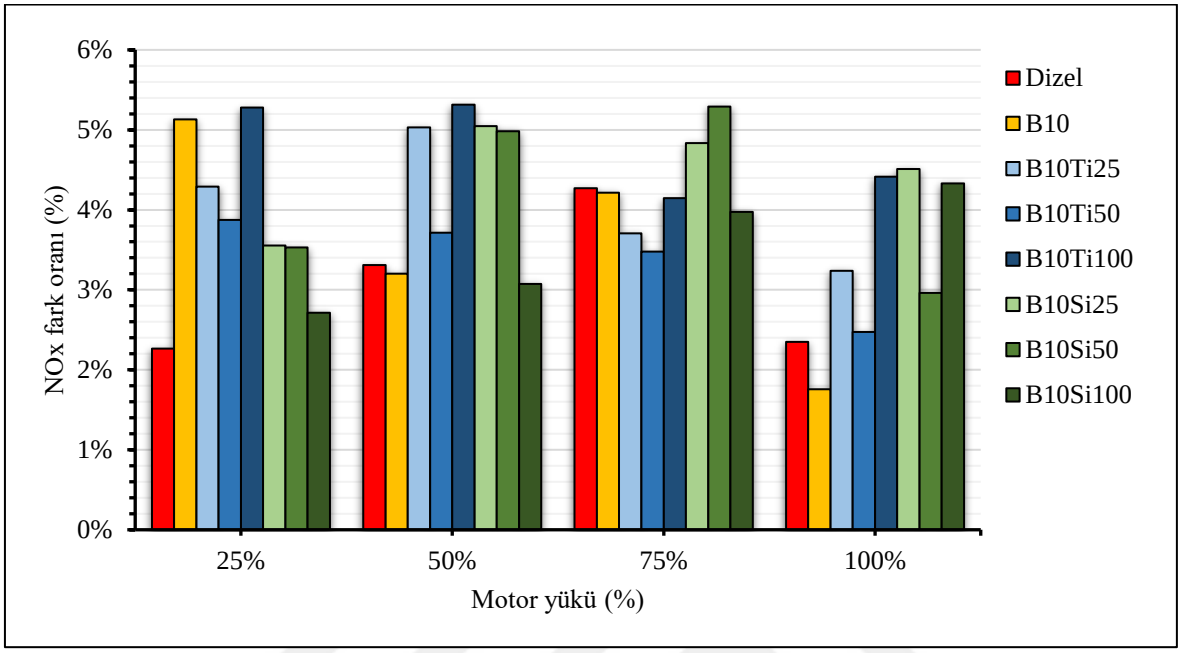
Şekil 4.16. Deneysel ve sayısal çalışmalar arasındaki HC emisyon farkı

Deneysel çalışmada %100 motor yüklerinde elde edilen HC emisyon değerleri, B10Si100, B10Si50, B10Ti100, B10Ti50, B10Si25, B10Ti25, B10 ve D100 yakıtları için sırasıyla 251,4 ppm, 254,8 ppm, 256,6 ppm, 264,3 ppm, 283,6 ppm, 291,3 ppm, 314,5 ppm ve 326,1 ppm olarak kaydedilmişken, sayısal çalışmada sırasıyla 239,9 ppm, 243,3 ppm, 246,5 ppm, 252,1 ppm, 270,1 ppm, 278,9 ppm, 307,6 ppm ve 311,2 ppm olarak hesaplanmıştır. Bu bulgular, sayısal çalışmanın elde ettiği verilerin, motor testleri sırasında ölçülen HC emisyonlarını doğruladığını göstermektedir. Aynı zamanda sayısal simülasyonun HC emisyonlarını doğru bir şekilde modelleyebilme yeteneğini ortaya koymaktadır.

4.3.5. NOx emisyonları

Tüm yakıt karışımlarına ait NOx emisyonlarının deneysel ve sayısal sonuçları arasındaki farklar, motor yüküne bağlı olarak Şekil 4.17'de gösterilmiştir. NOx emisyonlarının deneysel ve sayısal verileri arasındaki karşılaştırmada, gözlemlenen farklar genellikle %1,7 ila %5,2 arasında değişiklik göstermiştir. Şekil 4.17'de görüldüğü üzere, motor yükü arttıkça deneysel ve sayısal NOx emisyon sonuçları arasındaki fark genellikle artmıştır. Örneğin, %25 motor

yükünde deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yakıt tüketimi sonuçları arasındaki ortalama fark %4,4 iken, %100 motor yükünde bu fark %3,2'ye kadar azalmıştır.



Şekil 4.17. Deneysel ve sayısal çalışmalar arasındaki NOx emisyon farkı

Dolayısıyla, NOx emisyonlarına ait deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki en küçük fark %100 motor yükünde gözlemlenmiş olup deneysel çalışmada NOx emisyon değerleri B10Ti100, B10Ti50, B10Ti25, B10Si100, B10Si50, B10Si25, B10 ve D100 yakıtları için sırasıyla 1544,7 ppm, 1490,5 ppm, 1340,7 ppm, 1295,2 ppm, 1233,5 ppm, 1231,3 ppm, 1103,6 ppm ve 1027,1 ppm olarak ölçülmüştür. Sayısal çalışmada ise bu değerler sırasıyla 1476,5 ppm, 1453,7 ppm, 1297,2 ppm, 1239,1 ppm, 1197,8 ppm, 1175,6 ppm, 1084,2 ppm ve 1002,9 ppm olarak tahmin edilmiştir. Elde edilen bulgular, sayısal simülasyonun NOx emisyonları üzerinde uygun tahminlerde bulunma yeteneğini gösterirken aynı zamanda deneysel verileri doğrulamaktadır.

4.4. Termodinamik Analiz Bulguları

Bu tez çalışmasında, dizel yakıtı ile biyodizel karışımlarına eklenen SiO_2 ve TiO_2 nanopartiküllerinin, içten yanmalı motorların performansı ve emisyonları üzerindeki etkileri incelenmektedir. Bu bağlamda, farklı nanopartikül konsantrasyonlarının dizel-biyodizel karışımlarına eklenmesiyle elde edilen yakıt karışımları, enerji, ekserji, eksergoekonomik ve eksergoçevresel analizlerle değerlendirilmiştir. Yakıt karışımlarının performans analizi, içten

yanmalı motorların enerji verimliliği üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ekserji analizi ile sistemdeki enerji kayıpları belirlenmiş ve eksergoekonomik analizle ekonomik açıdan etkin yakıt karışımları üzerinde odaklanmıştır. Eksergoçevresel analizi ise yakıt karışımlarının çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini belirlemeye yönelik detaylı bir perspektif sunmuştur.

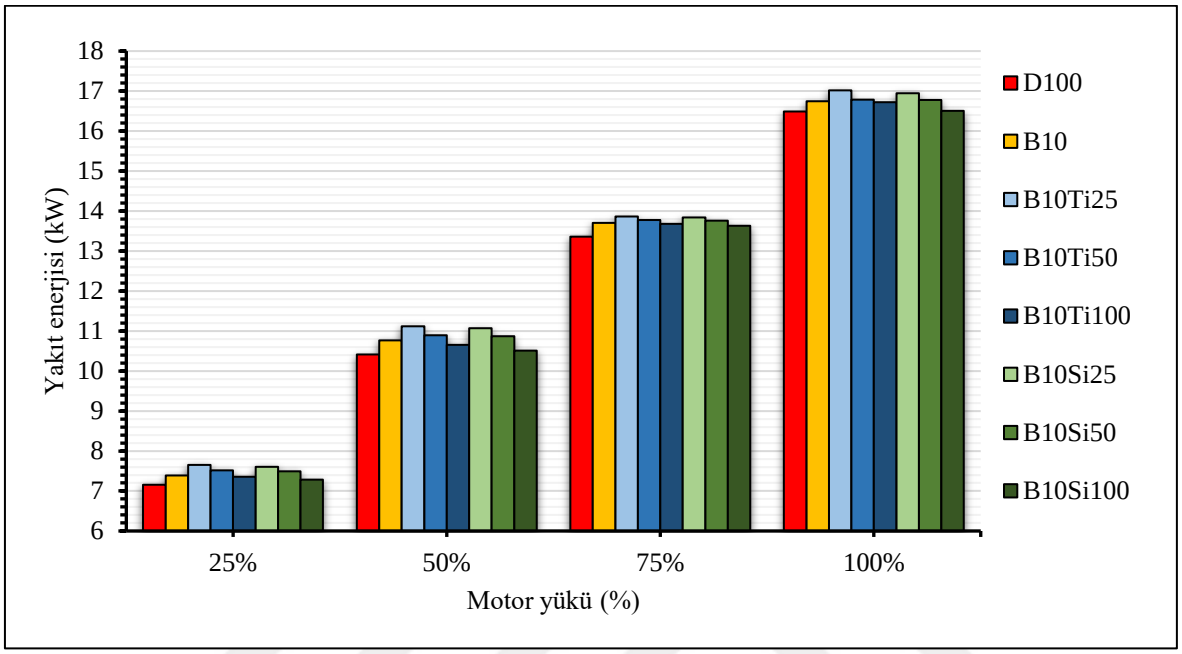
4.4.1. Enerji analizi bulguları

Yapılan çalışmanın enerji analizi çerçevesinde, tüm yakıt karışımlarına ait deneysel veriler kullanılarak yakıt enerjisi, egzoz enerjisi, soğutma suyu enerjisi, enerji kayıpları ve ısıl verim değerleri, farklı motor yükleme koşullarında hesaplanmıştır. Bu analizler, yakıt karışımlarına nanopartikül katkı oranlarının belirlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır.

Yakıt enerjisi

Yakıt enerjisi, içten yanmalı motor sistemlerinde meydana gelen yakıt yanması sonucu ortaya çıkan enerji akışını temsil etmektedir. Test edilen tüm yakıt karışımlarına ait yakıt enerjisi Eş. 3.39 ile hesaplanmış ve motor yüküne bağlı olarak Şekil 4.18'te gösterilmiştir. Tüm motor yük seviyelerinde, D100 yakıtının kullanımıyla elde edilen yakıt enerjisi değerlerinin diğer tüm yakıt karışımlarına kıyasla daha düşük olduğu gözlenmiş olup %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla 7.15 kW, 10.41 kW, 13.36 kW ve 16.48 kW olarak hesaplanmıştır. Üstelik tüm yakıt karışımları üzerinde yapılan gözlemler, motor yükü arttıkça yakıt enerjisinin de arttığını ortaya koymaktadır. Dizel yakıta atık kızartma yağı eklenmesi, yakıt enerjisini artırmıştır. Bu artışlar, 25%, 50%, 75% ve 100% motor yüklerinde sırasıyla %3,3, %3,1, %2,6 ve %1,4 olarak kaydedilmiştir. Literatüre göre, sistemdeki enerji akımı, özgül yakıt tüketimi miktarıyla doğrudan ilişkilidir. Şekil 4.2'de gözlemlendiği gibi, biyodizel içeren yakıt karışımlarının özgül yakıt tüketimi değerleri genellikle dizel yakıtına kıyasla daha yüksektir. Bu durum, B10 yakıtın enerji akışının, dizel yakıta göre artmasına neden olmuştur. Diğer yandan, B10 yakıtına 25 ppm ve 50 ppm SiO_2 nanopartikül eklenmesi, yakıt enerjisi değerlerini sırasıyla %2,7 ve %1,4'e kadar artırırken aynı konsantrasyondaki TiO_2 nanopartikül ilavesi de bu değerleri %3,3 ve %1,6 oranlarına kadar artırmıştır. Ancak 100 ppm oranında SiO_2 ve TiO_2 nanopartikülleri içeren yakıtlar kullanıldığında, yakıt enerjisi B10 yakıtına göre sırasıyla %2,5 ve %1,1'e kadar azalmıştır. Örneğin, %75 motor yükünde elde edilen yakıt enerjisi değerleri, B10Si25, B10Si50,

B10Ti25 ve B10Ti50 yakıtları için sırasıyla 13,83 kW, 13,76 kW, 13,87 kW ve 13,79 kW olarak belirlenmişken, aynı koşullarda B10Si100, B10Ti100 yakıtları için sırasıyla 13,63 kW ve 13,67 kW olarak hesaplanmıştır.



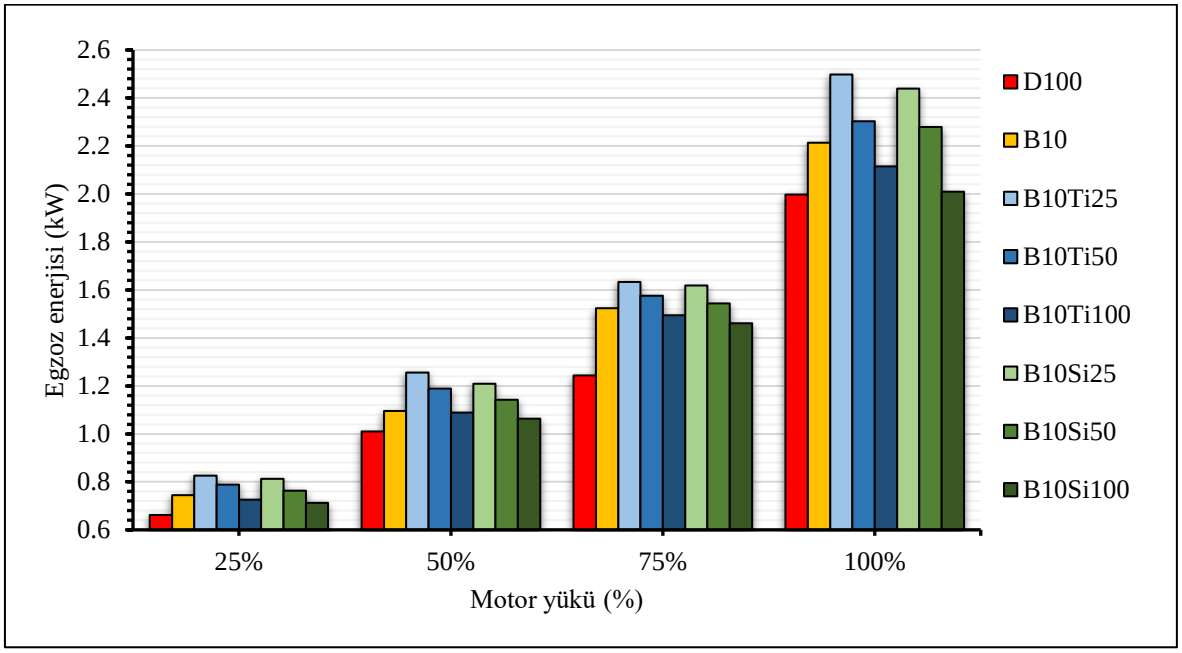
Şekil 4.18. Motor yüküne bağlı olarak enerji akımı değişimi

En düşük yakıt enerjisi değerleri %25 motor yükünde elde edilmiş olup D100, B10Si100, B10Ti100, B10, B10Si50, B10Ti50, B10Si25 ve B10Ti25 yakıtları için sırasıyla 7,15 kW, 7,28 kW, 7,35 kW, 7,39 kW, 7,48 kW, 7,51 kW, 7,60 kW ve 7,65 kW olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte en yüksek yakıt enerjisi değerleri %100 motor yükünde, B10Ti25, B10Si25, B10Ti50, B10Si50, B10, B10Ti100, B10Si100 ve D100 yakıtları için sırasıyla 17,02 kW, 16,94 kW, 16,79 kW, 16,77 kW, 16,74 kW, 16,71 kW, 16,53 kW ve 16,48 kW olarak belirlenmiştir.

Egzoz enerjisi

Egzoz enerjisi, içten yanmalı motorlarda yakıtın yanma sürecinden kaynaklanan ve egzoz gazları ile birlikte atmosfere atılan enerjiyi temsil etmektedir. Enerji analizi kapsamında, her bir yakıt karışımına ait egzoz enerjisi hesaplanmış ve motor yüküne bağlı olarak Şekil 4.19'da sunulmuştur. Değerlendirilen tüm yakıtlarda motor yükü arttıkça egzoz enerjisinin yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu durumun nedeni, yüksek motor yüklerinde egzoz çıkış sıcaklığı ile egzoz gazının kalorimetreye giriş sıcaklığı değerlerinin artmasıdır. D100

yakıtına ait egzoz enerjisinin farklı motor yük seviyelerindeki değerleri incelendiğinde, %25 motor yükünde 0.66 kW, %50 motor yükünde 1.01 kW, %75 motor yükünde 1.24 kW ve %100 motor yükünde 1.98 kW olarak belirlenmiştir. Dizel yakıta atık kızartma yağı eklenmesi yakıtın egzoz enerjisini %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla %11,08, %7,74, %18,39 ve %9,81 oranlarına kadar arttırmıştır. Bunun yanı sıra, B10 yakıtına eklenen farklı miktarlarda TiO_2 ve SiO_2 nanopartiküllerinin egzoz enerjisi üzerinde farklı etkilere sahip olduğu gözlemlenmiştir.



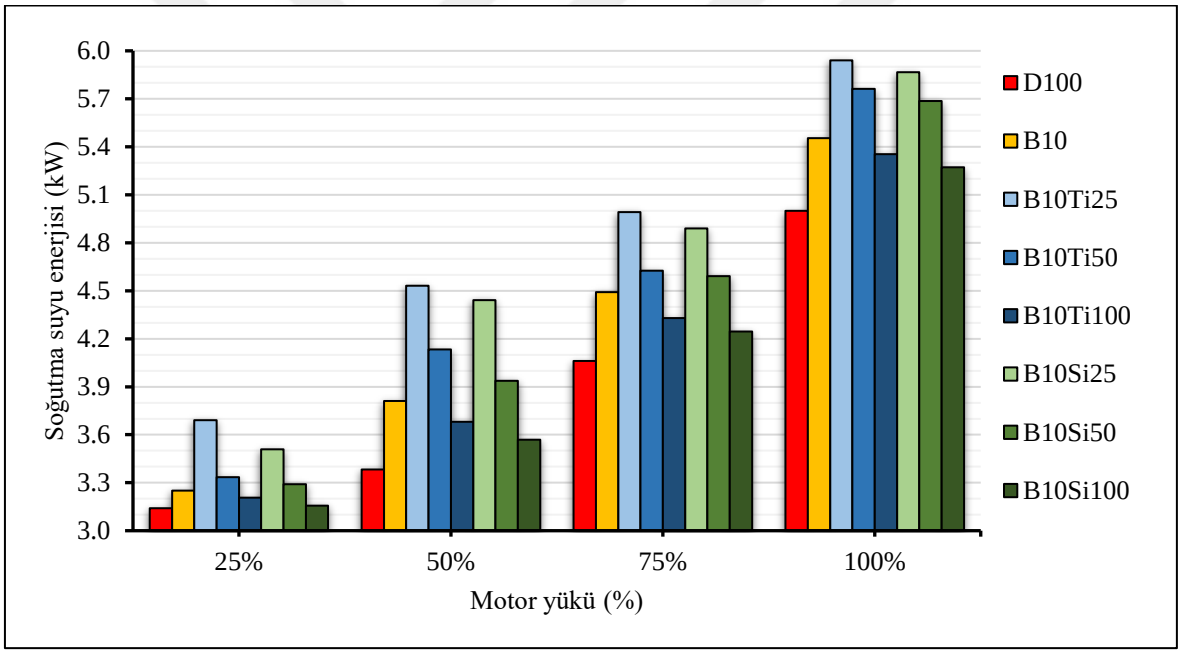
Şekil 4.19. Motor yüküne bağlı olarak egzoz enerjisi değişimi

Şekil 4.19'da görüldüğü üzere, 25 ppm ve 50 ppm TiO_2 ve SiO_2 nanopartikülleri içeren yakıt karışımlarının egzoz enerjisi, B10 yakıtına göre artış gösterirken 100 ppm nanopartikül eklenmesi egzoz enerjisini azaltmıştır. Örnek olarak %75 motor yükleme koşullarında, B10Si25, B10Si50, B10Ti25 ve B10Ti50 yakıtlarının egzoz enerjisi, B10 yakıtına göre sırasıyla %5,82, %1,29, %6,64 ve %3,28 oranlarında artarken B10Si100 ve B10Ti100 yakıtlarında bu değer sırasıyla %4,17 ve %1,90 oranlarında azalmıştır. Literatürde yer alan araştırmalara göre, bu nanopartiküllerin uygun oranlarda eklenmesi, daha düşük yanma sıcaklıklarına ve ateşleme gecikmelerine neden olarak daha düşük egzoz enerjisi seviyelerine yol açmaktadır [29]. Yapılan analizler neticesinde, en yüksek egzoz enerjisi %100 motor yükünde B10Ti25, B10Si25, B10Ti50, B10Si50, B10, B10Ti100, B10Si100 ve D100 yakıtları için sırasıyla 2,49 kW, 2,43 kW, 2,30 kW, 2,27 kW, 2,21 kW, 2,10 kW, 2,02 kW ve 1,97 kW olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte en düşük değerler %25 motor

yüklerinde D100, B10Si100, B10Ti100, B10, B10Si50, B10Ti50, B10Si25 ve B10Ti25 yakıtları için sırasıyla 0,66 kW, 0,71 kW, 0,72 kW, 0,75 kW, 0,77 kW, 0,79 kW, 0,82 kW ve 0,83 kW olarak tespit edilmiştir.

Soğutma suyu enerjisi

Soğutma suyu enerjisi, içten yanmalı motorlarda kullanılan soğutma sistemi tarafından taşınan ve yönetilen termal enerjiyi ifade etmektedir. İncelenen tüm yakıt karışımlarına ait soğutma suyu enerjisi, Eş. 3.43 kullanılarak hesaplanmış ve motor yüküne bağlı olarak Şekil 4.20'de sunulmuştur. Tüm motor yük seviyelerinde D100 yakıtının kullanımıyla elde edilen soğutma suyu enerjisi, diğer tüm yakıt karışımlarına kıyasla daha düşük bulunmuştur.



Şekil 4.20. Motor yüküne bağlı olarak soğutma suyu enerjisi değişimi

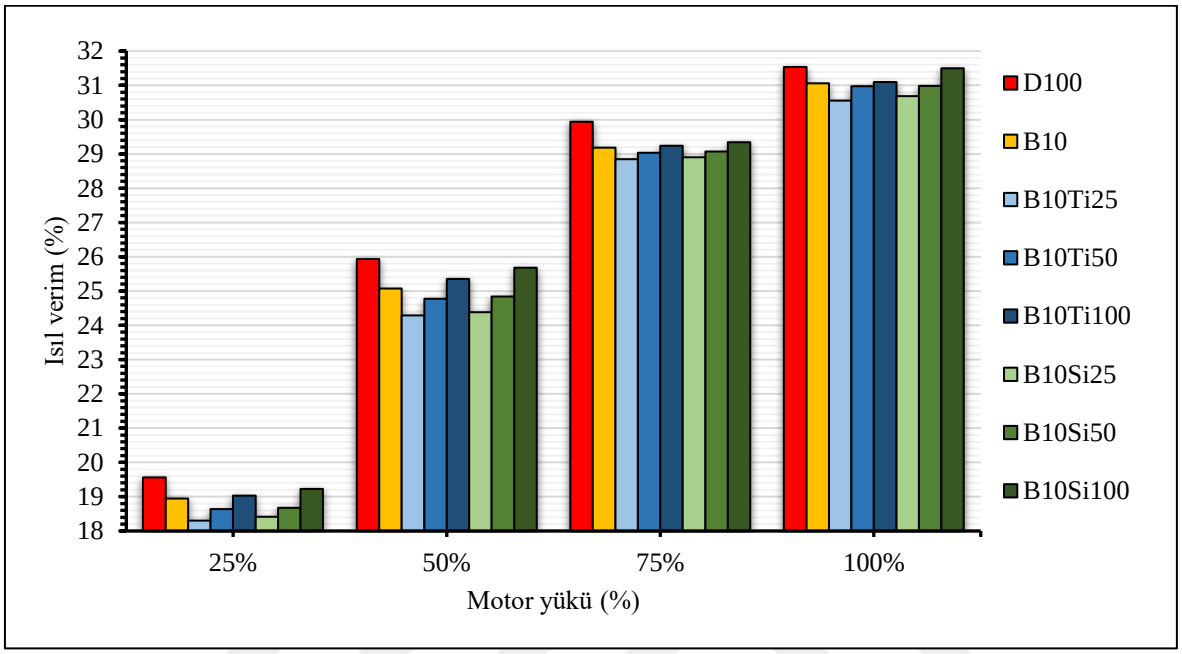
Tüm yakıt karışımlarında motor yükü arttıkça soğutma suyu enerjisinin da arttığı belirlenmiştir. Bu bağlamda, %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla 3.13 kW, 3.38 kW, 4.06 kW ve 4.98 kW olarak hesaplanmıştır. Dizel yakıta atık kızartma yağı eklenmesinin, soğutma suyu enerjisini artırdığı tespit edilmiştir. Bu artışlar, 25%, 50%, 75% ve 100% motor yüklerinde sırasıyla %3,40, %11,21, %9,62 ve %8,33 olarak bulunmuştur. Dizel ile biyodizel karışımına eklenen 25 ppm ve 50 ppm SiO_2 nanopartikülleri, soğutma suyu enerjisini sırasıyla %14,21 ve %4,32 oranlarına kadar artırırken aynı konsantrasyondaki TiO_2 nanopartikül ilavesi de bu değerleri sırasıyla %15,93 ve %7,80

seviyelerine kadar artırmıştır. Bununla birlikte, 100 ppm oranında SiO_2 ve TiO_2 nanopartikülleri içeren yakıtların kullanımı, soğutma suyu enerjisini B10 yakıtına göre sırasıyla %6,34 ve %3,62'ye kadar azaltmıştır. %25 motor yükünde elde edilen soğutma suyu enerjisi değerleri incelendiğinde, B10 yakıtına ait soğutma suyu enerjisi 3,25 kW iken, B10Si25, B10Si50, B10Ti25 ve B10Ti50 yakıtları için sırasıyla 3,51 kW, 3,29 kW, 3,69 kW ve 3,33 kW olarak belirlenmiştir. Aynı motor yükleme koşullarında B10Si100 ve B10Ti100 yakıtları için bu değerler sırasıyla 3,16 kW ve 3,21 kW olarak hesaplanmıştır. Soğutma suyu enerjisinin en düşük değerleri %25 motor yükünde elde edilmiş olup, D100, B10Si100, B10Ti100, B10, B10Si50, B10Ti50, B10Si25 ve B10Ti25 yakıtları için sırasıyla 3,13 kW, 3,16 kW, 3,21 kW, 3,25 kW, 3,29 kW, 3,33 kW, 3,51 kW ve 3,69 kW olarak hesaplanmıştır. Diğer taraftan, en yüksek değerler %100 motor yükünde, B10Ti25, B10Si25, B10Ti50, B10Si50, B10, B10Ti100, B10Si100 ve D100 yakıtları için sırasıyla 5,94 kW, 5,86 kW, 5,76 kW, 5,68 kW, 5,45 kW, 5,36 kW, 5,27 kW ve 4,98 kW olarak belirlenmiştir.

Isıl verim

Isıl verim, içten yanmalı bir motorun yakıttan elde ettiği enerjinin mekanik işe dönüştürme kapasitesini gösteren bir parametredir. Bu verim, motordan elde edilen net mekanik enerjinin, toplam yakıt enerjisi ile olan etkileşimini ifade etmektedir. Yüksek ısıl verim değerleri, motordan alınan enerjinin daha etkili bir şekilde mekanik işe dönüştürüldüğünü göstermektedir. Yapılan çalışmanın enerji analizi çerçevesinde, her bir yakıt karışımına ait ısıl verim değerleri hesaplanmış ve motor yüküne bağlı olarak Şekil 4.21'de verilmiştir. İncelenen tüm yakıtlarda motor yükü arttıkça ısıl verimin arttığı gözlenmiştir. Tüm motor yük seviyelerinde, D100 yakıtının ısıl verim değerlerinin diğer tüm yakıt karışımlarına göre daha yüksek olduğu belirlenmiş olup %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla %19.56, %25,93, %29,97 ve %31,53 olarak hesaplanmıştır. Dizel yakıta atık kızartma yağı eklenmesinin, ısıl verim değerlerini azalttığı gözlemlenmiştir. Bu azalmalar, 25%, 50%, 75% ve 100% motor yüklerinde sırasıyla %3,18, %3,31, %2,52 ve %1,55 olarak belirlenmiştir. B10 yakıtına farklı miktarlarda eklenen SiO_2 ve TiO_2 nanopartiküllerinin ısıl verim üzerinde farklı etkilere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan gözlemler, yakıttaki nanopartikül miktarının arttırılmasının ısıl verimi artırıcı bir etki yarattığını ortaya koymuştur. Şekil 4.21'de görüldüğü üzere, 25 ppm ve 50 ppm SiO_2 ve TiO_2 nanopartikülleri içeren yakıt karışımlarının ısıl verimi, B10 yakıtına kıyasla azalmışken 100 ppm nanopartikül eklenmesi ısıl verimi artırmıştır. Örnek olarak, %50 motor yükleme koşullarında, B10Si25, B10Si50,

B10Ti25 ve B10Ti50 yakıtlarının ısıl verimi, B10 yakıtına göre sırasıyla %2,75, %0,92, %3,11 ve %1,17 oranlarında azalmışken, B10Si100 ve B10Ti100 yakıtlarında bu değer sırasıyla %2,37 ve %1,09 oranlarında artmıştır.



Şekil 4.21. Motor yüküne bağlı olarak ısıl verim değişimi

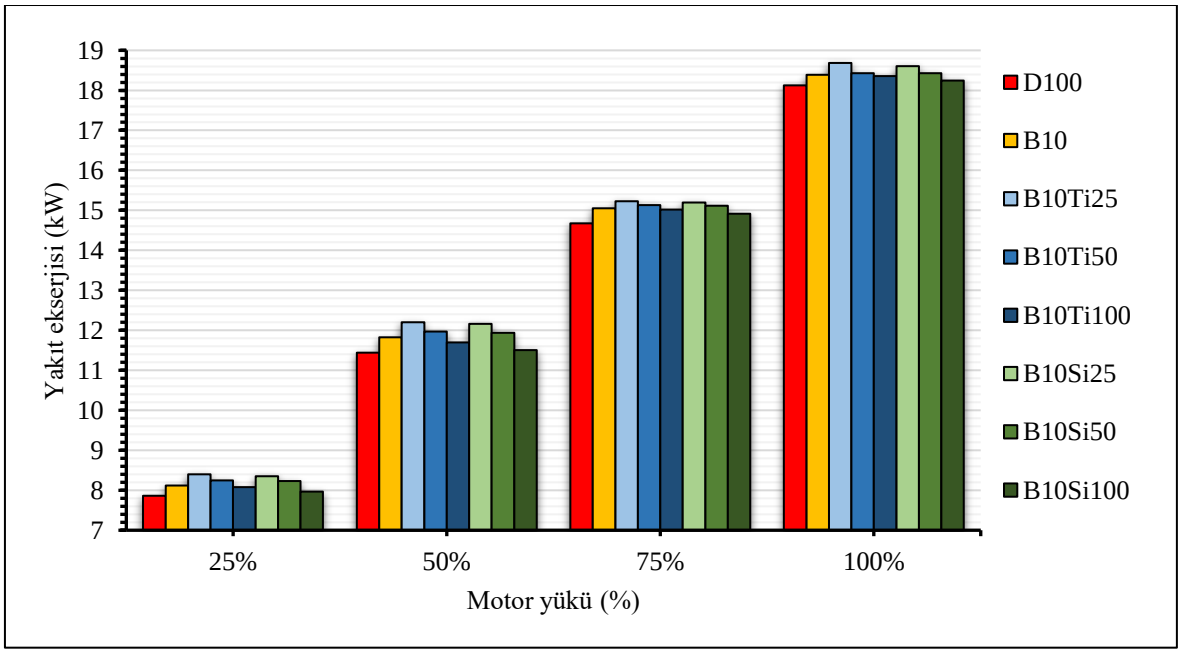
En yüksek ısıl verim değerleri %100 motor yükünde kaydedilmiş olup D100, B10Si100, B10Ti100, B10, B10Si50, B10Ti50, B10Si25 ve B10Ti25 yakıtları için sırasıyla %31,53, %31,49, %31,09, %31,06, %30,98, %30,97, %30,68 ve %30,55 olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, en düşük ısıl verim değerleri %25 motor yükünde B10Ti25, B10Si25, B10Ti50, B10Si50, B10, B10Ti100, B10Si100 ve D100 yakıtları için sırasıyla %18,30, %18,41, %18,67, %18,63, %18,94, %19,03, %19,24 ve %19,56 olarak hesaplanmıştır.

4.4.2. Ekserji analizi bulguları

Yürütülen çalışmanın ekserji analizi bağlamında, tüm yakıt karışımlarının deneysel verilerinin kullanılmasıyla yakıt ekserjisi, egzoz ekserjisi, ısıl ekserji, ekserji yıkımı ve ekserji verimi, farklı motor yükleme koşullarında hesaplanmıştır. Elde edilen analiz sonuçları, özellikle nanopartiküllerin yakıt karışımlarına katılım oranlarının belirlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Üstelik farklı yakıt karışımlarının termodinamik özelliklerini detaylı bir şekilde değerlendirerek en etkili ve verimli karışımın belirlenmesine yönelik önemli bir perspektif sunmaktadır.

Yakıt ekserjisi

Yakıt ekserjisi, yakıtın içerisinde barındırdığı kullanılabilir enerjiyi temsil eden bir termodinamik kavramı ifade etmektedir. Bu parametre, yakıtın kimyasal enerjisinin, içten yanmalı motorun mekanik iş yapma yeteneği olan ekserjiye dönüştürülme potansiyelini belirlemektedir. Çalışma kapsamında incelenen tüm yakıt karışımlarına ait yakıt ekserjisi, Eş. 3.48 kullanılarak hesaplanmış ve motor yüküne bağlı olarak Şekil 4.22'de sunulmuştur. Tüm motor yük seviyelerinde D100 yakıtının kullanımıyla elde edilen yakıt ekserjisi, diğer tüm yakıt karışımlarına kıyasla daha düşük bulunmuştur. Üstelik, tüm yakıt karışımlarında motor yükü arttıkça, yakıt ekserjisinin da arttığı belirlenmiştir. Bu bağlamda, D100 yakıtın ekserjisi %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla 7.86 kW, 11.44 kW, 14.67 kW ve 18.12 kW olarak hesaplanmıştır. Dizel yakıta atık kızartma yağı eklenmesinin, yakıt ekserjisini artırdığı tespit edilmiştir. Bu artışlar, 25%, 50%, 75% ve 100% motor yüklerinde sırasıyla %3,09, %3,22, %2,49 ve %1,43 olarak bulunmuştur. Bu bağlamda, %25, %50, %75 ve %100 motor yükü koşullarında B10 yakıtının ekserjisi sırasıyla 8,11 kW, 11,82 kW, 15,05 kW ve 18,38 kW olarak elde edilmiştir. Dizel ile biyodizel karışımına farklı miktarlarda eklenen TiO_2 ve SiO_2 nanopartiküllerinin yakıt ekserjisi üzerinde farklı etkilere sahip olduğu gözlemlenmiştir.



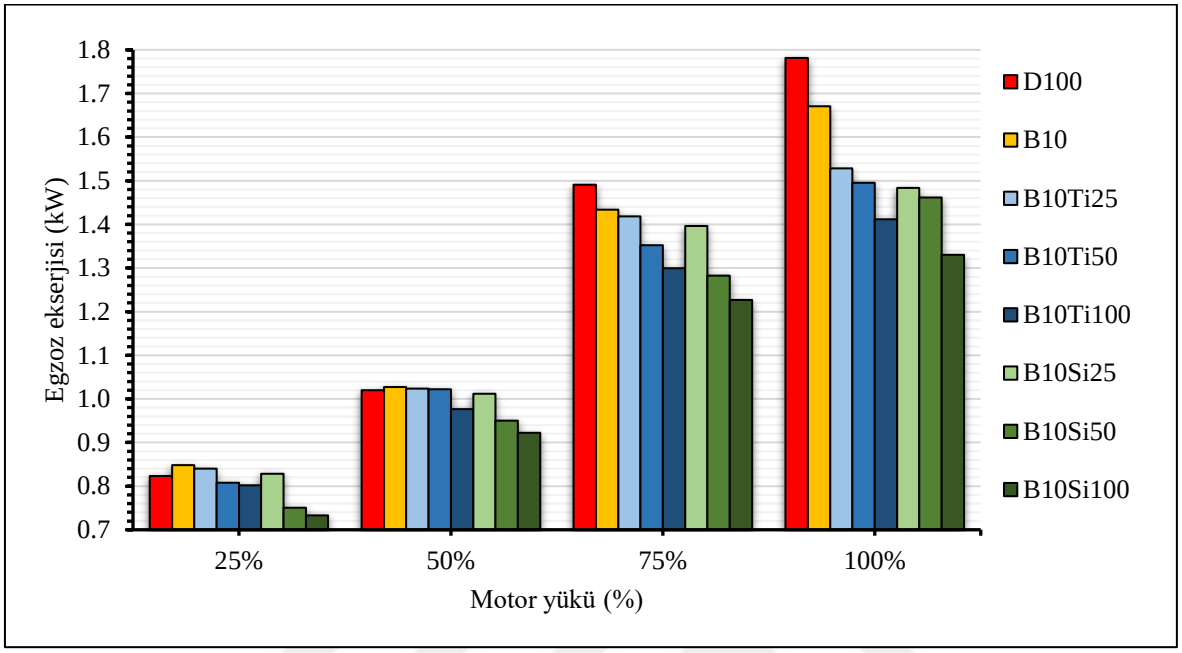
Şekil 4.22. Motor yüküne bağlı olarak yakıt ekserjisi değişimi

B10 yakıtına eklenen 25 ppm ve 50 ppm SiO_2 nanopartikülleri, yakıt ekserjisini sırasıyla %2,77 ve %1,40 oranlarına kadar artırırken, aynı konsantrasyondaki TiO_2 nanopartikül ilavesi de bu değerleri sırasıyla %3,37 ve %1,62 seviyelerine kadar artırmıştır. Üstelik, 100 ppm oranında SiO_2 ve TiO_2 nanopartikülleri içeren yakıtların kullanımı, yakıt ekserjisini B10 yakıtına göre sırasıyla %2,71 ve %1,09'a kadar azaltmıştır. %50 motor yükünde B10 yakıtının ekserjisi 11,82 kW iken, B10Si25, B10Si50, B10Ti25 ve B10Ti50 yakıtları için sırasıyla 12,16 kW, 11,93 kW, 12,20 kW ve 11,96 kW olarak belirlenmiştir. Aynı koşullarda B10Si100 ve B10Ti100 yakıtları için bu değerler sırasıyla 11,50 kW ve 11,69 kW olarak hesaplanmıştır. Yakıt ekserjisinin en düşük değerleri %25 motor yükünde elde edilmiş olup, D100, B10Si100, B10Ti100, B10, B10Si50, B10Ti50, B10Si25 ve B10Ti25 yakıtları için sırasıyla 7,86 kW, 7,96 kW, 8,07 kW, 8,11 kW, 8,23 kW, 8,24 kW, 8,34 kW ve 8,39 kW olarak hesaplanmıştır. Diğer taraftan, en yüksek değerler %100 motor yükünde, B10Ti25, B10Si25, B10Ti50, B10Si50, B10, B10Ti100, B10Si100 ve D100 yakıtları için sırasıyla 18,68 kW, 18,59 kW, 18,43 kW, 18,41 kW, 18,38 kW, 18,36 kW, 18,24 kW ve 18,12 kW olarak belirlenmiştir.

Egzoz ekserjisi

Egzoz ekserjisi, motordan çıkan egzoz gazlarının içerdikleri enerjinin, sistemin dışındaki ortama doğru taşınabilen kullanılabilir enerji miktarını ifade etmektedir. Yüksek egzoz ekserjisi değerleri, egzoz gazlarının içerdikleri enerjinin büyük bir kısmının kullanılamadan atmosfere yayıldığını göstermekte olup sistemdeki enerji verimliliğinin düşük olduğuna işaret etmektedir. Ekserji analizi kapsamında, her bir yakıt karışımının egzoz ekserjisi değerleri belirlenmiş ve motor yüküne bağlı olarak Şekil 4.23'te gösterilmiştir. İncelenen tüm yakıtlarda, motor yükü arttıkça egzoz ekserjisinin arttığı gözlemlenmiştir. D100 yakıtının farklı motor yük seviyelerindeki egzoz ekserjisi değerleri incelendiğinde, %25 motor yükünde 0,823 kW, %50 motor yükünde 0,102 kW, %75 motor yükünde 1,491 kW ve %100 motor yükünde 1,788 kW olarak belirlenmiştir. Atık kızartma yağının dizel yakıta eklenmesi, farklı motor yükleri altında egzoz ekserjisi üzerinde çeşitli etkilere neden olmuştur. Elde edilen sonuçlarına göre, %25 ve %52 motor yükleme koşullarında dizel yakıta eklenen atık kızartma yağı, egzoz ekserjisini sırasıyla %2,92 ve %0,69 oranlarında artırırken, %75 ve %100 motor yüklerinde atık kızartma yağının eklenmesi egzoz ekserjisini sırasıyla %3,82 ve %6,23 seviyelerine kadar azaltmıştır. B10 yakıtının egzoz ekserjisi %25, %50, %75 ve

%100 motor yüklerinde sırasıyla 0,848 kW, 1,027 kW, 1,434 kW ve 1,673 kW olarak hesaplanmıştır.



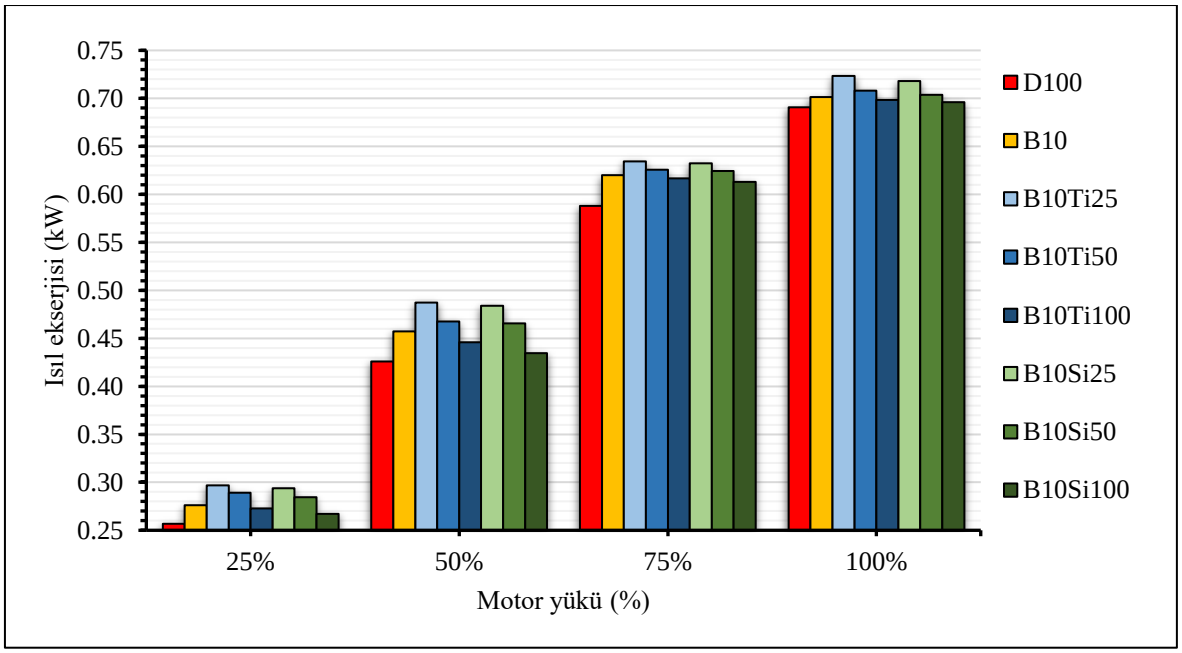
Şekil 4.23. Motor yüküne bağlı olarak egzoz ekserjisi değişimi

Şekil 4.23'te gösterildiği üzere, B10 yakıtına ilave edilen SiO_2 ve TiO_2 nanopartikülleri, egzoz ekserjisini azaltmıştır. Üstelik nanopartikül konsantrasyonunun arttırılmasının, egzoz ekserjisinin azalmasıyla doğrudan bir ilişkisi olduğu gözlemlenmiştir. Bu azalmalar, özellikle daha yüksek motor yüklerinde daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. B10 yakıtına eklenen 25 ppm, 50 ppm ve 100 ppm oranında SiO_2 nanopartikülleri, egzoz ekserjisini B10 yakıtına göre sırasıyla %11,2, %12,5 ve %20,39 oranlarına kadar azaltırken, aynı konsantrasyondaki TiO_2 nanopartiküllerinin, egzoz ekserjisini sırasıyla %4,3, %6,9 ve %15,2 oranlarına kadar azalttığı gözlemlenmiştir. Ek olarak SiO_2 nanopartikülleri içeren yakıtların egzoz ekserjisini azaltmada daha üstün bir performansa sahip olduğu gözlemlenmiştir. SiO_2 nanopartikülleri katkılı yakıtların, TiO_2 nanopartikülleri katkılı yakıtlara göre egzoz ekserjisini azaltmada %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla %59,7, %93,4, %58,2 ve %61,4 oranlarında daha etkili olduğu belirlenmiştir. En düşük egzoz ekserjisi değerleri %25 motor yükü altında elde edilmiş olup, B10Si100, B10Si50, B10Ti100, B10Ti50, D100, B10Si25, B10Ti25 ve B10 yakıt karışımları için sırasıyla 0,733 kW, 0,751 kW, 0,802 kW, 0,808 kW, 0,823 kW, 0,828 kW, 0,840 kW ve 0,847 kW olarak tespit edilmiştir. Aynı zamanda, en yüksek egzoz ekserjisi değerleri %100 motor yükünde, D100, B10, B10Ti25, B10Ti50, B10Si25, B10Si50, B10Ti100 ve B10Si100

yakıtları için sırasıyla 1,791 kW, 1,673 kW, 1,529 kW, 1,495 kW, 1,483 kW, 1,462 kW, 1,411 kW ve 1,330 kW olarak hesaplanmıştır.

Isı kayıpların ekserjisi

Isı kayıpların ekserjisi, bir sistemin içinde bulunduğu termal dengeden kaynaklanan ve sistemin dış dünyaya doğru taşınabilir olan kullanılabilir enerji miktarını ifade etmektedir. Çalışma kapsamında incelenen tüm yakıt karışımlarına ait ısı kayıpların ekserjisi, Eş. 3.51 ila Eş. 3.53 kullanılarak hesaplanmış ve motor yüküne bağlı olarak Şekil 4.24'te sunulmuştur.



Şekil 4.24. Motor yüküne bağlı olarak Isı kayıpların ekserjisi değişimi

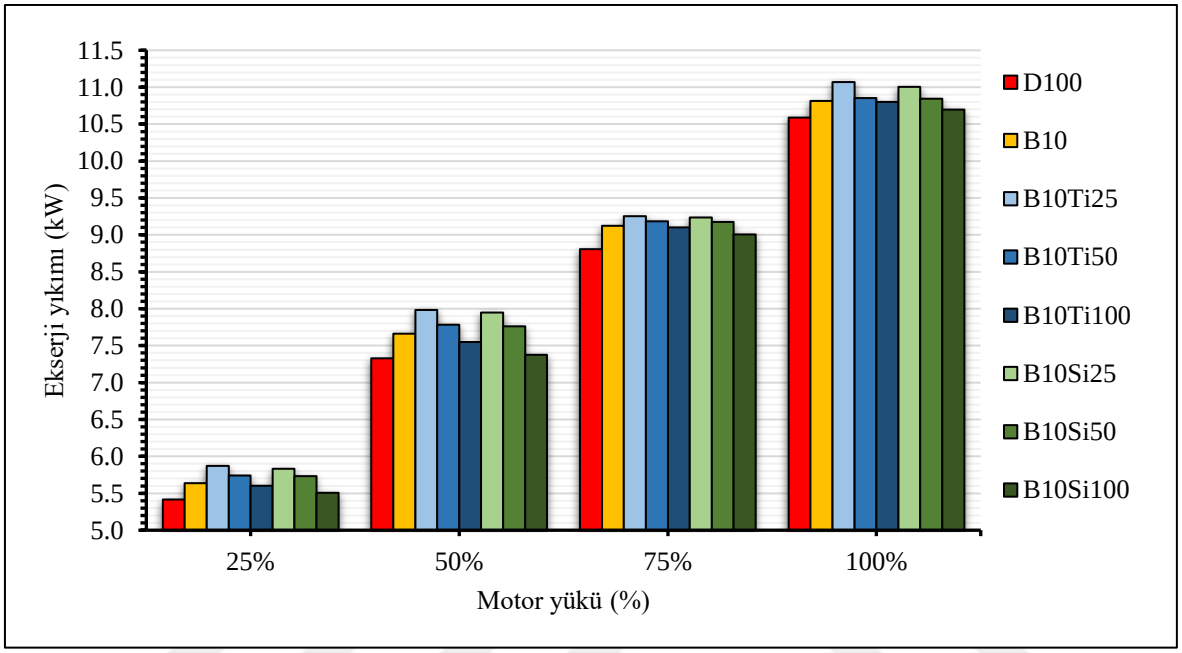
Tüm motor yük seviyelerinde D100 yakıtının kullanımıyla elde edilen ısı kayıpların ekserjisi, diğer tüm yakıt karışımlarına kıyasla daha düşük bulunmuştur. Tüm yakıt karışımlarında motor yükü arttıkça ısı kayıpların ekserjisinin da arttığı belirlenmiştir. D100 yakıtının ısıl ekserjisi %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla 0,257 kW, 0,426 kW, 0,588 kW ve 0,691 kW olarak hesaplanmıştır. Dizel yakıta atık kızartma yağı eklenmesinin, ısı kayıpların ekserjisini artırdığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda, B10 yakıtının ısı kayıpların ekserjisi %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla 0,276 kW, 0,457 kW, 0,620 kW ve 0,701 kW olarak bulunmuştur. Dizel ile biyodizel karışımına eklenen 25 ppm ve 50 ppm SiO_2 nanopartikülleri, ısı kayıpların ekserjisini sırasıyla %6,11 ve %2,93 oranlarına kadar artırırken aynı konsantrasyondaki TiO_2 nanopartikül ilavesi de bu değerleri

sırasıyla %7,04 ve %4,49 seviyelerine kadar artırmıştır. Bununla birlikte 100 ppm oranında SiO_2 ve TiO_2 nanopartikülleri içeren yakıtların kullanımı, ısı kayıpların ekserjisini B10 yakıtına kıyasla sırasıyla %4,91 ve %2,45'e kadar azaltmıştır. %75 motor yükünde elde edilen ısı kayıpların ekserjisi değerleri incelendiğinde, B10 yakıtına ait ısı kayıpların ekserjisi 0,620 kW iken, B10Si25, B10Si50, B10Ti25 ve B10Ti50 yakıtları için sırasıyla 0,632 kW, 0,624 kW, 0,635 kW ve 0,627 kW olarak belirlenmiştir. Aynı motor yükü koşullarında B10Si100 ve B10Ti100 yakıtları için bu değerler sırasıyla 0,613 kW ve 0,617 kW olarak hesaplanmıştır. Isı kayıpların ekserjisinin en düşük değerleri %25 motor yükünde elde edilmiş olup D100, B10Si100, B10Ti100, B10, B10Si50, B10Ti50, B10Si25 ve B10Ti25 yakıtları için sırasıyla 0,257 kW, 0,267 kW, 0,273 kW, 0,276 kW, 0,284 kW, 0,289 kW, 0,294 kW ve 0,297 kW olarak hesaplanmıştır. Diğer taraftan, en yüksek değerler %100 motor yükünde, B10Ti25, B10Si25, B10Ti50, B10Si50, B10, B10Ti100, B10Si100 ve D100 yakıtları için sırasıyla 0,723 kW, 0,718 kW, 0,708 kW, 0,704 kW, 0,701 kW, 0,699 kW, 0,694 kW ve 0,691 kW olarak belirlenmiştir.

Ekserji yıkımı

Termodinamiğin ikinci yasasına göre, enerji dönüşümleri sırasında bazı enerji formları tamamen işe dönüştürülemez ve bu kullanılamayan enerji miktarı ekserji yıkımı olarak ifade edilmektedir. Yapılan çalışmanın ekserji analizi kapsamında, her bir yakıt karışımına ait ekserji yıkım değerleri hesaplanmış ve motor yüküne bağlı olarak Şekil 4.25'te verilmiştir. Değerlendirilen tüm yakıtlarda motor yükü arttıkça ekserji yıkımının yükseldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, D100 yakıtının kullanmasıyla elde edilen ekserji yıkım değerleri, diğer tüm yakıt karışımlarıyla karşılaştırıldığında daha düşük bulunmuştur. D100 yakıtına ait ekserji yıkım değerleri, %25 motor yükünde 5.41 kW, %50 motor yükünde 7.32 kW, %75 motor yükünde 8.80 kW ve %100 motor yükünde 10.59 kW olarak belirlenmiştir. Dizel yakıta atık kızartma yağı eklenmesi ekserji yıkım değerlerini %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla %3,89, %4,38, %3,45 ve %2,07 oranlarında arttırmıştır. B10 yakıtının ekserji yıkım değerleri %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla 5.63 kW, 7.66 kW, 9.12 kW ve 10.81 kW olarak hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra, B10 yakıtına eklenen farklı miktarlarda TiO_2 ve SiO_2 nanopartiküllerinin ekserji yıkım değerleri üzerinde çeşitli etkilere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.25'te görüldüğü üzere, 25 ppm ve 50 ppm TiO_2 ve SiO_2 nanopartikülleri içeren yakıt karışımlarının ekserji yıkım değerleri, B10 yakıtına göre artış gösterirken 100 ppm nanopartikül eklenmesi ekserji yıkım değerlerini

azaltmıştır. Örnek olarak %50 motor yükleme koşullarında, B10Si25, B10Si50, B10Ti25 ve B10Ti50 yakıtlarının ekserji yıkım değerleri, B10 yakıtına kıyasla sırasıyla %3,56, %1,27, %4,02 ve %1,84 oranlarına kadar artmışken B10Si100 ve B10Ti100 yakıtlarında B10Si100 ve B10Ti100 yakıtlarında ekserji yıkım değerleri azalmıştır.



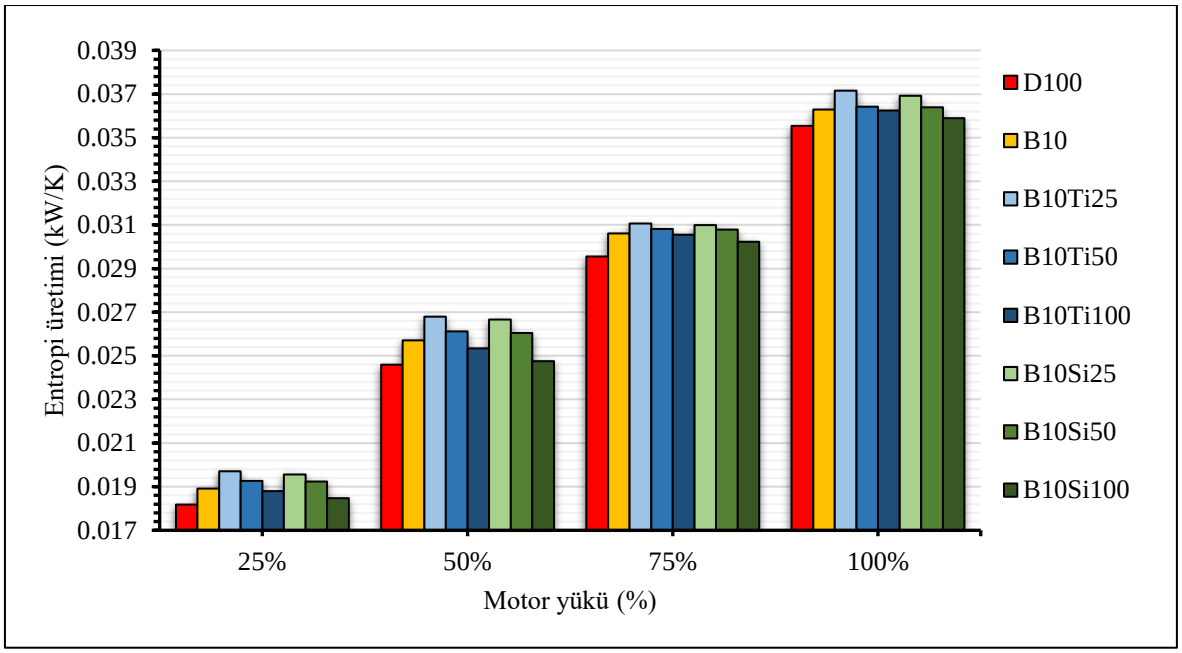
Şekil 4.25. Motor yüküne bağlı olarak ekserji yıkımı değişimi

Yapılan analizler neticesinde, en yüksek ekserji yıkım değerleri %100 motor yükünde B10Ti25, B10Si25, B10Ti50, B10Si50, B10, B10Ti100, B10Si100 ve D100 yakıtları için sırasıyla 11,12 kW, 11,01 kW, 10,92 kW, 10,84 kW, 10,81 kW, 10,79 kW, 10,68 kW ve 10,59 kW olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte en düşük ekserji yıkım değerleri %25 motor yüklerinde D100, B10Si100, B10Ti100, B10, B10Si50, B10Ti50, B10Si25 ve B10Ti25 yakıtları için sırasıyla 5,41 kW, 5,50 kW, 5,61 kW, 5,63 kW, 5,71 kW, 5,74 kW, 5,83 kW ve 5,87 kW olarak tespit edilmiştir.

Entropi üretimi

Entropi, bir sistemdeki düzensizlik veya belirsizlik derecesini ölçen bir parametre olarak tanımlanmakta olup içten yanmalı motorlardaki entropi üretimi, enerji dönüşüm süreçlerinin ve işlemlerin düzensizleşmesini ifade etmektedir. Yanma işlemi sırasında yüksek sıcaklık ve basınç değişimleri, kaçınılmaz bir biçimde entropi üretimine neden olmaktadır. Yanma odasındaki gazların ani genleşmesi, sıcaklık farkları ve sürtünme gibi etkileşimlerin sistemde

entropi artışına yol açmaktadır. Yapılan çalışma çerçevesinde incelenen tüm yakıt karışımlarına ait entropi üretim verileri, Eş. 3.55 kullanılarak hesaplanmış ve motor yüküne bağlı olarak Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Tüm motor yüklerinde en düşük entropi üretimi dizel yakıtında görülmüştür. Ayrıca, değerlendirilen tüm yakıtlarda motor yükü arttıkça entropi üretiminin yükseldiği gözlemlenmiştir. D100 yakıtına ait entropi üretim değerleri %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla 0.0182 kW/K, 0.0246 kW/K, 0.0297 kW/K ve 0.0355 kW/K olarak hesaplanmıştır. Biyodizel katkılı yakıt karışımı, dizel yakıtına göre entropi üretimini %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla %3,89, %4,38, %3,45 ve %2,07 oranlarında artırmıştır.



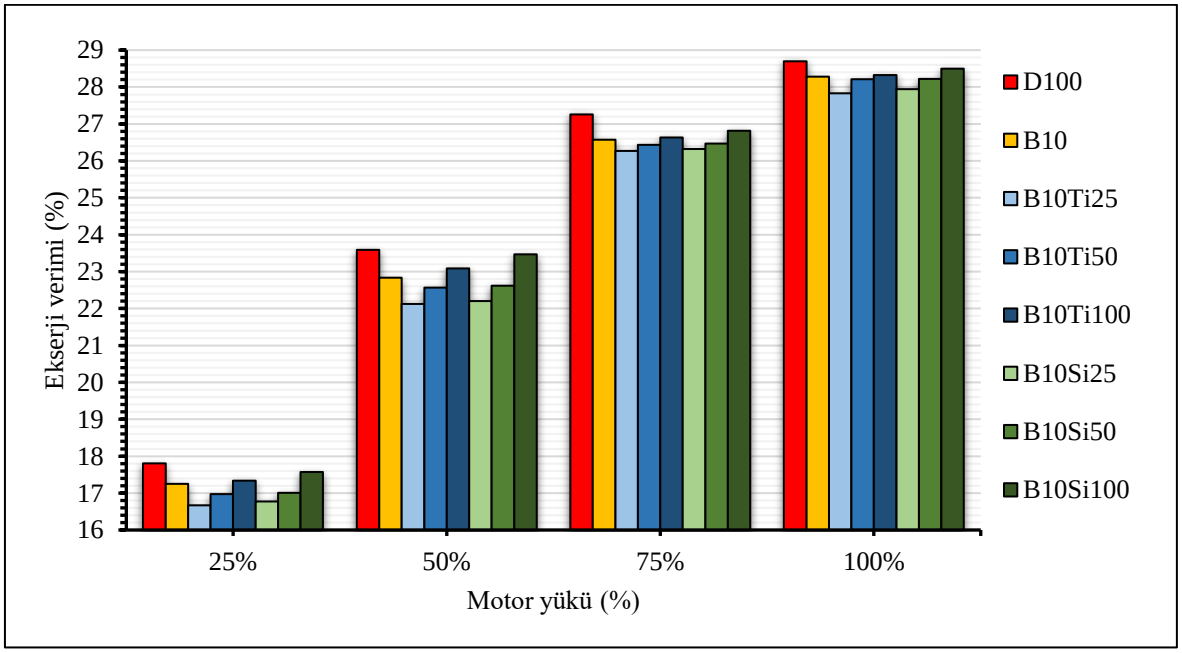
Şekil 4.26. Motor yüküne bağlı olarak entropi üretimi değişimi

B10 yakıtına 25 ppm ve 50 ppm SiO_2 ve TiO_2 nanopartikül ilavesinin, entropi üretimini artırdığı gözlemlenmiştir. Örneğin, %100 motor yükünde 25 ppm ve 50 ppm SiO_2 nanopartikül eklenmesi, entropi üretimini %3,57 ve %1,26 oranlarında artırırken aynı konsantrasyondaki TiO_2 nanopartikül ilavesi bu değerleri %4,02 ve %1,54 oranlarında yükseltmiştir. Bununla birlikte 100 ppm oranında SiO_2 ve TiO_2 nanopartikülleri içeren yakıtlar kullanıldığında entropi üretimi B10 yakıtına kıyasla sırasıyla %3,74 ve %1,46'ya kadar azalmıştır. En düşük entropi üretim değerleri %25 motor yükünde elde edilmiş olup, D100, B10Si100, B10Ti100, B10, B10Si50, B10Ti50, B10Si25 ve B10Ti25 yakıtları için sırasıyla 0,0182 kW/K, 0,0185 kW/K, 0,0188 kW/K, 0,0189 kW/K, 0,0192 kW/K, 0,0193 kW/K, 0,0196 kW/K ve 0,0197 kW/K olarak hesaplanmıştır. Diğer taraftan, en yüksek

değerler %100 motor yükünde, B10Ti25, B10Si25, B10Ti50, B10Si50, B10, B10Ti100, B10Si100 ve D100 yakıtları için sırasıyla 0,0372 kW/K, 0,0369 kW/K, 0,0365 kW/K, 0,0364 kW/K, 0,0362 kW/K, 0,0360 kW/K, 0,0357 kW/K ve 0,0355 kW/K olarak belirlenmiştir.

Ekserji verimi

Ekserji verimi, içten yanmalı bir motorun verimliliğini değerlendirmek amacıyla kullanılan kritik bir parametredir. Bu verim, motordan alınan ekserji ile motora verilen yakıt ekserjisi arasındaki oranı ifade etmektedir. Yüksek bir ekserji verimi, motordan alınan enerjinin daha etkili bir biçimde işe dönüştürüldüğünü ve sistemde daha az enerji kaybının olduğunu göstermektedir. Yapılan çalışmanın ekserji analizi çerçevesinde, her bir yakıt karışımına ait ekserji verimi hesaplanmış ve motor yüküne bağlı olarak Şekil 4.27'de verilmiştir. İncelenen tüm yakıtlarda, motor yükü arttıkça ekserji verimi de artmıştır. Üstelik tüm motor yükleme koşullarında, D100 yakıtının ekserji verimi diğer tüm yakıt karışımlarına göre daha düşük bulunmuştur. D100 yakıtının ekserji verimi %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla %17,80, %23,59, %27,26 ve %28,69 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.27. Motor yüküne bağlı olarak ekserji verimi değişimi

Dizel yakıta atık kızartma yağı eklenmesi, ekserji verimini azaltmıştır. Bu azalmalar, 25%, 50%, 75% ve 100% motor yüklerinde sırasıyla %3,09, %3,22, %2,50 ve %1,43 olarak

belirlenmiştir. B10 yakıtına eklenen farklı miktarlarda TiO_2 ve SiO_2 nanopartiküllerinin ekserji verimi üzerinde farklı etkilere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan gözlemler, yakıttaki nanopartikül miktarının artırılmasının ekserji verimini artırıcı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Şekil 4.27'de görüldüğü üzere, 25 ppm ve 50 ppm TiO_2 ve SiO_2 nanopartikülleri içeren yakıt karışımlarının ekserji verimi, B10 yakıtına kıyasla azalmışken 100 ppm nanopartikül eklenmesi ekserji verimini artırmıştır. Örnek olarak %25 motor yükleme koşullarında, B10Si25, B10Si50, B10Ti25 ve B10Ti50 yakıtlarının ekserji verimi, B10 yakıtına göre sırasıyla %2,78, %1,41, %3,37 ve %1,62 oranlarında azalmışken, B10Si100 ve B10Ti100 yakıtlarında bu değer sırasıyla %1,83 ve %0,43 oranlarında artmıştır. En yüksek ekserji verim değerleri %100 motor yükünde kaydedilmiş olup D100, B10Si100, B10Ti100, B10, B10Si50, B10Ti50, B10Si25 ve B10Ti25 yakıtları için sırasıyla %28,69, %28,50, %28,32, %28,28, %28,22, %28,19, %27,95 ve %27,83 olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte en düşük ekserji verimleri %25 motor yükünde B10Ti25, B10Si25, B10Ti50, B10Si50, B10, B10Ti100, B10Si100 ve D100 yakıtları için sırasıyla %16,65, %16,77, %16,97, %17,01, %17,25, %17,33, %17,57 ve %17,80 olarak hesaplanmıştır.

4.4.3. Sürdürülebilirlik analizi bulguları

Sürdürülebilirlik indeksi, yakıtın ekserji miktarının, ekserji kayıplarına oranını temsil etmektedir. Bu indeks, kontrol hacmine giren tüm ekserjinin, ekserji kayıplarının oranı olarak hesaplanmaktadır. Motordaki kayıplar azaldıkça sürdürülebilirlik indeksi artmaktadır ve bu da yakıtın daha etkili bir şekilde kullanıldığını göstermektedir [103]. Dolayısıyla sürdürülebilirlik indeksi her zaman 1'den büyük bir değer olması gerekmektedir. Yapılan çalışma çerçevesinde incelenen tüm yakıt karışımlarına ait sürdürülebilirlik indeksi, motor yüküne bağlı olarak Çizelge 4.3'te verilmiştir. Tüm motor yüklerinde en yüksek sürdürülebilirlik indeksi, dizel yakıtında gözlemlenmiştir. Ayrıca incelenen tüm yakıtlarda motor yükü arttıkça sürdürülebilirlik indeksi, artış göstermiştir. Dizel yakıta atık kızartma yağı eklenmesinin, sürdürülebilirlik indeksini azalttığı tespit edilmiştir. Bu azalmalar, 25%, 50%, 75% ve 100% motor yüklerinde sırasıyla %0,66, %0,98, %0,92 ve %0,57 olarak bulunmuştur. Dizel ile biyodizel karışımına eklenen farklı miktarlarda TiO_2 ve SiO_2 nanopartiküllerinin sürdürülebilirlik indeksi üzerinde farklı etkilere sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.3. Farklı motor yüklerinde yakıtların sürdürülebilirlik indeksi

Yakıt / Yük	D100	B10	B10Ti25	B10Ti50	B10Ti100	B10Si25	B10Si50	B10Si100
%25	1,217	1,208	1,201	1,204	1,210	1,202	1,205	1,213
%50	1,309	1,296	1,284	1,291	1,300	1,.285	1,292	1,307
%75	1,375	1,362	1,356	1,359	1,363	1,357	1,360	1,366
%100	1,402	1,394	1,386	1,393	1,395	1,388	1,393	1,399

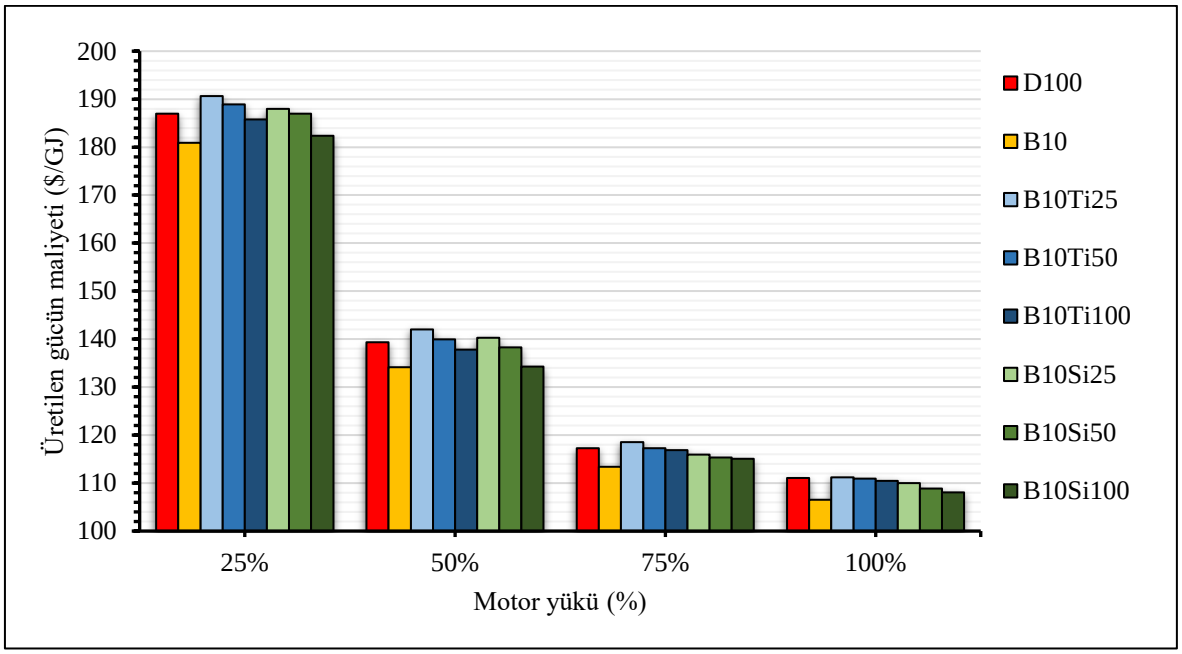
Yapılan gözlemler, yakıttaki nanopartikül miktarının artırılmasının sürdürülebilirlik indeksini artırıcı bir etki yarattığını ortaya koymuştur. SiO_2 nanopartikülleri içeren yakıtların sürdürülebilirlik indeksi, TiO_2 katkılı yakıtlara kıyasla daha yüksek bulunmuştur. B10 yakıtına eklenen 25 ppm ve 50 ppm SiO_2 nanopartikülleri, sürdürülebilirlik indeksini sırasıyla %0,80 ve %0,29 oranlarına kadar azaltırken aynı konsantrasyondaki TiO_2 nanopartikül ilavesi de bu değerleri sırasıyla %0,91 ve %0,34 seviyelerine kadar azaltmıştır. Bununla birlikte 100 ppm oranında SiO_2 ve TiO_2 nanopartikülleri içeren yakıtların kullanımı, sürdürülebilirlik indeksini B10 yakıtına kıyasla sırasıyla %0,83 ve %0,32'ye kadar artırmıştır. En yüksek sürdürülebilirlik indeksleri, dizel yakıtının kullanılmasıyla elde edilmiş olup %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla 1,217, 1,309, 1,375 ve 1,402 olarak belirlenmiştir. Sürdürülebilirlik indeksinin en düşük değerleri ise B10Ti25 yakıtında tespit edilmiş olup %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla 1,201, 1,284, 1,356 ve 1,386 olarak hesaplanmıştır.

4.4.4. Eksergoekonomik analizi bulguları

Eksergoekonomik analizi, İçten yanmalı motorlarının performansını ekonomik perspektifle değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu analitik yaklaşım, özellikle farklı alternatif yakıtların kullanımının ekonomik açıdan değerlendirilmesi, enerji dönüşüm süreçlerinin etkinliğini ve ekonomik sürdürülebilirliğini anlamak açısından kritik bir öneme sahiptir. Böylece içten yanmalı motorların verimliliği ile ekonomik performansı arasındaki ilişkiyi belirlemeye olanak sağlamaktadır. Yapılan çalışmanın eksergoekonomik analizi kapsamında, tüm incelenen yakıt karışımlarına ait üretilen gücün maliyeti, eksergoekonomik faktörü ve bağıl maliyet farkı değerleri, farklı motor yükleme koşullarında hesaplanmış olup karşılaştırılmıştır.

Üretilen gücün maliyeti

Eksergoekonomik analizinde yakıtların üretilen gücün maliyeti, motorların ekonomik performansını değerlendirmek için önemli bir parametredir. Üretilen gücün maliyeti, bir yakıtın ekonomik açıdan ne kadar verimli olduğunu değerlendirmede kullanılmaktadır ve enerji dönüşüm süreçlerinin ekonomik sürdürülebilirlik açısından değerlendirmektedir. Yapılan çalışma kapsamında incelenen tüm yakıt karışımlarına ait üretilen gücün maliyeti hesaplanmış ve motor yüküne bağlı olarak Şekil 4.28'de verilmiştir.



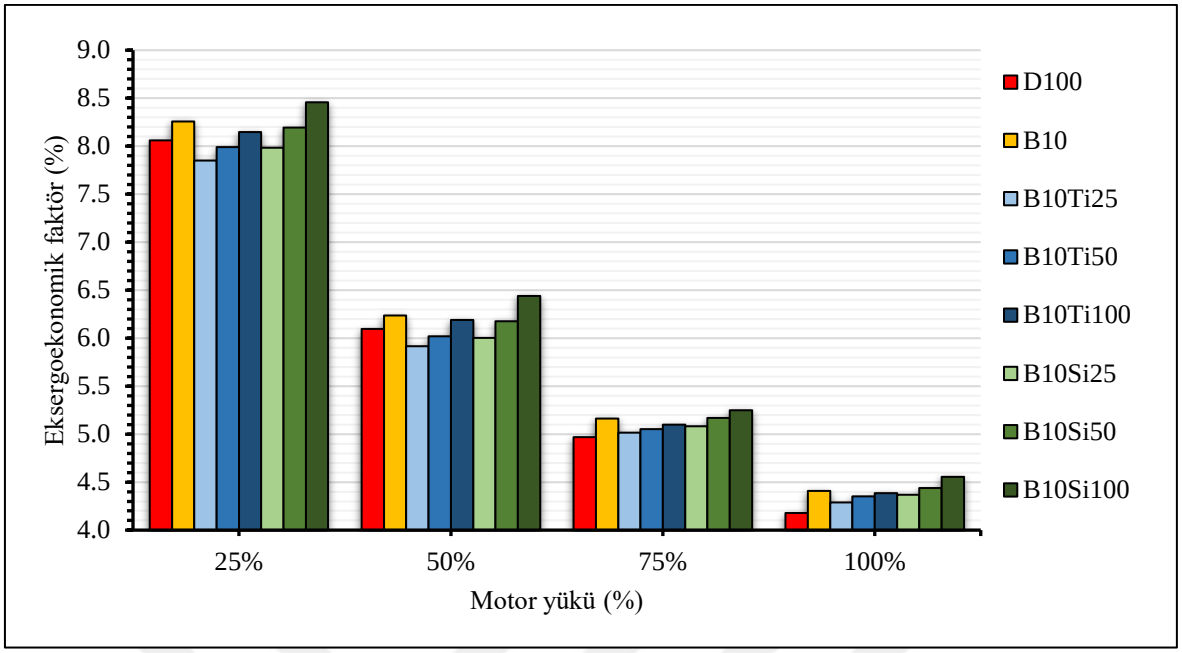
Şekil 4.28. Motor yüküne bağlı olarak üretilen gücün maliyeti değişimi

Tüm yakıtlarda, motor yükü arttıkça üretilen gücün maliyeti düşmüştür. Bu durum, motorun daha yüksek yük altında daha verimli bir şekilde çalışmasına bağlıdır. Motor yükü arttıkça termal ve mekanik kayıpların azalması, enerjinin daha etkili bir biçimde istenilen iş çıkışına dönüştürülmesine olanak tanımaktadır. Örneğin, B10Ti50 yakıtının üretilen gücün maliyetleri %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla 188,89 $/GJ, 139,97 $/GJ, 117,26 $/GJ ve 110,91 $/GJ olarak hesaplanmıştır. Dizel yakıtın üretilen gücün maliyeti %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla 186,97 $/GJ, 139,32 $/GJ, 117,24 $/GJ ve 111,03 $/GJ olarak elde edilmiştir. Dizel yakıta eklenen atık kızartma yağı, üretilen gücün maliyetlerini %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla %3,24, %2,98, %3,30 ve %4,05 oranlarında düşürmüştür. Şekil 4.28'de görüldüğü üzere, B10 yakıtına eklenen SiO_2 ve TiO_2 nanopartikülleri, üretilen gücün maliyetlerini artırmıştır. Ayrıca, yakıt karışımındaki

nanopartikül konsantrasyonunun artmasıyla birlikte, üretilen gücün maliyetinin azaldığı gözlemlenmiştir. B10 yakıtına eklenen 25 ppm, 50 ppm ve 100 ppm oranındaki SiO_2 nanopartikülleri, üretilen gücün maliyetini B10 yakıtına göre sırasıyla %4,38, %3,24 ve %1,49 oranlarına kadar artırırken aynı konsantrasyondaki TiO_2 nanopartikülleri de bu değerleri sırasıyla %5,53, %4,22 ve %3,55 oranlarına kadar yükseltmiştir. Örneğin, %100 motor yükünde B10 yakıtına ait üretilen gücün maliyeti 106,53 $/GJ iken, B10Si25, B10Si50, B10Si100, B10Ti25, B10Ti50 ve B10Ti100 yakıtları için sırasıyla 109,97 $/GJ, 108,84 $/GJ, 108,08 $/GJ, 111,22 $/GJ, 110,91 $/GJ ve 110,44 $/GJ olarak belirlenmiştir. En yüksek üretilen gücün maliyetleri, B10Ti25 yakıtına ait olup %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla 190,62 $/GJ, 142.01 $/GJ, 118,51 $/GJ ve 111,22 $/GJ olarak elde edilmiştir. En düşük maliyet ise B10 yakıtında gözlemlenmiş olup aynı motor yüklerinde sırasıyla 180,91 $/GJ, 134,16 $/GJ, 113,36 $/GJ ve 106,53 $/GJ olarak belirlenmiştir.

Eksergoekonomik faktör

Eksergoekonomik faktör, bir motorun işletme maliyetinin (ilk yatırım maliyeti ve bakım maliyeti) toplam maliyete (motor işletme maliyeti ve ekserji kayıpların maliyeti) oranını temsil etmektedir. Alternatif yakıtlarla ilgili yapılan çalışmalarda, genellikle motorun ilk yatırım maliyeti ve işletme maliyetleri tüm yakıt türleri için sabit tutulurken değişkenlik gösteren faktörler, kullanılan yakıtın ekserji kayıpları ve birim maliyetidir. Yüksek eksergoekonomik faktör değerlerine sahip olan yakıtlar, daha düşük ekserji kaybına ve yakıt birim maliyetine sahiptir. Yapılan çalışmada her bir yakıt karışımının eksergoekonomik faktörü, motor yüküne bağlı olarak Şekil 4.29'da sunulmuştur. Tüm yakıtlarda, motor yükü arttıkça eksergoekonomik faktörü de azalmıştır. Örneğin, B10Ti100 yakıtının eksergoekonomik faktörü %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla %7,99, %6,04, %5,05 ve %4,35 olarak hesaplanmıştır. Dizel yakıtın eksergoekonomik faktörü %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla %8,06, %6,09, %4,97 ve %4,17 olarak elde edilmiştir. Dizel yakıta atık kızartma yağı eklenmesinin, eksergoekonomik faktörünü artırdığı tespit edilmiştir. Bu artışlar, 25%, 50%, 75% ve 100% motor yüklerinde sırasıyla %2,26, %2,23, %3,74 ve %5,24 olarak bulunmuştur. Bu bağlamda, %25, %50, %75 ve %100 motor yükü koşullarında B10 yakıtının eksergoekonomik faktörü sırasıyla %8,25, %6,23, %5,16 ve %4,41 olarak elde edilmiştir.



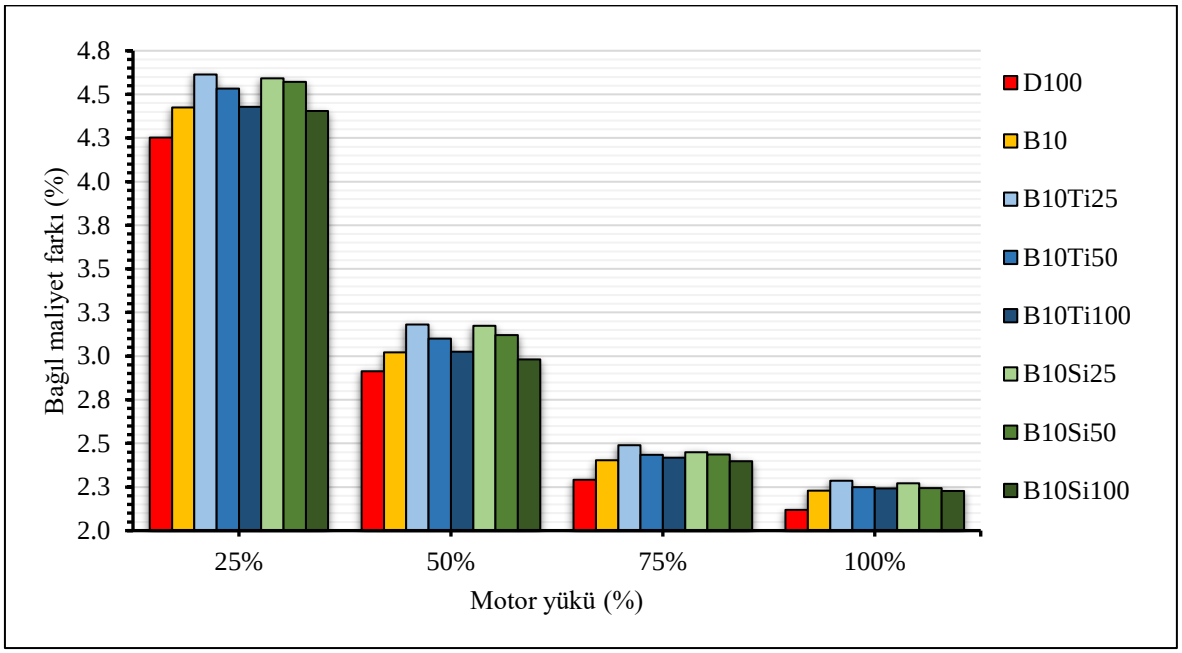
Şekil 4.29. Motor yüküne bağlı olarak eksergoekonomik faktör değişimi

Şekil 4.28'de görüldüğü üzere, B10 yakıtına eklenen 25 ppm ve 50 ppm SiO_2 nanopartikülleri, eksergoekonomik faktörünü sırasıyla %3,31 ve %0,95 oranlarına kadar azaltırken 100 ppm SiO_2 nanopartiküllerin ilavesi bu değeri %3,15 oranına kadar artırmıştır. Bunun yanı sıra, B10 yakıtına ilave edilen 25 ppm, 50 ppm ve 100 ppm TiO_2 nanopartikülleri, eksergoekonomik faktörünü sırasıyla %5,13, %3,47 ve %1,34 oranlarına kadar düşürmüştür. Örneğin, %50 motor yükünde B10 yakıtına ait eksergoekonomik faktörü %6,23 iken, B10Si25, B10Si50, B10Si100, B10Ti25, B10Ti50 ve B10Ti100 yakıtları için sırasıyla %6,01, %6,17, %6,44, %5,91, %6,02 ve %6,19 olarak belirlenmiştir. En yüksek eksergoekonomik faktör değerleri B10Si100 yakıtına ait olup %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla %8,45, %6,44, %5,25 ve %4,54 olarak elde edilmiştir. En düşük değerler ise B10Ti25 yakıtında tespit edilmiş olup aynı motor yüklerinde sırasıyla %7,85, %5,91, %5,01 ve %4,28 olarak belirlenmiştir.

Bağıl maliyet farkı

Bağıl maliyet farkı, yakıtın birim maliyeti ile üretilen güç maliyetini karşılaştırmak amacıyla kullanılmaktadır. Yüksek bağıl maliyet farkı değerleri, üretilen güç maliyetinin yakıtın birim maliyetinden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Çalışmada kullanılan tüm yakıt karışımlarına ait bağıl maliyet farkı, motor yüküne bağlı olarak Şekil 4.30'da verilmiştir. Tüm motor yük seviyelerinde D100 yakıtının kullanımıyla elde bağıl maliyet farkı, diğer

yakıt karışımlarına kıyasla daha düşük bulunmuştur. Üstelik, tüm yakıt karışımlarında motor yükü arttıkça bağıl maliyet farkı azalmıştır. D100 yakıtının bağıl maliyet farkı %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla 4,253, 2,914, 2,291 ve 2,119 olarak hesaplanmıştır. Dizel yakıta atık kızartma yağı eklenmesinin, bağıl maliyet farkını artırdığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda, B10 yakıtının bağıl maliyet farkı %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla 4,424, 3,022, 2,403 ve 2,230 olarak bulunmuştur.

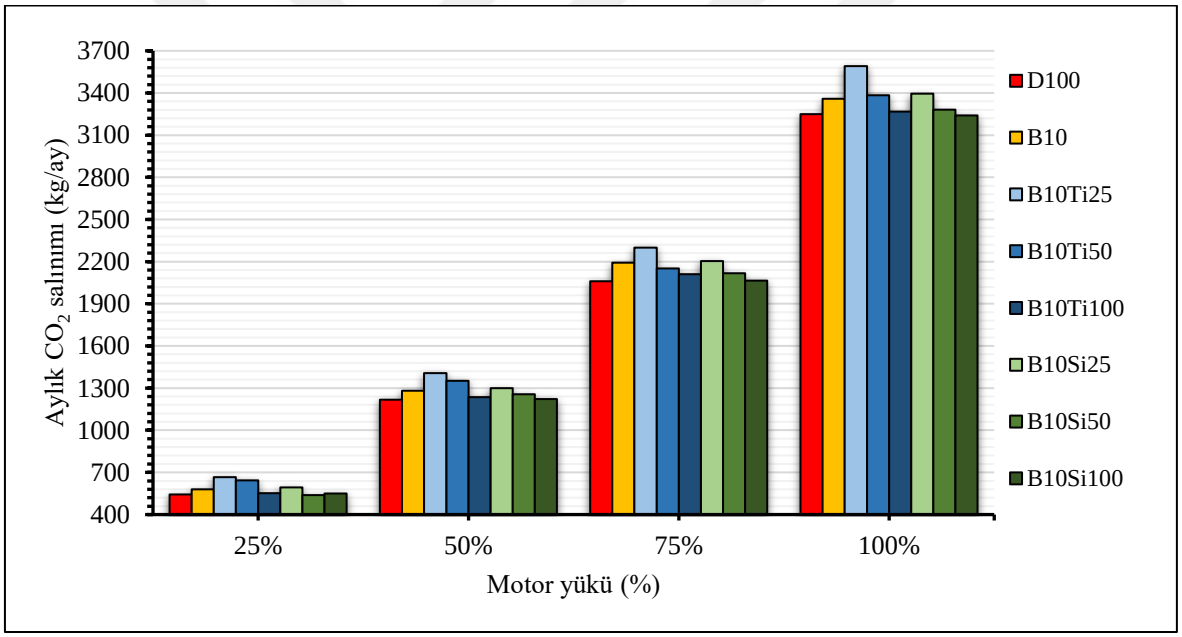


Şekil 4.30. Motor yüküne bağlı olarak bağıl maliyet farkı değişimi

Şekil 4.30'da görüldüğü üzere, B10 yakıtına 25 ppm ve 50 ppm SiO_2 nanopartikül eklenmesi, bağıl maliyet farkını sırasıyla %4,65 ve %3,13'e kadar artırırken aynı konsantrasyondaki TiO_2 nanopartikül ilavesi de bu değerleri %5,44 ve %4,91 oranlarına kadar artırmıştır. Bununla birlikte 100 ppm oranında SiO_2 ve TiO_2 nanopartikülleri içeren yakıtlar kullanıldığında bağıl maliyet farkı, B10 yakıtına göre sırasıyla %1,47 ve %0,62 oranlarına kadar azalmıştır. Örneğin, %75 motor yükünde B10 yakıtına ait bağıl maliyet farkı 2,403 iken, B10Si25, B10Si50, B10Si100, B10Ti25, B10Ti50 ve B10Ti100 yakıtları için sırasıyla 2,449, 2,437, 2,399, 2,490, 2,435 ve 2,419 olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla en yüksek bağıl maliyet farkı B10Ti25 yakıtına ait olup %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla 4,613, 3,182, 2,490 ve 2,285 olarak elde edilmiştir. En düşük değerler ise D100 yakıtında gözlemlenmiş olup aynı motor yüklerinde sırasıyla 4,253, 2,914, 2,291 ve 2,119 olarak belirlenmiştir.

4.4.5. Eksergoçevresel analizi bulguları

Eksergoçevresel analizi, enerji sistemlerinin verimliliği ile çevresel etkilerini entegre eden bir metodoloji olarak kabul edilmektedir. Bu analiz, bir sürecin enerji akışlarını inceleyerek hem enerji kullanımının optimize edilmesini hem de çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine uygunluğun değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Bu çalışmanın eksergoçevresel analizi çerçevesinde, motor deneylerde elde edilen CO_2 emisyon verileri ile motora giren her bir yakıt karışımının ekserji akış değerleri kullanılarak bir ay süresince her bir yakıt karışımının üretilen CO_2 emisyon miktarı (kg/ay) hesaplanmıştır. Yapılan çalışma kapsamında incelenen tüm yakıt karışımlarına ait aylık CO_2 salınımı hesaplanmış ve motor yüküne bağlı olarak Şekil 4.31'de gösterilmiştir.



Şekil 4.31. Motor yüküne bağlı olarak aylık CO_2 salınım değişimi

Tüm yakıtlarda motor yükü arttıkça aylık CO_2 salınımı da artmıştır. Örneğin, B10Si50 yakıtının aylık CO_2 salınımı %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla 539,48 kg CO_2/ay, 1256,26 kg CO_2/ay, 2118,01 kg CO_2/ay ve 3251,85 kg CO_2/ay olarak hesaplanmıştır. Dizel yakıta eklenen atık kızartma yağı, aylık CO_2 salınımını %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla %6,24, %5,01, %5,64 ve %3,25 oranlarında yükseltmiştir. Örneğin, %50 ve %100 motor yükü koşullarında D100 yakıtının aylık CO_2 salınımı sırasıyla 1217,94 kg CO_2/ay ve 3248,50 kg CO_2/ay olarak belirlenmişken, aynı koşullarda B10 yakıtında bu değerler 1282,15 kg CO_2/ay ve 3357,72 kg CO_2/ay olarak hesaplanmıştır. B10

yakıtına eklenen 25 ppm SiO_2 nanopartikülleri, aylık CO_2 salınımını %2,12 oranına kadar artırmıştır. Öte yandan, 50 ppm ve 100 ppm SiO_2 nanopartiküllerin eklenmesi, aylık CO_2 salınımını sırasıyla %4,60 ve %13,04 seviyelerine kadar azaltmıştır. B10 yakıtına 25 ppm ve 50 ppm TiO_2 nanopartiküllerin eklenmesi, aylık CO_2 salınımını sırasıyla %12,98 ve %9,83 oranlarına kadar artırırken, 100 ppm TiO_2 nanopartikülleri içeren yakıt karışımının aylık CO_2 salınımı %4,59 oranına kadar azalmıştır. Örneğin, %50 motor yükünde B10 yakıtına ait aylık CO_2 salınımı 1282,15 kg CO_2/ay iken, B10Si25, B10Si50, B10Si100, B10Ti25, B10Ti50 ve B10Ti100 yakıtları için sırasıyla 1298,54 kg CO_2/ay, 1256,27 kg CO_2/ay, 1221,33 kg CO_2/ay, 1405,51 kg CO_2/ay, 1350,87 kg CO_2/ay ve 1235,32 kg CO_2/ay olarak belirlenmiştir. Yapılan analizlerin neticesinde, en yüksek aylık CO_2 salınımı B10Ti25 yakıtına ait olup %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla 666,68 kg CO_2/ay, 1405,51 kg CO_2/ay, 2300,43 kg CO_2/ay, 3590,28 kg CO_2/ay olarak elde edilmiştir. En düşük değerler ise dizel yakıtında gözlemlenmiş olup %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla 543,82 kg CO_2/ay, 1217,96 kg CO_2/ay, 2061,17 kg CO_2/ay, 3248,44 kg CO_2/ay olarak belirlenmiştir.

4.4.6. Eksergoçevreekonomik analizi bulguları

Yapılan çalışmada, motor deneylerde kullanılan yakıtların çevreye salınan CO_2 maliyeti eksergoçevreekonomik analiz ile belirlenmiştir. Bu analiz, enerji verimliliği, çevresel ve ekonomik etkiler arasındaki ilişkileri inceleyerek test edilen yakıtların sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesine imkân sağlamaktadır. Bu çalışmada, eksergoçevresel analizden elde edilen aylık CO_2 salınım verileri kullanılarak her bir yakıt karışımının çevreye saldığı CO_2 maliyeti hesaplanmış ve motor yüküne bağlı olarak Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Farklı motor yüklerinde yakıtların aylık CO_2 maliyeti ($/ay)

Yakıt / Yük	D100	B10	B10Ti25	B10Ti50	B10Ti100	B10Si25	B10Si50	B10Si100
%25	7,89	8,41	9,67	9,34	8,02	8,59	7,82	7,97
%50	17,66	18,59	20,38	19,59	17,91	18,83	18,22	17,72
%75	29,89	31,80	33,36	31,19	30,59	31,96	30,71	29,95
%100	47,10	48,69	52,06	49,06	47,37	49,24	47,59	46,97

Tüm motor yük seviyelerinde B10Si100 yakıtının kullanımıyla elde edilen CO_2 maliyeti, diğer tüm yakıt karışımlarına kıyasla daha düşük bulunmuştur. Üstelik, tüm yakıt karışımlarında motor yükü arttıkça, CO_2 maliyetinin de arttığı gözlemlenmiştir. B10Si100 yakıtının CO_2 maliyeti %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla 7.97 $/ay, 17.72 $/ay, 29.95 $/ay ve 46.97 $/ay olarak hesaplanmıştır. Dizel yakıta atık kızartma yağı eklenmesi, yakıtın CO_2 maliyetini artırmıştır. Bu artışlar, 25%, 50%, 75% ve 100% motor yüklerinde sırasıyla %6,2, %5,1, %5,6 ve %3,2 olarak elde edilmiştir. Örneğin, %25 ve %100 motor yükü koşullarında D100 yakıtının CO_2 maliyeti sırasıyla 7,89 $/ay ve 47,10 $/ay olarak belirlenirken, aynı koşullarda B10 yakıtının CO_2 maliyeti 8,41 $/ay ve 48,69 $/ay olarak hesaplanmıştır. Çizelge 4.4'te görüldüğü üzere, B10 yakıtına eklenen 25 ppm SiO_2 nanopartikülleri, CO_2 maliyetini artırmışken, 50 ppm ve 100 ppm SiO_2 nanopartiküllerin eklenmesi, aylık CO_2 maliyetini azaltmıştır. Bununla birlikte, 25 ppm ve 50 ppm TiO_2 nanopartikülleri içeren yakıtların aylık CO_2 maliyeti B10 yakıtına göre yükselmiştir. Ancak 100 ppm TiO_2 nanopartikülleri içeren yakıt karışımının aylık CO_2 maliyeti, B10 yakıtına kıyasla %4,59 oranına kadar azalmıştır. En yüksek aylık CO_2 maliyeti B10Ti25 yakıtına ait olup %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde sırasıyla 9,67 $/ay, 20,38 $/ay, 33,36 $/ay, 52,06 $/ay olarak hesaplanmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Azalan fosil yakıt kaynakları ve geleneksel yakıtların çevreye olan olumsuz etkileri, araştırmacıları, konvansiyonel yakıtların daha verimli kullanılmasını sağlamak ve sera gazı emisyonlarını minimize etmek için yenilikçi yöntemler geliştirmeye yönlendirmektedir. Bazı alternatif yakıtların kullanımıyla birlikte, içten yanmalı motorların yapısında gerektirdiği modifikasyonların yüksek maliyetleri göz önüne alındığında, yakıt katkı maddeleri özellikle metal nanopartiküllerin kullanımı, önemli bir odak noktası olarak öne çıkmaktadır. Deneysel ve sayısal olarak gerçekleştirilmiş olan bu çalışmada, farklı konsantrasyonlarda (25 ppm, 50 ppm ve 100 ppm) SiO_2 ve TiO_2 nanopartiküllerinin atık kızartma yağından elde edilen biyodizel ile dizel karışımına eklenmesinin dizel bir motorda performans, ekonomik ve çevresel etkisi termodinamik analizler ile belirlenmiştir. Üstelik, motor deneylerinden elde edilen performans ve emisyon bulguları AVL simülasyon programı kullanılarak doğrulanmıştır. Deneysel sonuçların, sayısal simülasyon sonuçlarıyla %1 ila %5 arasında değişen bir farkla uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Literatürdeki motor simülasyonu ile ilgili yapılan çalışmalarda, sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki %1 ila %15'lik farklar, genellikle modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini göstermektedir [134-135]. İçten yanmalı motorlar gibi karmaşık sistemlerin simülasyonunda kullanılan sayısal modeller, genellikle bir dizi varsayıma dayanmaktadır. Bu modeller, motorun termodinamik, yanma ve akışkanlar mekaniği özelliklerini tahmin etmeye çalışırken, gerçeği tam olarak yansıtmayabilmektedir [136]. Ayrıca, deneysel çalışmaların doğasında bulunan belirsizlikler, çevresel değişkenler ve ölçüm hataları belirli bir hata payına neden olmakta olup sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki farkları artırabilmektedir [137]. Bu nedenle, sayısal simülasyon sonuçları ile deneysel veriler arasındaki %10 ila %15 farklar, deneysel belirsizliklerin ve ölçüm hatalarının doğal bir sonucu olarak kabul edilmektedir. Yapılan çalışmadan elde edilen deneyimler ışığında, aşağıdaki sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

5.1. Sonuçlar

- D100 yakıtına eklenen atık kızartma yağı biyodizeli, özgül yakıt tüketimini %4,6 oranına kadar artırmıştır. 100 ppm SiO_2 ve TiO_2 nanopartikülleri katkılı yakıt karışımlarının yüksek oksijen içeriği, üstün termal iletim özellikleri ve katalitik etkileri özgül yakıt tüketimini sırasıyla %2,5 ve %1,2 oranlarında azaltmış ve literatürde yer alan çalışmaları

ile benzer olduğu gözlemlenmiştir [58-59]. SiO_2 nanopartikülleri içeren karışımların özgül yakıt tüketimi, TiO_2 katkılı karışımlarına göre ortalama %2,4 oranına kadar daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

- B10 yakıtının yüksek oksijen içeriği sayesinde, CO, HC ve is emisyonları D100 yakıtına göre sırasıyla %8,7, %6,3 ve %10,9 oranlarına kadar azalmıştır. B10 yakıtına eklenen SiO_2 ve TiO_2 nanopartiküllerinin, CO, HC ve is emisyonlarını önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiş ve sonuçların literatür çalışmaları ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir [54-57]. Nanopartiküllerin yüksek oksijen içeriği, geniş yüzey alanı ve katalitik özellikleri, yakıtın daha etkin bir şekilde yanmasını sağlayarak CO, HC ve is emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunmuştur. Yakıt karışımlarının nanopartikül konsantrasyonu arttıkça CO ve HC emisyonların azalma eğilimi devam ettiği görülmüştür. Yakıt karışımdaki TiO_2 nanopartikül miktarının artması, is emisyonlarının azalmasına yol açarken, SiO_2 nanopartikül konsantrasyonundaki artış is emisyonlarını artırmıştır. En düşük CO ve HC emisyon değerleri B10Si100 yakıtında elde edilmiş olup %25 motor yükünde sırasıyla %0,04 ve 157,3 ppm olarak kaydedilmiştir. En düşük is emisyon değeri ise %25 motor yükünde B10Ti100 yakıtında elde edilmiştir.
- D100 yakıtına biyodizel ilavesi CO_2 emisyonlarını %3,2'e kadar artırmıştır. Biyodizelin yüksek oksijen içeriği ve düşük ısıl değeri, karbonun daha hızlı bir şekilde tamamen karbon dioksit dönüşmesine yol açarak CO_2 emisyonlarının artmasına neden olmuştur. B10 yakıtına eklenen 100 ppm SiO_2 ve TiO_2 nanopartikülleri, CO_2 emisyonlarını azaltmıştır. Tüm motor yük seviyelerinde, en düşük CO_2 emisyon değeri %25 motor yükünde 100 ppm SiO_2 ilaveli karışımda gözlemlenmiş ve %3,3 olarak kaydedilmiştir.
- D100 yakıtına eklenen atık kızartma yağı, NOx emisyonlarında %8,3'e varan bir artışa neden olmuştur. SiO_2 ve TiO_2 nanopartiküllerinin B10 yakıtına eklenmesi, NOx emisyonlarını sırasıyla %17,9 ve %43,9'a kadar artırmış ve literatürdeki çalışmalarla tutarlı olduğu gözlemlenmiştir [54,65]. Yakıt karışımındaki nanopartikül oranının artması, NOx emisyonlarının artmasına neden olmuştur. Nanopartikül katkılı yakıt karışımlarında en yüksek NOx emisyon değeri %100 motor yükünde 100 ppm TiO_2 katkılı yakıt karışımında gözlemlenmiştir.
- Dizel yakıta biyodizel eklenmesinin, ısıl verim değerlerini %3,3'e kadar azalttığı gözlemlenmiştir. Dizel ile biyodizel karışımına eklenen 25 ppm ve 50 ppm nanopartiküller, ısıl verim değerlerini düşürürken 100 ppm SiO_2 ve TiO_2 nanopartikülleri içeren yakıt karışımlarının ısıl verimin sırasıyla %2,3 ve %1,1 oranlarında arttığı tespit

edilmiştir. Yüksek konsantrasyondaki nanopartikül katkılı yakıt karışımlarında gözlenen artan ısıl verim değerleri, literatürde yapılan çalışmalarla uyumlu bulunmuştur [60,68]. Nanopartikül ilaveli yakıt karışımlarında en yüksek ısıl verim değeri, %100 motor yükünde B10Si100 yakıtında gözlemlenmiştir.

- Ekserji analizi sonuçları incelendiğinde, D100 yakıtı en düşük ekserji yıkım değerlerini sağlamıştır. D100 yakıtına biyodizel ilavesi, ekserji yıkım değerlerini %4,3'e kadar artırmıştır. B10 yakıtına eklenen 100 ppm SiO_2 ve TiO_2 nanopartikülleri ekserji yıkımını sırasıyla %3,7 ve %1,4'e kadar azaltmıştır. Nanopartikül katkılı yakıt karışımlarında en düşük ekserji yıkım değerleri 100 ppm SiO_2 içeren karışımda gözlemlenirken, en yüksek ekserji yıkımı 25 ppm TiO_2 ilaveli karışımda tespit edilmiştir.
- D100 yakıtı en yüksek ekserji verimini sağlarken en düşük verim 25 ppm TiO_2 katkılı karışımda belirlenmiştir. B10 yakıtının ekserji verimi, D100 yakıtına göre %3,2 oranında azalmıştır. B10 yakıtına 100 ppm nanopartikül ilavesi, ekserji veriminde %2,7'e varan bir artışa yol açmıştır. Nanopartikül katkılı yakıt karışımlarında en yüksek ekserji verimi B10Si100 yakıtında tespit edilmiştir.
- Sürdürülebilirlik açısından, en etkili sonuçlar D100 yakıtında tespit edilmiştir. Dizel yakıta biyodizel eklenmesinin, sürdürülebilirlik indeksini azalttığı gözlemlenmiştir. Nanopartikül ilaveli test yakıtları incelendiğinde, B10 yakıtına eklenen 25 ppm ve 50 ppm nanopartiküller, sürdürülebilirlik indeksini azaltırken 100 ppm nanopartikül ilavesi sürdürülebilirlik indeksini artırmıştır. Nanopartikül ilaveli yakıt karışımlarında en yüksek sürdürülebilirlik indeksi, %100 motor yükünde B10Si100 yakıtında gözlemlenmiştir.
- Dizel yakıta biyodizel eklenmesi, üretilen gücün maliyetini %4,1'e kadar azaltmıştır. B10 yakıtına eklenen nanopartiküller, üretilen gücün maliyetini yükseltmiştir. Yakıt karışımlarındaki nanopartikül oranının artmasıyla, üretilen gücün maliyetinin azaldığı tespit edilmiştir. SiO_2 içeren karışımların üretilen gücün maliyeti, TiO_2 katkılı karışımlarına kıyasla ortalama %1,6 oranında daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Nanopartikül katkılı karışımları incelendiğinde, en düşük üretilen gücün maliyeti %100 motor yükünde B10Si100 yakıtında 108,1 $/GJ olarak elde edilirken en yüksek maliyet %25 motor yükünde B10Ti25 yakıtında 190,62 $/GJ olarak gözlemlenmiştir.
- Çevreye salınan CO_2 maliyetinin en düşük değeri %25 motor yükünde B10Si100 yakıtı ile 7.3 $/ay olarak elde edilirken en yüksek maliyet %100 motor yükünde B10Ti25 yakıtında 52.1 $/ay olarak bulunmuştur. Dizel yakıta eklenen atık kızartma yağı, çevreye salınan CO_2 maliyetini %6,24'e kadar artırmıştır. B10 yakıtına ilave edilen 100 ppm SiO_2

ve TiO_2 nanopartikülleri, CO_2 maliyetini azaltmıştır. Yakıt karışımlarındaki nanopartikül artışının, CO_2 maliyetini azalttığı gözlemlenmiştir. SiO_2 katkılı karışımların CO_2 maliyeti, TiO_2 içeren karışımlara kıyasla ortalama %6,6 oranında daha düşük bulunmuştur.

Elde edilen sonuçlar, dizel-biyodizel karışımına eklenen 100 ppm SiO_2 ve TiO_2 nanopartiküllerinin motor performans parametrelerini iyileştirdiğini ve aynı zamanda emisyon değerlerini azalttığını göstermektedir. Nanopartikül katkılı yakıtlar arasında, en yüksek enerji verimi, ekserji verimi ve sürdürülebilirlik indeksi 100 ppm SiO_2 nanopartikülleri içeren yakıt karışımı ile elde edilmiştir. Ayrıca, en düşük CO, CO_2 ve HC emisyonları da SiO_2 nanopartikülleri içeren karışımlarda gözlemlenmiştir. Ekserji ekonomik ve ekserji çevresel analizlerinden elde edilen bulgular ise, 100 ppm SiO_2 nanopartikülleri içeren yakıt karışımının en etkili seçenek olduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla yapılan analizler sonucunda, kullanılan tüm yakıt karışımları arasında en etkin yakıtın 100 ppm SiO_2 nanopartikülleri içeren yakıt karışımı olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma ile dizel-biyodizel karışımına SiO_2 ve TiO_2 nanopartiküllerinin eklenmesinin motor performansı ve emisyonları üzerindeki etkileri ile ekonomik ve çevresel açılardan olan katkıları belirlenmiştir. Böylece, motor teknolojileri ve yakıt stratejilerinin gelecekteki evrimine dair kapsamlı bir yol haritası sunarak, daha sürdürülebilir ve çevre dostu bir ulaşım altyapısının inşasına katkıda bulabilmektedir.

5.2. Öneriler ve Gelecek Çalışmalar

Gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları ışığında, öneriler ve planlanan gelecek çalışmalar aşağıda listelenmiştir.

1. Günümüzde nanopartiküllerin fiyatının yüksek olması, ancak bunların çok düşük seviyelerde yakıta ekleniyor olması, genel yakıt maliyetini önemli ölçüde etkilememektedir. Nano partikül katkılı yakıt karışımları, motor modifikasyonlarına ihtiyaç duyulmadan kullanılabilir. Yakıta eklenen nanopartiküllerin konsantrasyonunun optimal seçiminin, motorun parametreleri üzerindeki önemli etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Farklı oranlardaki dizel ile biyodizel karışımlarına eklenen çeşitli boyutlardaki nanopartiküllerin, dizel motorlarının performansı, yanma parametreleri ve emisyonları üzerindeki etkileri incelenebilir.

2. Nanopartiküllerin motor performansı ve emisyonları üzerindeki etkileri, çeşitli motor devirlerinde ve değişen sıkıştırma oranlarında değerlendirilebilir.
3. Nanopartikül katkılı yakıtların uzun süreli kullanımının, motorun iç bileşenlerindeki aşınma süreçlerine ve genel motor ömrüne olan etkileri incelenebilir.
4. Gelecekteki çalışmalarda, içten yanmalı dizel motorlarda çeşitli nanopartiküllerin kullanımının özellikle ekonomik ve çevresel açılardan değerlendirilmesine odaklanacak çalışmaların yapılması planlanabilir.

KAYNAKLAR

1. Balasubramanian, N., and Steward, K. F. (2019). Biodiesel: History of plant-based oil usage and modern innovations. *Substantia*, 3(2), 57-71.

2. Guo, M., Song, W., and Buhain, J. (2015). Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 712-725.

3. İnternet: Türkiye Biyodizel Sanayi Derneği. Biyodizel Sektör Raporu. (2019). URL: http://www.biyoyakit.org.tr/asset/pdf/biyodizel.pdf, Son Erişim Tarihi 14.03.2024.

4. Sürer, E., Solmaz, H., Yılmaz, E., Calam, A., ve Duygu, İ. (2022). Dizel-biyodizel karışımına karbon nanotüp katkısının motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(2), 1055-1064.

5. Ogunkunle, O., and Ahmed, N. A. (2021). Overview of biodiesel combustion in mitigating the adverse impacts of engine emissions on the sustainable human-environment scenario. *Sustainability*, 13(10), 5465.

6. Saluja, R. K., Kumar, V., and Sham, R. (2016). Stability of biodiesel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 866-881.

7. Leng, L., Li, W., Li, H., Jiang, S., and Zhou, W. (2020). Cold flow properties of biodiesel and the improvement methods: A review. *Energy & Fuels*, 34(9), 10364-10383.

8. Singh, D., Sharma, D., Soni, S. L., Sharma, S., Sharma, P. K., and Jhalani, A. (2020). A review on feedstocks, production processes, and yield for different generations of biodiesel. *Fuel*, 262, 116553.

9. Su, G., Ong, H. C., Mofijur, M., Mahlia, T. I., and Ok, Y. S. (2022). Pyrolysis of waste oils for the production of biofuels: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127396.

10. Karabaş, H. (2022). Investigation of the potentials of oilseed crops used as a first-generation feedstock in the production of environmental friendly fuel biodiesel in terms of sector. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 9(3), 496-501.

11. Supriyanto, E., Sentanuhady, J., Dwiputra, A., Permana, A., and Muflikhun, M. A. (2021). The recent progress of natural sources and manufacturing process of biodiesel: A review. *Sustainability*, 13(10), 5599.

12. Maheshwari, P., Haider, M. B., Yusuf, M., Klemeš, J. J., Bokhari, A., Beg, M., and Jaiswal, A. K. (2022). A review on latest trends in cleaner biodiesel production: Role of feedstock, production methods, and catalysts. *Journal of Cleaner Production*, 355, 131588.

13. Arachchige, U. R., Miyuranga, K. V., Thilakarathne, D., Jayasinghe, R. A., and Weerasekara, N. A. (2021). Biodiesel-alkaline transesterification process for methyl ester production. *Nature Environment and Pollution Technology*, 20(5), 1973-1980.

14. Parangi, T., and Mishra, M. K. (2020). Solid acid catalysts for biodiesel production. *Comments on Inorganic Chemistry*, 40(4), 176-216.

15. Pasha, M. K., Dai, L., Liu, D., Du, W., and Guo, M. (2021). Biodiesel production with enzymatic technology: Progress and perspectives. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 15(5), 1526-1548.

16. Brahma, S., Nath, B., Basumatary, B., Das, B., Saikia, P., Patir, K., and Basumatary, S. (2022). Biodiesel production from mixed oils: A sustainable approach towards industrial biofuel production. *Chemical Engineering Journal Advances*, 10, 100284.

17. Gad, M. S., Panchal, H., and Ağbulut, Ü. (2022). Waste to energy: An experimental comparison of burning the waste-derived bio-oils produced by transesterification and pyrolysis methods. *Energy*, 242, 122945.

18. Ashikhmin, A., Andropov, M., Piskunov, M., Strizhak, P., and Yanovsky, V. (2023). Effects of temperature on viscosity, stability, and microstructure of water-in-biodiesel microemulsions. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 44(6), 987-999.

19. Andreo Martínez, P., Ortiz Martínez, V. M., García Martínez, N., de Los Ríos, A. P., Hernández Fernández, F. J., and Quesada Medina, J. (2020). Production of biodiesel under supercritical conditions: State of the art and bibliometric analysis. *Applied Energy*, 264, 114753.

20. Wahyono, Y., Hadiyanto, H., Budihardjo, M. A., and Adiansyah, J. S. (2020). Assessing the environmental performance of palm oil biodiesel production in indonesia: A life cycle assessment approach. *Energies*, 13(12), 3248.

21. Jeswani, H. K., Chilvers, A., and Azapagic, A. (2020). Environmental sustainability of biofuels: A review. *Proceedings of the Royal Society A*, 476(2243), 20200351.

22. Chong, C. T., Loe, T. Y., Wong, K. Y., Ashokkumar, V., Lam, S. S., Chong, W. T., and Ng, J. H. (2021). Biodiesel sustainability: The global impact of potential biodiesel production on the energy-water-food (EWF) nexus. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101408.

23. Celik, M. (2018). Improvement of performance and exhaust emissions in diesel engines by addition of n-hexadecane material. *Journal of Polytechnıc*, 21(3), 701-706.

24. Khan, S., Dewang, Y., Raghuwanshi, J., Shrivastava, A., and Sharma, V. (2022). Nanoparticles as fuel additive for improving performance and reducing exhaust emissions of internal combustion engines. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(2), 319-341.

25. Imdadul, H. K., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Zulkifli, N. M., Rashed, M. M., Rashedul, H. K., and Mosarof, M. H. (2015). A comprehensive review on the assessment of fuel additive effects on combustion behavior in CI engine fuelled with diesel biodiesel blends. *RSC Advances*, 5(83), 67541-67567.

26. Siddartha, G. V., Ramakrishna, C. S., Kujur, P. K., Rao, Y. A., Dalela, N., Yadav, A. S., and Sharma, A. (2022). Effect of fuel additives on internal combustion engine performance and emissions. *Materials Today: Proceedings*, 63, A9-A14.

27. Sezer, I. (2019). Effect of nano materials additives on fuel properties and combustion characteristics. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(1), 115-136.

28. Küçükosman, R., Yontar, A. A., and Ocakoglu, K. (2022). Nanoparticle additive fuels: Atomization, combustion and fuel characteristics. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 165, 105575.

29. Prabu, A. (2018). Nanoparticles as additive in biodiesel on the working characteristics of a DI diesel engine. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 2343-2349.

30. Hoekman, S. K., and Leland, A. (2018). Literature review on the effects of organometallic fuel additives in gasoline and diesel fuels. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 11(1), 105-124.

31. Ashok, B., Nanthagopal, K., Subbarao, R., Johny, A., Mohan, A., and Tamilarasu, A. (2017). Experimental studies on the effect of metal oxide and antioxidant additives with Calophyllum Inophyllum Methyl ester in compression ignition engine. *Journal of Cleaner Production*, 166, 474-484.

32. Saxena, V., Kumar, N., and Saxena, V. K. (2017). A comprehensive review on combustion and stability aspects of metal nanoparticles and its additive effect on diesel and biodiesel fuelled CI engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 563-588.

33. Yusof, S. A., Sidik, N. C., Asako, Y., Japar, W. A., Mohamed, S. B., and Muhammad, N. A. (2020). A comprehensive review of the influences of nanoparticles as a fuel additive in an internal combustion engine (ICE). *Nanotechnology Reviews*, 9(1), 1326-1349.

34. Rashid, M. M., Forte Tavčer, P., and Tomšič, B. (2021). Influence of titanium dioxide nanoparticles on human health and the environment. *Nanomaterials*, 11(9), 2354.

35. Godwin, H. A., Chopra, K., Bradley, K. A., Cohen, Y., Harthorn, B. H., Hoek, E. M., and Nel, A. E. (2009). The university of california center for the environmental implications of nanotechnology. *Environmental Science & Technology*, 43, 6453-6457.

36. Oberdörster, G., Oberdörster, E., and Oberdörster, J. (2005). Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environmental Health Perspectives*, 113(7), 823-839.

37. Rabajczyk, A., Zielecka, M., Porowski, R., and Hopke, P. K. (2020). Metal nanoparticles in the air: State of the art and future perspectives. *Environmental Science: Nano*, 7(11), 3233-3254.

38. Azadbakht, M., Safieddin Ardebili, S. M., and Rahmani, M. (2021). A study on biodiesel production using agricultural wastes and animal fats. *Biomass Conversion and Biorefinery,* 13, 4893-4899.

39. Gebremariam, S. N. (2023). Biodiesel as a transport fuel, advantages and disadvantages. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 17(5), 1445-1456.

40. Naik, N. S., and Balakrishna, B. (2018). A comparative study of B10 biodiesel blends and its performance and combustion characteristics. *International Journal of Ambient Energy*, 39(3), 257-263.

41. Uyumaz, A. (2020). Experimental evaluation of linseed oil biodiesel/diesel fuel blends on combustion, performance and emission characteristics in a DI diesel engine. *Fuel*, 267, 117150.

42. Khan, E., Ozaltin, K., Spagnuolo, D., Bernal-Ballen, A., Piskunov, M. V., and Di Martino, A. (2023). Biodiesel from rapeseed and sunflower oil: Effect of the transesterification conditions and oxidation stability. *Energies*, 16(2), 657.

43. Uyumaz, A., Aydoğan, B., Yılmaz, E., Solmaz, H., Aksoy, F., Mutlu, İ., İpci, D., and Calam, A. (2020). Experimental investigation on the combustion, performance and exhaust emission characteristics of poppy oil biodiesel-diesel dual fuel combustion in a CI engine. *Fuel*, 280, 118588.

44. Gongora, B., de Souza, S. N. M., Bassegio, D., Santos, R. F., Siqueira, J. A., Bariccatti, R. A., Gurgacz, F., Secco, D., Tokura, D., and Sequinel, R. (2022). Comparison of emissions and engine performance of safflower and commercial biodiesels. *Industrial Crops and Products*, 179, 114680.

45. Mohiddin, M. N., Saleh, A. A., Reddy, A. R., and Hamdan, S. (2018). A study on chicken fat as an alternative feed stock: Biodiesel production, fuel characterization, and diesel engine performance analysis. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 15(3), 5535-5546.

46. Borugadda, V. B., Paul, A. K., Chaudhari, A. J., Kulkarni, V., Sahoo, N., and Goud, V. V. (2018). Influence of waste cooking oil methyl ester biodiesel blends on the performance and emissions of a diesel engine. *Waste and Biomass Valorization*, 9, 283-292.

47. Gharehghani, A., Mirsalim, M., and Hosseini, R. (2017). Effects of waste fish oil biodiesel on diesel engine combustion characteristics and emission. *Renewable Energy*, 101, 930-936.

48. Abed, K. A., El Morsi, A. K., Sayed, M. M., El Shaib, A. A., and Gad, M. S. (2018). Effect of waste cooking-oil biodiesel on performance and exhaust emissions of a diesel engine. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(4), 985-989.

49. Örs, İ., Ciniviz, M., ve Sayın, B. (2021). Atık kızartma yağı biyodizelinin performans, emisyon ve yanma karakteristiklerinin pamuk yağı ve aspir yağı biyodizelleri ile karşılaştırılması. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 37(3), 392-403.

50. Yildizhan, Ş., Uludamar, E., Çalık, A., Dede, G., and Özcanlı, M. (2017). Fuel properties, performance and emission characterization of waste cooking oil in a variable compression ratio (VCR) diesel engine. *European Mechanical Science*, 1(2), 56-62.

51. Saravankumar, P. T., Suresh, V., Vijayan, V., and Godwin Antony, A. (2019). Ecological effect of corn oil biofuel with SiO_2 nano-additives. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 41(23), 2845-2852.

52. Dewangan, A., Mallick, A., Yadav, A. K., and Richhariya, A. K. (2020). Effect of metal oxide nanoparticles and engine parameters on the performance of a diesel engine: A review. *Materials Today: Proceedings*, 21, 1722-1727.

53. Wei, J., He, C., Fan, C., Pan, S., Wei, M., and Wang, C. (2021). Comparison in the effects of alumina, ceria and silica nanoparticle additives on the combustion and emission characteristics of a modern methanol-diesel dual-fuel CI engine. *Energy Conversion and Management*, 238, 114121.

54. Rangabashiam, D., Logesh, K., Yashvanth, U., Subbiah, G., and Selvam, C. (2019). Detailed study on the effect of nano-particle size on emission characteristics of diesel engine. *Petroleum Science and Technology*, 37(18), 2018-2024.

55. Khatri, D., and Goyal, R. (2020). Effects of silicon dioxide nanoparticles on the performance and emission features at different injection timings using water diesel emulsified fuel. *Energy Conversion and Management*, 205, 112379.

56. Adzmi, M. A., Abdullah, A., Abdullah, Z., and Mrwan, A. G. (2019). Effect of Al_2O_3 and SiO_2 metal oxide nanoparticles blended with POME on combustion, performance and emissions characteristics of a diesel engine. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 16(3), 6859-6873.

57. Wei, J., He, C., Lv, G., Zhuang, Y., Qian, Y., and Pan, S. (2021). The combustion, performance and emissions investigation of a dual-fuel diesel engine using silicon dioxide nanoparticle additives to methanol. *Energy*, 230, 120734.

58. Khatri, D., Gupta, R., and Goyal, R. (2019). Performance and emission features of diesel-silicon dioxide (SiO_2) nano particles fuelled operated VCR diesel engine. *Int J Eng Adv Technol (IJEAT)*, 8, 5050-5055.

59. Chen, A. F., Adzmi, M. A., Adam, A., Othman, M. F., Kamaruzzaman, M. K., and Mrwan, A. G. (2018). Combustion characteristics, engine performances and emissions of a diesel engine using nanoparticle-diesel fuel blends with aluminum oxide, carbon nanotubes and silicon oxide. *Energy Conversion and Management*, 171, 461-477.

60. Ramachander, J., Gugulothu, S. K., and Sastry, G. (2022). Performance and emission reduction characteristics of metal based SiO_2 nanoparticle additives blended with ternary fuel (Diesel-MME-Pentanol) on CRDI diesel engine. *Silicon*, 14(5), 2249-2263.

61. Gavhane, R. S., Kate, A. M., Soudagar, M. M., Wakchaure, V. D., Balgude, S., Rizwanul Fattah, I. M., and Shahabuddin, M. (2021). Influence of silica nano-additives on performance and emission characteristics of Soybean biodiesel fuelled diesel engine. *Energies*, 14(5), 1489.

62. Kumar, A. M., Kannan, M., and Nataraj, G. (2020). A study on performance, emission and combustion characteristics of diesel engine powered by nano-emulsion of waste orange peel oil biodiesel. *Renewable Energy*, 146, 1781-1795.

63. Sarma, C. J., Sharma, P., Bora, B. J., Bora, D. K., Senthilkumar, N., Balakrishnan, D., and Ayesh, A. I. (2023). Improving the combustion and emission performance of a diesel engine powered with mahua biodiesel and TiO_2 nanoparticles additive. *Alexandria Engineering Journal*, 72, 387-398.

64. Razzaq, L., Abbas, M. M., Waseem, A., Jauhar, T. A., Fayaz, H., Kalam, M. A., Soudagar, M., Silitonga, A., Husnain, S., and Ishtiaq, U. (2023). Influence of varying concentrations of TiO_2 nanoparticles and engine speed on the performance and emissions of diesel engine operated on waste cooking oil biodiesel blends using response surface methodology. *Heliyon*, 9(7), 17758.

65. Yaşar, A., Keskin, A., Yıldızhan, Ş., Uludamar, E., and Ocakoğlu, K. (2018). Effects of titanium-based additive with blends of butanol and diesel fuel on engine characteristics. *International Journal of Global Warming*, 15(1), 38-53.

66. Karagoz, M., Uysal, C., Agbulut, U., and Saridemir, S. (2021). Exergetic and exergoeconomic analyses of a CI engine fueled with diesel-biodiesel blends containing various metal-oxide nanoparticles. *Energy*, 214, 118830.

67. Vigneswaran, R., Balasubramanian, D., and Sastha, B. S. (2021). Performance, emission and combustion characteristics of unmodified diesel engine with titanium dioxide (TiO_2) nano particle along with water-in-diesel emulsion fuel. *Fuel*, 285, 119115.

68. D'Silva, R., Binu, K. G., and Bhat, T. (2015). Performance and emission characteristics of a CI engine fuelled with diesel and TiO_2 nanoparticles as fuel additive. *Materials Today: Proceedings*, 2(4), 3728-3735.

69. Ağbulut, Ü. (2022). Understanding the role of nanoparticle size on energy, exergy, thermoeconomic, exergoeconomic, and sustainability analyses of an IC engine: A thermodynamic approach. *Fuel Processing Technology*, 225, 107060.

70. Jafarmadar, S., and Amini Niaki, S. R. (2022). Experimental exergy analyses in a DI diesel engine fuelled with a mixture of diesel fuel and TiO_2 nano-particle. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 41(1), e13703.

71. Karthikeyan, S., and Prathima, A. (2017). Environmental effect of CI engine using microalgae methyl ester with doped nano additives. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 50, 385-396.

72. Örs, I., Sarıkoç, S., Atabani, A. E., Ünalan, S. E., and Akansu, S. O. (2018). The effects on performance, combustion and emission characteristics of DICI engine fuelled with TiO_2 nanoparticles addition in diesel/biodiesel/n-butanol blends. *Fuel*, 234, 177-188.

73. Senthil Kumar, J., Ramesh Bapu, B. R., and Gugan, R. (2020). Emission examination on nanoparticle blended diesel in constant speed diesel engine. *Petroleum Science and Technology*, 38(2), 98-105.

74. Goh, B. H., Chong, C. T., Ge, Y., Ong, H. C., Ng, J. H., Tian, B., Ashokkumar, B., Lim, S., Seljak, T., and Józsa, V. (2020). Progress in utilization of waste cooking oil for sustainable biodiesel and biojet fuel production. *Energy Conversion and Management*, 223, 113296.

75. Singh, D., Sharma, D., Soni, S. L., Inda, C. S., Sharma, S., Sharma, P. K., and Jhalani, A. (2021). A comprehensive review of biodiesel production from waste cooking oil and its use as fuel in compression ignition engines: 3rd generation cleaner feedstock. *Journal of Cleaner Production*, 307, 127299.

76. Doğan, T. H. (2016). The testing of the effects of cooking conditions on the quality of biodiesel produced from waste cooking oils. *Renewable Energy*, 94, 466-473.

77. Suzihaque, M. H., Alwi, H., Ibrahim, U. K., Abdullah, S., and Haron, N. (2022). Biodiesel production from waste cooking oil: A brief review. *Materials Today: Proceedings*, 63, S490-S495.

78. Yesilyurt, M. K. (2020). A detailed investigation on the performance, combustion, and exhaust emission characteristics of a diesel engine running on the blend of diesel fuel, biodiesel and 1-heptanol as a next-generation higher alcohol. *Fuel*, 275, 117893.

79. Mohanty, P., Mahapatra, R., Padhi, P., Ramana, C. V., and Mishra, D. K. (2020). Ultrasonic cavitation: An approach to synthesize uniformly dispersed metal matrix nanocomposites: A review. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 23, 100475.

80. Xu, M., Peng, B., Zhu, X., and Guo, Y. (2022). Multi-gas detection system based on non-dispersive infrared (NDIR) spectral technology. *Sensors*, 22(3), 836.

81. Ziółkowski, A., Fuć, P., Lijewski, P., Jagielski, A., Bednarek, M., and Kusiak, W. (2022). Analysis of exhaust emissions from heavy-duty vehicles on different applications. *Energies*, 15(21), 7886.

82. Börger, K., Belt, A., Kandler, A., Schultze, T., and Arnold, L. (2022). Investigation of smoke characteristics by photometric measurements. *Fire and Evacuation Modeling Technical Conference,* 9, 2022.

83. AVL BOOST v2013.2 Theory. (2013). A-8020 Graz, Austria.

84. Bellér, G., Árpád, I., Kiss, J. T., and Kocsis, D. (2021). AVL Boost: A powerful tool for research and education. *Journal of Physics: Conference Series*, 1935(1), 12015.

85. Castresana, J., Gabina, G., Martin, L., and Uriondo, Z. (2021). Comparative performance and emissions assessments of a single-cylinder diesel engine using artificial neural network and thermodynamic simulation. *Applied Thermal Engineering*, 185, 116343.

86. Lipskis, I., Pukalskas, S., Droździel, P., Barta, D., Žuraulis, V., and Pečeliūnas, R. (2021). Modelling and simulation of the performance and combustion characteristics of a locomotive diesel engine operating on a diesel-LNG mixture. *Energies*, 14(17), 5318.

87. Yu, W., Zhang, Z., and Liu, B. (2021). Investigation on the performance enhancement and emission reduction of a biodiesel fueled diesel engine based on an improved entire diesel engine simulation model. *Processes*, 9(1), 104.

88. Gholami Ghanati, S., Doğan, B., Yeşilyurt, M. K., and Yaman, H. (2023). Determination of engine performance and harmful pollutants of a spark-ignition engine fueled with higher-order alcohol/gasoline blends by engine simulation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering,* 0, 1-12.

89. Zel'dovich, Y.B. (1946). The oxidation of nitrogen in combustion explosions. *Acta Physicochimica U.S.S.R*, 21, 577-628.

90. Pattas, K., and Häfner, G. (1973). Stickoxidbildung bei der ottomotorischen Verbrennung. *Motortechnische Zeitschrift*, 34(12), 397-404.

91. Chauvy, M., Delhom, B., Reveillon, J., and Demoulin, F. X. (2010). Flame/wall interactions: Laminar study of unburnt HC formation. *Flow, Turbulence and Combustion*, 84, 369-396.

92. Salazar, V. M., and Ghandhi, J. B. (2009). Discussion of the role of fuel-oil diffusion in the hydrocarbon emissions from a small engine. *SAE International Journal of Engines*, 1(1), 1347-1356.

93. Vera, J., and Ghandhi, J. (2011). Investigation of post-flame oxidation of unburned hydrocarbons in small engines. *SAE International Journal of Engines*, 4(1), 67-81.

94. Şanli, B. G., and Uludamar, E. (2020). Energy and exergy analysis of a diesel engine fuelled with diesel and biodiesel fuels at various engine speeds. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(11), 1299-1313.

95. Doğan, B., and Erol, D. (2023). The investigation of energy and exergy analyses in compression ignition engines using diesel/biodiesel fuel blends: A review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(5), 1765-1782.

96. Bridjesh, P., and Arunkumar, G. (2015). Energy and exergy analysis of diesel engine by varying compression ratio. *International Journal of Chemical Science*, 13(2), 997-1013.

97. Yaman, H. (2022). Investigation of the effect of compression ratio on the energetic and exergetic performance of a CI engine operating with safflower oil methyl ester. *Process Safety and Environmental Protection*, 158, 607-624.

98. Çakmak, A., and Bilgin, A. (2017). Bir dizel motorda mısır yağı biyodizeli kullanımının termodinamik analizi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 5(2), 87-97.

99. Yılmaz, İ. (2019). Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda bilgisayar destekli enerji ve ekserji analizi. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 31(3), 201-207.

100. Odibi, C., Babaie, M., Zare, A., Nabi, M. N., Bodisco, T. A., and Brown, R. J. (2019). Exergy analysis of a diesel engine with waste cooking biodiesel and triacetin. *Energy Conversion and Management*, 198, 111912.

101. Doğan, B., Çelik, M., Bayındırlı, C., and Erol, D. (2023). Exergy, exergoeconomic, and sustainability analyses of a diesel engine using biodiesel fuel blends containing nanoparticles. *Energy*, 274, 127278.

102. Erol, D., Yeşilyurt, M. K., Yaman, H., and Doğan, B. (2023). Evaluation of the use of diesel-biodiesel-hexanol fuel blends in diesel engines with exergy analysis and sustainability index. *Fuel*, 337, 126892.

103. Şimsek, S., Gürüf, G., Uslu, S., and Şimsek, H. (2023). Exergy analysis of diesel engine fueled by binary combinations of diesel/waste animal fat biodiesel. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(15), 7767-7780.

104. Yaman, H., Doğan, B., Yeşilyurt, M. K., and Erol, D. (2021). Application of higher-order alcohols (1-hexanol-C6 and 1-heptanol-C7) in a spark-ignition engine: Analysis and assessment. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(12), 11937-11961.

105. Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Mohammadi, P., Khoshnevisan, B., Rajaeifar, M. A., and Pakzad, M. (2017). Neat diesel beats waste-oriented biodiesel from the exergoeconomic and exergoenvironmental point of views. *Energy Conversion and Management*, 148, 1-15.

106. Lazzaretto, A., and Tsatsaronis, G. (2006). SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. *Energy*, 31(8-9), 1257-1289.

107. Demirbas, M., and Yesilyurt, M. K. (2023). Investigation of the behaviors of higher alcohols in a spark-ignition engine as an oxygenated fuel additive in energy, exergy, economic, and environmental terms. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(10), 4427-4462.

108. Hatami, M., Hasanpour, M., and Jing, D. (2020). Recent developments of nanoparticles additives to the consumables liquids in internal combustion engines: Part II: Nano-lubricants. *Journal of Molecular Liquids*, 319, 114156.

109. Ettefaghi, E., Rashidi, A., Ghobadian, B., Najafi, G., Ghasemy, E., and Mazlan, M. (2021). Bio-nano emulsion fuel based on graphene quantum dot nanoparticles for reducing energy consumption and pollutants emission. *Energy*, 218, 119551.

110. Laza, T., and Bereczky, Á. (2011). Basic fuel properties of rapeseed oil-higher alcohols blends. *Fuel*, 90(2), 803-810.

111. Li, L., Wang, J., Wang, Z., and Xiao, J. (2015). Combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with diesel/biodiesel/pentanol fuel blends. *Fuel*, 156, 211-218.

112. Liaquat, A. M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Varman, M., Hazrat, M. A., Shahabuddin, M., and Mofijur, M. (2012). Application of blend fuels in a diesel engine. *Energy Procedia*, 14, 1124-1133.

113. Kumar, S., Dinesha, P., and Bran, I. (2017). Experimental investigation of the effects of nanoparticles as an additive in diesel and biodiesel fuelled engines: A review. *Biofuels*, 10(5), 615-622.

114. Simsek, S. (2020). Effects of biodiesel obtained from Canola, safflower oils and waste oils on the engine performance and exhaust emissions. *Fuel*, 265, 117026.

115. Hazrat, M. A., Rasul, M. G., Khan, M. K., Ashwath, N., and Rufford, T. E. (2019). Emission characteristics of waste tallow and waste cooking oil based ternary biodiesel fuels. *Energy Procedia*, 160, 842-847.

116. Noriler, D., Rosebrock, C. D., Madler, L., Meier, H. F., and Fritsching, U. (2014). Influence of atomization and spray parameters on the flame spray process for nanoparticle production. *Atomization and Sprays*, 24(6), 495-524.

117. Pinchuk, V. A., and Kuzmin, A. V. (2020). The effect of the addition of TiO_2 nanoparticles to coal-water fuel on its thermophysical properties and combustion parameters. *Fuel*, 267, 117220.

118. Sharma, S., and Maréchal, F. (2019). Carbon dioxide capture from internal combustion engine exhaust using temperature swing adsorption. *Frontiers in Energy Research*, 7, 143.

119. Baskar, P., and Senthilkumar, A. (2016). Effects of oxygen enriched combustion on pollution and performance characteristics of a diesel engine. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(1), 438-443.

120. Valente, O. S., Pasa, V. D., Belchior, C. P., and Sodré, J. R. (2012). Exhaust emissions from a diesel power generator fuelled by waste cooking oil biodiesel. *Science of the total environment*, 431, 57-61.

121. Kashdan, J. T., Mendez, S., and Bruneaux, G. (2007). On the origin of unburned hydrocarbon emissions in a wall guided, low NOx diesel combustion system. *SAE Transactions*, 116, 234-257.

122. Mofijur, M. M., Rasul, M. G., Hyde, J., Azad, A. K., Mamat, R., and Bhuiya, M. K. (2016). Role of biofuel and their binary and ternary blends on internal combustion engines emission reduction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 265-278.

123. Durai, C. S., Subramanian, N., and Duraisamy, A. J. (2023). Experimental investigation on SiO_2 nano particle as additives on performance and emission parameters of diesel engine fueled with castor oil blends. *Journal of Air Pollution and Health*, 8(4), 425-434.

124. Fangsuwannarak, K., and Triratanasirichai, K. (2013). Improvements of palm biodiesel properties by using nano-TiO_2 additive, exhaust emission and engine performance. *Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mecatronics*, 43,111.

125. Palash, S. M., Kalam, M. A., Masjuki, H. H., Masum, B. M., Fattah, I. R., and Mofijur, M. (2013). Impacts of biodiesel combustion on NOx emissions and their reduction approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 473-490.

126. Hoekman, S. K., and Robbins, C. (2012). Review of the effects of biodiesel on NOx emissions. *Fuel Processing Technology*, 96, 237-249.

127. Masera, K., and Hossain, A. K. (2023). Advancement of biodiesel fuel quality and NOx emission control techniques. *Renewable and sustainable energy reviews*, 178, 113235.

128. Ozgur, T., Tuccar, G., Uludamar, E., Yilmaz, A. C., Güngör, C., Ozcanli, M., Serin, H., and Aydin, K. (2015). Effect of nanoparticle additives on NOx emissions of diesel fuelled compression ignition engine. *International Journal of Global Warming*, 7(4), 487-498.

129. Di Iorio, S., Beatrice, C., Guido, C., Napolitano, P., Vassallo, A., and Ciaravino, C. (2012). Impact of biodiesel on particle emissions and DPF regeneration management in a Euro5 automotive diesel engine. *SAE Technical Paper*, 1, 839.

130. Agarwal, A. K., Gupta, T., Shukla, P. C., and Dhar, A. (2015). Particulate emissions from biodiesel fuelled CI engines. *Energy Conversion and Management*, 94, 311-330.

131. Dağlıoglu, Y. (2018). Nanopartikül karakterizasyon yöntemleri ve ekotoksisite deneylerindeki önemi. *Marmara Fen Bilimleri Dergisi,* 30(1), 1-17.

132. Li, S., Siu, Y. W., and Zhao, G. (2021). Driving factors of CO_2 emissions: Further study based on machine learning. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 721517.

133. Doğan, B., Gholami Ghanati, S., Yeşilyurt, M. K., and Yaman, H. (2024). Effects of compression ratio on the performance and emission levels of a CI engine fueled with safflower oil methyl ester through an engine simulation approach. *Science and Technology for Energy Transition*, 79(16), 2024015.

134. Rutland, CJ. (2011). Large-eddy simulations for internal combustion engines–a review. *International Journal of Engine Research*, 12(5), 421-451.

135. Nabi, MN., Rasul, M., Gudimetla, P. (2019). Modelling and simulation of performance and combustion characteristics of diesel engine. *Energy Procedia*, 160, 662-669.

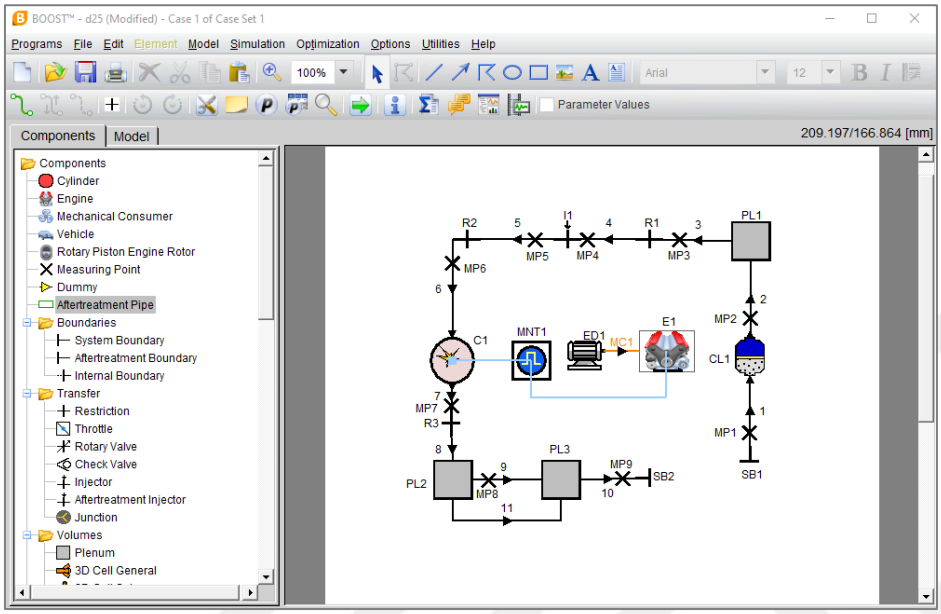
136. Sabariah, MS., Nabilah, AS., Rosli, AB., Junaidi, ZZ., Mustafar, MT. (2019). Analysis and simulation of combustion and emission on small engine. *InIOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 469(1), 012076.

137. Ikpe, AE., Owunna, IB. (2020). A 3D modelling of the in-cylinder combustion dynamics of two stroke internal combustion engine in its service condition. *Nigerian Journal of Technology*, 39(1), 161-172.

EKLER

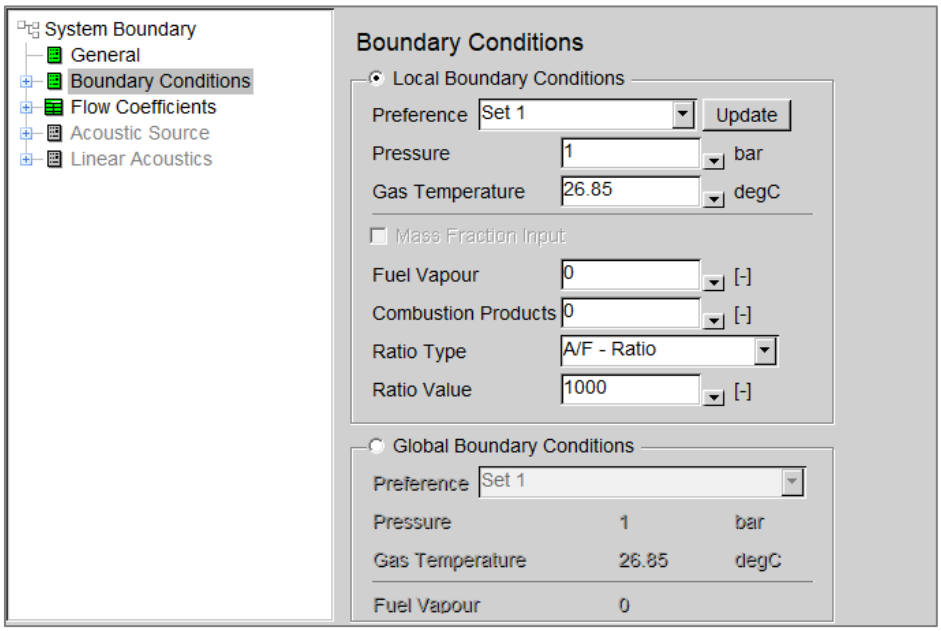
EK-1. AVL Boost modülü

AVL Boost programı sayfasında yerleştirilen motor bileşenleri ve ölçüm ekipmanlarının arayüz görünümü Şekil EK-1.1'de gösterilmiştir.



Şekil EK-1.1. AVL Boost programının çalışma alanı arayüz görünümü

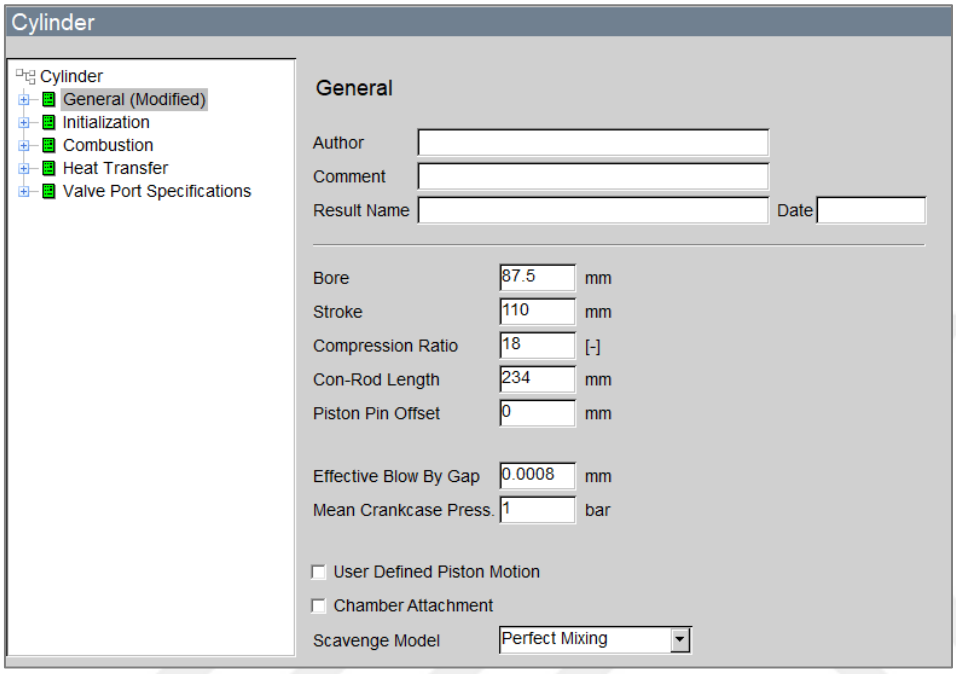
Şekil EK-1.2'de görüldüğü üzere, giriş ve çıkış havasındaki sınır koşulları tanımlanmıştır.



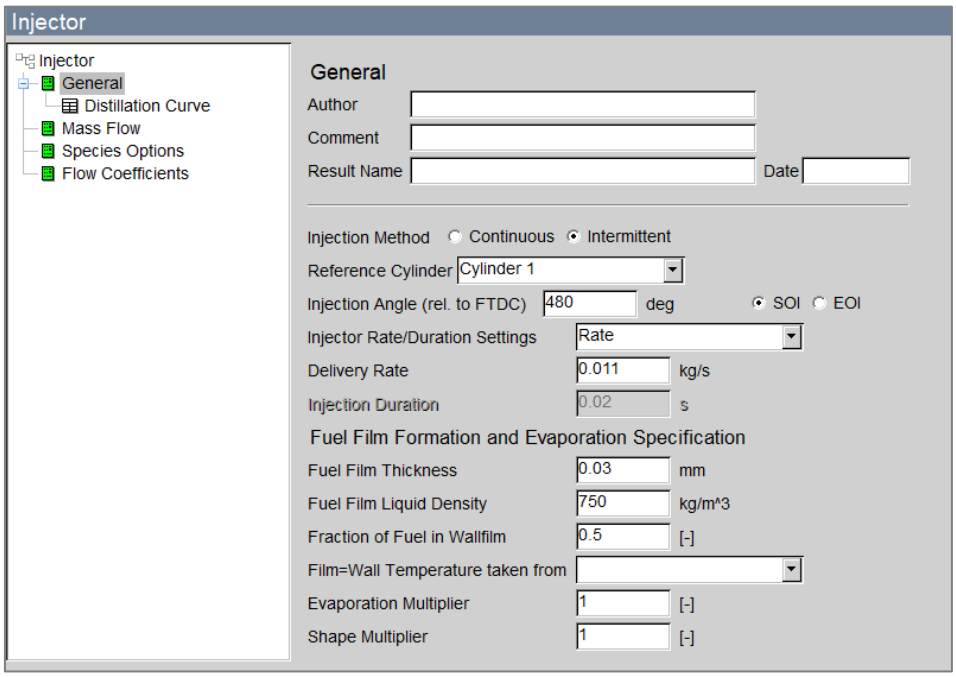
Şekil EK-1.2. Simülasyon sırasında kullanılan sınır şartları

EK-1. (devam) AVL Boost modülü

İlerleyen aşamalarda, Şekil EK-1.3 ve EK-1.4'te gösterildiği gibi, silindir geometrisi, hava-yakıt oranı, sıkıştırma oranı ve enjeksiyon parametreleri belirlenmektedir.



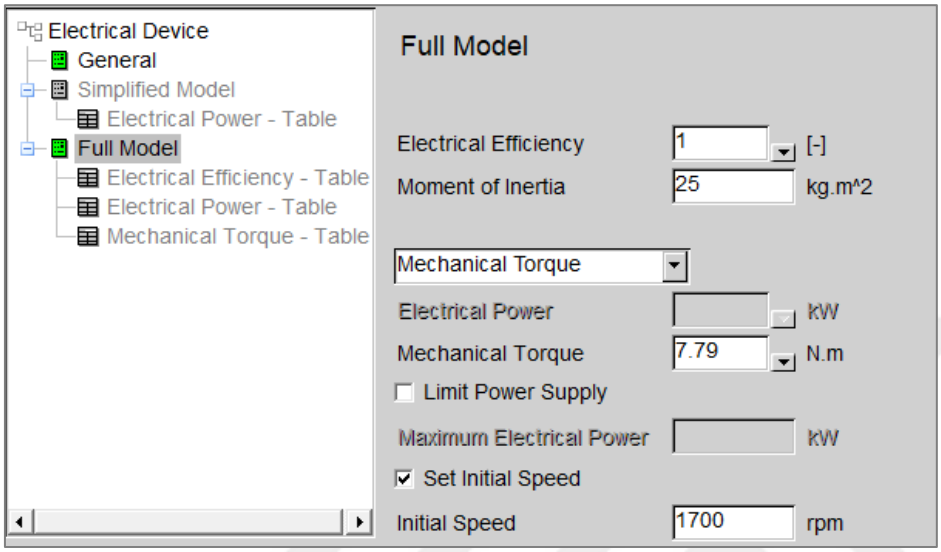
Şekil EK-1.3. Silindir ayarları



Şekil EK-1.4. Enjektör ayarları

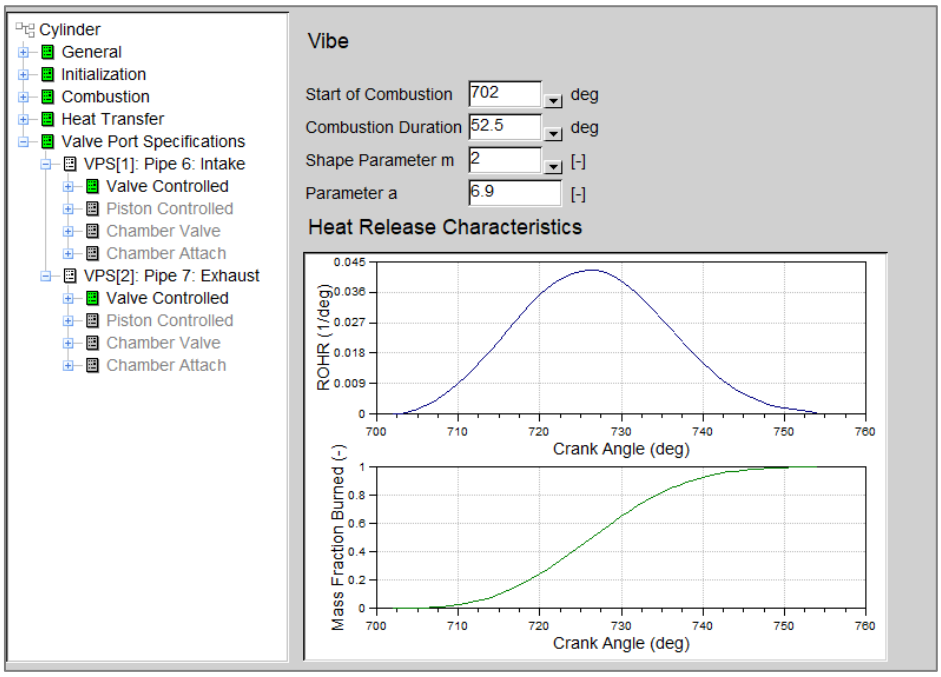
EK-1. (devam) AVL Boost modülü

Çalışmada, yükleme ünitesi olarak kullanılan elektrik motorunun ayarlama penceresi, Şekil EK-1.5'te verilmiştir.



Şekil EK-1.5. Yükleme ünitesi ayarları

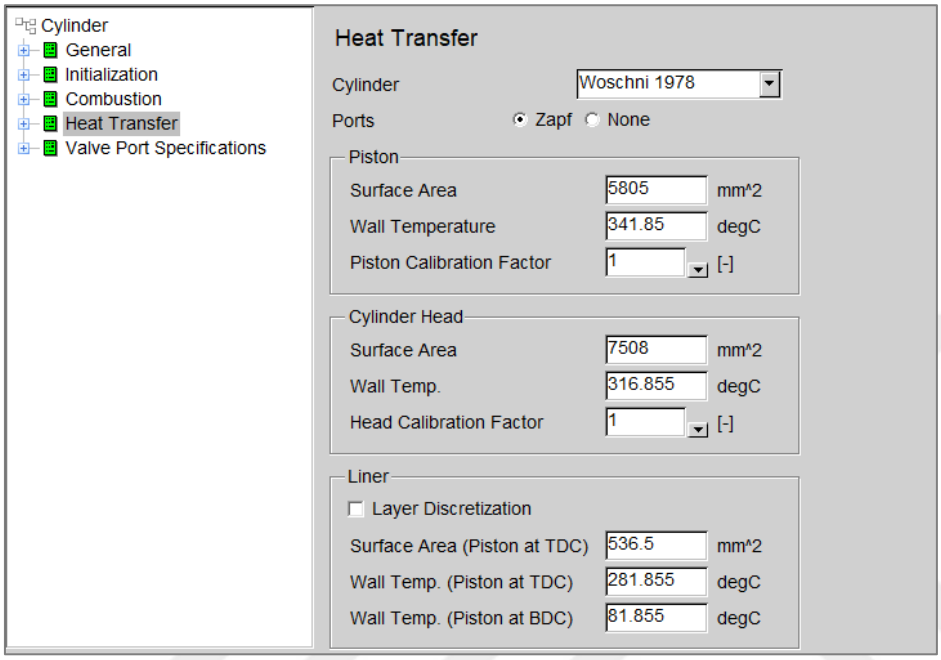
Şekil EK-1.6'da yanma sürecini modellemek için kullanılan Vibe modelinin ayarlama penceresi gösterilmiştir.



Şekil EK-1.6. Yanma ayarları

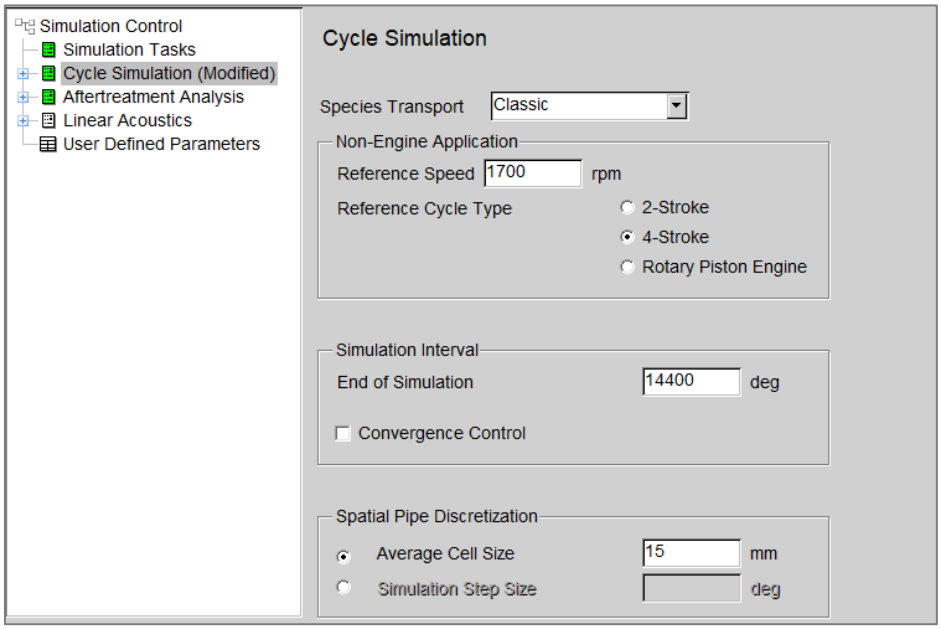
EK-1. (devam) AVL Boost modülü

Yapılan çalışmada, ısı transfer mekanizmasını modellemek için kullanılan Woschni 1978 modelinin ayarlama penceresi, Şekil EK-1.7'de görülmektedir.



Şekil EK-1.7. Isı transferi ayarları

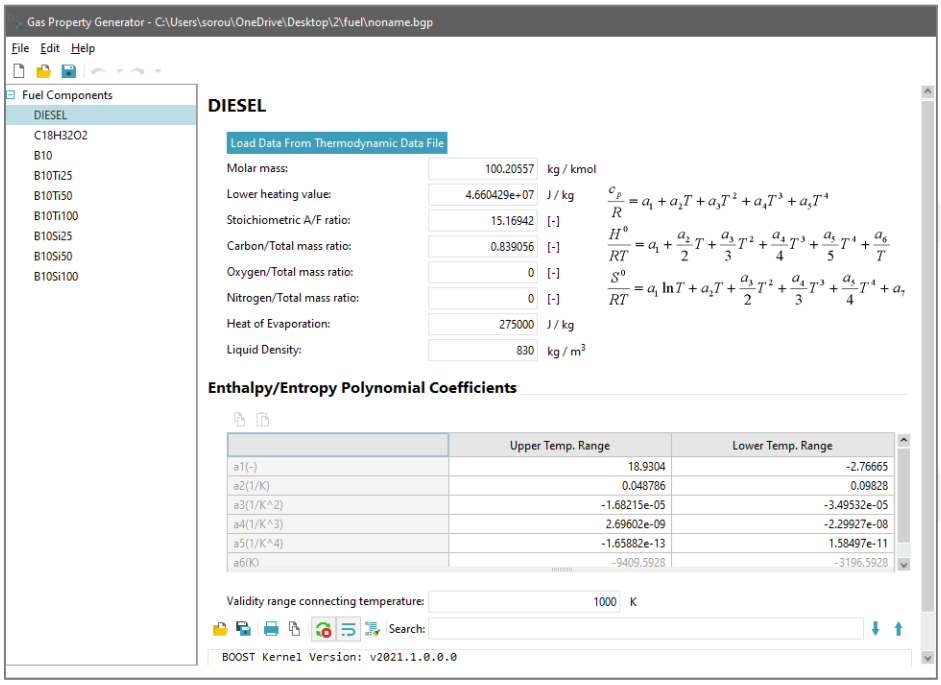
Şekil EK-1.8'de ise AVL Boost programının genel simülasyon ayarları gösterilmektedir.



Şekil EK-1.8. Genel simülasyon ayarları

EK-1. (devam) AVL Boost modülü

AVL Boost programının yakıt kütüphanesinde bulunmayan bir yakıt karışımı kullanılması gerektiğinde, "Gas Property Generator" aracı kullanılarak programa yeni yakıtlar tanıtılabilmektedir. AVL programı "Gas Property Generator" aracının arayüz görünümü Şekil EK-1.9'da gösterilmiştir.



Şekil EK-1.9. AVL "Gas Property Generator" aracı



Gazili olmak ayrıcalıktır