



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HİBRİT NANOPARTİKÜL İLAVESİNİN BİR DİZEL MOTORUN
PERFORMANS, YANMA VE EMİSYON
KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

ÜMİT AĞBULUT

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. SUAT SARIDEMİR**

DÜZCE, 2021

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİBRİT NANOPARTİKÜL İLAVESİNİN BİR DİZEL MOTORUN
PERFORMANS, YANMA VE EMİSYON
KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Ümit AĞBULUT tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Suat SARIDEMİR

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Suat SARIDEMİR

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Hamit SARUHAN

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet ŞEN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Doç. Dr. Tolga TOPGÜL

Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Ali Etem GÜREL

Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 31/05/2021

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

31 Mayıs 2021

Ümit AĞBULUT



TEŐEKKÜR

Yazar, bu doktora tez çalışmasının gerçekleőtirilmesinde, kendi akademik ve kişisel geliőtisinde katkısı bulunan ve aşağıda bahsi geçen kişi ve kurumlara teőekkürü bir borç bilir.

Hayat boyunca karőtılaőtıđım zorluklarda hertürlü desteğini hissettiren ve bana inanan çok kıymetli anneme, babama, ablalarım ve yeğenlerime, doktora çalıőmalarım boyunca tüm deneylerin gerçekleőtirilmesinde beraber emek harcadığımız çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Suat SARIDEMİR'e en içten dileklerle teőekkür ederim. Ayrıca, özellikle bireysel akademik geliőtimum üzerinde çok büyük katkılara ve yönlendirmelere sahip Doç. Dr. Ali Etem GÜREL ve Prof. Dr. Onuralp ULUER hocamlarıma teőekkür ederim.

Sürecin en baőtından itibaren, değerli zamanlarını ayırarak tez çalışmasının kalitesini artırmaya yönelik katkıları, yapıcı yorumları, önerileri ve düzeltmelerinden dolayı Prof. Dr. Hamit SARUHAN ve Doç. Dr. Mehmet ŞEN'e ve tüm süreç boyunca desteklerini hissettiren Arő. Gör. Melahat Sevgül Bakay'a ve Gökhan YILDIZ'a en içten dileklerle teőekkürlerimi sunarım.

Son olarak, eğitim hayatımın tüm evrelerinde vermiş olduğu burs ve teőviklerden dolayı TÜBİTAK'a ve 2020.07.04.1097 numaralı Bilimsel Araştırma Projesine vermiş olduğu maddi desteklerden dolayı Düzce Üniversitesi'ne teőekkürü bir borç bilirim.

31 Mayıs 2021

Ümit AĞBULUT

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR.....	ix
SİMGELER	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
EXTENDED ABSTRACT.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	5
3. MATERYAL VE METOT	20
3.1. EKİPMANLAR VE ÖLÇÜM DETAYLARI	20
3.2. MOTOR PERFORMANSI GÖSTERGELERİ	25
3.2.1. Özgül Yakıt Tüketimi (ÖYT).....	26
3.2.2. Isıl verim (IV)	26
3.3. ISI YAYILIM ORANI.....	27
3.4. TEST YAKITLARININ HAZIRLANMASI	29
4. SONUÇLAR.....	40
4.1. TEST YAKITLARININ STABİLİTESİ.....	40
4.2. YANMA KARAKTERİSTİĞİ	47
4.2.1. Maksimum Silindir İçi Gaz Basıncı.....	62
4.2.2. Maksimum Isı Yayılım Oranı	64
4.2.3. Tutuşma Gecikmesi.....	66
4.2.4. Yanma Süresi.....	68
4.3. PERFORMANS KARAKTERİSTİKLERİ	69
4.3.1. Özgül Yakıt Tüketimi	70
4.3.2. Isıl Verim.....	73
4.4. EMİSYON KARAKTERİSTİKLERİ	76
4.4.1. Egzoz gazı sıcaklığı.....	76
4.4.2. Karbon monoksit emisyonu	80
4.4.3. Nitrojen Oksit emisyonu.....	83
4.4.4. Hidrokarbon emisyonu	85
5. BULGULAR.....	90
6. DENEYSEL TECRÜBELER, KARŞILAŞILAN ZORLUKLAR VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ.....	93
7. KAYNAKLAR	96
ÖZGEÇMİŞ	112

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.1. Test motoru.....	20
Şekil 3.2. Enjektör (a) Genel görünüm (b) Yakıt püskürtme anı (c) Enjektör delikleri.	22
Şekil 3.4. Tork ölçüm ekipmanları (a) Önerilen montaj (b) Deney sistemi üzerinde montajlı görünüm (c) Verilerin İşlenmesi (d) Bilgisayar ekranında verilen okunması.	24
Şekil 3.5. Yanma analizi (a) Silindir içi basınç sensörü (b) Enkoder (c) Febris sensör arayüzü (d) Febris yanma analizi yazılımı.	25
Şekil 3.6. Deney düzeneğinin şematik görünümü.	28
Şekil 3.7. Deney düzeneğinin gerçek görünümü.	29
Şekil 3.8. CuO nanopartiküllerin farklı büyüklüklerdeki SEM görüntüsü (a) 1 µm (b) 5 µm.....	30
Şekil 3.9. bN nanopartiküllerin farklı büyüklüklerdeki SEM görüntüsü (a) 1 µm (b) 5 µm.....	31
Şekil 3.10. Al ₂ O ₃ nanopartiküllerin farklı büyüklüklerdeki SEM görüntüsü (a) 1 µm (b) 5 µm.....	32
Şekil 3.11. CuO nanopartikülüne ait EDX spektrum.....	33
Şekil 3.12. bN nanopartikülüne ait EDX spektrum.	33
Şekil 3.13. Al ₂ O ₃ nanopartikülüne ait EDX spektrum.....	34
Şekil 3.14. Nanoyakıtların hazırlanmasında takip edilen adımlar.	35
Şekil 3.15. Setan sayısı ölçüm cihazı.....	36
Şekil 3.16. Kinematik viskozite ölçüm cihazı.	37
Şekil 3.17. Yoğunluk ölçüm cihazı.....	37
Şekil 3.18. Parlama noktası ölçüm cihazı.	38
Şekil 4.1. Nanopartikül ilave edilmemiş test yakıtları (D100).	40
Şekil 4.2. Ultrasonikasyon işleminden hemen sonra nanopartikül ilave edilmiş test yakıtlarının görünümü (0. Dakika- Referans görüntü).....	41
Şekil 4.3. Test numunelerinin hazırlandıktan 12 saat sonraki görüntüleri.	41
Şekil 4.4. Test numunelerinin hazırlandıktan 24 saat sonraki görüntüleri.	42
Şekil 4.5. Test numunelerinin hazırlandıktan 48 saat sonraki görüntüleri.	43
Şekil 4.6. Test numunelerinin hazırlandıktan 72 saat sonraki görüntüleri.	43
Şekil 4.7. Test numunelerinin hazırlandıktan 1 hafta sonraki görüntüleri.....	44
Şekil 4.8. Test numunelerinin hazırlandıktan 15 gün sonraki görüntüleri.....	44
Şekil 4.9. Test numunelerinin hazırlandıktan 30 gün sonraki görüntüleri.....	45
Şekil 4.10 Test numunelerinin hazırlandıktan 45 gün sonraki görüntüleri.....	45
Şekil 4.11. Test numunelerinin hazırlandıktan 60 gün sonraki görüntüleri.....	46
Şekil 4.12. Yanma ve püskürtme karakteristiklerinin detaylandırılması.	48
Şekil 4.13. Yanma eğrileri (a) Püskürtme başlangıcı – ani ısı düşüşü (b) Yanma başlangıcı – sıfır noktasını geçiş.	49
Şekil 4.14. Tutuşma gecikmesinin tespiti.	50
Şekil 4.15. Maksimum silindir basıncı ve lokasyonu.	51
Şekil 4.16. Maksimum ısı yayılım oranı.....	51
Şekil 4.17. Yanma sonunun tespiti.	52
Şekil 4.18. 250 ppm’de silindir içi gaz basıncı ve ısı yayılım oranları (a) 3 Nm (b) 6 Nm (c) 9 Nm ve (d) 12 Nm.	54
Şekil 4.19. 500 ppm’de silindir içi gaz basıncı ve ısı yayılım oranları (a) 3 Nm (b) 6	

Nm (c) 9 Nm ve (d) 12 Nm.	55
Şekil 4.20. 1000 ppm'de silindir içi gaz basıncı ve ısı yayılım oranları (a) 3 Nm (b) 6 Nm (c) 9 Nm ve (d) 12 Nm.	56
Şekil 4.21. Ortalama yanma ve püskürtme parametrelerin ölçeklendirilmesi.	61
Şekil 4.22. Test yakıtlarının ortalama maksimum silindir içi gaz basınçları ve yüzdesel değişimleri.	63
Şekil 4.23. Test yakıtlarının ortalama ısı yayılım oranları ve yüzdesel değişimleri.	65
Şekil 4.24. Test yakıtlarının ortalama tutuşma gecikmesi süreleri ve yüzdesel değişimleri.	67
Şekil 4.26. Test yakıtlarının değişen nanopartikül dozajlarına göre ortalama yanma süreleri.	69
Şekil 4.27. Değişen motor yüklerine göre özgül yakıt tüketimleri (a) 250 ppm (b) 500 ppm (c) 1000 ppm (d) ortalama değişimler.	71
Şekil 4.28. Değişen motor yüklerine göre ısı verimindeki değişimler (a) 250 ppm (b) 500 ppm (c) 1000 ppm (d) ortalama değişimler.	74
Şekil 4.29. Ortalama performans değişimlerinin tüm nanopartiküller için radar grafiği üzerinde görünümü (%0-%15 aralığında ölçeklendirilmiştir).	76
Şekil 4.30. Değişen motor yükleri için egzoz gazı sıcaklıkları (a) 250 ppm (b) 500 ppm ve (c) 1000 ppm.	78
Şekil 4.31. Değişen motor yükleri için CO emisyonlarının değişimi (a) 250 ppm (b) 500 ppm (c) 1000 ppm.	81
Şekil 4.32. Değişen motor yükleri için NOx emisyonlarının değişimi.	84
Şekil 4.33. Değişen motor yükleri için HC emisyonlarının değişimi.	86
Şekil 4.34. Emisyonların ortalama yüzdesel değişimi (%0-%40 aralığında ölçeklendirilmiştir).	88

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 3.1. Test motorunun teknik özellikleri.....	21
Çizelge 3.2. Egzoz emisyonu cihazının ölçüm aralığı.....	23
Çizelge 3.3. Nanopartiküllerin fiziksel özellikleri.....	29
Çizelge 3.4. Test yakıtlarının bazı önemli özellikleri.....	39
Çizelge 4.1. 250 ppm'deki yanma ve püskürtme parametrelerinin sayısal değerleri.	58
Çizelge 4.2. 500 ppm'deki yanma ve püskürtme parametrelerinin sayısal değerleri.	59
Çizelge 4.3. 1000 ppm'deki yanma ve püskürtme parametrelerinin sayısal değerleri. ..	60



KISALTMALAR

AID	Alt ısııl değer
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
B10	%90 dizel ve %10 biyodizel
bN	Boron nitrit
BSFC	Özgöl yakıt tüketimi
BTE	Isıl verim
CeO ₂	Seryum oksit
CeO ₂	Seryum IV Oksit
CO	Karbon monoksit
CO ₂	Karbon dioksit
CuO	Bakır oksit
D100	Geleneksel dizel yakıt
EGS	Egzoz gazı sıcaklığı
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
FeCl ₃	Demir III Klorür
HC	Hidrokarbon
IV	Isıl verim
IY01O _{max}	Maksimum ısı yayılım oranı
KA	Krank açısı
Ni/Cr	Nikel/Krom
NO _x	Azot oksitler
O ₂	Oksijen
ÖYT	Özgöl yakıt tüketimi
PB	Püskürtme başlangıcı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TG	Tutuşma gecikmesi
TiO ₂	Titanyum oksit
U	İç enerji
UEA	Uluslararası Enerji Ajansı
YB	Yanma başlangıcı
YS	Yanma süresi
ZnO	Çinko oksit

SİMGELER

C_p	Sabit basınçtaki özgül ısı
CP_{max}	Maksimum silindir içi gaz basıncı
C_v	Sabit hacimdeki özgül ısı
g	Gram
h	Saat
Hz	Hertz
kJ	KiloJoule
kW	KiloWatt
\dot{m}	Kütleli debi
P	Silindir içi gaz basıncı
ppm	Milyonda bir
Q_t	Isı yayılımı
R	Gaz sabiti
rpm	Dakikadaki devir sayısı
s	Saniye
T	Sıcaklık
V	Hacim
YCP_{max}	Maksimum silindir içi gaz basıncının yeri
W	İş

ÖZET

HİBRİT NANOPARTİKÜL İLAVESİNİN BİR DİZEL MOTORUN PERFORMANS, YANMA VE EMİSYON KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Ümit AĞBULUT

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Suat SARIDEMİR

Mayıs 2021, 111 sayfa

Bu tez çalışmasında, mono ve hibrit nanopartikül kullanımının bir dizel motorun yanma, performans ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu bağlamda, üç farklı nanopartikül tipi (Al_2O_3 , bN ve CuO) ve bunların ikili hibrit formları (CuO- Al_2O_3 , bN-CuO ve bN- Al_2O_3) geleneksel dizel yakıt ile ultrasonikasyon yöntemi kullanılarak kütleli olarak 250, 500 ve 1000 ppm miktarlarında karıştırılmıştır. Ayrıca, testler nanopartikül içermeyen geleneksel dizel yakıt (D100) ile de gerçekleştirilmiş ve referans veriler elde edilmiştir. Testler tek silindirli, hava soğutmalı bir dizel motorda, 2400 rpm sabit motor devrinde ve 3, 6, 9, 12 Nm değişken motor yüklerinde gerçekleştirilmiştir. Nanopartikül kullanımının dizel yakıtın ısı değerini, setan sayısını ve viskozitesini artırdığı gözlemlenmiştir. Test motoru nanopartikül takviye edilmiş test yakıtları ile çalıştırıldığında, motorun yanma, performans ve emisyon karakteristiklerinde önemli oranlarda iyileşmeler saptanmıştır. Nanopartikül takviyesi ile, tutuşma gecikmesi sürelerinin %4,20 ile %13,75 aralığında kısaldığı görülmüştür. Ayrıca, nanopartiküllerin katalizör görevi üstlenip yanma süreci boyunca kimyasal reaksiyonları hızlandırması sayesinde ortalama yanma sürelerinde %6,93'ten %11,73'e kadar kısaltmalar saptanmıştır. Tüm test yakıtları arasında, en kısa yanma süresi CuO- Al_2O_3 hibrit nanopartikül kullanılan yakıtta elde edilmiştir. Öte yandan, frenleme özgül yakıt tüketimi (ÖYT) ve ısı verim (IV), tüm nanopartikül içerikli test yakıtlarında gelişme göstermiştir. ÖYT değerinde en büyük düşüş, yanma süresinin de en kısa sürdüğü CuO- Al_2O_3 hibrit test yakıtı ile %11,08 oranında gözlemlenirken, aynı test yakıtı için ısı verim de %6,57 oranında artmıştır. Yanma sürelerinin kısaltılması, üstün ısı iletim kabiliyetleri, geniş yüzey/hacim oranı ve gelişen motor performansı, nanopartikül içerikli test yakıtlarında daha düşük egzoz gazı sıcaklığı ve daha düşük NOx emisyonlarını tetiklemiştir. Nanopartikül ilavesi ile birlikte NOx emisyonları için hesaplanan düşüş oranı %8,5 ile %25,8 aralığında değişmektedir. Ayrıca, CO ve HC gibi eksik yanma ürünlerinde de tüm nanopartikül içerikli test yakıtlarında önemli seviyelerde düşüşler gözlemlenmiştir. CO emisyonundaki ortalama düşüş %18,7 ile %34,4 aralığında iken bu oran HC emisyonları için %4,2 ile 20,3 aralığında kalmıştır. Tüm sonuçlar bir arada düşünüldüğünde ise, geleneksel dizel yakıt ile birlikte nanopartiküllerin kullanımı hem enerji verimliliği hem de çevresel hususlar açısından oldukça umut verici sonuçlar sunmaktadır. Ayrıca, hibrit nanopartikül kullanımı ile birlikte motor karakteristikleri üzerindeki iyileşmelerin mono nanopartikül kullanımına göre genelde daha iyi sonuçlar verdiği de gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Dizel motor, Emisyon, Nanopartikül, Performans, Yanma.

ABSTRACT

INVESTIGATION THE EFFECTS OF ADDING HYBRID NANOPARTICLE ON PERFORMANCE, COMBUSTION AND EMISSION CHARACTERISTICS OF A DIESEL ENGINE

Ümit AĞBULUT

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Suat SARIDEMİR

May 2021, 111 pages

In this thesis study, it is aimed to investigate the effects of using mono and hybrid nanoparticles on the combustion, performance and emission characteristics of a diesel engine. In this framework, three different types of nanoparticles (Al_2O_3 , bN, and CuO) and their binary hybrid forms (CuO- Al_2O_3 , bN-CuO, and bN- Al_2O_3) were doped into conventional diesel fuel (D100) at mass fractions of 250, 500, and 1000 ppm by using the ultrasonication method. In addition, the tests were carried out with conventional diesel fuel (D100) without nanoparticles and reference data were gathered. Tests were performed on a single-cylinder, air-cooled diesel engine, at a constant engine speed of 2400 rpm and varying engine loads of 3, 6, 9, 12 Nm. It is observed that nanoparticles increase the heating value, cetane number, and viscosity of diesel fuel. When the test engine was run with nanoparticles-doped test fuels, significant improvements were noticed in the engine's combustion, performance and emission characteristics. With the addition of nanoparticles, ignition delay duration shortened between 4.20% and 13.75%. Moreover, due to the fact that nanoparticles act as catalysts and accelerate chemical reactions during the combustion process, the average combustion duration (CD) shortened from 6.93% to 11.73%. Among all fuels, the shortest CD occurred for CuO- Al_2O_3 hybrid test fuel. On the other hand, the brake-specific fuel consumption (BSFC) and brake thermal efficiency (BTE) improved for all nanoparticle-containing test fuels. The largest reduction for the BSFC value was observed with the CuO- Al_2O_3 hybrid test fuel, where the CD was the shortest, at a rate of 11.08%, while the thermal efficiency for the same test fuel improved by 6.57%. The shortened CD, superior heat transfer mechanism, large surface/volume ratio, and improved engine performance ensured lower exhaust gas temperature as well as lower NO_x emissions for nanoparticle-containing test fuels. With the addition of nanoparticles, the reduction rate for NO_x emissions varied between 8.5% and 25.8%. Besides, incomplete combustion products such as CO and HC emissions were noticed to significantly drop for all nanoparticle-containing test fuels. While the average reduction for CO emissions was between 18.7% and 34.4%, this rate remained between 4.2% and 20.3% for HC emissions. Considering all results together, the use of nanoparticles along with conventional diesel fuel offers very promising results in terms of both energy efficiency and environmental aspects. In addition, it is noticed that the improvements in engine characteristics with the use of hybrid nanoparticles generally give better results than the use of mono nanoparticles.

Keywords: Combustion, Diesel engine, Emission, Nanoparticle, Performance.

EXTENDED ABSTRACT

INVESTIGATION THE EFFECTS OF ADDING HYBRID NANOPARTICLE ON PERFORMANCE, COMBUSTION AND EMISSION CHARACTERISTICS OF A DIESEL ENGINE

Ümit AĞBULUT

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Suat SARIDEMİR

May 2021, 111 pages

1. INTRODUCTION

The transportation sector has a respectable share on the world's energy consumption as well as global greenhouse gas emissions. This sector is almost entirely driven by the burning of petroleum products in internal combustion engines. However, petroleum products are not renewable energy sources, and their reserves, therefore, have a limit. The reserves of petroleum products are depleting day by day, and this case leads to both pollution of the environment and an increase in the costs of remaining reserves. Therefore, the popularity of studies on alternative fuels for the transportation sector is continuously increasing. In recent years, a number of fuel researchers have announced that the engine characteristics have noteworthy improved with the presence of nanoparticles in the fuels. Accordingly, this study investigates the use of different types of nanoparticles in diesel engines as mono and hybrid forms in order to use the remaining petroleum reserves in a more efficient and environmentally friendly way. To present a detail investigation, it is aimed to test different types of nanoparticles along with conventional diesel fuel and to investigate their impacts on the combustion, performance, and emission characteristics of a diesel engine.

2. MATERIAL AND METHODS

In this thesis study, three nanoparticles which are copper oxide (CuO), aluminum oxide (Al₂O₃), and boron nitride (bN) separately added into conventional diesel fuel (DF) at the mass fractions of 250, 500, and 1000 ppm. In addition to usage of mono nanoparticles, the hybrid nanoparticles CuO-Al₂O₃, bN-Al₂O₃, and bN-CuO were also added to diesel fuel. The mass fractions were measured with the aid of Radwag AS 220 R.2 sensitive

scale with the accuracy of ± 0.0001 g. Accordingly, seven test fuels (DF, Al_2O_3 , CuO, bN, bN- Al_2O_3 , bN-CuO, CuO- Al_2O_3) were formed in the study. In forming of these test fuels, some widely used significant steps were followed to ensure more homogenous blends. Nanoparticles-added test fuels were initially mixed with the aid of a mechanic stirrer at 500 rpm for 1 hour, and then the blends were exposed to ultrasonication waves at 40 kHz for 2 hours. After these steps, the test fuels directly poured into the fuel tank not to allow the sedimentation of the nanoparticles in the fuel. The tests conducted at a single-cylinder and air-cooled Lombardini brand 15 LD 350 diesel engine. The engine operated at varying load conditions ranging from 3 to 12 Nm with an interval of 3 Nm under the constant engine speed of 2400 rpm.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The experimental results demonstrated that the ignition delay (ID) period shortens between 4.20% and 13.75% thanks to higher cetane numbers of nanoparticles-doped test fuels according to that of conventional DF. As the engine load increases, ID generally shortens for each test fuel. The shortest ignition delay is noticed for bN-CuO test fuels. The combustion duration (CD) period always takes a short time for the nanofuels. The shortest period stays between 6.93% and 11.78% according to that of DF. The shortest CD period is noticed when the engine is fuelled by CuO- Al_2O_3 test fuel. As the nanoparticle concentration increases from 250 to 1000 ppm, it is observed that this period gradually shortens for all nanofuels. This may be related to the improvement of the engine performance since the performance of the engine increases with any increment in nanoparticle concentration. On the other hand, brake-specific fuel consumption drops in all cases with the presence of nanoparticles in test fuels, and it drops by 11.08% for CuO- Al_2O_3 test fuel. This reduction may be related to the shortened CD period to reach the same engine conditions, increased calorific value, and energy density with nanoparticles. Moreover, brake thermal efficiency enhances by 6.57% with the addition of nanoparticles due to enhanced heating value, cetane number, catalyst effect, accelerated chemical reactions, shortened both ID and CD periods of nanoparticle addition. On the other hand, noteworthy reductions are recorded in the exhaust pollutants when the engine fuels with nanoparticles-diesel fuels. For instance, a reduction of 34.4% and 20.3% for CO and HC emissions is observed with the CuO- Al_2O_3 test fuel. Probably, the reason underlying this reduction is directly related to the improvement of the test fuel properties and increased heating value and oxygen content with nanoparticles. NO_x emission drops by 25.8% with

CuO-Al₂O₃ test fuel. The reason behind the reduction of NO_x may be attributable to the increased heat transfer mechanism, shortened CD period, and reduced fuel consumption. All these ensure a lower temperature which cannot allow reacting the nitrogen and oxygen more. The recorded exhaust gas temperature (EGT) approve this case. That is, lower EGT values are recorded for nanofuels due to high surface to volume ratio, higher thermal conductivity value, enhanced performance with the addition of nanoparticles.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

Based on the experimental results of the present thesis study, it is possible to say that the nanoparticles-doped test fuels are improving the engine characteristics thanks to their superior physical and chemical properties. Moreover, hybrid nanoparticle addition into DF gives more satisfying results in terms of combustion, performance, and emission characteristics. Briefly, the presence of nanoparticles in the fuel ensures a significant reduction in the CO, HC, and NO_x emissions. On the other hand, nanofuels enhance the brake thermal efficiency while dropping the brake-specific fuel consumption according to the conventional diesel fuel. Overall, it is suggested for future studies that diesel fuel should be used with nanoparticles. However, there are some significant drawbacks to using nanoparticles. In today's technology, the sedimentation, agglomeration, and clustering of nanoparticles in the fuels are unavoidable issues. These issues seem a major obstacle to the wide use and commercialization of nanoparticles with fuels. Moreover, the nanoparticles have a high cost, and they significantly increase the unit price of the test fuels. Therefore, it is suggested that future works may focus on the cost analysis of the use of nanoparticles along with diesel fuel. Another important point to be handled is that the characteristics of test fuels are improving as the nanoparticle fraction increases. However, it is thought that the engine characteristics may be worsened after a point of the high fraction. That is because the viscosity of test fuel is increasing step by step with any increment in the dosage. The increment in the viscosity results in poor atomization for the nanofuels at high dosages. Therefore, future works may work on the determination of the best dosage selection for the engine characteristics. Besides, an optimization study may be beneficial in this stage for both saving time and cost. Finally, this thesis study is suggesting that future works may investigate the optimization of nanoparticle dosages as well as the prediction of engine characteristics.

1. GİRİŞ

Günümüzde dünyanın birincil enerji ihtiyacı %86 oranında kömür, doğal gaz ve petrol gibi fosil kökenli yakıtların termik santrallerde yakılması ile karşılanmakta ve dünya enerji talebi her geçen gün katlanarak artmaktadır (Abas ve ark., 2015). Son 10 yıllık süreçte, dünya birincil enerji tüketimi yıllık ortalama %1,7'lik artışlar sergilemiştir (Yıldız ve ark., 2020). Hızla artan küresel nüfus, gelişen teknoloji ve sanayileşme, genişleyen ekonomiler, yükselen yaşam standartları ve birçok diğer önemli faktör günümüzde sürekli artan enerji talebinin arkasında yatan ana tetikleyicilerdir. Uluslararası Enerji Ajansı'nın 2019 yılı içerisinde yayımladığı bir rapora göre, 2050 yılına gelindiğinde küresel enerji tüketiminin 2018 yılındakinden yaklaşık %50 daha fazla olacağı da tahmin edilmektedir (Li ve ark., 2018). Oysaki bilinen rezervlerle birlikte fosil kökenli yakıtların yaşadığımız yüzyıl içerisinde tamamen tükeneceği de öngörülmektedir (Uluer ve ark., 2018). Dünyanın toplam enerji tüketiminin yaklaşık üçte biri ulaşım sektöründen kaynaklanmaktadır (Liang ve ark., 2017). Türkiye'de ise ulaşım sektörü, birincil enerji tüketiminin yaklaşık %14'ünden ve birincil petrol tüketiminin yaklaşık %51'inden sorumludur (Solak, 2013). Ayrıca, ulaşım sektörü günümüzde %99'dan daha fazla oranla fosil kökenli yakıtların içten yanmalı motorlar içerisinde yakılması sonucu sürdürülebilirliğini devam ettirebilmektedir (Kalghathi ve ark., 2018).

Tarihin tüm evrelerinde, fosil yakıtlar ticaret hacmi en geniş enerji kaynağı olmuştur. Bununla birlikte, ülkelerin ekonomik gelişmişlikleri ve cari açıkları üzerindeki etkileri de oldukça fazladır (Özaytürk ve Alper, 2017). Türkiye toplam birincil enerji ihtiyacının yaklaşık %75'ini (Gürel ve ark., 2019) ve toplam petrol ihtiyacının ise %91-93'ünü (Solak, 2013) dış kaynaklardan sağlamaktadır. Bu yüzden, Türkiye'nin petrol fiyatlarındaki volatilité hareketlerinden etkilenmesi de kaçınılmazdır. Bu etkinin minimize edilmesi için ülkemizde petrole olan bağımlılığın azaltılması gerekmektedir.

Fosil yakıtların ülke ekonomileri üzerindeki etkilerinin yanısıra çevre üzerindeki etkileri de günümüzde oldukça hissedilir seviyelerdedir ve fosil yakıtlar temiz/çevreci enerji kaynakları arasında yer almamaktadır. Fosil yakıtların, içten yanmalı motorlar içerisinde yakılması ile birlikte birçok zararlı egzoz emisyonlarının atmosfere salınarak hava kirliliğine yol açtığı da bilinmektedir. Dünya genelinde, ulaşım sektöründe kullanılan bir

günlük sıvı yakıt tüketimi yaklaşık 11 milyar litre civarındadır (Kalghathi ve ark., 2018). Bir litre dizel yakıtın ya da bir litre benzinin içten yanmalı motorlar içerisinde yakılması sonucu atmosfere salınan CO₂ (karbon dioksit) emisyonları ise sırasıyla 2,6 kilogram ve 2,4 kilogramdır (Kumar ve Sharma, 2018). Ulaşım sektörü toplam küresel CO₂ emisyonlarının %23-24'ünden (Al-Enazi ve ark., 2021; Chapman, 2007) ve toplam küresel sera gazlarının ise %14'ünden sorumludur (Lee ve ark., 2020). Bu oranlar, fosil yakıtların hava kalitesini ve buna bağlı olarak insan sağlığını ne denli etkileyebileceğini ortaya koymaktadır. The Lancet dergisinin 2016 yılında yayımladığı bir rapora göre, dünya genelinde hava kirliliğinin yol açtığı hastalıklar sebebiyle ölen kişi sayısı yıllık ortalama 6,5 milyon civarındadır. Daha çarpıcı olan ise, bu sayının yıllık tüberküloz, AIDS/HIV ve trafik kazalarında ölen insanların toplamından daha fazla olduğu gerçeğidir (The Lancet, 2016). Bu veriler, son zamanlarda insanoğlunun çevresel faktörler üzerindeki endişelerini daha da görünür bir hale getirmiştir.

Fosil yakıt tüketimi ile ilgili problemler sadece bu yakıtların ülke ekonomilerindeki ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri ile de sınırlı değildir. Göz ardı edilemeyecek diğer önemli bir husus ise, fosil yakıtların yenilenemez bir enerji kaynağı olmasıdır. Başka bir ifade ile bu yakıtlar sonlu rezervlere sahiptir ve zamanla tamamen tükenecektir. Oysaki dünyanın birincil enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için %86 oranında (Ayas ve ark., 2016) bu yakıtlara bağlı olunması, bu yakıtlar ile tahrik olan tüm sistemler için kısa, orta ve uzun vadedeki yatırımları ve küresel enerji talebine yakın gelecekte nasıl cevap verilebileceği gibi soruları zihinlere getiren önemli bir gerçekliktir.

Fosil kökenli yakıtları kullanarak enerji üreten sistemlerin bu yakıtlara bağımlılığını azaltmak ve bu yakıtların kullanımı ile karşılaşılan zorlukları minimize etmek için genelde iki kurgu üzerinde durulmaktadır. Bunlardan birincisi; fosil kökenli yakıtlar yerine daha güvenilir, temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağına tümüyle geçiş ve bu sayede fosil kökenli yakıtlara bağımlılığın günbegün azaltılmasıdır. Ancak, fosil yakıtlar ile tahrik olan termik santrallerin verimlerinin genelde yüksek olması ve günümüzde nispeten hem daha ekonomik hem de kolay ulaşılabilir bir enerji kaynağı olması bu kurgunun gerçekleşmesini sınırlayan önemli unsurlardır. İkinci kurgu ise geriye kalan rezervlerin daha etkin, verimli ve çevreci bir şekilde değerlendirilmesidir. Her iki kurgu da oldukça önemli olmasına rağmen, bu çalışma ile ikinci kurgunun yani geride kalan fosil yakıt rezervlerinin ulaşım sektöründe daha verimli ve çevreci kullanılabilmesi üzerinde durulacaktır.

Değişen ve sıkılaştıran emisyon normları, fiyatlardaki yüksek volatilité, yakıtlara olan güvensizlik ortamı ve son yıllardaki olumsuz çevresel etkilerle birlikte artan endişeler araştırmacıları yeni, yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarını aramaya teşvik etmektedir. Bu bağlamda, araştırmacılar son zamanlarda birçok yakıt tipini ya da yakıt eklentisini içten yanmalı motorlarda geleneksel yakıtlara alternatif olarak test etmişlerdir. Bunların yanı sıra, araçlardaki motor tahrik sistemini tamamen değiştirecek köklü değişiklikler de (elektrikli tahrik sistemleri gibi) birçok araştırmacının odak noktası olmaya başlamıştır. Son yıllarda hızla gelişen elektrikli araç teknolojisine rağmen ulaşım sektöründeki sıvı yakıt tüketiminin 2040 yılına kadar ortalama %1,1/yıl'lık kümülatif artışlar sergileyeceği de öngörülmektedir (Taufiq-Yap ve ark., 2020). Elektrikli araç teknolojisi hem yakıt ekonomikliği hem de çevresel açıdan oldukça umut verici çıktılar sunmasına rağmen, bu tez çalışmasının kapsamı dışında kalmaktadır.

Literatürde bugüne kadar geleneksel dizel yakıtı alternatif olarak en çok kabul görmüş olan yakıt tipi ya da yakıt eklentisi şüphesiz biyoyakıtlardır (Ganesan ve ark., 2020; Şanlı ve ark., 2019; Thapa ve ark., 2018). Biyokütle, güneşten elde ettiği enerjiyi fotosentez yoluyla kimyasal enerjiye dönüştürüp bu enerjiyi bünyesinde depolayan bitkilerden elde edilen, toksik etkisi bulunmayan, biyobozunur, sülfür içermeyen ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır (Doudin, 2021; Omonhinmin ve ark., 2020; Dixit ve ark., 2020). Taşıtlarda kullanılan ve biyokütleden elde edilen biyoyakıtlar maddenin iki formu ile karşımıza çıkmaktadır. Bunlardan ilki, biyodizel ve biyoetanol gibi sıvı formda iken, diğeri hidrojen ve biyogaz gibi maddenin gaz formundadır. Her iki form da günümüzde taşıtlarda sıklıkla tercih edilmektedir. Biyoyakıtların içten yanmalı motorlarda sıklıkla kullanılmasının arkasında yatan sebepler, bu yakıtların motor sistemi üzerinde hiçbir değişikliğe ihtiyaç duymadan direkt olarak yakıt tankına boşaltılabiliyor olması, depolanmalarının güvenli olması, özelliklerinin geleneksel yakıtlara yakın olması ve yerel kaynaklardan elde edilebiliyor olması yani ithal olmayan ürünlerden de üretilebiliyor olmasıdır (Villarante ve Ibarrientos, 2021; Yusoff ve ark., 2020; Kadapure ve ark., 2020). Ancak, biyoyakıt kullanımının bazı önemli dezavantajları da mevcuttur. Örneğin, biyodizellerin viskoziteleri geleneksel dizel yakıtlara göre oldukça yüksektir (Ma ve ark., 2021a; Işık, 2021). Yüksek viskozite, yakıtın püskürtme karakteristiklerini ve atomizasyon aşamasını olumsuz etkileyerek motor performansı üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır. Ayrıca, biyodizellerin enerji içerikleri geleneksel dizel yakıtlara kıyasla daha düşüktür (Dey ve ark., 2021; Lakshmi ve ark., 2021) ve

biyodizellerin birim maliyetleri de günümüzde geleneksel yakıtlardan daha yüksektir (Kumar ve Singh, 2019; Kirubakaran ve Selvan, 2018). Bu olumsuzluklar, yakıt üzerinde çalışmalar yapan araştırmacıları farklı yakıt eklentileri aramaya itmiştir. Son yıllarda, gelişen teknoloji ile birlikte oldukça küçük boyutlarda (nano ve mikro gibi) malzeme üretimleri kolaylaşmıştır. Bu malzemelerin yaygınlaşması ile birlikte küçük boyutlu malzemeler için özellikle ısı mühendisliği alanında yeni birçok kullanım alanı doğmuştur. Boyutlarının oldukça küçük olması mikro kanallardan hatta küçük elek çaplarına sahip filtrelerden bile geçebiliyor olması bu parçacıkların akışkanlar ile birlikte kullanımına olanak sağlamıştır.

Nanomalzemelerin akışkanlar içerisine süspansiyon edilmesi ile oluşan yeni karışımlar nanoakışkanlar olarak adlandırılmaktadır. Birçok araştırmacı, nanoakışkanların, sistem performanslarını önemli seviyelerde iyileştirdiğini bildirmişlerdir. Son zamanlarda, bu nanomalzemeleri yakıt içerisine takviye eden çalışmalar da popülerlik kazanmıştır. Yakıt üzerine çalışmalar yapan araştırmacılar nanopartiküllerin yakıt içerisine ilave edilmesi ile birlikte motorlarda performans, yanma ve emisyon karakteristiklerinde kayda değer iyileşmeler gözlemlediklerini rapor etmişlerdir. Bu tez çalışmasında da son yıllarda popüleritesi gittikçe artan bu yeni yakıt eklentilerinin bir dizel motor üzerinde meydana getirdiği değişikliklerin detaylıca tartışılması amaçlanmaktadır.

Çalışmanın ilerleyen bölümleri şu şekilde devam etmektedir. Bölüm 2, konu ile ilgili güncel literatür çalışmalarını genelden özele doğru açıklamaktadır. Bölüm 3, deney sistemini, ölçüm ekipmanlarını, test yakıtlarının hazırlanmasını ve çalışmada kullanılan eşitlikleri kapsamaktadır. Bölüm 4, yakıtların homojenlik sürelerini ve elde edilen sonuçları detaylı bir şekilde sunarak, grafikleri neden/sonuç ilişkisi ile birlikte açıklamaktadır. Bölüm 5 ise elde edilen bulguları bir özet şeklinde sunmaktadır. Son bölüm ise, deneysel çalışmalardan kazanılan tecrübeleri, karşılaşılan zorlukları, çözüm önerilerini ve gelecek çalışmalar için önerileri kapsamaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Dizel yakıt ve biyoyakıt kullanımları ve bu kullanımlar sonucunda dizel motorlardaki performans, yanma ve emisyon karakteristikleri üzerinde meydana gelen değişimleri içeren yakıtlar ve yanma konusunda son yıllarda yapılmış önemli çalışmalar bu bölümde yer almaktadır. Öncelikle, bu çalışmalarda ağırlıklı olarak dizel-biyodizel ve dizel-alkol karışimli yakıtların performans, yanma ve emisyon karakteristikleri üzerinde meydana getirdiği değişiklikler incelenecektir. Daha sonra, son yıllarda popülerliği günden güne artan nanopartiküllerin dizel yakıtı içerisinde kullanımı ve elde edilen deneysel sonuçlar ele alınacaktır.

Dizel ve çeşitli biyoyakıtlardan oluşan ikili ya da üçlü yakıt karışımları uzun süredir yakıt araştırmacıları tarafından dizel motorlarda en sık test edilen alternatif yakıt örnekleridir. Örneğin, Selvaraj ve Thangavel (2021) değişen motor yüklerinde kızartma yağı metil esteri, dietil ester ve geleneksel dizel yakıtı birbirleri ile karıştırarak ikili ve üçlü yakıt tipleri elde etmişlerdir. Test yakıtı olarak, (1) %100 dizel yakıt, (2) %60 dizel yakıt + %40 kızartma yağı metil esteri, (3) %55 dizel yakıt + %40 kızartma yağı metil esteri + %5 dietil ester ve (4) %50 dizel yakıt + %40 kızartma yağı metil esteri + %10 dietil ester karışımları hazırlamışlardır. Çalışmada, geleneksel dizel yakıtta kızartma yağı metil esteri ilavesinin yeni test yakıtlarının yoğunluğunu, kinematik viskozitesini ve setan sayısını artırdığı ancak kalorifik değeri düşürdüğü, dietil ester ilavesinin ise, karışımın yoğunluğunu, kinematik viskozitesini, alt ısı değerini ve setan sayısını azalttığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar ele alındığında, tüm motor yüklerinde en yüksek ısı veriminin geleneksel dizel yakıtta elde edilirken, en düşük ısı veriminin ise %60 dizel yakıt + %40 kızartma yağı metil esteri karışımından elde edildiği görülmüştür. Ayrıca, ikili yakıt karışımına dietil ester ilavesinin, ısı verim değerini iyileştirdiği ve özgül yakıt tüketimini (ÖYT) düşürdüğü gözlemlenmiştir. Performans göstergeleri açısından, kızartma yağı metil esterinin sebep olduğu kötüleşmenin arkasında yatan ana sebebin; artan viskozite sebebiyle yakıtın atomizasyonunun kötüleşmesi ve püskürtme karakteristiklerinin olumsuz yönde etkilenmesi olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca hem kızartma yağı metil esteri hem de dietil ester, yakıt karışımlarının kalorifik değerini düşürmesinin performansın kötüleşmesinin arkasında yatan diğer önemli bir faktör olduğu da raporlanmıştır (Selvaraj

ve Thangavel, 2021). Başka bir çalışmada ise, %100 dizel yakıtı ve %80 dizel yakıt + %20 hurma yağı biyodizeli içeren test yakıtları referans yakıt olarak kabul edilmiş ve dizel-biyodizel ikili yakıt karışımına sırasıyla hacimsel olarak %5, 10, 20 ve 30 oranlarında su ilave edilerek yeni üçlü emülsiyon test yakıtları elde edilmiştir. İlgili çalışmada, deneyler sabit motor devrinde ve farklı motor yüklerinde gerçekleştirilmiştir. Değişen parametrelere göre, yanma, emisyon ve performans göstergeleri incelenmiştir. Sonuçlar ele alındığında sıkıştırılmalı ateşlemeli bir motorda yakıtta su ilavesinin, enjekte edilen yakıtın tutuşma gecikmesi olarak bilinen fiziksel ve kimyasal yanma hazırlığına girmesi için geçen süreyi uzattığı saptanmıştır. Bu nedenle, geleneksel dizel yakıtta ya da dizel-biyodizel ikili karışımlarına kıyasla, emülsiyon yakıtlarının, sıkıştırma stroku sırasında ortaya çıkan daha uzun tutuşma gecikmesi nedeniyle daha az (negatif) iş gerektirdiği ısı yayılım grafiklerinden gözlemlenmiştir. Bu nedenle, maksimum silindir içi basıncın ve maksimum ısı yayılım oranlarının tepe noktaları emülsiyon içerikli yakıtlarda daha yüksek elde edilmiştir. Diğer yandan, yakıtta su ilavesi yakıt damlacık çapını ve viskozite değerlerini artırmıştır. Başka bir ifadeyle, yakıt demetlerinin atomize olmasını kötüleştirmiştir. Ayrıca, emülsiyon karışımlarında yakıtların ısıl değerleri de oldukça düşmüştür. Bu sebeple, özgül yakıt tüketiminin önemli derecede artarken ısıl verimin de kayda değer şekilde azaldığı görülmüştür. Ayrıca, emülsiyon yakıtların yüksek buharlaşma gizli ısısı ve soğutucu etkisi ile yanma odasındaki sıcaklık değerinin çok yüksek değerlere çıkmasına izin verilmemiştir. Böylelikle, yüksek sıcaklıklarda daha kolay reakte olabilen nitrojen ve oksijen atomlarına daha az imkân sağlanarak, NO_x (azot oksitler) seviyesi bir miktar düşürülmüştür. Öte yandan, HC (Hidrokarbon) oluşumu yakıt içerisindeki suyun yanma prosesini söndürmeye meyilli olması sebebiyle, yakıtı eksik yanmaya teşvik etmesinden dolayı bir hayli artmıştır (Maawa ve ark., 2020). Başka bir çalışmada ise, pamuk yağından transesterifikasyon yöntemi ile pamuk yağı biyodizeli elde edilmiştir. Daha sonra, elde edilen biyodizel, geleneksel dizel yakıt ile hacimsel olarak %10, 20 ve 50 oranlarında harmanlanmıştır. Çalışmada, pamuk yağı biyodizeli kullanımının bir dizel motorda yanma, performans ve emisyon karakteristiklerine olan etkileri incelenmiştir. Ayrıca, çalışmada bu karakteristiklerin yapay sinir ağları yöntemi ile tahmin edilebilirliği de test edilmiştir. Testler, değişen enjektör basınçlarında (175, 190, 205 ve 220 bar), değişen motor yüklerinde (2,5, 5, 7,5 ve 10 Nm) ve 2000 rpm'lik sabit bir motor devrinde gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarında, pamuk yağı içeren test yakıtlarının, CO (Karbon monoksit) emisyonlarını azaltırken, NO_x emisyonlarını arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, özgül yakıt tüketimi ve ısıl verim gibi önemli

performans göstergeleri, test yakıtları içerisinde pamuk yağı metil esteri girmesiyle birlikte bir miktar kötüleşmiştir. Test yakıtları içerisinde biyodizel oranı arttıkça, performans göstergelerindeki kötüleşme seviyesi de artmıştır. Ayrıca, enjektör basıncının artmasıyla birlikte özgül yakıt tüketiminin ve ısıl verimin iyileştiği gözlemlenmiştir. Çalışmada, ölçülen motor karakteristiklerinin yüksek doğruluk ile tahmin edileceği de rapor edilmiştir (Ağbulut ve ark. 2020). Atık tavuk yağından elde edilen biyodizelin bir dizel motorda performans ve emisyon karakteristikleri üzerinde meydana getirdiği değişimlerin detaylı şekilde incelendiği bir diğer çalışmada, atık tavuk yağı biyodizeli, geleneksel dizel yakıtı hacimsel olarak %10, 20, 30 ve 40 oranlarında eklenmiştir. Sonuçlar, test yakıtı içerisinde biyodizel oranı arttıkça özgül yakıt tüketiminin ve ısıl verimin kötüleştiğini göstermiştir. İçeriğinde %40 biyodizel içeren test yakıtında, saf dizel yakıtı kıyasla özgül yakıt tüketimi %39,6 artmış ve ısıl verim %7,2 oranında düşmüştür. Yazarlar, performans çıktılarında kötüleşmeye sebep olan mekanizmanın biyodizel ilavesiyle artan viskozite ve olumsuz etkilenen yakıt atomizasyonu olduğunu vurgulamışlardır. Bu etkenler, yakıtın buharlaşabilmesi için gerekli olan sürenin, başka bir deyişle tutuşma gecikmesi periyodunun uzamasına sebep olarak yanma prosesini olumsuz yönde etkilemişlerdir. Ayrıca, tutuşma gecikmesi periyodunun uzamasının, yanma süresinin kısalmasına ve yanma odasındaki sıcaklığın biyodizel içerikli test yakıtlarında daha düşük olmasına yol açtığı belirtilmiştir. Bunun bir sonucu olarak, her motor yükünde egzoz gazı sıcaklığı en düşük değerini %40 biyodizel içeren test yakıtında alırken, en yüksek değeri saf dizel yakıtta almıştır. Egzoz gazı sıcaklığına benzer bir eğri NO_x emisyonlarında da gözlemlenmiştir. Oksijen ve nitrojen moleküllerinin yüksek sıcaklıklarda reakte olabilme yeteneğinin daha fazla olması, biyodizel içerikli test yakıtlarında NO_x miktarının daha yüksek ölçülmesine sebep olmuştur. Ayrıca, biyodizelin içeriğinde yer alan yüksek miktardaki oksijen yanma odasında karbon atomları ile tepkimeye girerek CO₂ emisyonunu arttırırken, eksik yanma ürünü olan CO emisyonunu ve duman koyuluğu seviyesini de önemli ölçüde düşürmüştür (Barik ve Vijayaraghavan, 2020). Ma ve ark. (2021b) yaptıkları çalışmada saf dizel ve dizel-biyodizel ikili çalışmalarını test etmişlerdir. Çalışmada, geleneksel dizel yakıtı ilave edilen biyodizelin özellikle motor performansını kötüleştirdiği tespit edilmiştir. Bu yüzden, farklı alkol eklentilerini dizel-biyodizel ikili karışıma ilave edip, çıktılarını araştırmışlardır. Deneyler değişen motor devirlerinde (1000, 1500 ve 1800 rpm) gerçekleştirilmiştir. Sonuçlarda, tüm test yakıtları için motor devri arttıkça tutuşma gecikmesi periyodunun uzadığı gözlemlenmiştir. En kısa tutuşma gecikmesi, yüksek

setan sayısından dolayı saf dizel yakıtta gözlemlenirken, yakıt içerisine biyodizel ve alkol eklenmesi yakıtın gizli buharlaşma ısısını arttırdığından, tutuşma gecikmesi sürelerini de arttırmıştır. Artan motor devri ile birlikte daha fazla yakıtın yanması, tüm test yakıtları için NOx emisyonunun yükselmesine sebep olmuştur. Dizel-biyodizel ikili karışımına alkol ilave edilmesi ile birlikte test yakıtlarının viskozite değerleri yükselmiştir. Alkol eklentisi ile NOx emisyonu bir miktar düşürülmüştür, çünkü alkol ilavesi ile birlikte tutuşma gecikmesinin uzadığı ama yanma süresinin kısaldığı bildirilmiştir. Ayrıca, artan viskozite yakıtın püskürtülmesini ve atomizasyonunu olumsuz yönde etkileyerek yanma prosesini bir miktar kötüleştirmiştir. Bu sebeple, silindir içi gaz sıcaklığının alkol ilavesi ile bir miktar düştüğü ve düşük sıcaklıkta da NOx emisyonunun daha az salındığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, biyodizel ve alkol içeriğinde bulunan oksijen atomları sayesinde CO emisyonunun daha düşük seviyelerde olduğu da gözlemlenmiştir. Yazarlar, son olarak dizel-biyodizel ikili karışımları yerine dizel-biyodizel-alkol'den oluşan üçlü yakıt karışımının daha iyi sonuçlar verdiğini, bu yüzden üçlü yakıt karışımlarının kullanılması gerektiği sonucuna varmışlardır (Ma ve ark., 2021b). Ganesan ve Devarajan (2021) ise yaptıkları çalışmada %100 dizel yakıt, %100 Jatropha biyodizeli ve %95 Jatropha biyodizeli + %5 bütanol, %90 Jatropha biyodizeli ve %10 bütanol karışımlarından oluşun, tekli, ikili ve üçlü test yakıtları hazırlamışlardır. Yazarlar, testleri %0, 25, 50, 75 ve 100 motor yüklenme durumlarında ve 1800 rpm'lik sabit motor devrinde gerçekleştirmişler. Çalışmada, HC, CO ve NOx emisyonlarının Jatropha biyodizeli ile önemli seviyelerde düşürüldüğü ve bütanol takviye edilince de bu düşüşün daha da büyük olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, yazarlar biyodizeli tek başına kullanmak yerine alkol ile birlikte kullanmanın çevresel olarak daha yararlı olacağını savunmuşlardır. Ayrıca, dizel motorun %100 biyodizel ile ya da biyodizel-alkol karışımı ile çalıştırılmasının motor parçaları üzerinde gözle görülür bir hasara neden olmadığı da bildirilmiştir. Dolayısıyla, motorların petrodizel yerine tamamen biyoyakıtlar ile çalıştırılabileceği ilgili çalışmada vurgulanmıştır (Ganesan ve Devarajan, 2021). Ancak tamamen biyoyakıtlara geçiş için daha uzun süreli testlerin yapılması gerektiği bilinmektedir.

Dizel motorlarda, bitkisel biyodizel kullanımının yanı sıra birçok hayvansal biyodizel kullanımının test edildiğini literatürde görmek mümkündür. Örneğin, Emiroğlu ve ark., (2018) yapmış oldukları bir çalışmada Bolca Hindi Fabrikası'ndan temin ettikleri hindi rendering yağını transesterifikasyon yöntemi kullanarak, hindi rendering biyodizeline

dönüştürmüş, daha sonra da dizel motorda değişen motor yüklerinde yanma, performans ve emisyon gibi önemli parametreler üzerinde kullanılabilirliğini test etmişlerdir. Testler, 2000 rpm'lik sabit motor devrinde ve 2,5 Nm'den 10 Nm'ye 2,5 Nm'lik aralıklarla artan motor yüklerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlarda, silindir içi basınç değerinin hindi rendering biyodizeli içeren test yakıtlarında daha yüksek değerlerde olduğu gözlemlenmiştir. Yazarlar bu artışı biyodizel ilavesinin test yakıtlarındaki setan sayısını düşürmesi ile ilişkilendirmiştir. Düşen setan sayısının test yakıtlarının tutuşma gecikmesi süresini ve tutuşma gecikmesi süresi boyunca yanma odasında biriken ve tutuşmak için bekleyen yakıt miktarını arttırdığı vurgulanmıştır. Uygun sıcaklık ve basınç altında yakıtın yanmasıyla, biyodizel ilave edilmemiş yakıtta göre daha çok yakıtın yanma odasında birikmesi bu yanmanın ani bir yanma şeklinde olmasına ve silindir içi maksimum basınç değerinde bir miktar artışa neden olmuştur. Ayrıca, hindi rendering biyodizelinin motorun performansını olumsuz yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Performans açısından, 7,5 Nm'ye kadar ısı verim ve özgül yakıt tüketiminin iyileştiği ancak 10 Nm'de bu parametrelerin tekrar kötüleşmeye başladığı çalışmada gösterilmiştir. Bu durumun, 10 Nm motor yükünde enjektörden püskürtülen yakıt miktarının artışına bağlı olarak karışımın zenginleşmesinden dolayı oluşan eksik yanmadan kaynaklandığı düşünülmüştür. Ayrıca, hindi rendering biyodizeli içerisinde bulunan oksijen sayesinde eksik yanma miktarının düşük motor yüklerinde azaltıldığı ve bu sebeple duman emisyonunda kayda değer bir düşüş görüldüğü de çalışmada bildirilmiştir (Emiroğlu ve ark. 2018). Diğer bir çalışmada ise, Simsek ve Uslu (2020) bitkisel ve hayvansal yağlardan ürettikleri biyodizel yakıtların, dizel motorun performans ve emisyon çıktılarında meydana getirdiği değişimleri gözlemlemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, en düşük özgül yakıt tüketimi saf dizel yakıtta elde edilirken, %100 hayvansal yağdan oluşan test yakıtında yaklaşık %27'lik bir artış, %100 bitkisel yağdan oluşan test yakıtında ise yaklaşık %16'lık bir artış gözlemlenmiştir. Isıl verimde ise, saf dizel yakıtta kıyasla %100 hayvansal yağdan oluşan test yakıtında yaklaşık %7,5'lik bir azalma, %100 bitkisel yağdan oluşan test yakıtında yaklaşık %1,5'lik bir azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca, dizel yakıtta hem hayvansal hem de bitkisel yağdan elde edilen biyodizellerin eklenmesi CO ve HC emisyonlarında önemli düşüş sağlamıştır. Bu düşüşün nedeninin biyodizel içerisinde bulunan oksijen moleküllerinin varlığı olduğu belirtilmiştir. Oksijenin yanma odasında daha çok tam yanmayı teşvik ederek eksik yanma ürünleri olan duman koyuluğu, CO ve HC emisyonlarını düşürdüğü rapor edilmiştir. Ancak, hayvansal ve bitkisel biyodizel kullanımı NOx emisyonlarında sırasıyla yaklaşık olarak %68 ve %80

artışa sebep olmuştur (Simsek ve Uslu, 2020). Ayrıca, literatürde diğer biyodizellerin dizel motor üzerinde meydana getirdiği değişimleri gözlemek amacıyla yapılan birçok çalışma yer almaktadır. Örneğin, atık pişirme yağı biyodizeli (Aydın ve ark., 2020; Yesilyurt, 2019), hardal yağı biyodizeli (Baweja ve ark., 2021; Uyumaz ve ark., 2018), jobjoba yağı biyodizeli (Saleh, 2021; El-Seesy ve ark., 2017), kestane yağı metil esteri (Venkatesan ve ark., 2021; Padmanabhan ve ark., 2017), çam yağı biyodizeli (Huang ve ark., 2019; Prakash ve ark., 2019), karanya yağı biyodizeli (Kursam ve ark., 2021; Thangaraj ve ark., 2018), kanola yağı biyodizeli (Ramesh ve ark., 2021; Öztürk ve ark., 2020), aspir yağı biyodizeli (Thiyagarajan ve ark., 2020; Aydın, 2020), mısır yağı biyodizeli (Sathyamurthy ve ark., 2021; Mahmood ve ark., 2020), karpuz tohumu biyodizeli (Bhanu Teja ve Alagumurthi, 2021; Jobi, 2020), kolza tohumu biyodizeli (Saravanan ve ark., 2020; Çelik ve Bayindirli, 2020), kaju fıstığı biyodizeli (Suwanmanee ve ark., 2020; Radhakrishnan ve ark., 2018), ayçiçek yağı biyodizeli (Najjar ve ark., 2021; Elkelawy ve ark., 2020) ve soya biyodizeli (Vellaiyan ve ark., 2020; Vellaiyan ve Partheeban, 2020) daha önce test edilen biyodizeller arasında yer almaktadır. Bunlara ek olarak birçok alkol grubu da dizel motorda test edilmiştir. Örneğin, etanol (Venu ve ark., 2021; Shirmeshan ve ark., 2021), metanol (Chen ve ark., 2021; Wei ve ark., 2021), bütanol (Pan ve ark., 2021; Fayad ve Dhahad, 2021) ve pentanol (Liang ve ark., 2021; Zhang ve ark., 2021) dizel motorlarda en sık kullanılan alkol grupları iken son yıllarda fuzel yağı (ya da fusel alkol) da dizel motorlarda test edilmeye başlanmıştır (Ağbulut ve ark., 2021; Ardebili ve ark., 2021).

Literatür çalışmalarına dayanarak, biyoyakıtların dizel yakıtlar ile harmanlanmasının petrodizel yakıtta en iyi alternatif olarak kabul gördüğünü söylemek mümkündür. Bunun nedeni, dizel-biyodizel karışımlarının duman koyuluğu, HC, CO ve PM (partikül madde) emisyonlarında önemli seviyede düşüşe sebebiyet vermesi olarak görülmektedir. Biyodizel çalışmaları emisyonlarda önemli düşüşe sebep olsa da performans çıktılarını olumsuz yönde etkilemektedir. Motor performansının kötüleşmesine ek olarak biyodizel kullanımı, yakıtın termofiziksel özelliklerinde de kritik sayılabilecek dezavantajlara neden olmaktadır. Örneğin, yüksek viskozite, düşük uçuculuk, düşük kalorifik değer ve yüksek NO_x emisyonları bu dezavantajların başında gelmektedir. Bu dezavantajların yanı sıra, bazı faktörler biyodizeli bugün petrodizele en iyi alternatif yakıt konumunda tutmaktadır. Enerjide dışa bağımlılık ve enerji güvenliği meseleleri, petrol fiyatlarındaki volatilité, kırsal bölgelerde istihdam imkânı, petrolün savaş ve zorunlu hallerde

ulaşımının zor olması gibi ulusal güvenlik ve çıkarlar açısından özellikle kendi rezervi olmayan ve petrodizel bağımlı ülkeler için biyodizel şüphesiz her zaman önemli olmaya devam edecektir.

Biyoyakıtların yanısıra, son dönemlerde bazı ilave maddelerin dizel yakıt içerisinde kullanımı da popülerlik kazanmıştır. Bunların başında nano boyutlu malzemeler gelmektedir. Son yıllarda teknolojideki gelişmeler, nano boyutlu parçacıkları geçmişe göre kolaylıkla elde edilebilir bir duruma getirmiştir. Nanopartikül; boyutu nanometre ölçeğinde değişen parçacıklara verilen isimdir ve genellikle bir akışkan sıvı ile karıştırılarak kullanılmaktadır. Nanopartikül baz akışkanın karıştırılması ile elde edilen bu yeni süspanse karışıma ise nanoakışkan denilmektedir. Bu terim literatürde ilk kez 1995 yılında Choi ve Eastman tarafından kullanılmıştır (Choi ve Eastman, 1995). Nano boyutlu malzemelerin akışkan içine nüfuz etmesi, yalın akışkan kullanımına göre termofiziksel ve kimyasal özelliklerde birtakım iyileşmelere sebebiyet vermiş ve termal sistemler için sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. İçten yanmalı motorlarda yakıt içerisine takviye edilen nanopartiküller ise nanoyakıtlar olarak adlandırılmıştır (Karagoz ve ark., 2021). Nanoyakıtlar, biyodizel kullanımı sonucu motor performans, emisyon ve yanma karakteristiklerinde meydana gelen kötüleşmeleri iyileştirerek kötüleşen özelliklerin geri kazanımında oldukça umut verici sonuçlar doğurmuştur. Bu sonuçlar nanopartikül takviyeli test yakıtlarını daha cazip bir hale getirmiş ve son yıllarda araştırmacılar tarafından yoğun ilgi görmesine neden olmuştur. Örneğin, Prabakaran ve Udhoji dizel, biyodizel ve alkol karışımlarına ZnO nanopartikülü ilave etmiştir. Elde edilen sonuçlar emisyon, performans ve yanma özellikleri açısından karşılaştırılmıştır. Deneyler boyunca motor devri 1400 rpm'de sabit tutulmuş ve motor %25, 50, 75 ve 100 yükleme durumlarında çalıştırılmıştır. Sonuçlarda, dizel yakıtı biyoyakıt eklenmesiyle yakıtların yanma öncesinde daha yüksek buharlaşma gizli ısısına ihtiyaç duyduğu ve bu sebeple egzoz gazı sıcaklıklarında da bir düşüş meydana geldiği saptanmıştır. Bununla birlikte, nanopartikül takviyesi, egzoz gazı sıcaklığının daha da düşmesine neden olmuştur. Bu durum, NOx emisyonlarının nanopartikül içeren test yakıtlarında daha düşük seviyelerde çıkmasına sebep olmuştur. Nanopartiküller, yüzey alanı-hacim oranını artırmıştır, yanmayı hızlandırmıştır ve bir aktivatör görevi üstlenmiştir. Nanopartikül ilavesi ile birlikte yanma prosesinin iyileşmesi, eksik yanma ürünü olan CO, HC ve duman koyuluğu gibi emisyonları düşürmüştür. Başka bir deyişle, motorun nanopartikül takviyeli yakıtlar ile tahrik edilmesiyle bu emisyonların miktarı en düşük seviyelerde

çıkıştır. Ayrıca, nanopartikül ilavesiyle test yakıtlarının performans çıktıları düşük yüklerde kötü iken, yükün artmasıyla birlikte yükselen yanma odası sıcaklığıyla yakıt atomizasyonu kolaylaştığı için performansta da iyileşmeler gözlemlenmiştir (Prabakaran ve Udhoji, 2016). Benzer çalışmalara ve sonuçlara başka yazarlar tarafından yapılan çalışmalarda da rastlanmıştır (Tewari ve ark., 2013). Wei ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada Al_2O_3 (alüminyum oksit) nanopartiküllerini dizel-metanol karışımlarına 25 ve 100 ppm oranlarında ilave etmişlerdir. Alümina oksit nanopartikülünün test yakıtlarının içinde bulunması, test yakıtlarının kinematik viskozitesini, kalorifik değerini ve alt ısı değerini yükseltmiştir. Metanol-dizel-nanopartikül üçlüsünden oluşan test yakıtlarının ısı verimleri tüm yüklerde nanopartikül içermeyen metanol-dizel test yakıtlarından daha yüksektir. Daha yüksek ısı verim, Al_2O_3 nanopartiküllerinin daha geniş yüzey alan-hacim oranı ile açıklanmıştır. Bu durumun da yakıt-hava karışımının silindir içinde kolaylıkla ve homojen bir şekilde dağılmasını sağladığı ifade edilmiştir. Çalışmada, 100 ppm Al_2O_3 nanopartikülünün ilave edilmesiyle dizel-metanol karışımının ısı veriminin %6,6 yükseldiği, özgül yakıt tüketiminin ise %3,7 azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, dizel yakıtta metanol ilave edilmesiyle, metanolün içeriğinde bulunan oksijen molekülleri yakıtı tam yanmaya teşvik etmiş ve böylelikle CO emisyon seviyesinin düştüğü gözlemlenmiştir. Nanopartikül ilavesi ise bu düşüşü daha belirgin hale getirmiştir. %15 metanol içeren test yakıtına 25 ve 100 ppm alüminyum oksit eklenmesiyle, bu test yakıtına göre CO emisyonlarında sırasıyla %50 ve %83,3'lük düşüşler gözlemlenmiştir. Bu keskin düşüşün, nanopartikül sayesinde test yakıtlarındaki yüzey alanı/hacim oranının artışı, yakıtın homojenitesinin iyileşmesi ve tutuşma gecikmesinin kısılmasından kaynaklandığı vurgulanmıştır. Bu olay, nanopartikül içeren test yakıtlarında kimyasal reaktiviteyi artırmıştır. Ayrıca, nanopartiküllerin içeriğinde bulunan oksijen atomlarının, nanopartiküllerin yanma odasında bir katalizör görevini üstlenmesine ve yanma prosesindeki tepkilemeleri hızlandırmasının da iyileşmelere sebep olabileceği vurgulanmıştır (Wei ve ark., 2021). Benzer çıkarımlar, başka çalışmalarda da yapılmıştır (Hosseini ve ark., 2017; Kumar ve ark., 2017; Nanthagopal ve ark., 2017). İlgili çalışma, dizel ve alkolden oluşan ikili test yakıtlarının emisyon ve performans çıktılarının iyileştirilmesi için oksit bazlı bir nanopartikül ilavesinin önemini deneysel olarak ortaya koymuştur. Benzer bir çalışmada ise, Fayad ve Dhahad (2021) %20 bütanol ve %80 dizel yakıttan oluşan test yakıtlarına sırasıyla 30, 50 ve 100 ppm alüminyum oksit nanopartikülü ilave etmiştir. Testler, dört silindirli ve su soğutmalı dizel bir motorda gerçekleştirilmiştir. Nanopartikül ilavesi ile test yakıtlarında, setan sayısının, kinematik

viskozitenin, yoğunluğun, buharlaşma gizli ısısının, kalorifik değerin ve parlama noktasının arttığı, yağlayıcılık özelliğinin ise azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, dizel-metanol karışımının ısı iletim katsayısı, 0,121 W/m.K iken 100 ppm alüminyum oksit ilave edildiğinde 1,268 W/m.K olarak ölçülmüştür. Isı iletim katsayısındaki bu büyük artış, yanma odası sıcaklığının, egzoz gazı sıcaklığının ve NO_x emisyonunun düşüşünü tetiklemiştir. 100 ppm nanopartikül içeren test yakıtında, NO_x emisyonu %12,37'lik bir düşüş sergilemiştir. Ayrıca, en yüksek ısıl verim ve en düşük özgül yakıt tüketimi nanopartikül ilave edilen test yakıtlarında gözlemlenmiştir. Test yakıtları içerisinde nanopartikül oranı arttıkça, bu iyileşmenin miktarı da artmıştır. Örneğin 100 ppm nanopartikül içeren test yakıtı için ısıl verimdeki en yüksek artış %7,84, özgül yakıt tüketimindeki en yüksek düşüş ise %9,24 olarak elde edilmiştir. Ayrıca, CO, HC emisyonları ve duman koyuluğunda da en yüksek düşüş, nanopartikül oranı en yüksek test yakıtında gözlemlenmiştir (Fayad ve Dhahad, 2021). Benzer sonuçlar, farklı dizel-biyodizel eşleşmeleri, farklı nanopartikül tipleri ve oranları için farklı araştırmacılar tarafından da bildirilmiştir (Ekaab ve ark., 2019; Prabu 2018; Venu ve Madhavan, 2016). Örneğin, TiO₂ (titanyum oksit) nanopartikülünün test karışımları içinde bulunmasıyla özgül yakıt tüketiminde %13,22 (Fangsuwannarak ve Triratanasirichai, 2013) ve %21,28'lik (D'Silva, 2015) düşüşler rapor edilmiştir. Soudagar ve ark. (2019) 20, 40 ve 60 ppm grafen oksit nanopartiküllerini dizel-biyodizel içeriğine ultrasonikasyon yöntemini kullanarak ilave etmişlerdir. Sonuçlarda, özgül yakıt tüketimi %8,34 düşürülmüş ve ısıl verim %11,56 arttırılmıştır. Ayrıca, HC emisyonu %21,68, duman koyuluğu %24,88, CO emisyonu %38,66 ve NO_x emisyonu %5,62 oranında düşürülmüştür. Çalışmada, grafen oksitin yakıt içerisine ilave edilmesiyle özellikle yanma süresinde önemli bir düşüş gözlemlenmiştir. Bunlara ek olarak, tutuşma gecikmesi süresi de oldukça kısalmıştır. Yazarlar, nanopartikül takviye edilmiş yakıtlarda aynı çıktıya daha kısa sürede yanma ile erişmenin performansı iyileştiren en önemli etken olduğunu belirtmişlerdir (Soudagar ve ark. 2019).

Vigneswaran ve ark., (2021) 30, 60 ve 90 ppm titanyum oksit nanopartikülünü %10 sudan oluşan su-dizel emülsiyon karışımı içerisine ilave etmişlerdir. Ayrıca, karışımın homojenitesini arttırmak amacıyla hacimsel olarak %0,2 oranında Triton X-100 yüzey aktifleştirici madde kullanmışlardır. Sonuçlarda, katkısız dizel yakıt ile kıyaslandığında ısıl verim en yüksek %5,65'lik artışla 90 ppm titanyum oksit takviye edilmiş test yakıtında gözlemlenmiştir. Isıl verimdeki bu artışın sebebinin emülsiyon yakıtlardaki

mikro patlamalardan ve nanopartikülün katalitik etkisinden kaynaklanabileceği bildirilmiştir. Ayrıca, test yakıtlarının içeriğindeki nanopartikül dozajının artması ile verimin de artış gösterdiği grafiklerden görülmüştür. Bunun sebebinin ise, yakıtlarda nanopartikül ilavesi ile birlikte artan ısı değerinin ve setan sayısının olduğu ifade edilmiştir. Emisyon açısından sonuçlar değerlendirildiğinde ise, maksimum CO, HC emisyonları ve duman koyuluğu genellikle dizel-su ikili emülsiyonunda gözlemlenirken, nanopartiküllerin yakıt içerisine takviye edilmesi ile bu emisyonların seviyesi düşmekte ve en yüksek nanopartikül dozajı olan 90 ppm titanyum oksitli test yakıtında bu üç emisyonun minimum değerine ulaşılmaktadır. Öncelikle, dizel-su emülsiyon karışımının en yüksek emisyon sonuçları vermesinin nedeninin suyun yanma sıcaklığını söndürücü etkisi olduğu saptanmıştır ve bu yüzden yakıtların tam yanmasının engellendiği bildirilmiştir. Nanopartiküllerin yakıt içerisinde bir aktivatör ve oksijen tamponu görevi üstlenmesi yanma karakteristiklerinin iyileşmesiyle ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, tutuşma gecikmeleri düşük yüklerde yanma odası sıcaklığının da düşük olması sebebi ile daha uzunken, yük arttıkça kısalmıştır. Tutuşma gecikmesi açısından test yakıtları arasında tutarlı bir değişim gözlemlenmemiştir. Elde edilen bu değişimlerin nanopartiküllerin yol açtığı mikro patlamalar ve ikincil atomizasyondan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, çalışmada test yakıtları sadece mekanik karıştırıcı yardımı ile 15 dakika karıştırılmıştır. Bu şartlara göre, nanopartiküllerin yakıt içerisinde çökmeden asılı kalabileceği maksimum sürenin üç gün olduğu rapor edilmiştir (Vigneswaran ve ark., 2021). Gumus ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada farklı dozajlarda alüminyum oksit ve bakır oksit nanopartikülleri içeren dizel yakıtta farklı yüzey aktifleştirici maddeler ekleyerek stabilitesini incelemişlerdir. İlgili çalışmada, pH değerinin ve yüzey aktifleştirici madde kullanımının test yakıtlarının stabilitesi üzerinde etkin iki önemli parametre olduğu belirlenmiştir. Alüminyum oksit takviyeli dizel yakıt için pH değeri 7,7 civarında iken ve bakır oksit takviyeli dizel yakıt için pH değeri 10 civarında iken en iyi stabilite değerleri gözlemlenmiştir (Gumus ve ark., 2016). Başka bir çalışmada ise, 400 W ve 24 kHz frekansta 30 dakika ultrasonik banyoda karıştırılan dizel-nanopartikül test yakıtlarının stabilitesinin tespit edilmesi amacıyla yakıtlar 200 saat boyunca ultraviyole görünür spektrofotometre analizine tabi tutulmuştur. Test yakıtlarının çökme süreleri, absorban oranı olarak ifade edilen \bar{A}/\bar{A}_0 'a göre belirlenmiştir. Analiz için, 420 nm'lik sabit dalga boyuna maruz bırakılan numunelerden, 1 kilogram dizel yakıt içerisinde 100 miligram alüminyum oksit nanopartikülü içeren test yakıtının stabilitesi %28,1'lik \bar{A}/\bar{A}_0 oranı ile en stabil test yakıt karışımı olarak saptanmıştır. Ayrıca, çalışmada yakıtların

stabilitesinin gözlemlenebilmesi için literatürde en sık kullanılan fotoğraflandırma yöntemi de kullanılmıştır. Yazarlar test numunelerini ultrasonik banyodan hemen sonra ve bir hafta sonra fotoğraflandırmışlardır. Özellikle 1 kilogramda 100 miligram karbon nanotüp bulunduran numunenin bir hafta içinde büyük oranda çökeldiği gözlemlenmiştir (Chen ve ark., 2018).

Fayaz ve ark., (2021) ise %70 dizel ve %30 palmye yağı biyodizelden oluşan karışıma sırasıyla 100 ppm alüminyum oksit, karbon nanotüp ve titanyum oksit nanopartiküllerini ayrı ayrı ilave etmişlerdir. Homojen bir yakıt karışımı elde edilmesi amacıyla, hazırlanan tüm test yakıtları önce 2000 rpm'de bir mekanik karıştırıcı vasıtasıyla 35 dakika karıştırılmış ve daha sonra ultrasonik banyoda 1 saat boyunca bekletilmiştir. Testler, değişen motor devirlerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlarda, saf dizel yakıtla dizel-biyodizel karışımının motorun ısıl verimini düşürdüğü ve yakıt tüketimini arttırdığı, ayrıca CO ve NOx emisyonlarında da büyük bir artışa sebebiyet verdiği gözlemlenirken HC emisyonlarında ise küçük bir düşüş görüldüğü rapor edilmiştir. Daha sonra, aynı test nanopartikül ilave edilerek gerçekleştirilmiş ve motorun ısıl verimi ile özgül yakıt tüketiminde büyük bir gelişme gözlemlenmiştir. Performans açısından en iyi sonuçlar, alüminyum oksit nanopartikülü içeren dizel-biyodizel karışımlarında gözlemlenmiştir. Alüminyum oksit nanopartikülünü, performansın iyileştirilmesi açısından sırasıyla karbon nanotüp ve titanyum oksit nanopartikülleri içeren test yakıtları takip etmiştir. Performans açısından en kötü sonuçlar, tüm motor devirlerinde dizel-biyodizel ikili karışımında elde edilmiştir. Nanopartikül takviyeli yakıtlardaki bu iyileşmenin, yakıtlardaki artan kalorifik değer ve buna bağlı olarak artan enerji içerikleri olabileceği düşünülmektedir. Emisyon açısından ise, nanopartikül ilavesi ile birlikte CO, HC ve NOx emisyonlarında keskin düşüşler gözlemlenmiştir (Fayaz ve ark., 2021). Bu sonuçlar ışığında nanopartikül takviyesinin dizel-biyodizel karışımlarının sebep olduğu performanstaki kötüleşmeyi iyileştirebildiği ve hatta %100 dizel yakıt ile tahrik olan bir motorun sunduğu performans çıktılarından bile daha iyi sonuçlar verdiği açıkça görülmektedir. Nanopartikül ilavesi ile motor performansında gözlemlenen bu iyileşmelerin arkasında yatan ana nedenleri birçok araştırmacı yakıtın kalorifik değerinin artmasına (Jaikumar ve ark., 2021a), atomizasyonun iyileşmesine (Devarajan ve ark., 2019), ikincil atomizasyon mekanizmasına (Srinidhi ve ark., 2019), setan sayısının yükselmesine (Soudagar ve ark., 2021), yanma sırasındaki tepkimelerin hızlanmasına (Jiaqiang ve ark., 2018), nanopartiküllerin içeriğindeki oksijen atomlarına (Ağbulut ve

ark., 2021) ve nanopartiküllerin üstlendiği katalitik aktivatör rolüne (Wei ve ark., 2021) bağlamaktadır.

Tanvir ve Qiao (2015) farklı dozajlarda 80 nm boyutundaki alüminyum oksit nanopartiküllerini etanol-dizel ikili karışımlarına ilave etmişlerdir. Çalışmada, damlacık çapı mikroskobik görselleştirme yöntemi ile incelenmiştir. Sonuçlar, nanopartikül miktarının test yakıtında artması ile birlikte yanan yakıt miktarının ve yanma hızının %140'a kadar arttığını göstermiştir. Yanma olayında gözlemlenen bu iyileşmenin, yakıt damlacıkları içerisinde asılı kalabilen nanopartiküllerin yanma süresince radyasyon emilimini arttırması ile ilişkilendirilmiştir. Bu olayın, yakıtın buharlaşma zamanındaki ekzotermik reaksiyondan (alev), sıvı faza (damlacık) daha fazla enerji geçişi sağlayarak yanma hızını arttırdığı vurgulanmıştır (Tanvir ve Qiao, 2015). Mehta ve ark., (2014) ise yanma prosesini fotoğraflandırarak yakıtların tutuşma gecikmesi ve yanma sürelerini gözlemlenmiştir. Çalışmada, dizel yakıtına, alüminyum, bor ve demir nanopartikülleri ilave edilmiştir. Fotoğraflandırma tekniği ile elde edilen görüntüler neticesinde, saf dizel yakıtta tutuşma gecikmesinin 1,2 saniye iken nanopartikül ilave edilmiş test yakıtlarında tutuşma gecikmesi periyodunun 0,2 saniye olduğu görülmüştür. Sonuçlar, nanopartikül ilavesi ile yakıtın yanması için beklenen sürenin oldukça azaldığını deneysel olarak ortaya koymuştur (Mehta ve ark., 2014). Sajith ve ark. (2010) tarafından yapılan çalışmada, biyodizel yakıtlarına seryum oksit nanopartiküllerinin eklenmesinin, yakıtların parlama noktasını ve tutuşma sıcaklığını önemli ölçüde arttırdığını ve böylece yakıtın güvenli bir şekilde nakliyesinin de mümkün olduğunu bildirmişlerdir (Sajith ve ark. 2010). Benzer çıkarımlar farklı araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir (Kalaimurugan ve ark., 2020; Mousavi ve Heris, 2020; Sajeevan ve Sajith, 2016).

Özetle, yapılan literatür taramasına dayanarak, dizel-biyodizel ve dizel-alkolden oluşan ikili sıvı-sıvı karışımların ya da dizel-biyodizel-alkollerden oluşan üçlü sıvı-sıvı-sıvı karışımların genelde motorun performans ve yanma karakteristiklerini kötüleştirirken CO, HC gibi önemli egzoz emisyonlarını ve duman koyuluğunu düşürdüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca, dizel-biyoyakıt kullanımlarının, NOx emisyonlarında ise genelde artışa sebebiyet verdiği birçok çalışmada görülmüştür (Sathyamurthy ve ark., 2021; Gad ve ark., 2021a; Sarıdemir ve ark., 2021). Temelde, performanstaki kötüleşmeye yol açan mekanizmanın biyodizellerin yüksek viskozitesi dolayısıyla yakıt damlacıklarının enjektörden çıktıktan sonra atomizasyonundaki kötüleşme, düşük kalorifik değer ve setan sayısı, tutuşma gecikmesi periyodunun uzun sürmesi ve oksijen

çokluğu sebebiyle yanma süresinin gereğinden fazla uzaması gibi faktörlerden kaynaklanabileceği bildirilmiştir (Yeşilyurt ve ark., 2020; Çelebi ve Aydın, 2019; Keskin, 2019; Şen, 2019; Emiroğlu ve ark., 2018). Son yıllarda, teknolojik ilerlemeler ışığında nanopartiküllerin yakıt içerisine girmesi, kötüleşen performans, yanma ve emisyon karakteristiklerinin geri kazanımı ve hatta saf dizel yakıttan bile daha iyi sonuçlar sunması nanoyakıtları büyük bir ilgi odağı haline getirmiştir. Nanopartiküllerin yakıt içerisine ilave edilmesi ile motor karakteristiklerinde meydana gelen iyileşmeler birçok araştırmacı tarafından farklı mekanizmalar ile açıklanmaya çalışılmıştır. Örneğin, motor performansındaki iyileşmeyi nanopartiküllerin silindir duvarlarındaki karbon birikintilerini temizleyerek pistonun sürtünmeyle kaybettiği işi azaltmış olabileceğine dayandıran birçok araştırmacı vardır (Kalaimurugan ve ark., 2020; Rastogi ve ark., 2020; Hasannuddin ve ark., 2018; Sivakumar ve ark., 2018; Selvan ve ark., 2009). Nanopartikül takviyeli test yakıtlarının buharlaşma sürelerinin ve buna bağlı olarak tutuşma gecikmesi periyotlarının kısaldığı ve bunun bir sonucu olarak yanma prosesinin kalitesinin ve ısı veriminin arttığı ve yakıt tüketiminin azaldığı da birçok çalışma ile rapor edilmiştir (George ve ark., 2015; Raj ve ark., 2016). Ayrıca, nanopartiküller sayesinde artırılan yüzey/hacim oranı ile test yakıtlarının karışım dereceleri, homojeniteleri ve kimyasal reaktiviteleri gelişmiştir. Bunun bir sonucu olarak, yanma karakteristiklerinin ve performans çıktılarının iyileştiği de literatürde sıkça vurgulanmıştır (Appavu ve Venkata Ramanan, 2020; Prabu, 2018; Ghafoori ve ark., 2015). Performanstaki iyileşmenin, nanopartikül takviye edilmiş test yakıtlarında gözlemlenen atomizasyondaki iyileşme, hızlı buharlaşma ve gelişen yanma prosesinden dolayı daha optimum bir hava yakıt karışımından kaynaklanabileceğini ve nanopartiküllerin, yakıtta üstün yüzey alanı özelliği kazandırarak daha fazla oksijen molekülünün tepkimeye girmesine yol açacağını savunan bulgular mevcuttur (Prabu, 2018). Yakıt içerisine takviye edilen metalik tozların boyutlarının araştırılması da ilgi çekici konular arasında yer almaktadır. Ancak, Yetter ve ark. 2009 yılında yapmış olduğu kapsamlı derleme çalışmasında birçok deneysel araştırma sonucuna dayanarak parçacık boyutundaki küçülme ile katalitik aktivite, süperparamanyetik davranış, daha düşük erime sıcaklıkları, süperplastiklik, düşük sinterleme sıcaklıkları ve yüksek teorik yoğunluklar sergilediği sonucuna varmışlardır (Yetter ve ark., 2009). Ayrıca, nanopartiküllerin test yakıtları içinde bulunması ile beklenen bazı diğer önemli özelliklerin yakıtlara kazandırılmasının da performans ve yanma karakteristiklerindeki iyileşmelere sebebiyet verdiği birçok araştırmacı tarafından rapor edilmiştir. Bu beklentilerin başında, nanopartiküllerin geniş spesifik yüzey alanına

başka bir deyişle yüksek reaktiviteye sahip olması ve bu üstün özelliği sayesinde enerji depolama yeteneklerinin de yükselmesi gelmektedir (Yetter ve ark., 2009). Birçok araştırmacı yakıt içerisine karıştırılan nanopartiküllerin yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasından dolayı bu malzemeleri enerjistik partiküller olarak da isimlendirmektedir (Venkatesan ve ark., 2019; Sim ve ark., 2018; Tanvir ve Qiao, 2015). Enerjistik nanopartiküllerin yanma esnasında yüksek miktarda kimyasal enerjiyi ısı şeklinde açığa çıkardığı rapor edilmektedir. Ayrıca, enerjistik nanopartiküllerin yanma esnasında kimyasal reaksiyonları hızlandırdığı, kimyasal bağların oluşumuna ve kırılmasına (Sundaram ve ark., 2017) katkı sağlayan katalizör görevi üstlendiği ve bu sayede yanma prosesini iyileştirdiği bildirilmiştir (Mei ve ark., 2016). Motor performansı üzerinde etkili diğer önemli özelliklerin (setan sayısı ve kalorifik değer gibi) nanopartikül ilavesi ile artırılmış olmasının motor performansı ve yanma karakteristikleri, buna bağlı olarak da emisyon değerlerinde azalmaya sebep olduğunu rapor eden çok sayıda çalışma mevcuttur (Rastogi ve ark., 2021; Khan ve ark., 2020; Aalam ve Saravanan, 2017). Özellikle oksit bazlı nanopartiküllerin içeriğinde bulunan kapsüllenmiş oksijen moleküllerinin uygun sıcaklıkta karbon atomlarıyla birleşerek yanma odasında daha çok tam yanmaya sebep olmasının, eksik yanma ürünlerini (CO, HC ve duman koyuluğu) azalttığı ve nanopartiküllerin üstün termal özellikleri sayesinde de yanma odasındaki ısı transferini hızlandırarak nispeten daha düşük NO_x emisyonuna yol açtığı birçok araştırmacı tarafından rapor edilmiştir (Ağbulut ve ark., 2021; Geng ve ark., 2021; Kumar ve ark., 2020; Selvabharathi ve ark., 2019).

Son birkaç yılda, literatürde yalın nanopartikül kullanımının yanı sıra hibrit nanopartikül kullanımının da yaygınlaşmaya başladığı gözlemlenmektedir. Hibrit nanopartikül, baz akışkan içerisinde aynı anda en az iki nanopartikül kullanılması durumudur. Birçok termal sistem için test edilmeye başlanan hibrit nanopartikül kullanımının sistem performansını yalın nanopartikül kullanımına göre daha iyi geliştirdiği farklı alanlarda yapılan birçok çalışma tarafından rapor edilmiştir (Rabbi ve Sahin, 2021; Çiftçi, 2021; Gürbüz ve ark., 2020; Raju ve ark., 2020; Hosseinzadeh ve ark., 2020; Sharma ve ark., 2020). Ancak, hibrit nanopartikül kullanım geçmişinin uzun olmaması sebebiyle oluşan bu sinerjik etkinin arkasında yatan faktörler günümüzde birçok araştırmacı tarafından açıklanmakta zorlanılan bir durumdur. Şu ana kadar, yapılan literatür taramasında hibrit nanopartikül kullanımının bir dizel motor için yanma, performans ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkilerine odaklanan bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu

sebeple, ilgili çalışma literatürde fark edilen bu boşluğu doldurmayı ve hibrit nanopartikül kullanımının motor karakteristikleri üzerindeki etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır. Bu bağlamda, literatürde yaygın olarak kullanılan alüminyum oksit ve bakır oksit nanopartiküllerinin yanı sıra dünya rezervlerinin %73'ü Türkiye'de bulunan (Ertan, 2020) bor elementinin de (boron nitrit nanopartikül) testleri yapılarak, ülkemiz için stratejik öneme sahip bor elementine yeni bir kullanım alanı açılması da hedeflenmektedir. Nanopartiküllerin yalın kullanımına göre değişimini incelemek amacıyla, testler, bu üç nanopartikülün yalın hallerini (Al_2O_3 , bN ve CuO) ve hibrit karışımlarını (CuO- Al_2O_3 , bN-CuO ve bN- Al_2O_3) içerecek şekilde kütleli olarak 250, 500 ve 1000 ppm dozajlarda direkt olarak saf dizel yakıtta karıştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Testler aynı zamanda, hiçbir katkı malzemesi bulundurmayan saf dizel yakıt ile de yapılmış ve referans veriler elde edilmiştir. Ayrıca, testler değişen test yakıtları için 2400 rpm sabit motor devrinde ve 3, 6, 9 ve 12 Nm motor yükleri altında gerçekleştirilmiştir.



3. MATERYAL VE METOT

Bu bölüm, iki alt bölümden oluşmaktadır. Yapılan deneysel çalışmada kullanılan ekipmanlar ve ölçüm detayları Bölüm 3.1’de açıklanmış, motor performans göstergeleri Bölüm 3.2’de, ısı yayılım oranının elde edilmesi Bölüm 3.3’te ve test yakıtının hazırlanması ve özellikleri de Bölüm 3.4’te verilmiştir.

3.1. Ekipmanlar ve Ölçüm Detayları

Deneylerde test motorunu yüklemek için Kemsan marka 15 kW güç absorbe edebilen bir elektrikli dinamometre kullanılmıştır. Test motoru olarak dört zamanlı, tek silindirli, doğal emişli ve hava soğutmalı Lombardini 15 LD 350 marka bir dizel motor kullanılmıştır. Test motorunun görünümü ve teknik özellikleri sırasıyla Şekil 3.1 ve Çizelge 3.1’de verilmiştir.



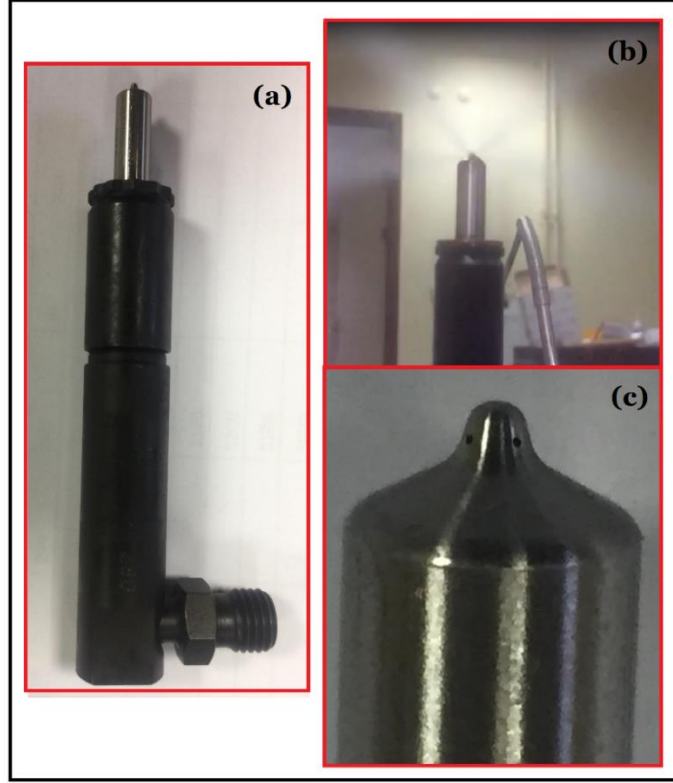
Şekil 3.1. Test motoru.

Çizelge 3.1. Test motorunun teknik özellikleri.

Maksimum Güç	7,5 HP/3600 rpm
Maksimum Tork	16,6 Nm/2400 rpm
Silindir Hacmi	349 cm ³
Kompresyon Oranı	20,3/1
Çap×Strok	82 mm × 66 mm
Enjektör Açılma Basıncı	207 bar

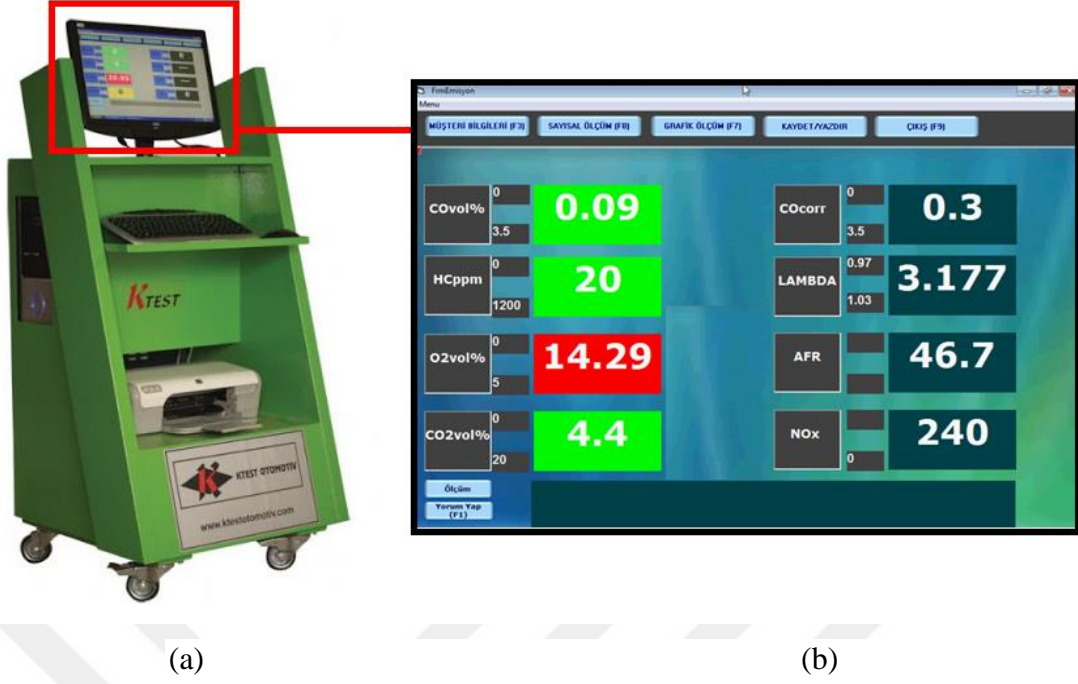
Deneyler, ortam sıcaklığı 23 °C (± 2 °C) olan Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği bölümü bünyesinde bulunan İçten Yanmalı Motor Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Test yakıtları ise yine aynı koşullarda ve aynı bölümdeki Yakıt Hazırlama Laboratuvarı'nda hazırlanmış ve saklanmıştır.

Nanopartiküllerin üstün özelliklerinden faydalanılması için bu partiküllerin yakıt içinde yanma odasına gönderilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, deney düzeneğinde kullanılan yakıt filtrelerinin elek çapının, kullanılan nanopartiküllerin tane boyutlarından büyük olması gerekmektedir. Çalışmada kullanılan yakıt filtresinin elek çapı 8 μm 'dir ve bu değer çalışmada kullanılan nanopartiküllerin ortalama tane boyutlarından büyüktür (Çizelge 3.3). Dolayısıyla, nanopartiküllerin elekten geçememe ihtimali oldukça düşüktür. Ayrıca, deneyler motorun katalogunda belirtilen 207 bar enjektör püskürtme basıncında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan enjektörde 4 adet yakıt püskürtme deliği yer almaktadır. Yakıt filtresinden sorunsuz bir şekilde geçen nanopartiküllerin enjektöre takılmadan yanma odasına gitmesi gerekir. Bu yüzden, nanopartiküllerin tane boyutlarının enjektörün delik çaplarından da küçük olması gerekmektedir. Aksi halde, nanopartiküllerin enjektör deliklerini tıkama ve motorun çalışmasına zarar verme ihtimali yüksektir. Kullanılan enjektörün delik çapı 0,25 mm'dir. Bu değer, çalışmada kullanılan tüm nanopartiküllerin tane boyutundan daha büyüktür. Motorun enjektörü Şekil 3.2a'da, enjektörden yakıt püskürtme anı Şekil 3.2b'de ve enjektör deliği ise Şekil 3.2c'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Enjektör (a) Genel görünüm (b) Yakıt püskürtme anı (c) Enjektör delikleri.

Test motorunun katalog değerleri üzerinde herhangi bir modifikasyon yapılmamıştır. Deneylede, aynı başlangıç şartlarının ve stabil veri akışının sağlanması açısından motor yağ sıcaklığının 50 °C'ye ulaşması beklenmiştir. İlgili test yakıtının motor yağ sıcaklığı bu değere ulaştığında testler başlamış ve veriler kaydedilmiştir. Egzoz ve yağ sıcaklığı ölçümleri NiCr-Ni kaplı yüksek sıcaklıklara dayanabilen ve 1200 °C'ye kadar $\pm\%1$ hassasiyet ile ölçüm yapabilen K-Tipi ısı çiftleri ile gerçekleştirilmiştir. Egzoz emisyonları, 2004/22 EC belgeli, çift filtreli, kendi kendini kalibre edebilen K-Test marka egzoz emisyonu ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Cihazın görünümü Şekil 3.3a'da, ekran çıktısı Şekil 3.3b'de ve ölçüm aralıkları ise Çizelge 3.2 ile verilmiştir.

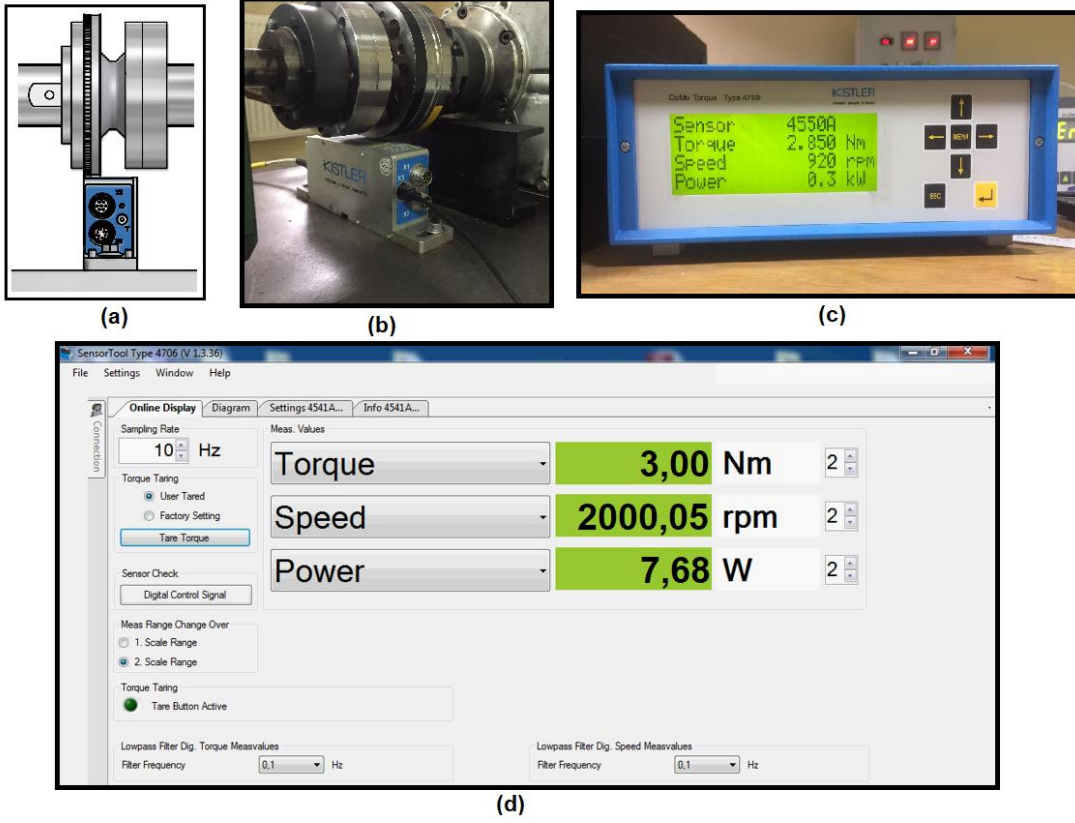


Şekil 3.3. Egzoz emisyonu ölçüm cihazı (a) Görünümü (b) Cihazın ekran çıktısı.

Çizelge 3.2. Egzoz emisyonu cihazının ölçüm aralığı.

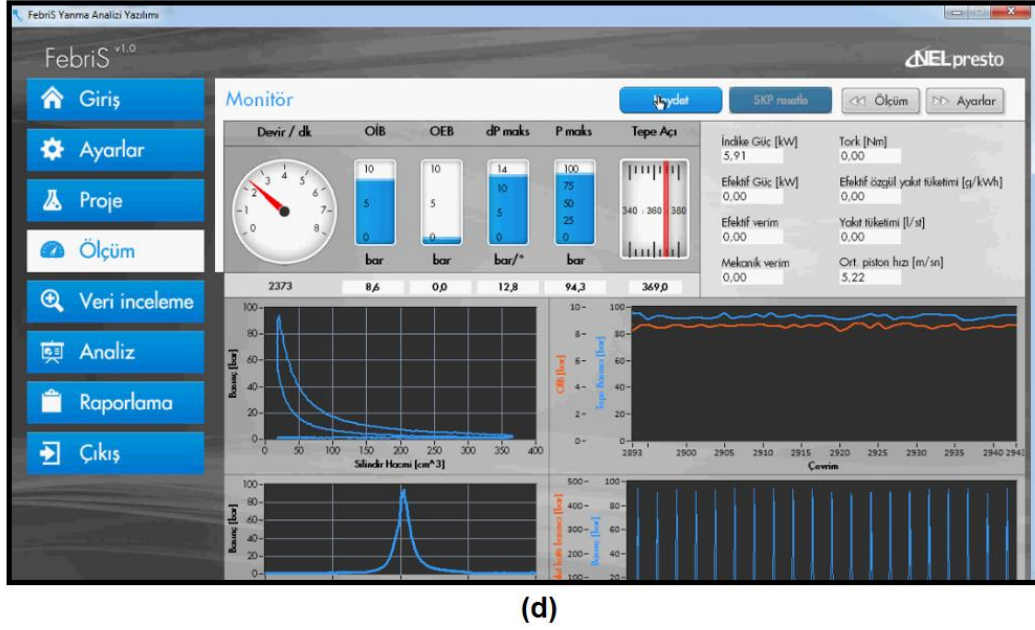
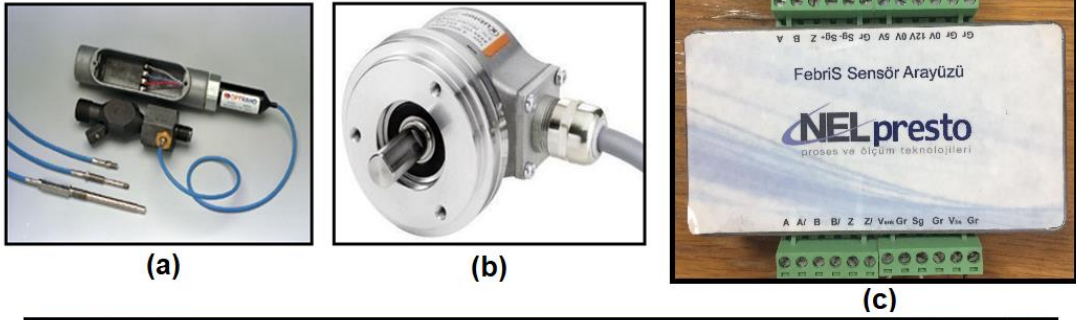
Marka	Ölçüm aralığı	Birim
Frekans	50	Hz
O ₂	0-25	%
CO	0-15	%
NO _x	0-5000	ppm
HC	0-20.000	ppm

Motor torku, gücü ve devri gibi önemli parametreler Kistler 4550A model ölçüm ünitesi yardımı ile manyetik olarak ölçülmüştür. İlgili ölçüm düzeneği, üretici firmanın önerisi (Bkz: Şekil 3.4a) ve belirlediği optimum manyetik ölçüm uzaklığı dikkate alınarak bir flanş yardımı ile motor mili üzerine monte edilen rotor ve statör düzeneğinden oluşmaktadır (Bkz: Şekil 3.4b). Ölçülen parametrelerden elde edilen ham veriler Kistler CoMo tork model 4700A ekipmanı kullanılarak standardize edilmiştir (Bkz: Şekil 3.4c). Daha sonra bu ekipmanla uyumlu SensorTool tip 4706 arayüzü kişisel bilgisayara kurulmuş ve ilgili parametrelere ait nihai veriler toplanmıştır (Bkz: Şekil 3.4d).



Şekil 3.3. Tork ölçüm ekipmanları (a) Önerilen montaj (b) Deney sistemi üzerinde montajlı görünüm (c) Verilerin işlenmesi (d) Bilgisayar ekranında verilen okunması.

Silindir içi basınç değerleri, silindir kapağına monte edilen Oprant AutoPSCI-TC marka 0-3000 psi aralığında %1 hassasiyet ile ölçüm yapabilen fiber optik sıcaklık dengelemeli dinamik basınç sensörü vasıtasıyla ölçülmüştür (Bkz: Şekil 3.5a). Krank açısı ($^{\circ}$ KA), Kübler-Sendix marka bir enkoder ve $0,2^{\circ}$ KA aralıklar ile kaydedilmiştir (Bkz: Şekil 3.5b). Krank açısına bağlı elde edilen silindir içi gaz basıncı değişimi verileri Nel Presto firması tarafından geliştirilen Febris Sensör Arayüzü kiti aracılığı ile toplanmış (Bkz: Şekil 3.5c) ve LabVIEW tabanlı Febris Yanma Analizi Yazılımı'na gönderilmiştir. Bu yazılım aracılığı ile krank açısına bağlı olarak silindir içi basınç değerlerini ve deneylerden alınan toplam 1000 çevrimin ortalama verisini kullanıcıya sunmaktadır. Programın çalışma anındaki görüntüsü Şekil 3.5d'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Yanma analizi (a) Silindir içi basınç sensörü (b) Enkoder (c) Febris sensör arayüzü (d) Febris yanma analizi yazılımı.

3.2. Motor Performansı Göstergeleri

Bu çalışmada, değişen test yakıtlarına göre motor performansında meydana gelen değişimler iki önemli ölçüt olan özgül yakıt tüketimi ve ısı verim açısından tartışılacaktır. Bu iki ölçüt esas olarak yakıt tüketimi ve yakıt özellikleri ile ilişkilidir. Tez çalışmasında, yakıt değişimi, 1 mililitre hassasiyete sahip 100 mL³ hacminde cam büret ile ölçülmüştür. Motor öncelikle, test edilecek yakıt için deney değişkenlerine göre ayarlanmıştır. Bu değişkenlerde 60 saniyelik periyotlar halinde üç kez ölçüm yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarından herhangi iki tanesi arasında %2'den daha büyük bir fark var ise dördüncü ölçüm yapılmıştır. Daha sonra ölçümlerin ortalaması alınarak ilgili test yakıtı için ortalama yakıt tüketim miktarı belirlenmiştir.

3.2.1. Özgül Yakıt Tüketimi (ÖYT)

Birim zamanda (örneğin bir saatte) harcanan yakıt tüketimi, özgül yakıt tüketimi olarak adlandırılmaktadır. Test yakıtlarının motor performansı üzerindeki etkilerinin kıyaslanması için oldukça önemli bir gösterge olan özgül yakıt tüketimi, değişen bir test yakıtı için aynı değere (motor yükü ya da hızı) ne kadar yakıt tüketerek ulaşılabileceğini ifade etmektedir. Bu sebeple, düşük ÖYT değerleri, modifiye edilen test yakıtları için önemli bir parametredir. Çalışmada, ÖYT Eşitlik 3.1'de verilen denklem kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\text{ÖYT} = \frac{\dot{m}_y}{P_e} \times 3600 \quad (3.1)$$

İlgili eşitlikte, ÖYT özgül yakıt tüketimi göstermektedir ve birimi g/kWh'dir. Eşitlikte bulunan diğer parametrelerden \dot{m}_y yakıt tüketimi, ise P_e efektif motor gücünü ifade etmektedir. Bu iki parametrenin birimleri ise sırasıyla g/s ve kW'dır. Bu çalışmada, yakıt tüketimi hacimsel olarak ölçülmüştür. Yakıt tüketimindeki değişimi yine zamana bağlı fakat hassas terazi ile kütleli olarak ölçen deneysel sistemler de literatürde mevcuttur.

3.2.2. Isıl verim (IV)

Genel olarak verim, bir sistemden elde edilen çıktılardan bu çıktılara ulaşmak için tüketilen ürün miktarına oranlanması ile elde edilir. Herhangi bir termik sistem için (dizel motor gibi) yapılan çalışmaların çoğu verimi arttırmaya yöneliktir. Ancak, termodinamiğin ikinci kanununa göre, hiçbir sistemin veriminin %100'ü geçemeyeceği de bilinmektedir. Çünkü yakıt karışımlarının eksik yanması, pistonun silindir çeperlerine sürtünmesi, uygun olmayan yanma odası, enjektör ve piston tasarımları, eylemsizlik kuvvetleri ve yakıt özellikleri verimi önemli seviyede etkileyen unsurlardır.

Dizel motorlarda kullanılan ısı verim, yakıt içerisinde bulunan kimyasal enerjinin yanma sonucunda ne kadarının mekanik enerjiye çevrilebildiğinin bir göstergesidir. Bu sebeple, yüksek ısı verim modifiye edilmiş test yakıtları için istenen bir özelliktir. Bir dizel motorda ısı verim, özgül yakıt tüketimi ile doğrudan ilişkilidir ve Eşitlik 3.2 ile hesaplanmaktadır.

$$IV = \left(\frac{3600 \times 1000}{b_e \cdot AID} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

İlgili eşitlikte, IV ve AID sırasıyla ısı verimi ve yakıtın alt ısı değerini ifade etmektedir ve birimleri sırasıyla % ve MJ/kg'dir.

3.3. Isı Yayılım Oranı

Deneilerin tekrar edilebilirliği, güvenilirliği ve olası anlık hataların minimize edilebilmesi amacıyla bu çalışmada verilen tüm yanma grafikleri için en az 1000 ardışık çevrimin ortalaması alınmıştır. Her çevrim için 1800 veri, toplamda ise en az 1,8 milyon verinin ortalaması ile krank açısına bağlı olarak her motor yükündeki ısı yayılım oranı grafikleri çizdirilmiştir. Ölçülen silindir içi basınç değerlerine göre, aşağıdaki denklemler vasıtasıyla ısı yayılım oranı hesaplanmıştır.

Isı yayılım oranının hesaplanmasında sistemin tamamen termodinamiğin birinci yasasına uygunluğu kabul edilmiştir ve aşağıda verilen Eşitlik 3.3-3.12 ile hesaplamalar yapılmıştır. Örneğin, hareketli pistonun yaptığı iş W olsun,

$$W = P \frac{\partial V}{\partial t} \quad (3.3)$$

ilgili eşitlikte, P silindir içi gaz basıncını ifade etmektedir. Pistonun hareketine bağlı olarak hacimdeki değişiklik (genişleme ya da sıkışma) ∂V ile gösterilmiştir. Çalışmada, kapalı kontrol hacmi için segmandan ve supaptan gaz kaçağının olmadığı ve bu yüzden silindir içerisindeki gaz kütlelerinin değişmediği varsayılmıştır. Buna göre, kapalı bir sistem için genel enerji denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = Q_t - W \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \dot{m} \times c_v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.5)$$

Denklemden, U iç enerjiyi ve Q_t toplam ısı yayılım oranını ifade etmektedir. Ayrıca, sistem için geliştirilmiş ideal gaz denklemi aşağıda yazılmıştır. İlgili denklemde \dot{m} ve R sırasıyla kütleli debi ve gaz sabitidir. T ise sıcaklığı ifade etmektedir.

$$PV = \dot{m} \times R \times T \quad (3.6)$$

Çalışmada, R ile ifade edilen katsayının ve silindir içi gaz kütlelerinin sabit olduğu ya da başka bir deyişle değişmediği varsayılmıştır. Yukarıdaki denklemleri aşağıdaki gibi ifade etmekte mümkündür.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial V}{V} + \frac{\partial P}{P} \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{mR} \left[P \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial P}{\partial t} \right] \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \dot{m} \times c_v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.9)$$

İlgili eşitlikte, c_v özgül ısıyı ifade etmektedir. Denklemlerde uygun parametreler yerine yazılırsa;

$$Q_n = \left[\frac{c_v}{R} + 1 \right] P \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{c_v}{R} V \frac{\partial P}{\partial t} \quad (3.10)$$

Daha sonra, yukarıdaki denklemde zaman yerine (t), krank açısı (θ) yazılır ve özgül ısıların birbirine oranı olarak ifade edilen k izotropik üstel sabiti denkleme entegre edilirse ısı yayılım oranı aşağıdaki gibi olacaktır.

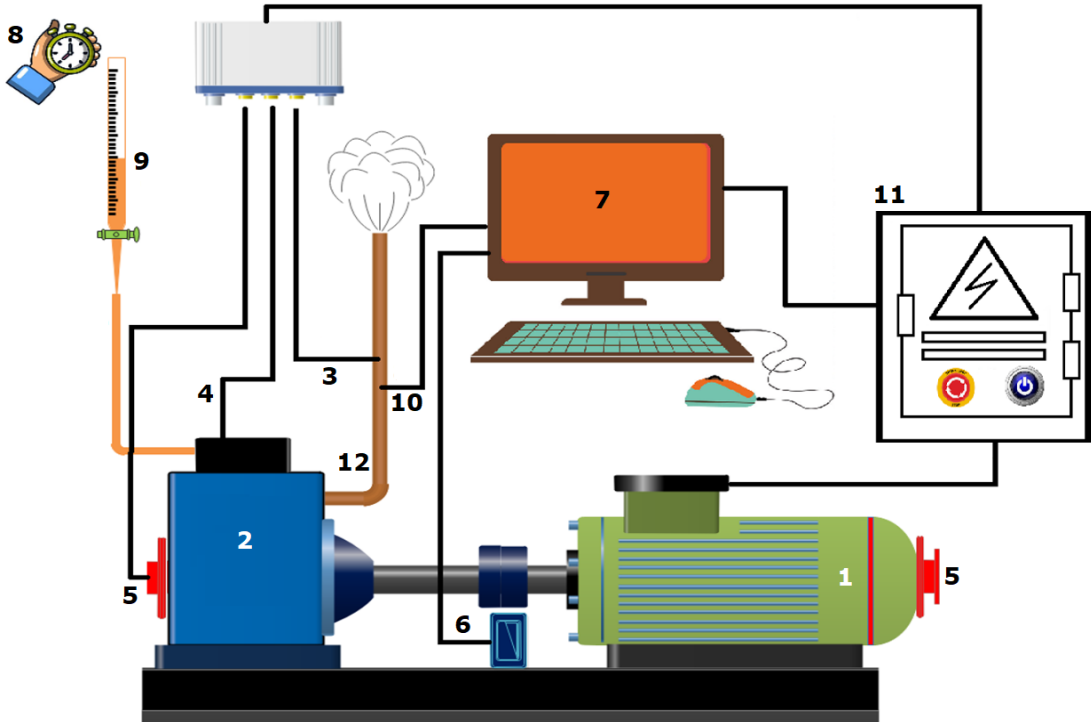
$$Q_n = \frac{k}{k-1} P \frac{\partial V}{\partial \theta} + \frac{1}{k-1} V \frac{\partial P}{\partial \theta} \quad (3.11)$$

Buradaki, k sabit basınç altındaki özgül ısının, sabit hacimdeki özgül ısıya oranını vermektedir.

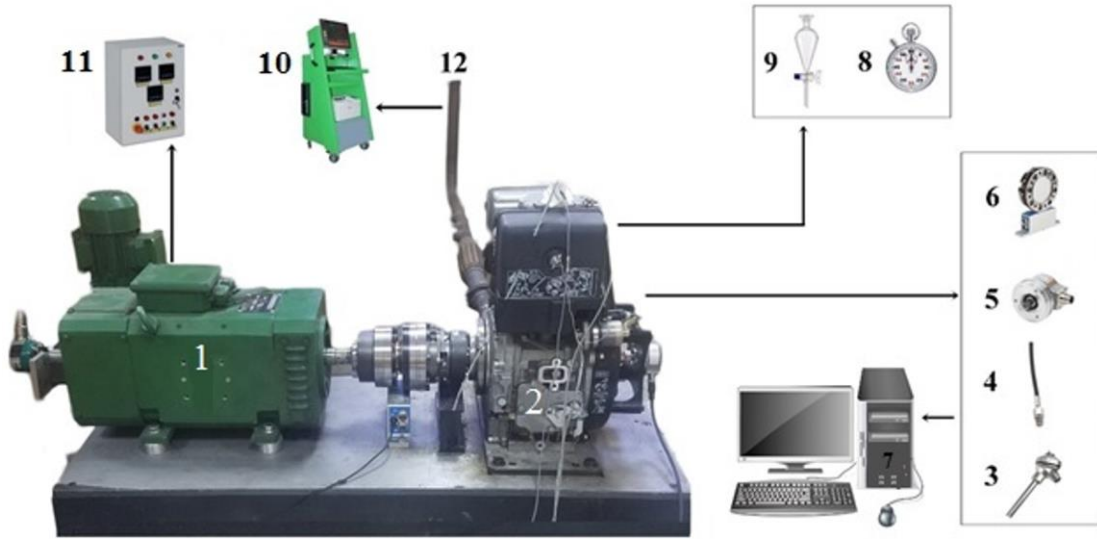
$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad (3.12)$$

Testler boyunca, silindir içerisindeki gazın ideal bir gaz olan hava olduğu varsayıldığından, ilgili özgül ısılar termodinamik tablolarından $c_p = 1,005 \text{ kJ/kg.K}$ ve $c_v = 0,718 \text{ kJ/kg.K}$ olarak okunmuştur. Bu durumda, k sabiti ilgili çalışma için 1,4 olarak alınmıştır.

Son olarak deneylerin yapıldığı düzeneğin şematik görünümü Şekil 3.6'da ve gerçek görünümü ise Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.5. Deney düzeneğinin şematik görünümü.



1	Dinamometre	2	Deney Motoru	3	Termokupl
4	Silindir Basınç Sensörü	5	Enkoder	6	Tork Metre
7	Bilgisayar	8	Kronometre	9	Yakıt Tüketim Büreti
10	Emisyon Ölçüm Cihazı	11	Kontrol Paneli	12	Egzoz Borusu

Şekil 3.6. Deney düzeneğinin gerçek görünümü.

3.4. Test Yakıtlarının Hazırlanması

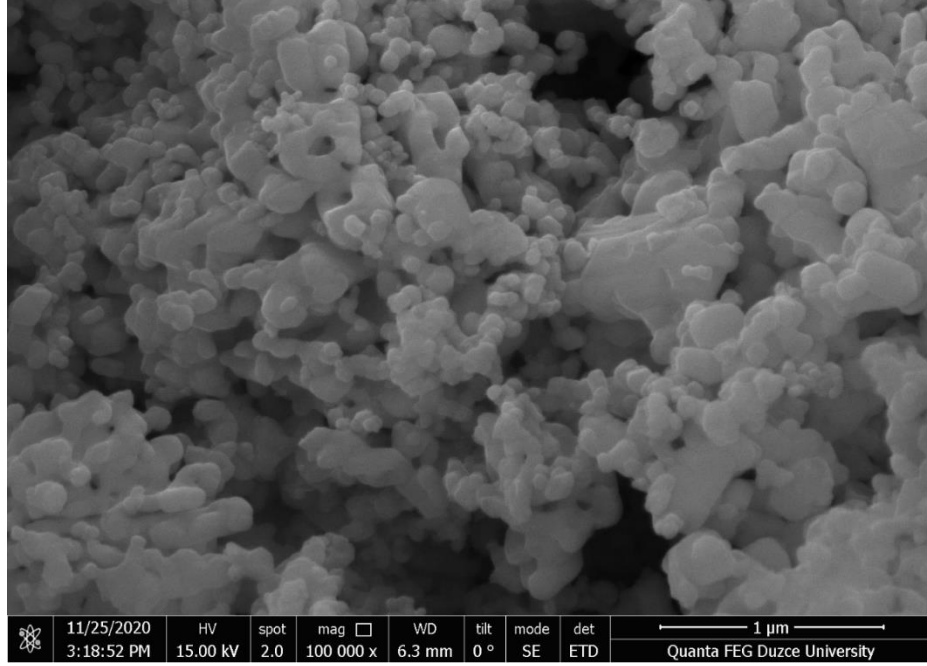
Testlerde kullanılan dizel yakıt, Düzce’de bulunan yerel bir istasyondan satın alınmıştır. Çalışmada, üç farklı nanopartikül; alüminyum oksit (Al_2O_3), bakır oksit (CuO) ve boron nitrit (bN) kullanılmıştır. Kullanılan nanopartiküller Nanografi Nano Teknoloji şirketinden satın alınmıştır. Kullanılan nanopartiküllerin saflığı, görünümü, ortalama tane boyutu, spesifik yüzey alanı, yoğunluğu ve kristalografik yapısı gibi temel fiziksel özellikleri üretici firmadan temin edilmiş ve Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Nanopartiküllerin fiziksel özellikleri.

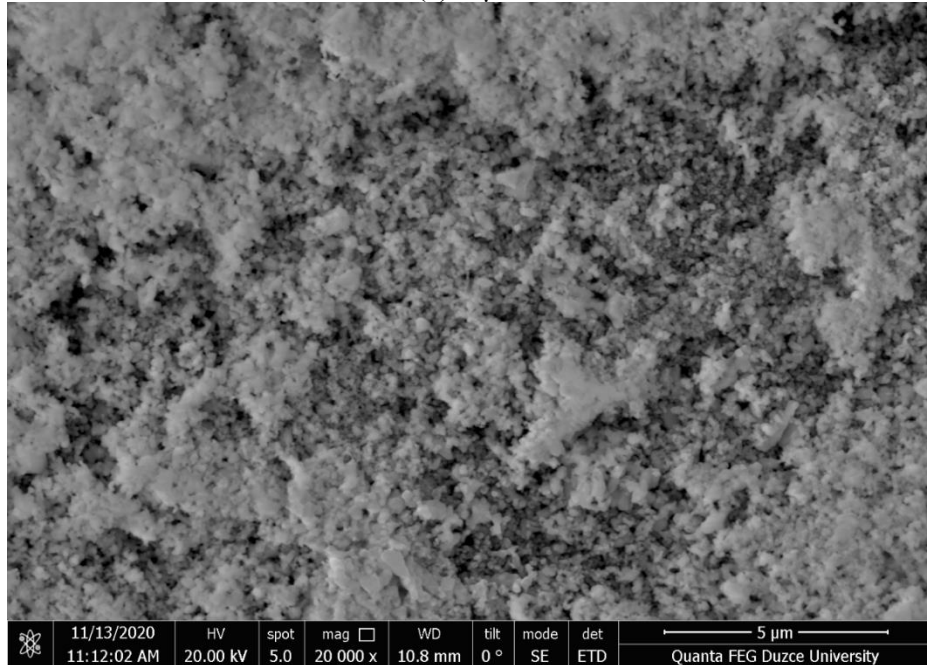
Özellik	CuO	bN	Al_2O_3
Saflık	%99,5	%99,7	%99,95
Görünüm	Siyah	Beyaz	Beyaz
Ort. Tane Boyutu, nm	< 77	790	136
Spesifik Yüzey Alanı	>20 m^2/g	-	>20 m^2/g
Özgül kütle, g/cm^3	6,5	2,3	3,95
Kristalografik Yapı	Küresele yakın	Hekzagonal	Eşkenar dörtgen

Test yakıtlarına ilave edilen nanopartiküllerin gerçek görünümleri ve farklı ölçeklerde çekilmiş SEM (scanning electron microscope- Taramalı elektron mikroskobu)

görüntüleri Şekil 3.8-3.10'da sırasıyla CuO, bN ve Al₂O₃ nanopartikülleri için verilmiştir. İlgili şekillerde, nanopartikül görünüşleri a ve b alt şekilleriyle sırasıyla 1 µm ve 5 µm büyütme oranı ile gösterilmiştir. SEM görüntüleri, Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi laboratuvarlarında FEI marka Quanta FEG 250 model cihazı ile farklı büyüklüklerde çekilmiştir.

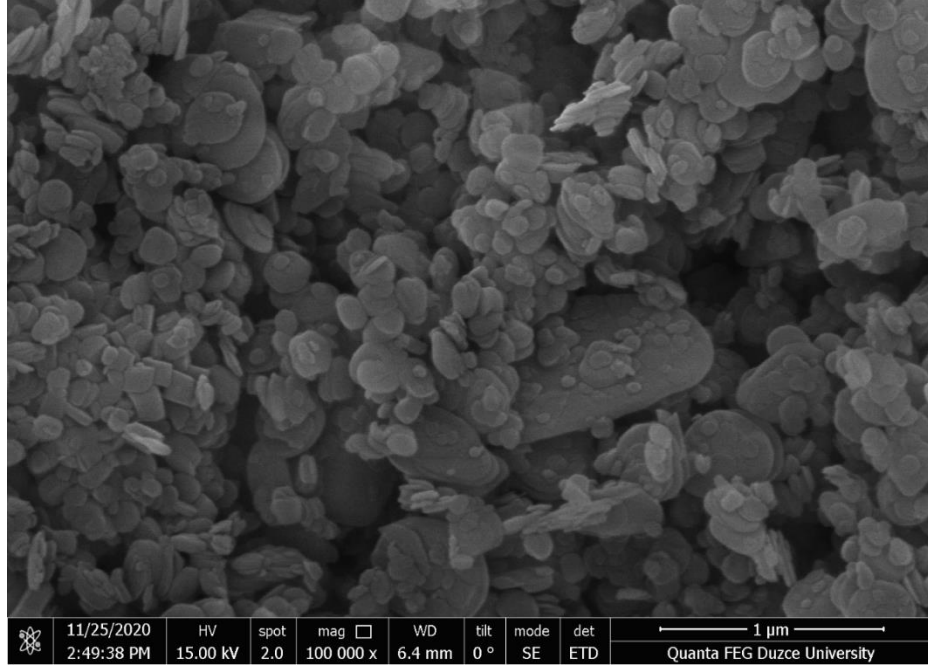


(a) 1 µm

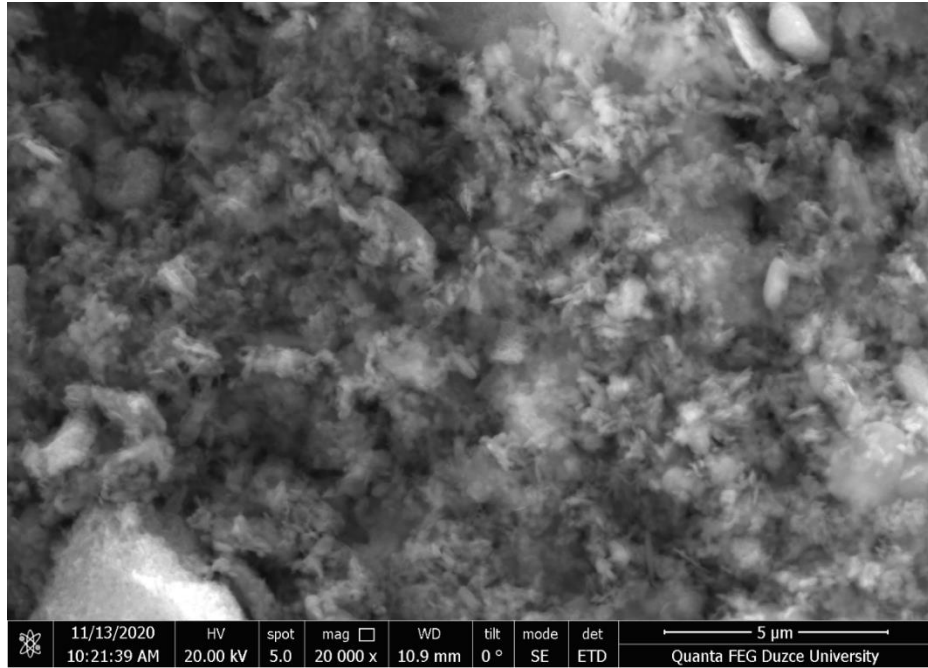


(b) 5 µm

Şekil 3.7. CuO nanopartiküllerin farklı büyüklüklerdeki SEM görüntüsü (a) 1 µm (b) 5 µm.

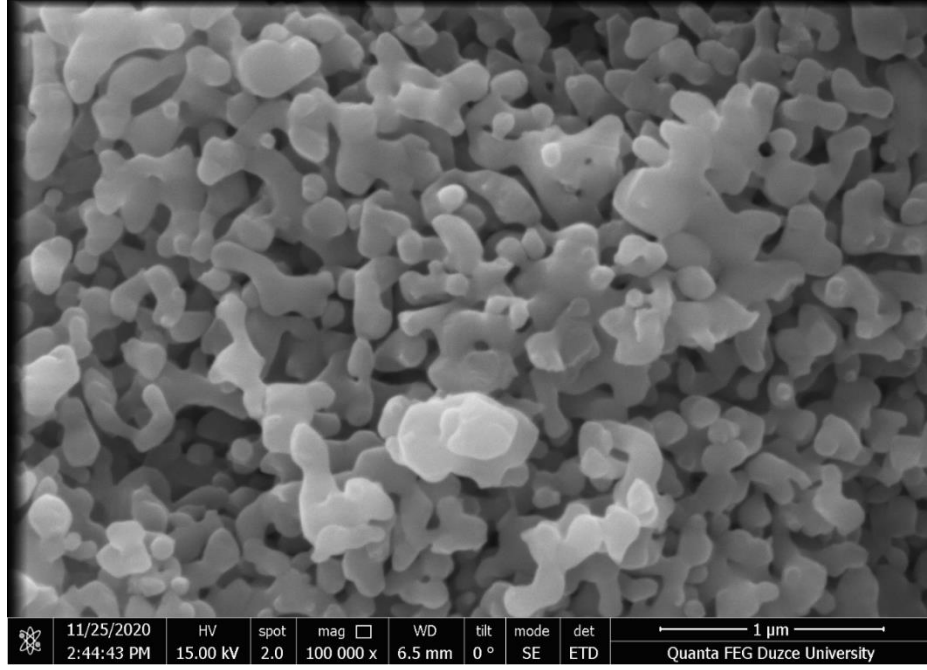


(a)

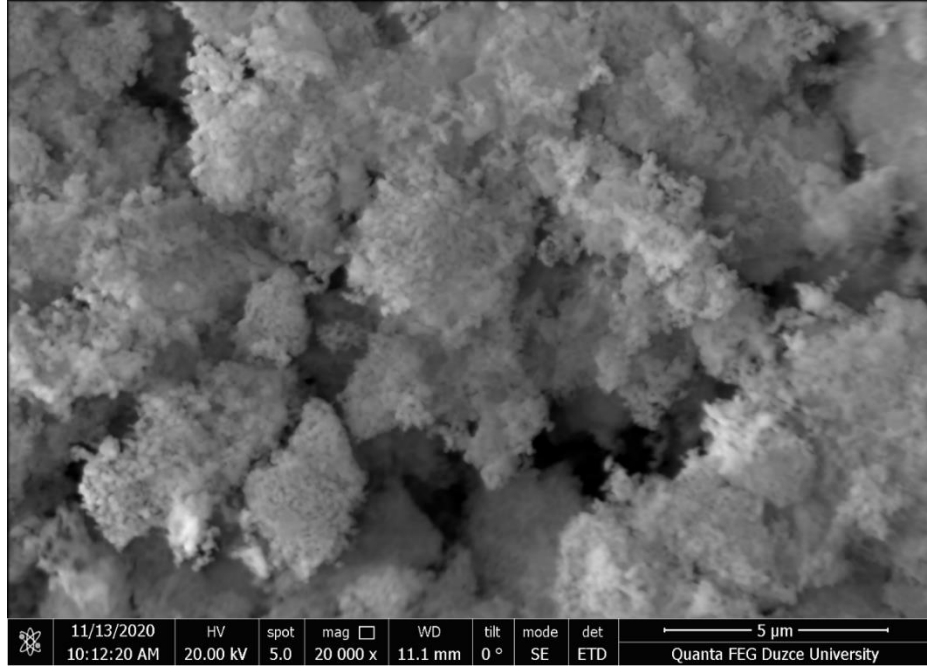


(b)

Şekil 3.8. bN nanopartiküllerin farklı büyüklüklerdeki SEM görüntüsü (a) 1 μm (b) 5 μm .



(a)

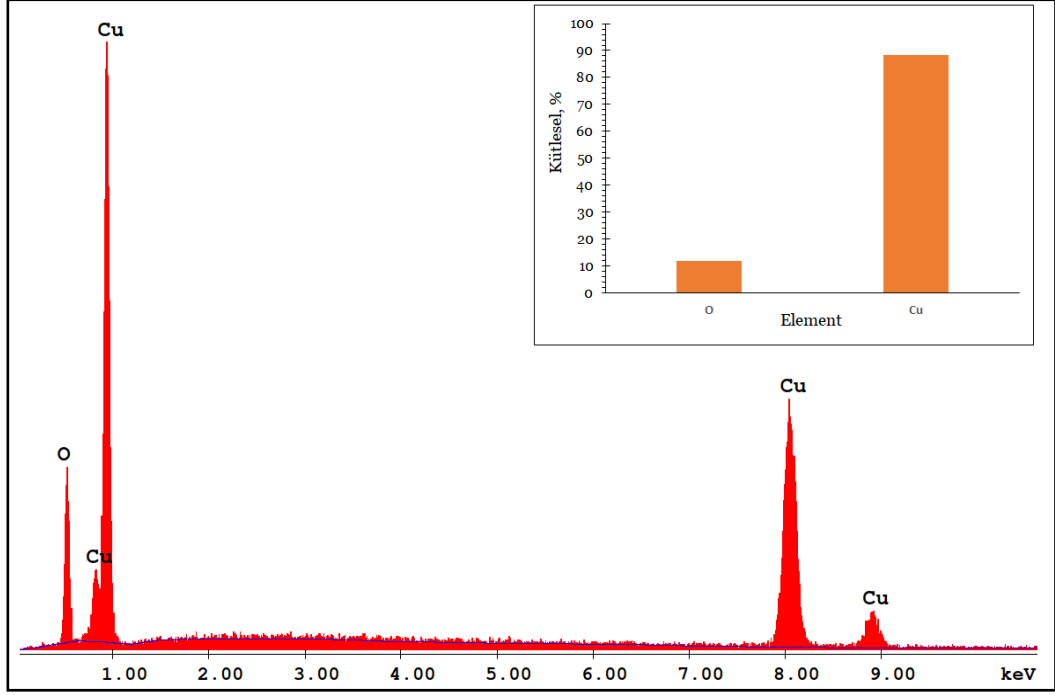


(b)

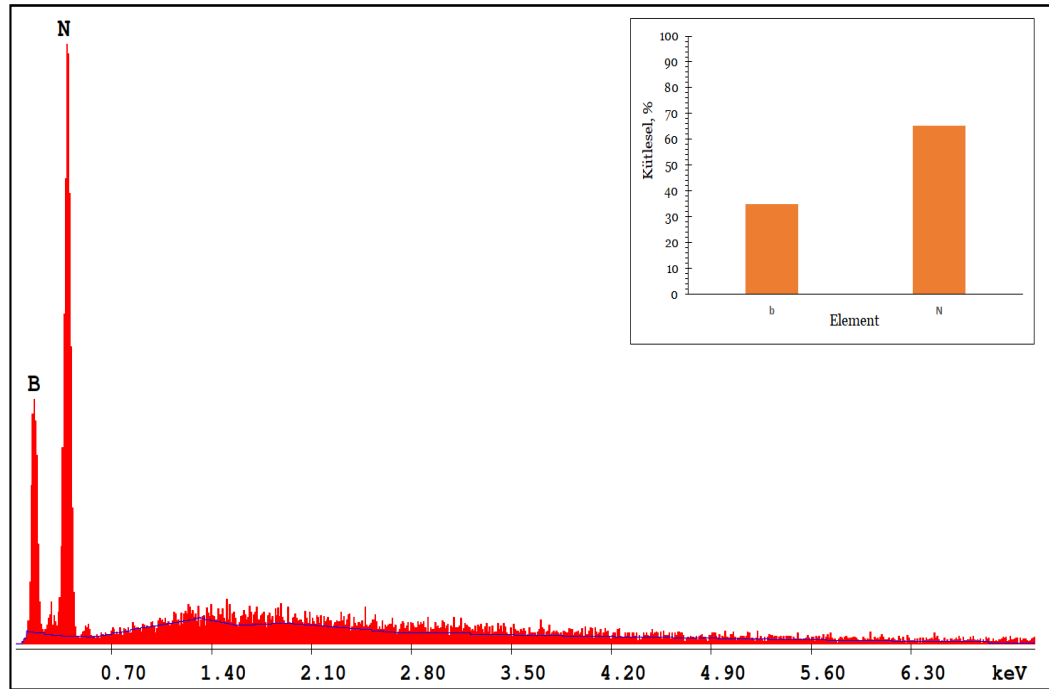
Şekil 3.9. Al₂O₃ nanopartiküllerin farklı büyüklüklerdeki SEM görüntüsü (a) 1 µm (b) 5 µm.

Çizelge 3.3 incelendiğinde CuO nanopartikülünün siyah, bN ve Al₂O₃ nanopartiküllerinin beyaz görünüme sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, nanopartiküllerin SEM görüntüsü incelendiğinde, CuO nanopartiküllerinin küresele yakın, bN nanopartiküllerin hekzagonal ve Al₂O₃ nanopartiküllerinin eşkenar dörtgen geometrisine yakın bir morfolojiye sahip olduğu görülmektedir. Kullanılan nanopartiküllere ait EDX (Energy-

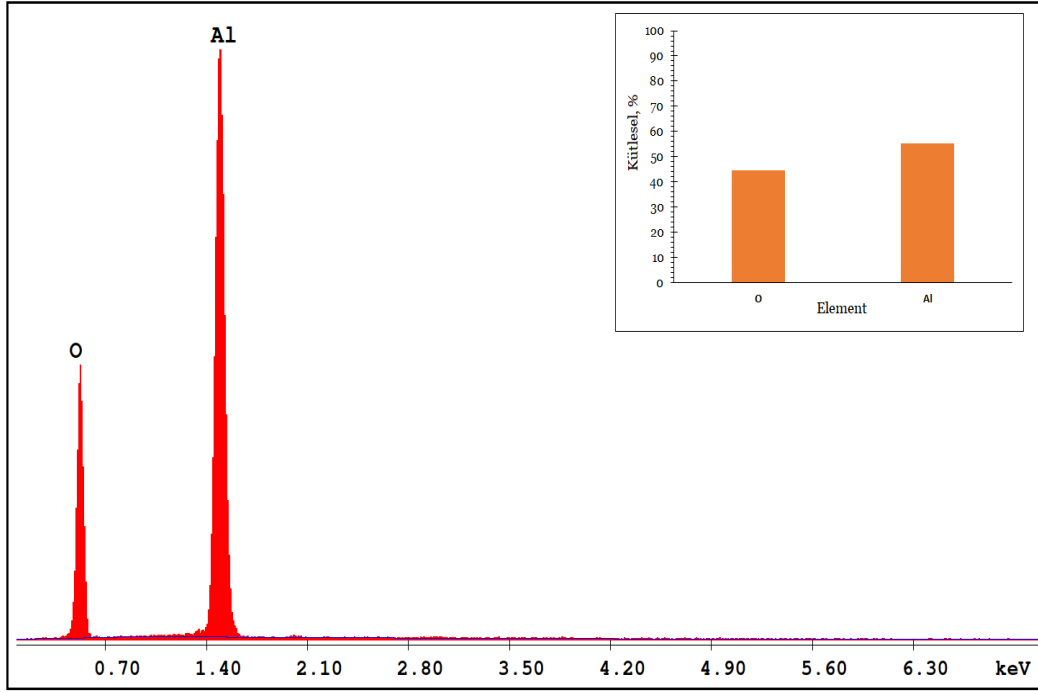
dispersive X-ray) spektrumları ise yine Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi laboratuvarlarında bulunan FEI marka Quanta FEG 250 model cihazın EDX detektörü ile elde edilmiş ve Şekil 3.11-3.13'te gösterilmiştir.



Şekil 3.10. CuO nanopartikülüne ait EDX spektrum.



Şekil 3.11. bN nanopartikülüne ait EDX spektrum.

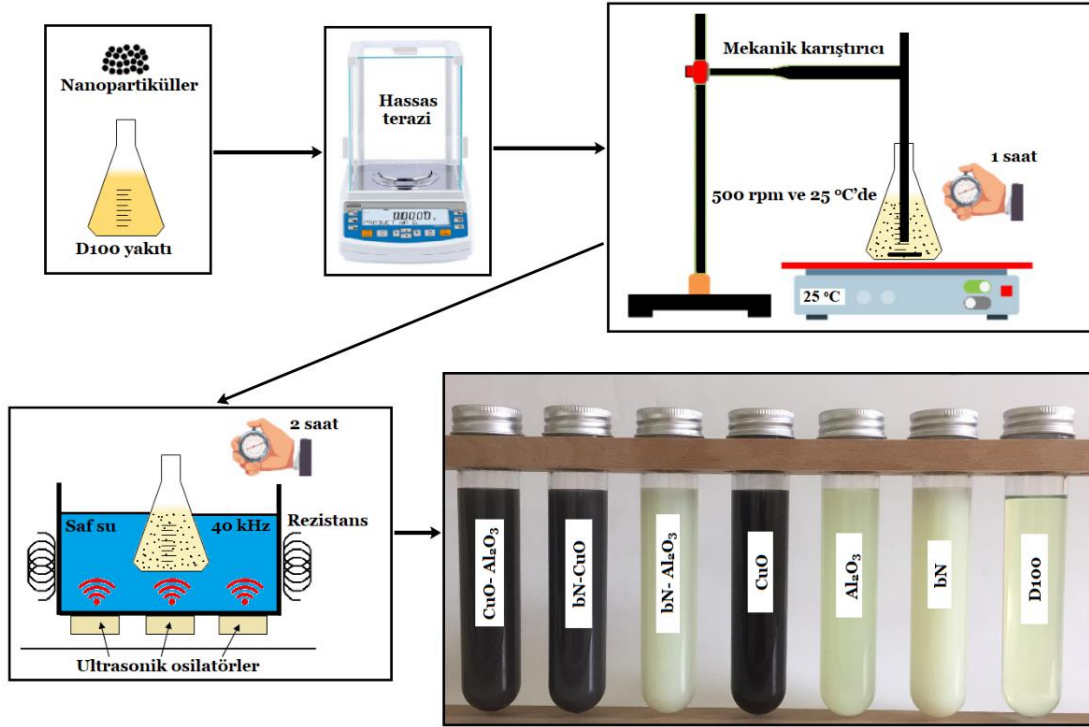


Şekil 3.12. Al₂O₃ nanopartikülüne ait EDX spektrum.

Şekil 3.11’de CuO nanopartikülünün kütlece % 11,63 oksijen elementinden, %88,37 bakır elementinden oluştuğu görülmektedir. bN nanopartikülü ise %30,78 boron elementinden oluşurken %69,22 nitrit elementinden oluşmaktadır (Bkz: Şekil 3.12). Son olarak, Al₂O₃ nanopartikülü %44,62 oranında oksijen, %55,38 oranında ise alüminyum elementinden oluşmaktadır (Bkz: Şekil 3.13). Burada ifade edilen oranlar kütleli olarak hesaplanmıştır.

Tez çalışmasında her bir nanopartikül, dizel yakıtta 250, 500 ve 1000 ppm oranlarında kütleli olarak ilave edilmiştir. Ancak, kullanılan nanopartiküller ve geleneksel dizel yakıt arasındaki yoğunlukların farklı olması sebebiyle ilave edilen nanopartiküllerin zaman içerisinde çökmesi kaçınılmazdır. Çökme süresini uzatmak, nanopartiküller arasındaki topaklaşmayı minimize etmek ve homojen bir test yakıtı elde etmek amacıyla literatürde de sıklıkla başvurulan bazı adımlar takip edilmiştir. Öncelikle, saf dizel yakıtta ilave edilecek nanopartiküllerin dozajları Radwag AS 220 R.2 hassas terazi ile ± 0.0001 gram hassasiyet ile ölçülmüştür. Daha sonra dizel yakıt ve nanopartiküller birbirleri ile cam deney büreti içinde TermoLab marka karıştırıcı kullanılarak 500 rpm’de ve 25 °C’de karıştırılmıştır. Bu karıştırma işlemi 1 saat boyunca sürdürülmüştür. Daha sonra, ilgili deney büreti HY Teknoloji marka ultrasonik banyo içinde bulunan saf su içerisine bırakılmıştır. Burada test numunelerinin, 40 kHz frekansta, tam dalga boyunda, 2 saat süresince ses dalgalarına maruz bırakılarak homojen olarak çözünmesi sağlanmıştır. Daha

sonra elde edilen nanodizeller (nanopartikül-dizel karışımları), test edilmek üzere yakıt tankına boşaltılmış ve motorun referans sıcaklık değerine ulaşması için bu test yakıtları kullanılmıştır. Nanoyakıtların hazırlanması için takip edilen adımlar Şekil 3.14'te aşama aşama gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Nanoyakıtların hazırlanmasında takip edilen adımlar.

Zeltex ZX440 marka C 2000 IKA model bomba kalorimetre ile test yakıtlarının setan sayıları $\pm 0,5$ hassasiyet ile ölçülmüştür. Her bir test yakıtı için üç adet ölçüm yapılmış ve verilen değerler bu üç ölçümün ortalaması alınarak elde edilmiştir. Setan sayısı ölçüm cihazı Şekil 3.15'te verilmiştir.



Şekil 3.14. Setan sayısı ölçüm cihazı.

Tez çalışmasında yakıtların kinematik viskozite değerleri ise Tanaka AKV-202 model kinematik ölçüm cihazı ile $\pm 0,01 \text{ mm}^2/\text{s}$ hassasiyet ile ölçülmüştür. Her bir test yakıtı için üç adet ölçüm yapılmış ve verilen değerler bu üç ölçümün ortalaması alınarak elde edilmiştir. Kinematik viskozite ölçüm cihazı Şekil 3.16'da verilmiştir.



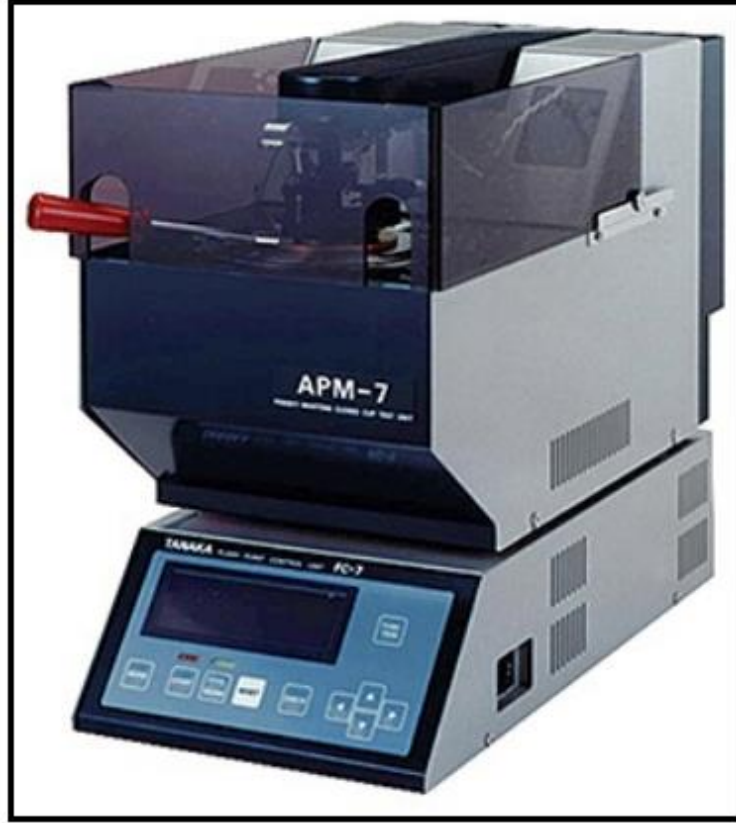
Şekil 3.15. Kinematik viskozite ölçüm cihazı.

Çalışmada test yakıtlarının yoğunluk değerleri $\pm 0,001 \text{ g/cm}^3$ hassasiyetine sahip portatif Kyoto marka KEM DA-130N el tipi yoğunluk ölçer cihazı ile ölçülmüştür. Her bir test yakıtı için üç adet ölçüm yapılmış ve verilen değerler bu üç ölçümün ortalaması alınarak elde edilmiştir. Yoğunluk ölçüm cihazı Şekil 3.17’de gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Yoğunluk ölçüm cihazı.

Test yakıtlarına ait parlama noktası ise $\pm 0,5$ °C hassasiyet ile ölçüm yapabilen Tanaka marka APM-7 tip parlama noktası analizatörü yardımı ile ölçülmüştür. Ölçümler her bir test yakıtı için üçer kez tekrarlanmış ve verilen değerler bu üç değerın ortalaması alınarak elde edilmiştir. Parlama noktası ölçüm cihazı Şekil 3.18’de gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Parlama noktası ölçüm cihazı.

Elde edilen test yakıtı özellikleri Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Test yakıtlarının bazı önemli özellikleri.

Dozaj, ppm	Yakıt tipi	Yoğunluk, g/L @ 25°C	Setan sayısı	Kinematik viskozite, cSt @ 40°C	Parlama Noktası, °C	Isıl değer cal/g
-	D100	0,831	60,5	3,01	92,5	9050
250	bN	0,831	60,9	3,04	>100	9340
	Al ₂ O ₃	0,831	60,9	3,02	>100	9210
	CuO	0,831	60,8	3,02	>100	9183
	bN- CuO	0,831	61,1	3,02	>100	9236
	bN- Al ₂ O ₃	0,831	61	3,02	>100	9225
	CuO- Al ₂ O ₃	0,831	61,1	3,02	>100	9253
500	bN	0,832	61,3	3,06	>100	9630
	Al ₂ O ₃	0,832	61,3	3,03	>100	9371
	CuO	0,832	61,1	3,04	>100	9316
	bN- CuO	0,832	61,7	3,04	>100	9422
	bN- Al ₂ O ₃	0,832	61,5	3,03	>100	9400
	CuO- Al ₂ O ₃	0,832	61,7	3,04	>100	9455
1000	bN	0,832	62,1	3,09	>100	10210
	Al ₂ O ₃	0,832	62,1	3,06	>100	9691
	CuO	0,832	61,7	3,06	>100	9582
	bN- CuO	0,832	62,9	3,06	>100	9793
	bN- Al ₂ O ₃	0,832	62,5	3,05	>100	9750
	CuO- Al ₂ O ₃	0,832	62,9	3,06	>100	9860
Tüm test yakıtları için	Test Metodu					
	TS EN ISO 12185	TS10317 EN ISO 5165 TS EN 15915	TS 1451 EN ISO 3104	TS EN ISO 2719	-	

4. SONUÇLAR

4.1. Test Yakıtlarının Stabilitesi

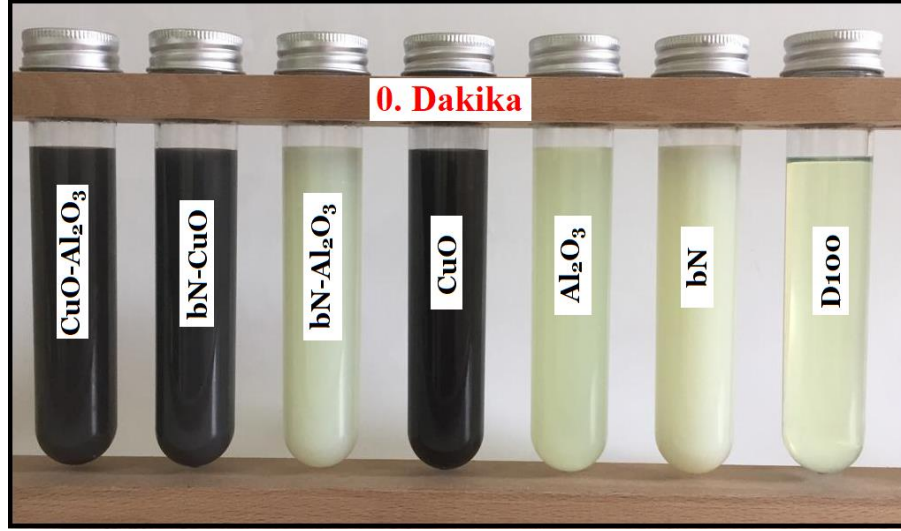
Çalışmada test yakıtları içerisine takviye edilen nanopartiküllerin havada asılı kalma sürelerini, faz ayrımlarını, topaklaşmalarını ve yakıt içerisinde dibe çökmelerini gözlemlemek amacıyla kısa aralıklarla fotoğraflama yöntemi kullanılmıştır. Bu işlem sadece ortalama nanopartikül çökme süresinin tespiti için gerçekleştirilmiş olsa da ilgili yakıt tipleri deneylerden önceki adımlar takip edilerek önce 1 saat mekanik karıştırıcı ile ve sonrasında 2 saat ultrasonik banyoda 40 kHz frekansındaki ses dalgalarına maruz bırakılarak hazırlanmıştır. Şekil 4.1 saf dizel yakıt ile doldurulmuş ancak henüz nanopartikül ilave edilmemiş deney tüplerini göstermektedir.



Şekil 4.1. Nanopartikül ilave edilmemiş test yakıtları (D100).

Nanopartikül dozajı sıvı yakıt içerisinde ne kadar fazla ise nanopartiküllerin yakıt içerisinde çökme sürelerinin de o kadar hızlı olması beklenmektedir. Bunun nedeni, daha fazla sayıda partiküllerin yakıt içerisinde serbestçe dolaşabileceği hacmin küçülmesi ve birbirlerine tutunma/kümeleşme/topaklaşma ihtimallerinin daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Buna göre, görüntüleme işlemi bu çalışmada kullanılan ve çökme süresinin en hızlı olması muhtemel nanopartikül dozajı olan 1000 ppm nanopartikül içerikli test yakıtları için gerçekleştirilmiştir. 1000 ppm nanopartikül takviye edilen test

yakıtları için mekanik karıştırma ve ultrasonik banyo işlemleri aynı anda gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerden hemen sonra, elde edilen nanoyakıt görünümleri test yakıtlarının kodlamaları ile birlikte Şekil 4.2’de sunulmuştur.



Şekil 4.2. Ultrasonikasyon işleminden hemen sonra nanopartikül ilave edilmiş test yakıtlarının görünümü (0. Dakika- Referans görüntü).

İlk görüntüden sonra test yakıtlarına ait kodlama etiketleri çökmelerinin ve faz değişimlerinin daha net gözlemlenebilmesi amacıyla deney tüpleri üzerinden kaldırılmıştır. Ancak yakıtların sıralamasında herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. İlk görüntüden sonra, ikişer saat ara ile 24 saat boyunca çekim yapılmıştır. Şekil 4.3 ile nanoyakıt numuneleri hazırlandıktan 12 saat sonraki çekilen görüntü verilmiştir.



Şekil 4.3. Test numunelerinin hazırlandıktan 12 saat sonraki görünümü.

Numuneler hazırlandıktan 12 saat sonra (Bkz: Şekil 4.3) tüplerin en üst katmanında gözle görülebilen küçük bir faz ayrımının başladığı tespit edilmiştir. Bundan önceki çekimlerde, gözle görünür bir ayırım tespit edilemediğinden ilgili görüntüler çalışmada verilmemiştir. Faz ayrımı bu noktadan sonra daha da belirgin hale gelmiştir. Test numunelerin hazırlandıktan 24 saat sonraki görünüşleri ise Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Test numunelerinin hazırlandıktan 24 saat sonraki görünüşleri.

Şekil 4.4'ten görüldüğü üzere faz ayrımı en belirgin iki numune CuO ve CuO-Al₂O₃ test yakıtlarıdır. Çizelge 3.3'ten CuO nanopartikülü tez çalışmasında kullanılan nanopartiküller arasında yoğunluğu en yüksek olan nanopartiküldür. CuO nanopartikülün yüksek yoğunluk değerinin, faz ayrımı işleminin CuO nanopartikül içeren test yakıtlarında en erken başlamasına sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Ayrıca, bN ve Al₂O₃ nanopartiküllerinin görünüşlerinin beyaz renkli olmasından kaynaklı olarak faz ayrımı çizgilerinin tespiti de daha zordur. Test numunelerin 48 saat sonraki görünüşü ise Şekil 4.5'te verilmiştir.



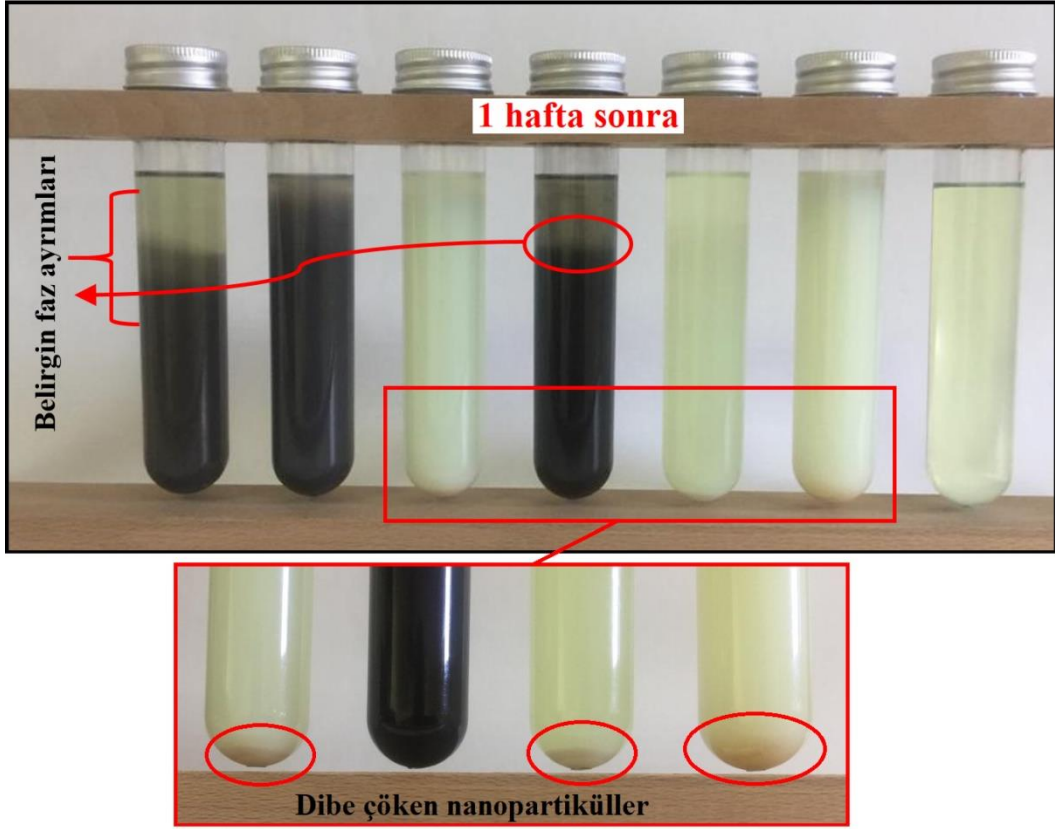
Şekil 4.5. Test numunelerinin hazırlandıktan 48 saat sonraki görünüşleri.

Numuneler hazırlandıktan 48 saat sonra ise faz ayrımı artık daha belirgin bir hale gelmiştir. Ayrıca, yakıt tüplerinin en alt kısmında az sayıda nanopartikülde bu aşamadan sonra görünür olmaya başlamıştır. Diğer taraftan, CuO test yakıtı içeren numunelerde faz ayrımı çizgilerinin tespiti nispeten daha kolayken, dibe çöken partiküllerin bu numunenin siyah renkli oluşundan kaynaklı olarak tespiti oldukça zordur. Şekil 4.6 ise numuneler hazırlandıktan 72 saat sonra çekilen fotoğrafı göstermektedir.



Şekil 4.6. Test numunelerinin hazırlandıktan 72 saat sonraki görünüşleri.

Numuneler hazırlandıktan sonra geçen 1 hafta ile birlikte artık faz ayrımı çizgisi ilerlemiş ve dibe çöken nanopartikül hacmi daha da belirgin bir hale dönüşmüştür. Şekil 4.7'de ilerleyen faz ayrımı görünümü ve dibe çöken nanopartiküllerin detayı verilmiştir.



Şekil 4.7. Test numunelerinin hazırlandıktan 1 hafta sonraki görünüşleri.

İlerleyen günlerde test yakıtlarının homojenliği giderek kötüleşmiş ve dibe çöken nanopartikül hacminde de artışlar gözlemlenmiştir. Ayrıca, faz ayrımı kesişim çizgileri de günbegün deney tüpünün alt kısmına doğru ilerlemiştir. Şekil 4.8, 4.9, 4.10 ve 4.11’de test yakıtlarının sırasıyla 15 gün, 30 gün, 45 gün ve 60 gün sonraki görüntüleri verilmiştir.



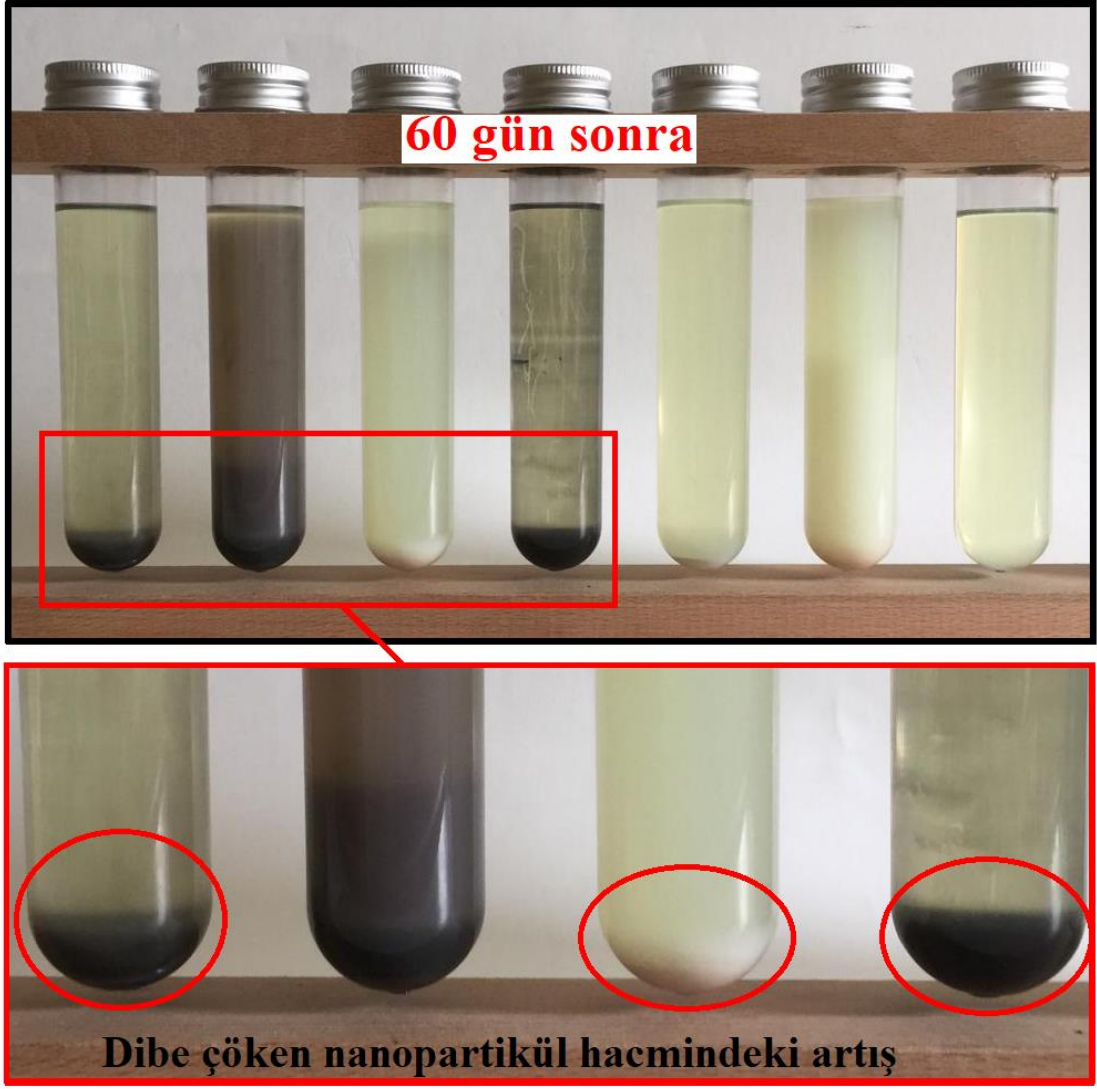
Şekil 4.8. Test numunelerinin hazırlandıktan 15 gün sonraki görünüşleri.



Şekil 4.9. Test numunelerinin hazırlandıktan 30 gün sonraki görünüşleri.



Şekil 4.10 Test numunelerinin hazırlandıktan 45 gün sonraki görünüşleri.



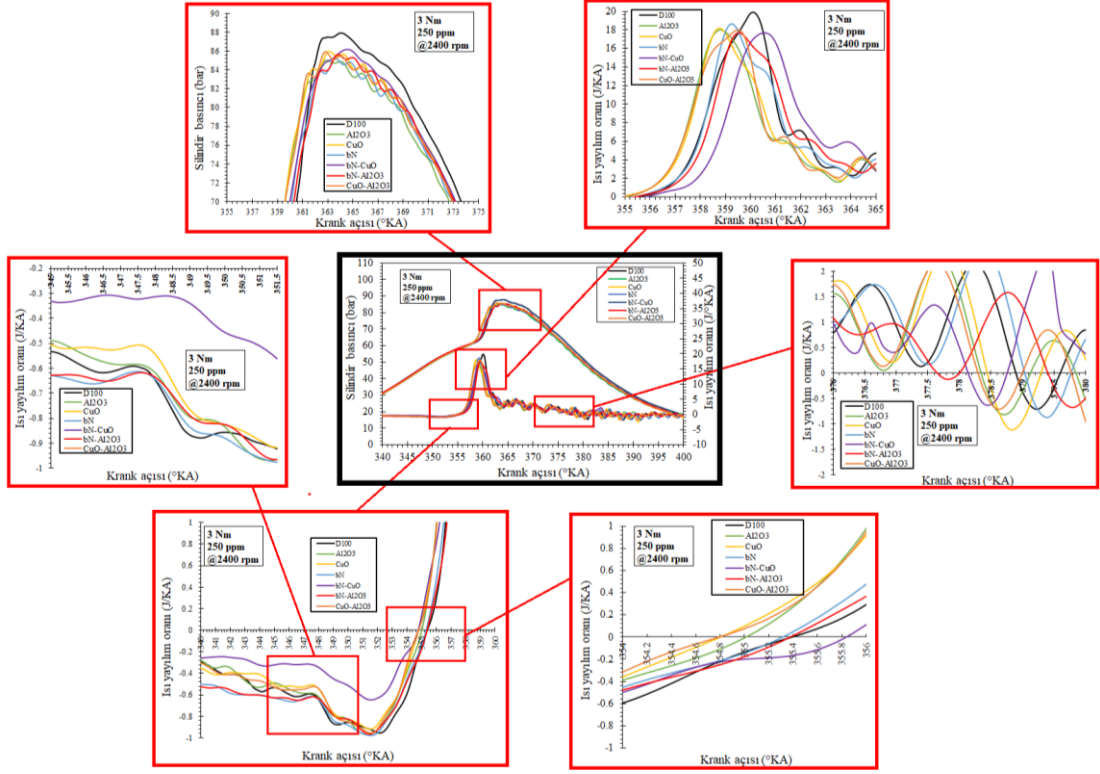
Şekil 4.11. Test numunelerinin hazırlandıktan 60 gün sonraki görünüşleri.

Özetle, çalışmada görüntüleme işlemi en hızlı çökelmenin beklendiği 1000 ppm nanopartikül içeren test yakıtları için gerçekleştirilmiştir. Yukarıdaki şekillerden görüleceği üzere, numuneler hazırlandıktan 12 saat sonra faz ayrımı gözle görülebilir bir hale dönüşmektedir. Zaman ilerledikçe havada asılı kalan nanopartikül miktarında bir azalma ve buna bağlı olarak faz ayrımında ise ilerlemeler tespit edilmiştir. Şekillerden, çökeltme süreleri ve homojenliklerin numuneden numuneye değişiklik gösterdiği görülmektedir. En hızlı çökeltme, yoğunluğu en yüksek olan CuO nanopartikülü içeren test yakıtlarında gözlemlenmiştir. Nanopartiküllerin renkleri faz ayrım çizgilerinin ve dipte biriken partiküllerin tespiti için önemlidir. Siyah renkli nanopartiküllerde faz ayrım çizgileri daha belirgin iken, beyaz renkli nanopartiküllerde topaklaşmaların görüntülenmesi daha kolaydır. Nanopartiküller, test yakıtlarına üstün termofiziksel ve kimyasal özellikler kazandırmaktadır. Ancak bu özelliklerden yararlanabilmek için

homojen bir karışım şarttır. Test yakıtı içerisinde bulunan nanopartikülün dibe çökmesi, topaklanması ya da kümelenmesi ile bu üstün özelliklerinden yararlanma oranı da giderek düşmektedir. Görüntüleme sonuçlarına dayanarak, nanopartikül içeren test yakıtlarının hazırlandıktan en fazla 12 saat içerisinde yakıt tankına boşaltılıp test edilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır. Nanoyakıt hazırlandıktan sonra geçen süre ne kadar uzun olursa nanoyakıtların homojenliğinin kötüleşmesi de o kadar hızlı olacaktır. Bu çalışmada, nanoyakıtlar hazırlandıktan hemen sonra (0. Dakika) olası bir çökelmeye müsaade etmemek amacıyla nanoyakıtlar yakıt tankına boşaltılmış ve deneylere başlanmıştır.

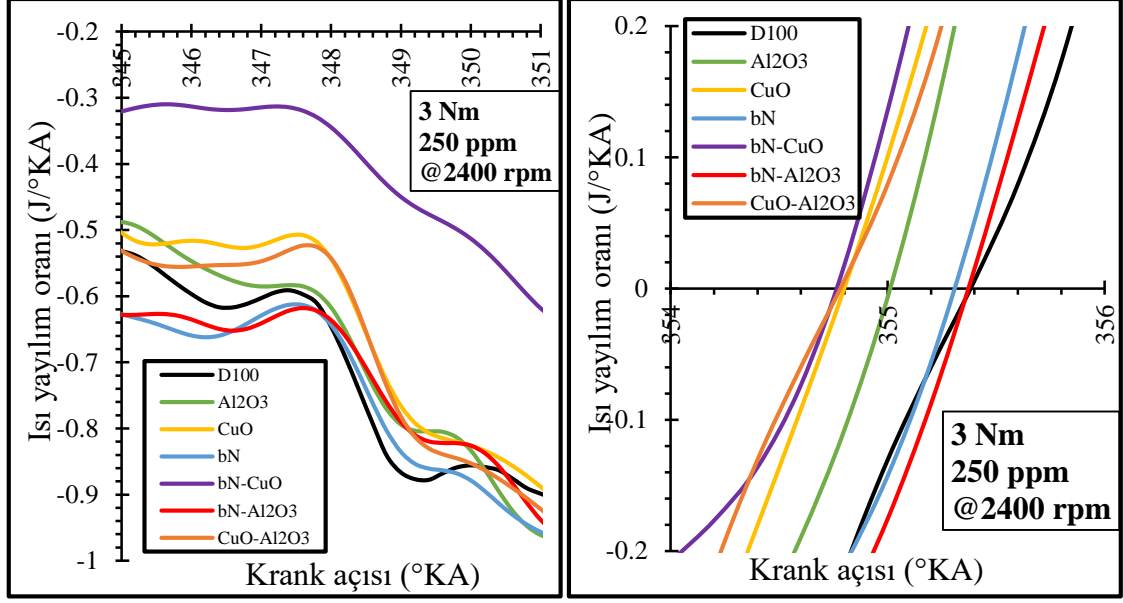
4.2. Yanma karakteristiği

Bu çalışmada, kullanılan test yakıtlarının değişen motor yüküne göre yanma karakteristikleri iki önemli yanma eğrisi olan silindir içi gaz basıncı ve ısı yayılım oranının krank açısına bağlı oluşturduğu eğriler detaylı bir şekilde analiz edilerek açıklanmaya çalışılmıştır. Yanma eğrileri ve bu eğrilerden türetilen önemli püskürtme ve yanma karakteristiklerine ait sayısal değerler Çizelge 4.1, 4.2 ve 4.3'te sırasıyla 250, 500 ve 1000 ppm nanopartikül dozajlarında, tüm motor yüklerinde her bir test yakıtı için detaylandırılmıştır. Yanma ve püskürtme detayları Şekil 4.12'de gösterildiği gibi yanma eğrilerinden türetilmiştir.



Şekil 4.12. Yanma ve püskürtme karakteristiklerinin detaylandırılması.

Çalışmada, yanma karakteristiklerinin belirlenmesi için bazı kabuller ve varsayımlar yapılmıştır. Bilindiği üzere, enjektörden püskürtülen yakıt demetleri atomize bir formda yanma odasına girdiği zaman sabit sıcaklıkta faz değiştirirken ortamdan bir miktar ısı çeker. Bu sebeple, kısa bir süre için ısı yayılım eğrilerinde küçük seviyelerde de olsa ani bir düşüş gözlemlenir. Bu çalışmada, ani düşüşün başladığı krank açısı değeri, ilgili test yakıtının püskürtme başlangıcı olarak kabul edilmiştir. Daha sonra, ısı yayılım eğrileri Şekil 4.13'te de gösterildiği gibi yakıtların tutuşması ile birlikte hızla yükselir ve sıfır noktasını kısa sürede geçer. Çalışmada, ısı yayılım eğrisinin püskürtme başlangıcından sonra hızla yükselip sıfır noktasını geçtiği krank açısı değeri ise ilgili test yakıtı için yanma başlangıcı olarak kabul edilmiştir. Yakıtın tutuşma gecikmesi ve bu gecikme boyunca yanma odasına püskürttüğü yakıt miktarı, püskürtülmenin başladığı nokta, püskürtülen yakıt jetlerinin buharlaşabilmek için silindir içerisinden çektiği ısı miktarı, silindir içerisindeki sıcaklık, yakıtın viskozitesi ve atomizasyonu, silindir içi gaz sıcaklığı ve birçok diğer faktör yakıtın yanmaya başladığı nokta üzerinde etkili olan önemli parametrelerdir. Püskürtme başlangıcı olarak kabul edilen ani ısı düşüşünün görünümü Şekil 4.13a'da ve yanma başlangıcı olarak kabul edilen sıfır noktasına ulaşılan krank açısı ise Şekil 4.13b'de gösterilmiştir.

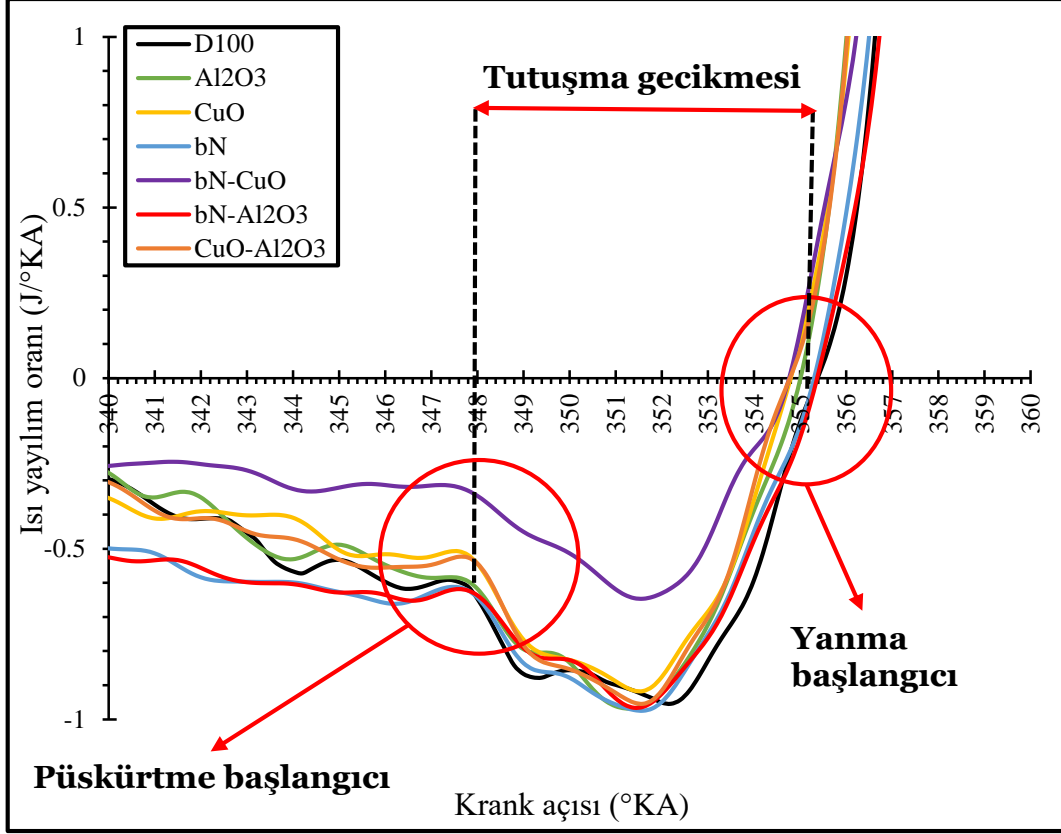


(a)

(b)

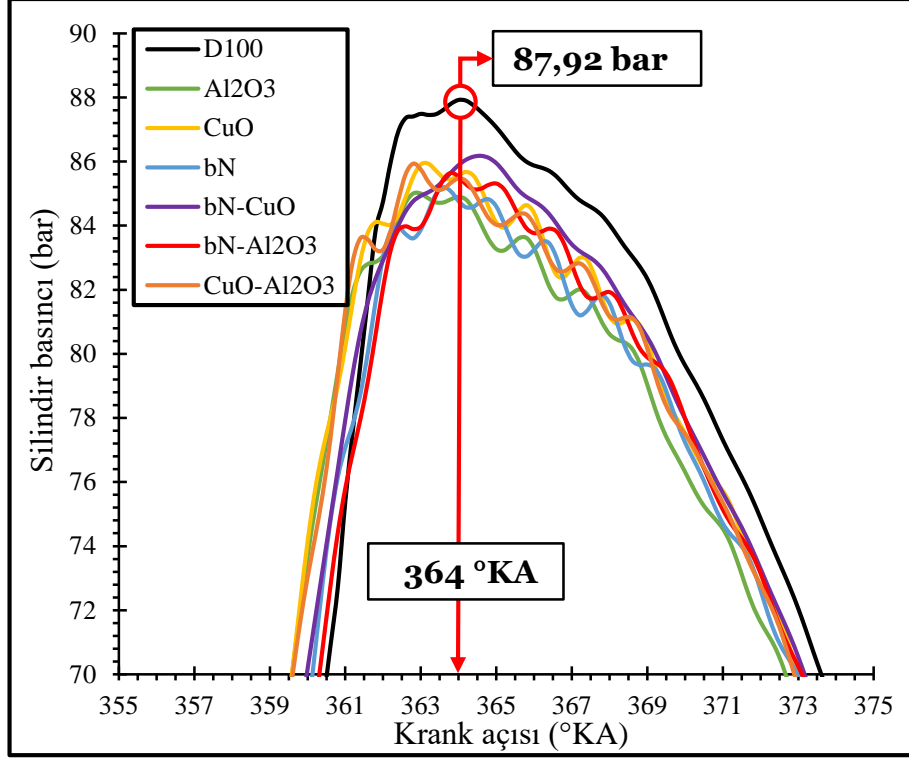
Şekil 4.13. Yanma eğrileri (a) Püskürtme başlangıcı – ani ısı düşüşü (b) Yanma başlangıcı – sıfır noktasını geçiş.

Dizel motorlarda, silindir içerisine alınan hava tüm subaplar kapalı konumda iken pistonun alt ölü noktadan üst ölü noktaya doğru hareketiyle birlikte sıkışır. Bu sıkışma işlemi sonucunda, yanma odasındaki havanın sıcaklığı ve basıncı oldukça yükselir. Piston üst ölü noktaya yaklaştığında ise enjektör açılır ve yüksek basınç ile yakıt demetleri sıcaklığı ve basıncı yükseltilmiş havanın üzerine püskürtülür. Ancak, yakıt enjektörden püskürtüldüğü anda hemen yanma işlemi başlayamaz. Yakıtın alevli bir yanmaya başlayabilmesi için optimum fiziksel (enjektör basıncı, delik çapı, yanma odası tasarımı, yakıt damlacıklarının atomizasyonu, ısınması, buharlaşması gibi) ve kimyasal gecikmelerin (yakıt özellikleri ve silindir içi sıcaklığa bağlı) tamamlanması beklenir. Bu bekleme süresine, tutuşma için hazırlık evresi ya da tutuşma gecikmesi (bu çalışmada tutuşma gecikmesi) denir. Bu çalışmada, yakıtın püskürtme başlangıcı ve yanma başlangıcı arasında geçen sürenin mutlak farkı alınarak tutuşma gecikmesi için geçen süre tespit edilmiştir. Tutuşma gecikmesi süresinin tespiti Şekil 4.14 ile sembolik olarak gösterilmiştir.



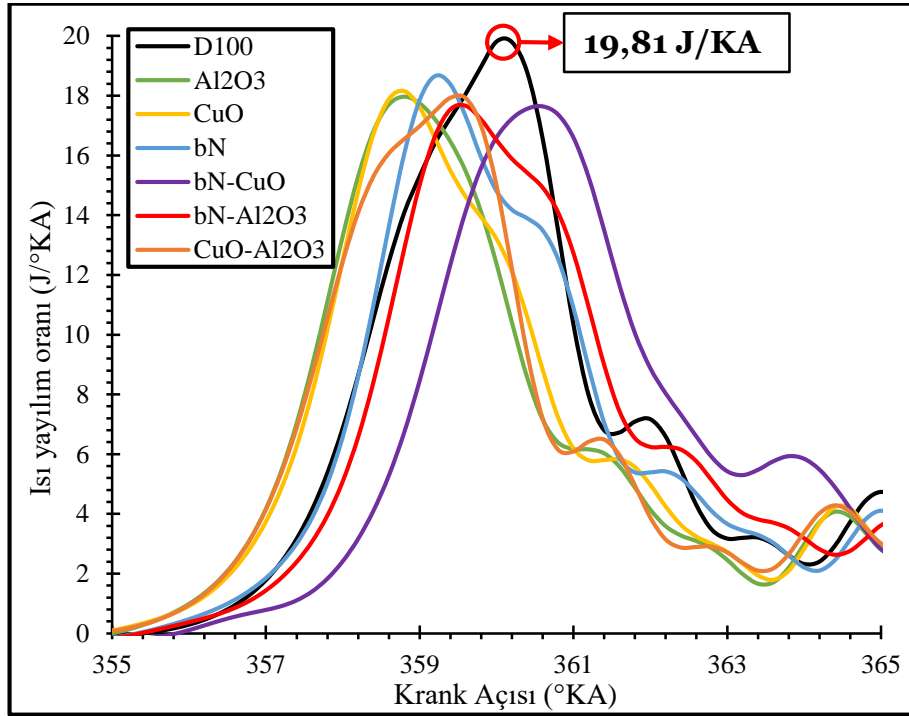
Şekil 4.14. Tutuşma gecikmesinin tespiti.

Maksimum silindir içi gaz basınç değeri ve maksimum silindir içi gaz basınç değerinin yeri Şekil 4.15'te gösterildiği gibi silindir basıncı-krank açısı grafiğinden görülmektedir. Öncelikle ilgili test yakıtı için maksimum değer tespit edilir ve daha sonra bu maksimum değere hangi krank açısında ulaşıldığı grafikten okunur. Örneğin, D100 test yakıtı için 3 Nm motor yükündeki maksimum silindir basıncı değeri 87,92 bar'dır ve bu değere ilgili test yakıtı ile üst ölü noktayı 4 °KA geçtikten sonra (ya da 364 °KA) ulaşılmıştır.



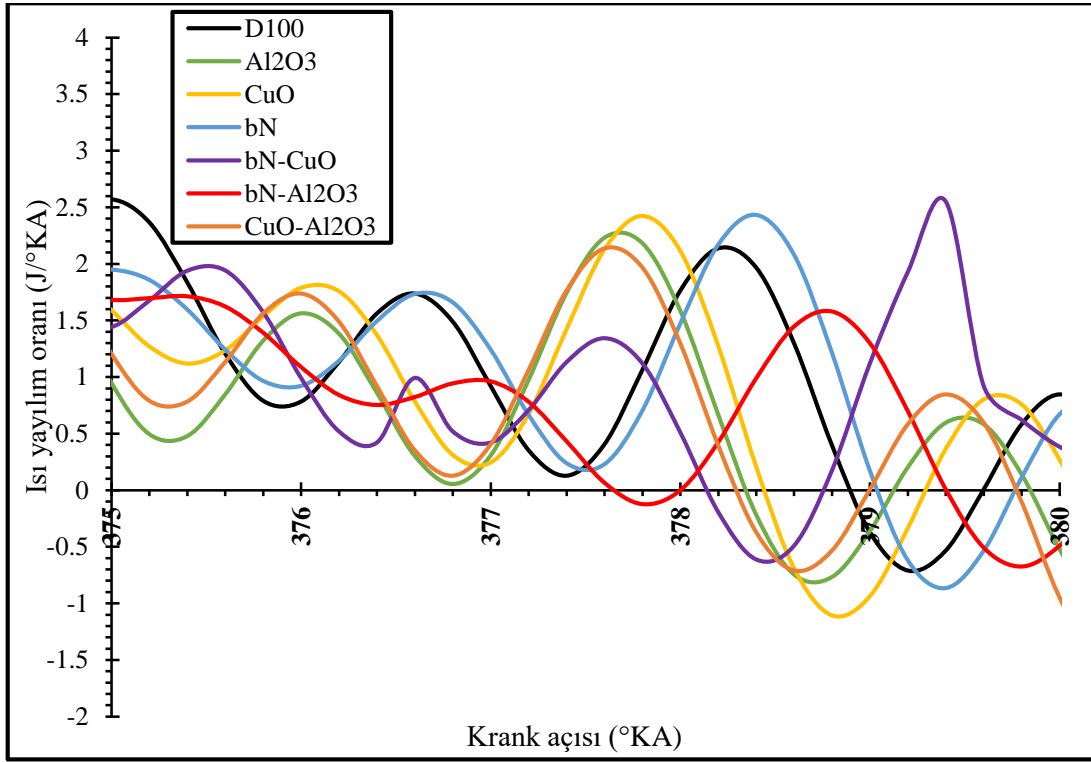
Şekil 4.15. Maksimum silindir basıncı ve lokasyonu.

Benzer şekilde, test yakıtlarına ait maksimum ısı yayılım oranı değerleri ısı yayılım oranı-krank açısı eğrilerinden okunarak elde edilmiştir (Bkz: Şekil 4.16). Örneğin, 3 Nm motor yükünde D100 test yakıtının maksimum ısı yayılım oranı 19,81 J/°KA'dır.



Şekil 4.16. Maksimum ısı yayılım oranı.

Yanma başlangıcı olarak test yakıtlarının ısı yayılım eğrisinde sıfır noktasını geçtiği krank açısı değeri kabul edilmiştir. Benzer mantık ile çalışmada, yanma sonu değeri için de, test yakıtlarına ait ısı yayılım eğrileri grafiklerinin sıfır noktasının altına düştüğü ilk nokta kabul edilmiştir (Bkz: Şekil 4.17). Yanma sonu değerlerinin tespitinde, yine ısı yayılım oranı-krank açısı grafiğinden faydalanılmıştır. Bu bölge “art yanma bölgesi” olarak adlandırılır. Art yanma bölgesinde, artık yakıtın yanma odasına püskürtülme evresi tamamlanmıştır ve piston genişleme evresine geçmiştir. Bu bölgede, daha önce yanma odasına püskütülen ancak yanmak için fırsat bulamayan yakıt uygun şartlara eriştiğinde oksijen buldukça yanmaya devam eder (Çelik ve ark., 2016). Bu sebeple, art yanma bölgesindeki salınımlar Şekil 4.17’de de görüldüğü gibi oldukça fazladır.

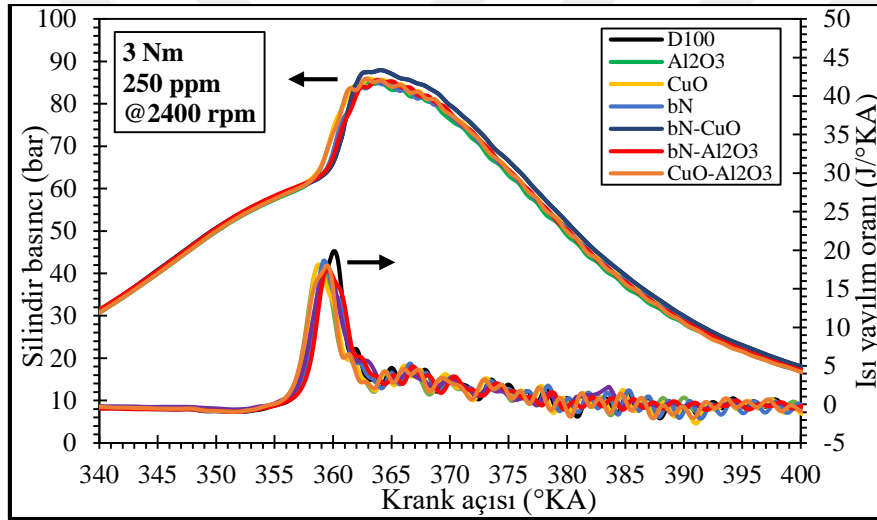


Şekil 4.17. Yanma sonunun tespiti.

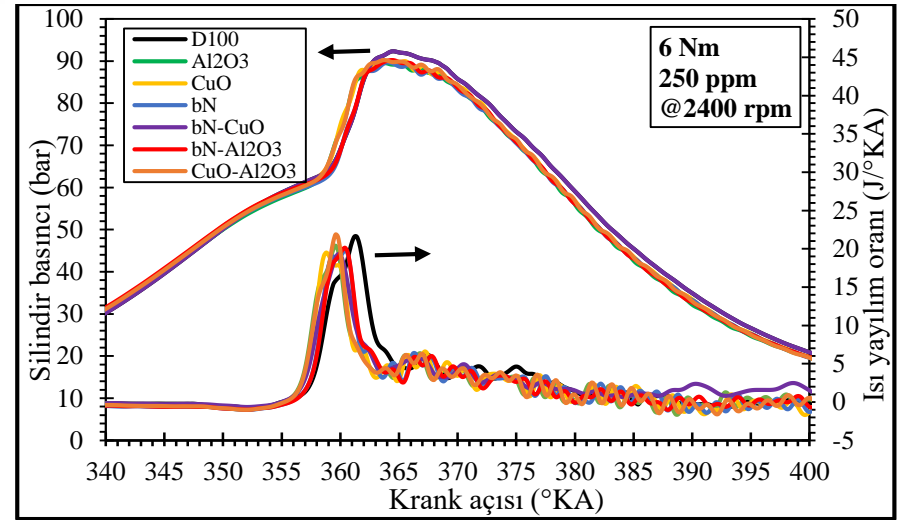
İçten yanmalı motorlarda yanma süresi genellikle her çevrim için ortalama birkaç milisaniye kadar sürmektedir (Ma ve ark., 2017; Yuan ve ark., 2017; Prechtl ve ark., 1998). Bu çalışmada, yanma süresi krank açısı cinsinden verilmiştir ve yanma başlangıcı ile yanma sonu arasındaki süre göz önüne alınarak elde edilmiştir. Yanma parametreleri için yapılan kabuller ve elde edilmiş yöntemleri yukarıda tek bir örnek üzerinden detaylıca açıklanmıştır. Aşağıda Şekil 4.18, 4.19 ve 4.20 ile sırasıyla 250, 500 ve 1000 ppm nanopartikül dozajındaki silindir basıncı-krank açısı ve ısı yayılım oranı-krank açısı

değerleri değişen yüklere göre verilmiştir. Motor yüklerindeki değişimler ilgili şekillerde a, b, c ve d alt şekilleri ile sırasıyla 3, 6, 9 ve 12 Nm için gösterilmiştir. Ayrıca, bu eğrilerden yukarıda anlatılan yollar ile elde edilen detaylı yanma ve püskürtme parametrelerine ait nümerik veriler ise Çizelge 4.1, 4.2 ve 4.3'te sırasıyla 250, 500 ve 1000 ppm nanopartikül kullanım durumlarına göre verilmiştir.

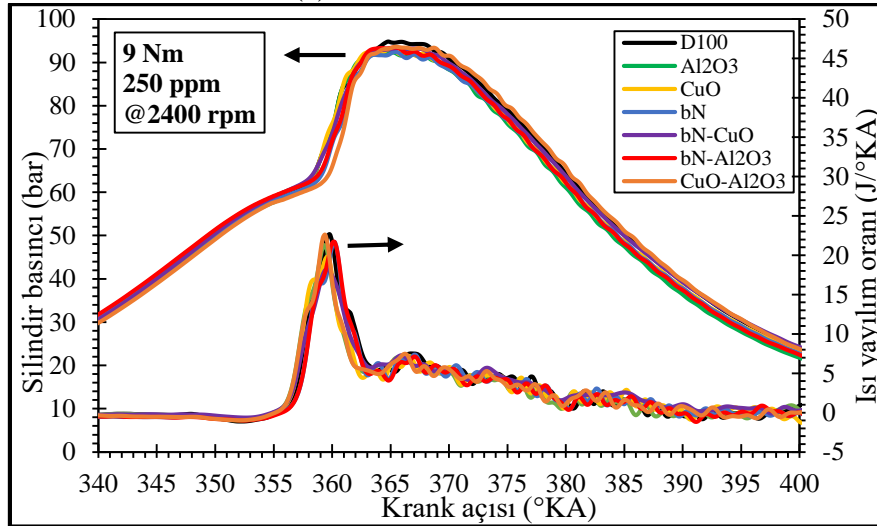




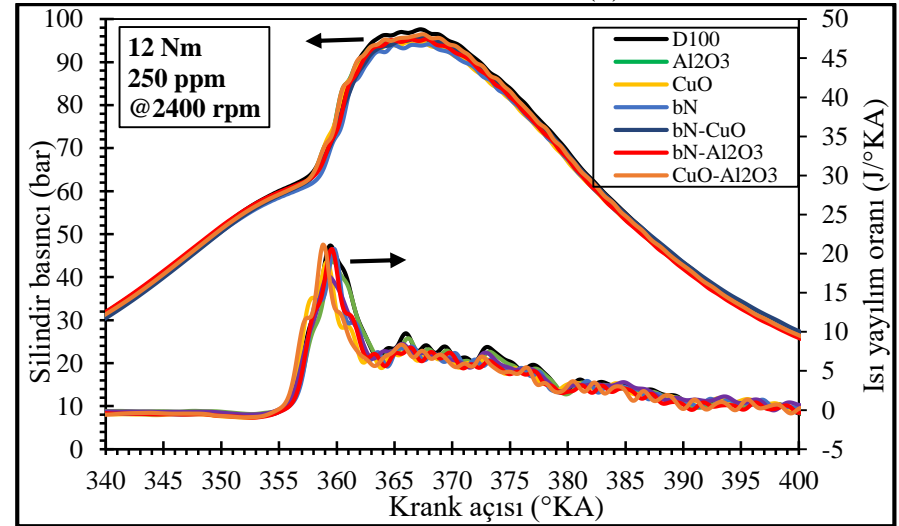
(a)



(b)

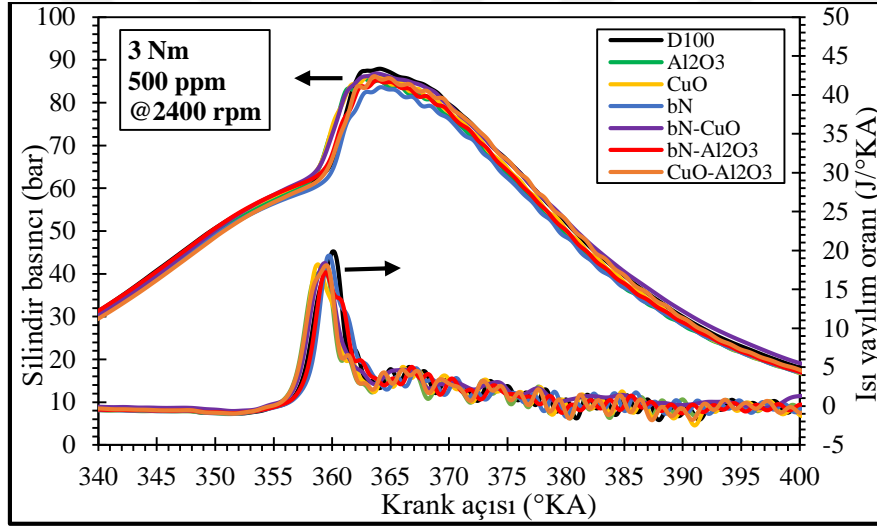


(c)

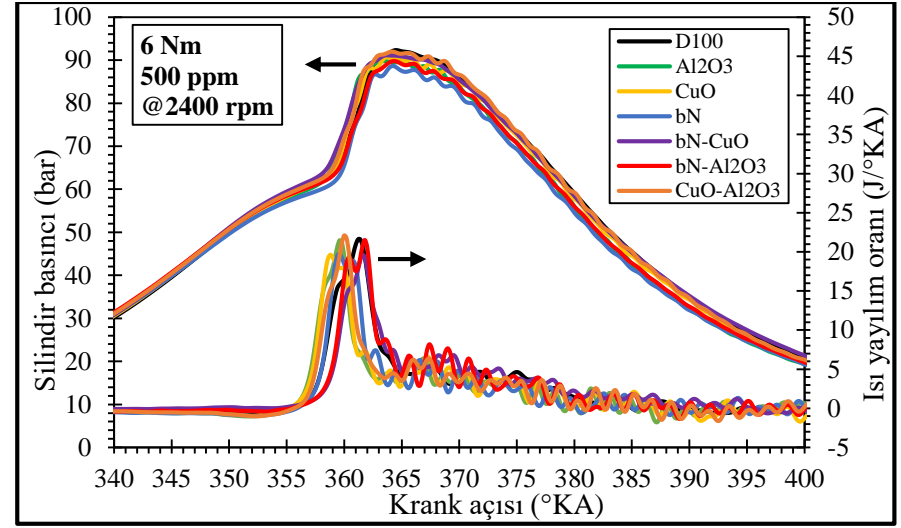


(d)

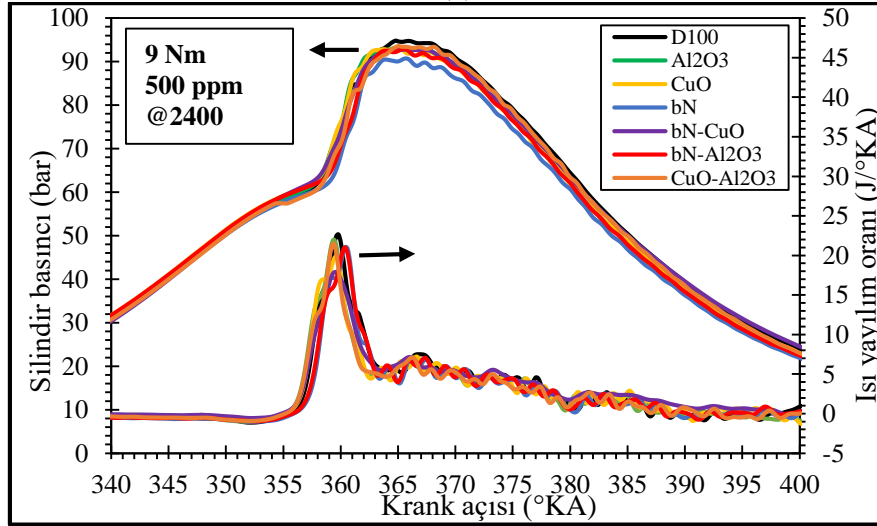
Şekil 4.18. 250 ppm'de silindir içi gaz basıncı ve ısı yayılım oranları (a) 3 Nm (b) 6 Nm (c) 9 Nm ve (d) 12 Nm.



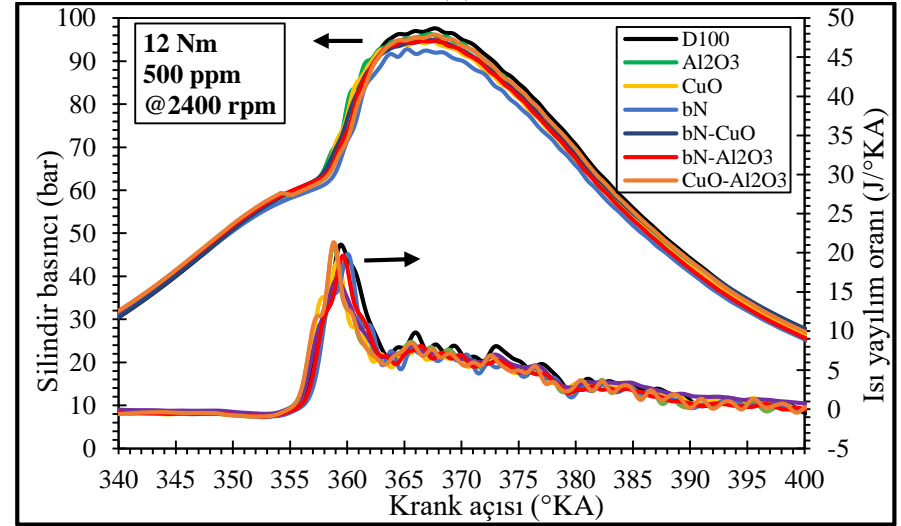
(a)



(b)

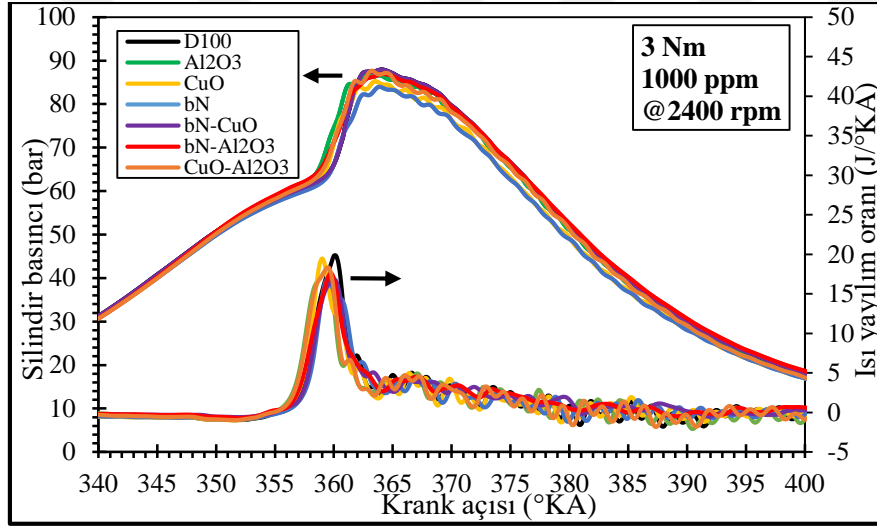


(c)

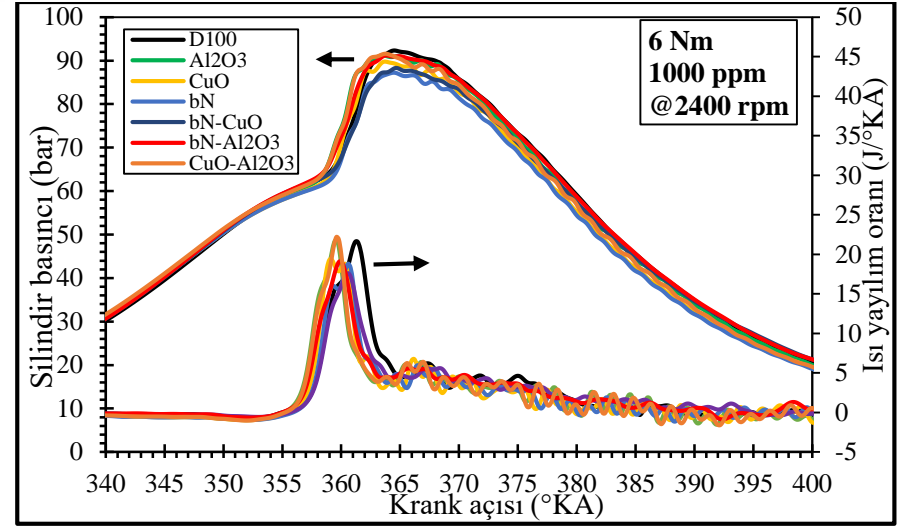


(d)

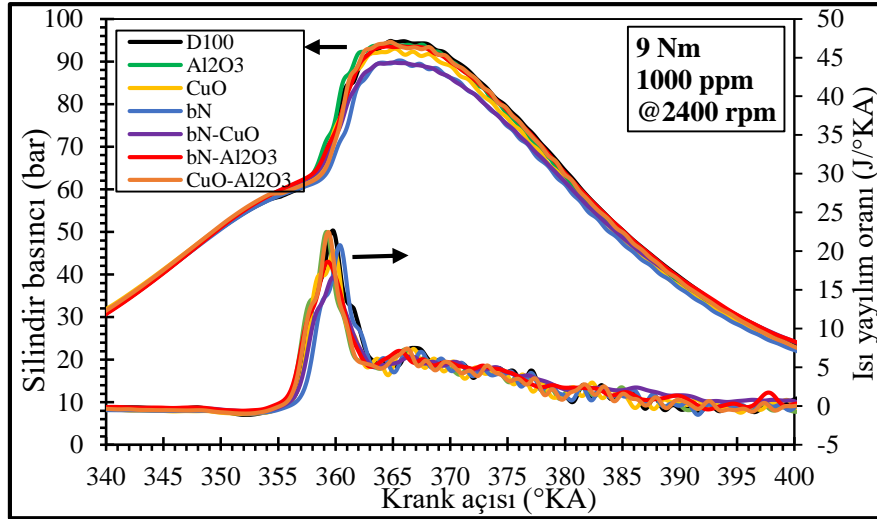
Şekil 4.19. 500 ppm'de silindir içi gaz basıncı ve ısı yayılım oranları (a) 3 Nm (b) 6 Nm (c) 9 Nm ve (d) 12 Nm.



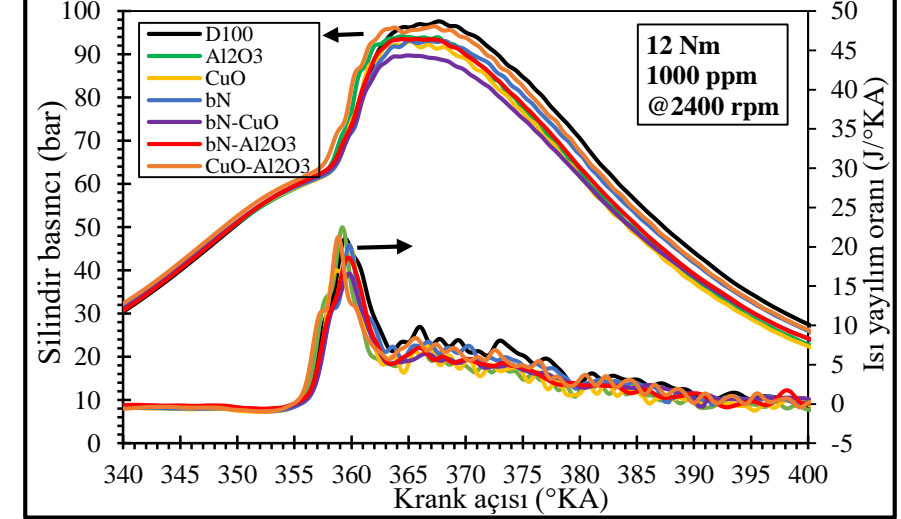
(a)



(b)



(a)



(b)

Şekil 4.20. 1000 ppm'de silindir içi gaz basıncı ve ısı yayılım oranları (a) 3 Nm (b) 6 Nm (c) 9 Nm ve (d) 12 Nm.

Aşağıdaki çizelgelerde de kullanılan kısaltmalar ve incelenen yanma ve püskürtme parametreleri şu şekildedir:

- PB: Püskürtme başlangıcı ($^{\circ}\text{KA}$),
- TG: Tutuşma gecikmesi ($^{\circ}\text{KA}$),
- YB: Yanma başlangıcı ($^{\circ}\text{KA}$),
- YS: Yanma süresi ($^{\circ}\text{KA}$),
- CP_{max} : Maksimum silindir içi gaz basıncının değeri (bar),
- YCP_{max} : Maksimum silindir içi gaz basıncının yeri ($^{\circ}\text{KA}$),
- IYO_{max} : Maksimum ısı yayılım oranı değeri ($\text{J}/^{\circ}\text{KA}$).

Çizelge 4.1. 250 ppm'deki yanma ve püskürtme parametrelerinin sayısal değerleri.

Yük (Nm)	Test yakıtı	PB (°KA)	TG (°KA)	YB (°KA)	YS (°KA)	CP _{max} (bar)	YCP _{max} (°KA)	IYO _{max} (J/°KA)
3	D100	-12,20	7,60	-4,60	27,20	87,92	4,00	19,81
	Al ₂ O ₃	-12,00	7,20	-4,80	24,00	85,00	2,80	17,97
	bN	-12,00	7,20	-4,80	23,20	85,20	3,60	18,65
	CuO	-12,20	7,20	-5,00	25,80	85,93	3,20	18,16
	bN-CuO	-12,00	6,80	-5,20	24,00	86,18	4,60	17,28
	bN-Al ₂ O ₃	-12,00	7,40	-4,60	25,20	85,65	3,80	17,65
	CuO-Al ₂ O ₃	-12,00	6,80	-5,20	23,60	85,94	3,00	17,93
6	D100	-12,20	7,20	-5,00	32,60	92,31	4,40	21,59
	Al ₂ O ₃	-11,40	6,60	-4,80	31,40	89,52	3,80	20,41
	bN	-11,20	6,80	-4,40	31,60	89,70	4,00	19,81
	CuO	-11,20	6,60	-4,60	31,60	90,40	3,40	19,51
	bN-CuO	-11,20	6,20	-5,00	31,20	90,27	4,00	19,30
	bN-Al ₂ O ₃	-11,00	6,60	-4,40	30,60	90,24	4,40	20,14
	CuO-Al ₂ O ₃	-11,60	7,00	-4,60	27,60	90,22	3,80	21,87
9	D100	-12,20	7,20	-5,00	34,20	94,82	4,60	22,66
	Al ₂ O ₃	-11,20	6,20	-5,00	32,40	92,31	5,20	21,26
	bN	-11,00	6,60	-4,40	33,80	92,43	5,40	21,70
	CuO	-11,20	6,60	-4,60	33,60	93,17	5,00	19,79
	bN-CuO	-10,80	6,00	-4,80	33,20	93,31	5,60	18,20
	bN-Al ₂ O ₃	-11,20	7,00	-4,20	32,40	93,44	5,40	21,71
	CuO-Al ₂ O ₃	-11,40	6,60	-4,80	33,20	93,60	5,40	22,61
12	D100	-11,20	6,60	-4,60	46,40	97,62	7,80	21,02
	Al ₂ O ₃	-11,20	6,40	-4,80	42,40	95,81	7,40	20,85
	bN	-10,80	6,40	-4,40	44,80	94,15	8,00	20,60
	CuO	-11,20	6,40	-4,80	43,80	94,64	7,40	18,98
	bN-CuO	-10,60	5,60	-5,00	42,80	95,68	7,20	17,08
	bN-Al ₂ O ₃	-10,80	6,20	-4,60	44,20	95,33	7,80	20,59
	CuO-Al ₂ O ₃	-10,80	5,80	-5,00	44,20	96,47	7,40	21,14

Çizelge 4.2. 500 ppm'deki yanma ve püskürtme parametrelerinin sayısal değerleri.

Yük (Nm)	Test yakıtı	PB (°KA)	TG (°KA)	YB (°KA)	YS (°KA)	CP _{max} (bar)	YCP _{max} (°KA)	IYO _{max} (J/°KA)
3	D100	-12,20	7,60	-4,60	27,20	87,92	4,00	19,81
	Al ₂ O ₃	-12,20	7,20	-5,00	23,60	85,57	3,00	17,39
	bN	-12,00	7,60	-4,40	23,20	83,63	4,20	19,32
	CuO	-11,80	7,20	-4,60	23,20	86,21	3,40	18,21
	bN-CuO	-11,00	6,80	-4,20	24,40	86,84	3,60	18,37
	bN-Al ₂ O ₃	-11,00	7,00	-4,00	24,80	85,23	3,80	17,20
	CuO-Al ₂ O ₃	-11,80	7,20	-4,60	23,60	86,19	3,60	18,03
6	D100	-12,20	7,20	-5,00	32,60	92,31	4,40	21,59
	Al ₂ O ₃	-11,60	7,00	-4,60	30,00	89,79	3,60	21,48
	bN	-11,20	7,20	-4,00	29,20	88,66	4,20	19,72
	CuO	-11,20	7,00	-4,20	31,20	90,66	3,80	19,62
	bN-CuO	-11,20	6,60	-4,60	31,40	91,12	3,80	19,63
	bN-Al ₂ O ₃	-11,00	6,40	-4,60	28,80	89,77	4,40	21,51
	CuO-Al ₂ O ₃	-10,80	6,60	-4,20	27,40	91,98	4,20	22,09
9	D100	-12,20	7,20	-5,00	34,20	94,82	4,60	22,66
	Al ₂ O ₃	-11,40	6,60	-4,80	33,40	93,14	5,00	22,01
	bN	-10,80	6,80	-4,00	32,40	90,71	5,60	21,07
	CuO	-11,00	6,40	-4,60	33,20	93,30	5,00	19,86
	bN-CuO	-11,00	6,00	-5,00	33,20	92,76	5,60	17,88
	bN-Al ₂ O ₃	-11,20	7,00	-4,20	32,40	92,89	5,60	21,00
	CuO-Al ₂ O ₃	-11,20	6,40	-4,80	33,40	93,57	5,20	21,48
12	D100	-11,20	6,60	-4,60	46,40	97,62	7,80	21,02
	Al ₂ O ₃	-11,00	6,00	-5,00	41,60	96,34	5,40	21,05
	bN	-10,80	6,60	-4,20	42,80	92,76	5,40	19,84
	CuO	-11,40	6,80	-4,60	43,40	93,65	7,60	19,61
	bN-CuO	-11,00	6,20	-4,80	40,60	94,96	7,40	16,55
	bN-Al ₂ O ₃	-10,60	6,40	-4,20	39,40	94,80	7,80	19,62
	CuO-Al ₂ O ₃	-11,20	6,20	-5,00	39,00	96,19	7,60	21,35

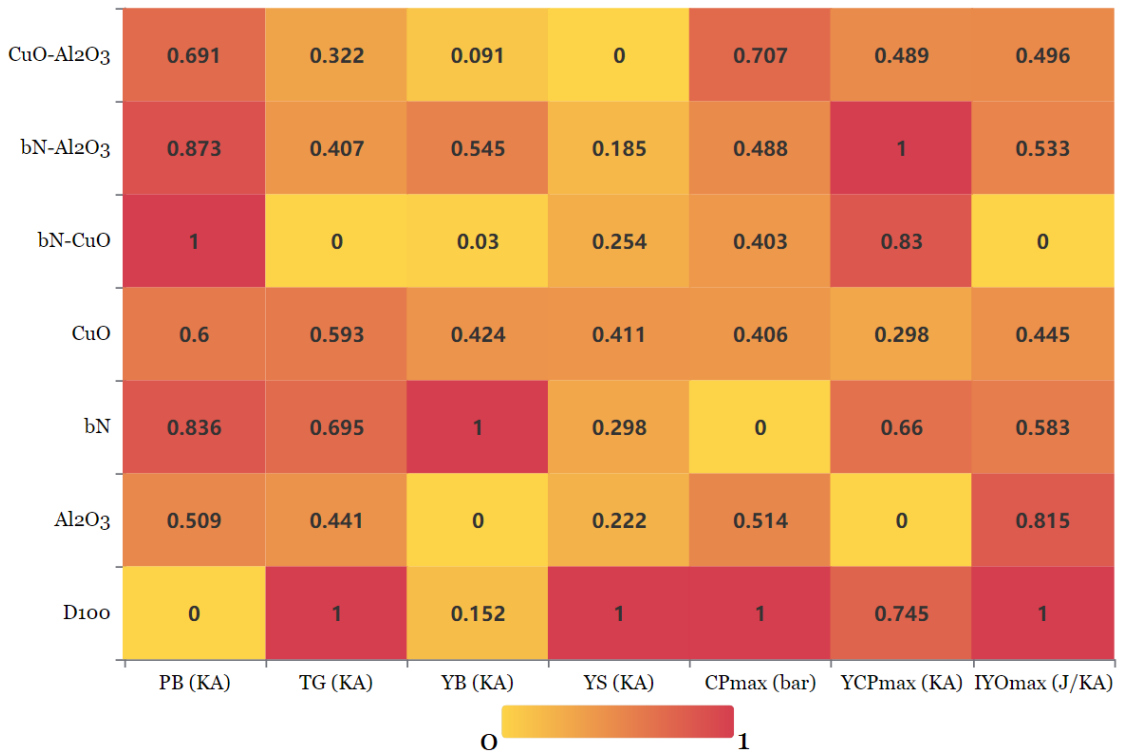
Çizelge 4.3. 1000 ppm'deki yanma ve püskürtme parametrelerinin sayısal değerleri.

Yük (Nm)	Test yakıtı	PB (°KA)	TG (°KA)	YB (°KA)	YS (°KA)	CP _{max} (bar)	YCP _{max} (°KA)	IYO _{max} (J/°KA)
3	D100	-12,20	7,60	-4,60	27,20	87,92	4,00	19,81
	Al ₂ O ₃	-12,00	6,80	-5,20	23,40	86,86	2,80	18,08
	bN	-11,60	7,20	-4,40	22,20	83,94	3,80	16,86
	CuO	-11,80	7,00	-4,80	22,20	85,21	3,60	19,47
	bN-CuO	-11,00	6,00	-5,00	23,80	85,50	4,60	16,87
	bN-Al ₂ O ₃	-11,80	6,20	-5,60	21,60	86,92	4,20	17,57
	CuO-Al ₂ O ₃	-11,80	6,60	-5,20	22,40	87,66	3,60	18,28
6	D100	-12,20	7,20	-5,00	32,60	92,31	4,40	21,59
	Al ₂ O ₃	-11,40	6,60	-4,80	31,40	91,21	3,80	21,84
	bN	-11,20	7,00	-4,20	31,60	87,21	4,00	18,82
	CuO	-11,20	6,60	-4,60	31,60	89,75	3,40	19,33
	bN-CuO	-11,20	6,20	-5,00	31,40	88,29	4,00	17,61
	bN-Al ₂ O ₃	-11,00	6,40	-4,60	30,60	91,20	4,40	19,10
	CuO-Al ₂ O ₃	-11,00	6,40	-4,60	28,60	91,57	4,00	22,20
9	D100	-12,20	7,20	-5,00	34,20	94,82	4,60	22,66
	Al ₂ O ₃	-11,20	6,20	-5,00	32,40	94,17	5,20	22,50
	bN	-11,00	6,60	-4,40	33,80	90,23	5,40	20,77
	CuO	-11,20	6,60	-4,60	33,60	93,01	5,00	19,98
	bN-CuO	-10,80	6,00	-4,80	33,20	89,84	5,60	16,61
	bN-Al ₂ O ₃	-11,40	6,00	-5,40	32,40	93,53	5,40	18,60
	CuO-Al ₂ O ₃	-11,00	6,20	-4,80	32,80	94,63	5,00	15,47
12	D100	-11,20	6,60	-4,60	46,40	97,62	7,80	21,02
	Al ₂ O ₃	-11,20	6,40	-4,80	36,60	95,81	7,40	22,50
	bN	-10,60	6,20	-4,40	37,80	93,17	8,00	20,25
	CuO	-11,40	6,60	-4,80	38,80	94,64	7,40	18,98
	bN-CuO	-10,60	5,60	-5,00	35,00	95,68	7,20	17,08
	bN-Al ₂ O ₃	-10,80	6,20	-4,60	38,40	95,33	7,80	20,59
	CuO-Al ₂ O ₃	-11,20	6,00	-5,20	35,80	96,47	7,20	21,23

Çizelge 4.1, 4.2 ve 4.3'ten parametrelerin tüm motor yükleri ve tüm nanopartikül dozajları için elde edilen ortalama değerleri, aşağıda verilen Şekil 4.21'de özetlenmiştir. İlgili şekilde yukarıda bulunan 7 değişken [0, 1] aralığına normalize edilmiştir. Normalize işlemi Eşitlik 4.1 kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

$$n = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (4.1)$$

Bu eşitlikte, x normalize edilecek veriyi, min(x) x veri kümesi içerisinde yer alan en küçük değeri ve max(x) bu kümedeki en büyük değeri ifade etmektedir. Burada, n değeri ise x verisinin normalize edilmiş ve [0, 1] aralığına indirgenmiş yeni değerini ifade etmektedir.



Şekil 4.21. Ortalama yanma ve püskürtme parametrelerinin ölçeklendirilmesi.

Yukarıdaki şekilde, 0 değeri ilgili değişken için tüm test yakıtları arasında en küçük sayısal veriye sahip olduğunu gösterirken, 1 değeri ise o değişken için en büyük sayısal değeri ifade etmektedir. Buna göre, tüm yükler ve dozajlar bir arada düşünüldüğünde tutuşma gecikmesi periyodunun tüm yük ve nanopartikül dozajları bir arada düşünüldüğünde en uzun D100 yakıtında sürerken en kısa ise bN-CuO hibrit test yakıtı ile elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, maksimum silindir içi basınç değeri ve maksimum ısı yayılım oranı değerlerini referans D100 test yakıtı ile gözlemlendiği şekilden görülmektedir. Önemli bir diğer gösterge olan ve performans ve emisyon sonuçlarının

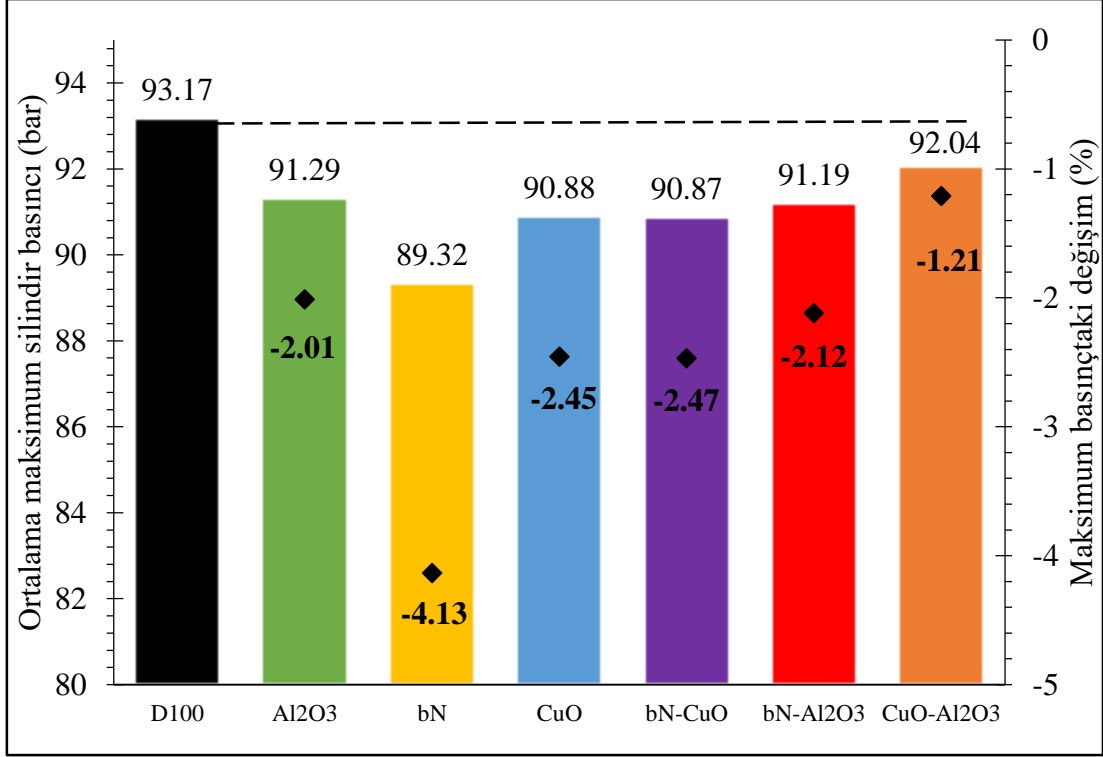
yorumlanmasında da sıklıkla refere edilecek yanma süresi parametresinin ise en uzun D100 test yakıtı ile elde edildiği ve nanopartikül takviyesi ile tüm test yakıtları için kısaldığı şekilden görülmektedir. En kısa yanma süresi ise CuO-Al₂O₃ test yakıtında gerçekleşmiştir. Aşağıda, önemli yanma ve püskürtme parametreleri ayrı ayrı açıklanmış ve tartışılmıştır.

4.2.1. Maksimum Silindir İçi Gaz Basıncı

İçten yanmalı motorlarda, test edilen herhangi bir yakıtın yanması ile silindir içinde oluşan mekanik yüklemelerin zamana göre (krank açısı) değişimi silindir içi gaz basıncı grafikleri ile temsil edilmektedir. Elde edilen silindir içi gaz basıncı grafikleri motor üreticileri tarafından incelenerek ilgili motor için hız sınırlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır (Önsezen ve Çanakçı, 2009).

Test yakıtlarının maksimum silindir içi gaz basıncı değerleri, ilgili test yakıtının yanma olayının gerçekleşmesinden hemen önce tutuşma gecikmesi boyunca yanma odasında biriken miktarı ile birlikte, test yakıtlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Yanmadan önce silindirde biriken yakıt miktarı arttıkça, ani ve kontrolsüz yanma şiddetinin ve buna bağlı olarak maksimum silindir içi gaz basıncı değerinin artması da beklenir. Tutuşma gecikmesi için beklenen süre uzadıkça yanma odasında biriken yakıt miktarı da artmaktadır. D100 test yakıtı için diğer test yakıtlarına göre daha uzun tutuşma gecikmesi periyodu olması, bu test yakıtı için daha büyük bir ani yanma olayının gerçekleşmesine hazırlık sağlamaktadır. Test motoru D100 yakıtı ile çalıştırıldığında, yanma öncesi daha fazla miktarda yakıtın silindirde birikmesi ve bu fazla miktardaki yakıtın uygun şartlara ulaştığında ani yanması sonucu diğer test yakıtlarına göre tüm motor yüklerinde daha yüksek silindir içi gaz basıncı değerlerine ulaşılmasına neden olmuştur. Ayrıca, artan motor yükü ile birlikte her yakıtın kendi içerisinde maksimum silindir içi gaz basınç değeri de adım adım artmıştır. Bunun sebebi, yük arttıkça yakıtın tutuşması için beklenen sürenin kısalması (yüksek silindir içi sıcaklıktan dolayı) ve test motorunun yüksek motor yüklerine ulaşabilmesi için birim zamanda tüketmesi gereken yakıt miktarını artırmak zorunda kalması ile ilişkilendirilebilir. Başka bir ifadeyle bu artış test motorunun 12 Nm motor yüküne ulaşabilmesi için enjektörden püskürttüğü yakıt miktarının, 3 Nm motor yüküne ulaşabilmesi için püskürttüğü yakıt miktarından daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, yüksek motor yüklerinde silindir içerisinde yanmak için uygun şartları bekleyen yakıt miktarı da daha

fazla olacaktır. Bu nedenle, ani ve kontrolsüz yanma ve bunlara bağlı olarak vuruntulu çalışma da motor yükü arttıkça artmıştır. Tüm bu olaylar, motor yükü arttıkça tüm test yakıtları için silindir içi gaz basıncı değerlerinin yükselme nedenlerini açıklamaktadır. Şekil 4.23, çalışmada kullanılan test yakıtlarının maksimum silindir içi gaz basınçlarının ortalama değerlerini ve referans test yakıtına göre yüzdesel değişimlerini göstermektedir.



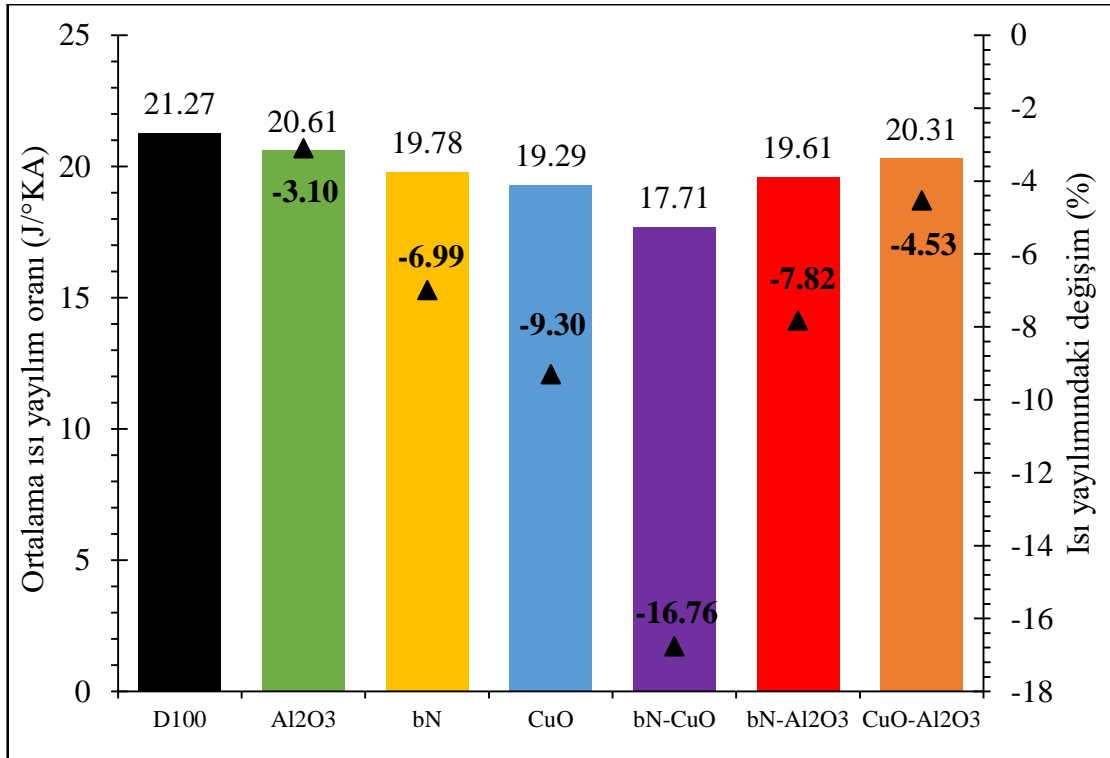
Şekil 4.22. Test yakıtlarının ortalama maksimum silindir içi gaz basınçları ve yüzdesel değişimleri.

Tüm motor yüklerindeki ve tüm nanopartikül dozajlarındaki maksimum silindir içi gaz basıncı değerleri bir arada değerlendirildiğinde, D100 test yakıtı ortalama 93,17 bar ile en yüksek değere sahipken, bN test yakıtında 87,32 bar ile en düşük ortalama maksimum silindir gaz basıncına erişilmiştir. Şekil 4.22'den, bN test yakıtı için ortalama maksimum silindir içi gaz basıncı değerinde D100 referans test yakıtına kıyasla %4,13'lük bir düşüş olduğu görülmektedir. Bu düşüş, Al₂O₃ test yakıtı için %2,01, CuO test yakıtı için %2,45, bN-CuO test yakıtı için %2,47, bN- Al₂O₃ için %2,12, CuO- Al₂O₃ test yakıtı için ise %1,21 seviyesindedir.

4.2.2. Maksimum Isı Yayılım Oranı

Tüm test yakıtları için değişen motor yüklerindeki ısı yayılım eğrileri krank açısı cinsinden 250, 500 ve 1000 ppm için sırasıyla Şekil 4.18, 4.19 ve 4.20’de gösterilmiştir. Test yakıtlarına ait ısı yayılım değerleri yakıtın püskürtülmesi ile birlikte sıfır değerinin altında seyretmektedir. Bunun nedeni, yakıtların kendi ısısının katbekat üzerindeki ortama püskürtülmesi ve bu ortamdan buharlaşabilmeleri için bir miktar ısı çekmek zorunda kalmalarına bağlanabilir. Silindir içerisinde ısı çekilmesi olayı ile birlikte enerji değerinde de bir miktar düşüş gözlemlenir. Bu durum, ısı yayılım eğrisinin küçük bir hareket ile negatif yönde ilerlemesine neden olur. Ancak bu süreç oldukça kısadır. Daha sonra, hızla ısı artmaya başlayan yakıtlar belli bir süreçten sonra yanmak için artık uygun basınç ve sıcaklık değerine ulaşır ve aniden kendi kendine tutuşmaya başlarlar. Isı yayılım eğrilerindeki bu ani yanma sıçrayışının olduğu bölge kontrolsüz yanma bölgesi olarak adlandırılır. Isı yayılım eğrileri dikkatlice incelendiğinde, test yakıtlarının tümü için ön yanma safhasının krank açısı cinsinden birbirlerine oldukça yakın bölgelerde gerçekleştiği görülür. Eğrinin yükseliş trendi enjektörden yakıt püskürtme anı bitinceye kadar devam eder ve sonra azalmaya başlar. Azalma süresi ve ısı yayılım eğrisi altında kalan miktarın genişliği püskürtülen yakıt miktarına, yakıt özelliklerine ve yanma kalitesine bağlıdır. Daha sonra kontrollü yanma ve art yanma bölgeleri ile yanma işlemi sonlanır. Şekil 4.18, 4.19 ve 4.20’den görüldüğü üzere tüm test yakıtları benzer ısı yayılım eğilimleri sergilemişlerdir. Isı yayılım eğrisinin maksimum noktası tutuşma gecikmesine, yakıtın setan sayısına, ısı değerine, viskozitesine, oksijen içeriğine ve termal özelliklerine yüksek oranda bağlıdır. Nanopartikül ilave edilmesi ile birlikte Şekil 4.22’den görüldüğü üzere ortalama maksimum ısı yayılım değerlerinde bir düşüş meydana gelmektedir. Bunun nedenlerinin, nanopartikül eklenmesi ile birlikte artan yüzey-hacim oranı, yakıtın yükselen ısı iletim katsayısı ve yükselen enerji yoğunluğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, birçok araştırmacı ısı yayılım oranındaki bu düşüşü nanopartiküllerin katalizör rolü sayesinde yanma odasındaki kimyasal reaksiyonları hızlandırmasına da atfetmiştir (Venu ve Appavu, 2020; Mei ve ark., 2019; Yaşar ve ark., 2019). Öte yandan, nanopartikül takviye edilen test yakıtlarında kalorifik değer artması (Bkz: Çizelge 3.4) ile birlikte D100 test yakıtına kıyasla daha az miktarda yakıt ile aynı motor yüküne ulaşmak da mümkündür. Başka bir deyişle, aynı motor yüklerine ulaşabilmek için daha az miktarda yakıtın yanıyor olması, nanopartikül içerikli test yakıtlarının ısı yayılım eğrilerinin de daha düşük seviyelerde seyretmesine

sebepler olmuştur. Ayrıca, nanopartikül takviye edilmesi ile birlikte test yakıtlarının ısı transfer katsayısı ve ısı transfer mekanizması gelişmektedir (Devarajan ve ark., 2019; Basha ve Anand, 2013). Gelişen ısı transfer mekanizması, nanoyakıtlar için iletim, taşınım, radyasyon, ısı ve kütle aktarım oranını hızlandıran bir etkiye de neden olmuştur (Venu, 2019; Tyagi ve ark., 2008). Bu olayın da ısı yayılım eğrilerinde nano takviye edilen test yakıtları ile D100 referans yakıtına kıyasla küçüğe olsa bir düşüşe sebep olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, nanoyakıtlardaki tutuşma gecikmesi periyodunun kısalmasının bir sonucu olarak yakıtın erken tutuşması ile de ısı yayılım eğrilerinde bir düşüş yaşanabileceğini ileri süren çalışmalar da literatürde mevcuttur (Prabu, 2018). Motor yükünün artması ile birlikte ısı yayılım eğrilerinde küçüğe olsa bir artış tespit edilmiştir. Bu genişleme, yanma sürelerindeki uzama ile de doğrulanmaktadır. Bu genişlemenin, yük arttıkça tutuşma gecikmesindeki kısalma ve yanma odasına püskürtülen yakıt miktarındaki artma ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Şekil 4.23 test yakıtlarının maksimum ısı yayılım oranlarının ortalama değerlerini ve bu değerlerin D100 referans yakıtına göre değişimini göstermektedir.



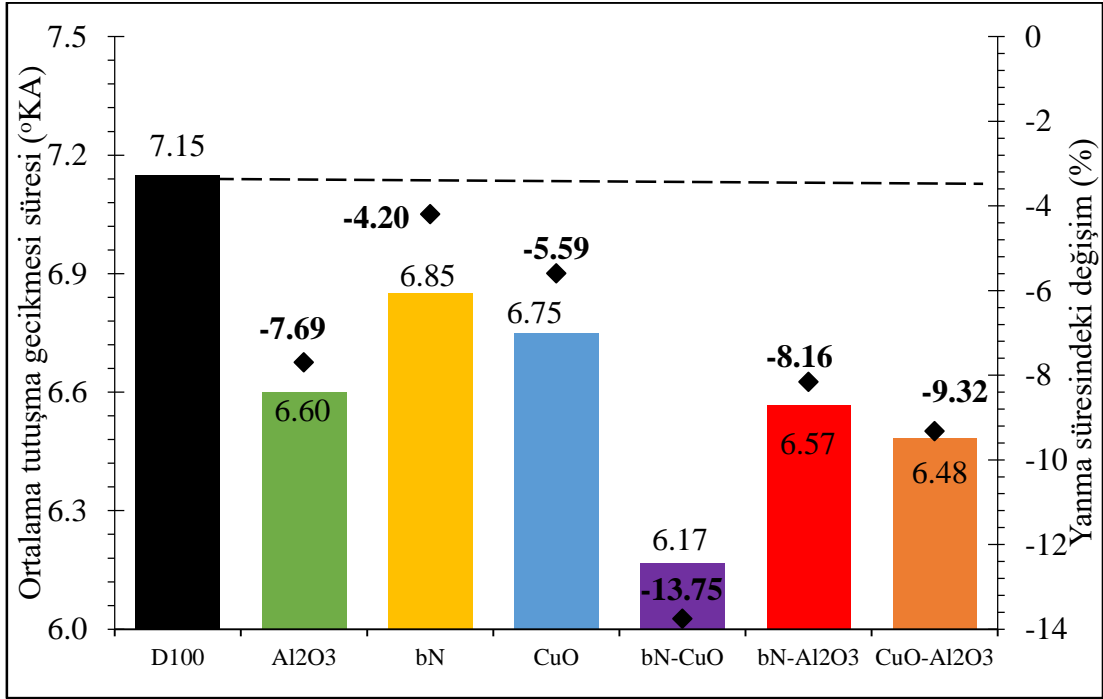
Şekil 4.23 Test yakıtlarının ortalama ısı yayılım oranları ve yüzdesel değişimleri.

Şekil 4.23'ten görüleceği üzere, test yakıtlarının ortalama ısı yayılım oranları nanopartikül süspansede edildiğinde önemli seviyelerde düşüşe neden olmaktadır. En yüksek ortalama maksimum ısı yayılım oranı 21,27 J/°KA ile D100 test yakıtında gözlemlenirken, bu değer Al₂O₃ test yakıtında %3,10, N test yakıtında %6,99, CuO test yakıtında %9,30, bN-CuO test yakıtında %16,76, bN-Al₂O₃ test yakıtında %7,82 ve CuO-Al₂O₃ test yakıtında %4,53'lük düşüşler tespit edilmiştir.

4.2.3. Tutuşma Gecikmesi

Test yakıtlarının setan sayısı, tutuşma gecikmesini etkileyen en önemli yakıt özelliklerinden birisidir. Yüksek setan sayısı, ilgili test yakıtının tutuşma kabiliyetini artırdığı gibi düşük setan sayısına sahip test yakıtlarının buharlaşabilmek için daha yüksek gizli ısı absorpsiyonuna ihtiyacı vardır (Devan ve Mahalakshmi, 2009). Bu yüzden, düşük setan sayılı yakıtların tutuşması için beklenen süre de daha uzundur. Şekil 4.24 çalışmada kullanılan test yakıtlarının ortalama tutuşma gecikmesi değerlerini ve referans test yakıtına göre değişimlerini göstermektedir. Çalışmada kullanılan test yakıtları içerisinde en düşük setan sayısı değeri D100 referans test yakıtına aittir. D100 test yakıtına nanopartikül süspansede edilmesi nanodizel test yakıtlarının setan değerinde bir artışa sebebiyet vermiştir (Bkz: Çizelge 3.4). Bu durum, nanopartikül takviye edilmiş test yakıtlarında genellikle tutuşma gecikmesi için beklenen sürenin daha kısa sürmesine neden olmuştur (Bkz: Şekil 4.24). Deneylede, motor yükü arttıkça tutuşma gecikmesi süresinin tüm test yakıtları için genelde azaldığı gözlemlenmiştir. Bu düşüşün artan motor yükü ile birlikte yanma odasındaki sıcaklık değerinin yükselmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Deneylede, test motorunun set edilen yüksek motor yüklerine ulaşabilmesi için daha fazla yakıt püskürtülmesi, yanma sonu sıcaklığını artırarak yakıtın kendi kendine tutuşabilmesi için daha uygun şartlar oluşmasını sağlamıştır. Bu durum, tüm test yakıtları için en kısa tutuşma gecikmesi süresinin, genelde 12 Nm motor yükünde gözlemlenmesine neden olmuştur (Bkz: Çizelge 4.1, 4.2 ve 4.3). Ayrıca, nanopartikül dozajı arttıkça test yakıtlarının setan sayısında da bir artış gözlemlenmiştir (Bkz: Çizelge 3.4). Bu durumda, (her ne kadar tutuşma gecikmesi süresinin artan nanopartikül dozajı ile birlikte yakıtların yükselen setan değerinden dolayı kısalması beklense de) tutuşma gecikmeleri açısından tutarlı sonuçlar elde edilememiştir. Bu durumun nedeninin, test yakıtı içerisinde ihtiva eden nanopartikül miktarındaki artışla birlikte yükselen viskozite değerinin, yakıtların atomize oluşunu kötüleştirmesinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, yakıtların stabilitesi, nanopartiküllerin

kompleks ve non-linear davranışlarının da bu tutarsızlıkta önemli bir role sahip olabileceği varsayılmaktadır.

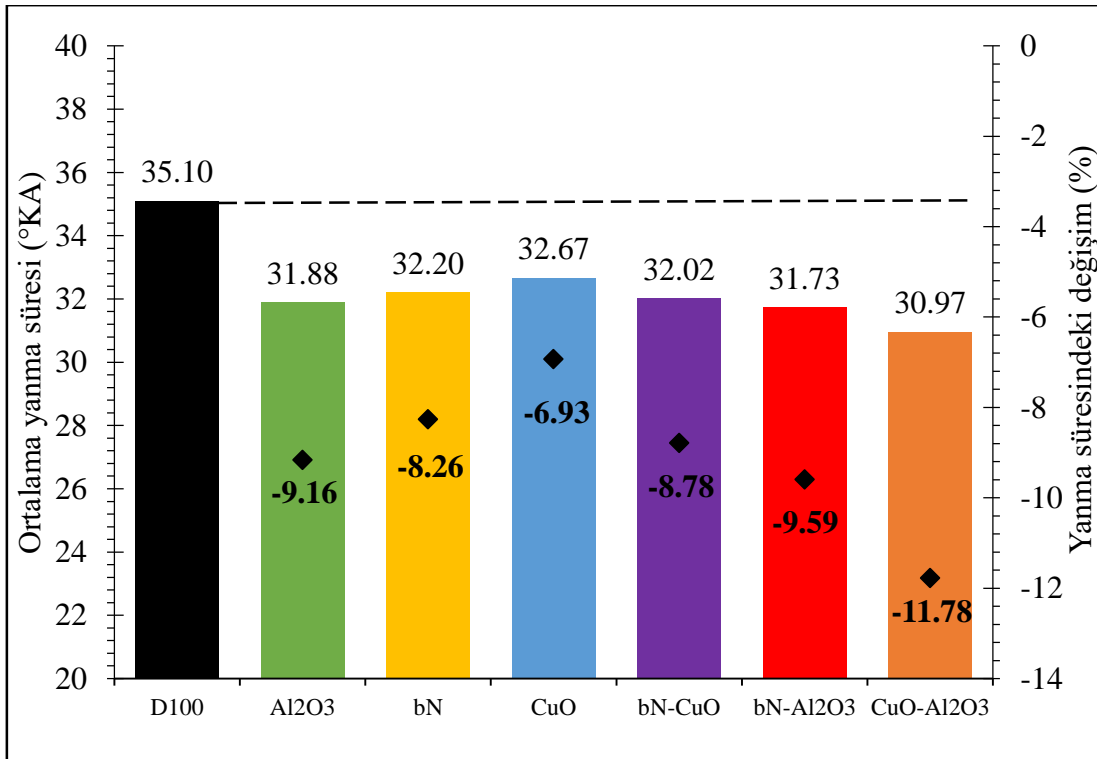


Şekil 4.24. Test yakıtlarının ortalama tutuşma gecikmesi süreleri ve yüzdesel değişimleri.

D100 test yakıtının ortalama tutuşma gecikmesi 7,15 °KA'dır. Nanopartikül takviye edildiğinde ise bu süre Al₂O₃ için 6,60 °KA, bN için 6,85 °KA, CuO için 6,75 °KA, bN-CuO için 6,17 °KA, bN-Al₂O₃ için 6,57 °KA ve CuO-Al₂O₃ için ise 6,48 °KA'ya düşmüştür. Başka bir ifade ile nanopartikül takviye edilmiş test yakıtlarının tutuşma gecikmesi sürelerinde, D100 test yakıtına kıyasla ortalama %4,20 ile %13,75'lik azalmalar gözlemlenmiştir. Ayrıca, literatürdeki birçok çalışma nanopartikül süspansiyon edilen test yakıtlarında tutuşma gecikmesi süresinin kısalmasını nanopartiküllerin katalizör görevi üstlenmesine, daha düşük buharlaşma gizli ısısına sebebiyet vermesine, yanma işlemi boyunca kimyasal reaksiyonları hızlandırmasına, daha fazla miktardaki yakıtı oksitlemesine, nanopartikül eklenmesiyle gerçekleşen yanma odasındaki mikro patlamalara ve ikincil atomizasyona, yükselen setan sayılarına ve iyileşen yakıt özelliklerine atfedilmiştir (Elumalai ve ark., 2021a; Hamadi ve Khudhur, 2021; Özgür, 2021; Marlina ve ark., 2021; Sunil ve ark., 2021).

4.2.4. Yanma Süresi

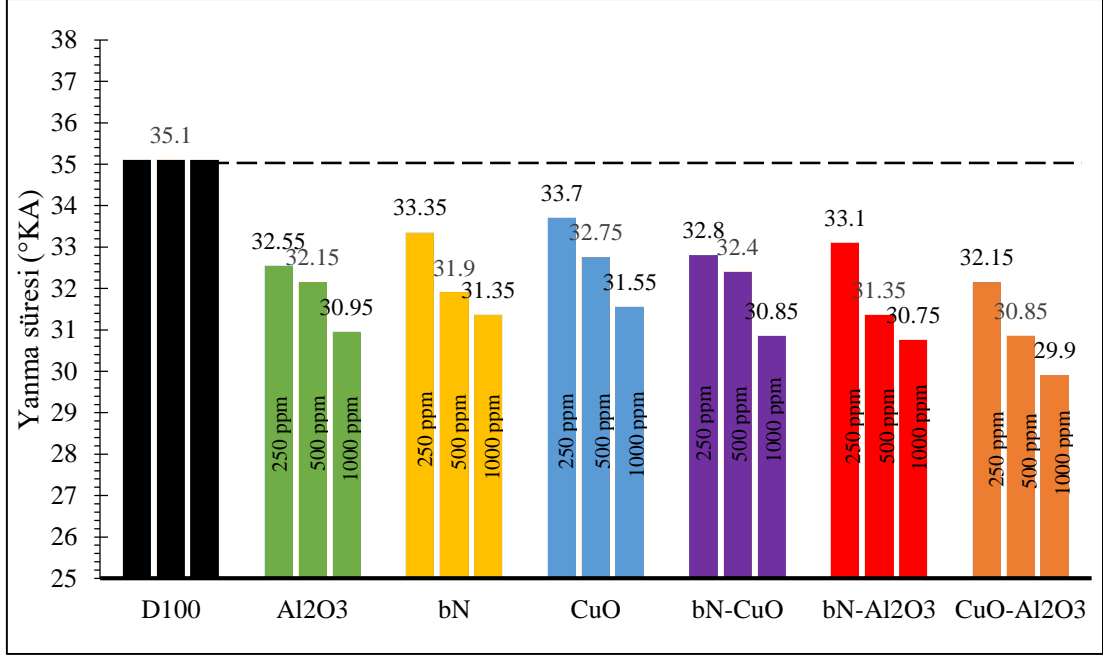
Test yakıtlarının ortalama yanma süreleri ve D100 referans yakıtına kıyasla değişimleri Şekil 4.25'te gösterilmektedir. Yakıtların ortalama toplam yanma süreleri Çizelge 4.1, 4.2 ve 4.3'ten görüldüğü üzere motor yükündeki artışla birlikte krank açısı cinsinden uzamıştır. Bu uzamanın sebebi, yüksek motor yüklerinde püskürtülen yakıt miktarının dolayısıyla yanacak ürünün miktarının artmasına bağlı olarak kontrollü yanma bölgesindeki genişleme ile ilişkilendirilebilir. Şekil 4.25'ten görüldüğü üzere nanopartikül süspansiyon edilmiş test yakıtlarında ortalama toplam yanma süresi D100 test yakıtına göre yaklaşık 2–4 °KA kadar kısalmıştır. Yanma süresindeki bu kısalma, nanopartiküllerin geniş yüzey-hacim oranı sayesinde aktivatör görevi üstlenip yanma boyunca kimyasal reaksiyonları hızlandırması ve yüksek enerji içerikleri ile ilişkilendirilebilir (Ramesh ve ark., 2021; Nair ve ark., 2021; Hosseinzadeh-Bandbafha ve ark., 2020). Şekil 4.25'ten en kısa yanma süresinin 30,97 °KA ile ısı değeri en yüksek test yakıtı olan CuO- Al₂O₃ ile elde edildiği görülmektedir.



Şekil 4.25. Test yakıtlarının ortalama yanma süreleri ve değişimleri.

Tüm motor yükleri ve nanopartikül dozajları bir arada düşünüldüğünde ortalama yanma süresi 35,10 °KA ile D100 test yakıtında gözlemlenmiştir. Nanopartikül takviye edilmesi ile birlikte yanma süresinde Al₂O₃ test yakıtında %9,16, bN test yakıtında %8,26, CuO

test yakıtında %6,93, bN-CuO test yakıtında %8,78, bN-Al₂O₃ test yakıtında %9,59 ve CuO-Al₂O₃ test yakıtında %11,78'lik kısalmalar hesaplanmıştır. Ayrıca, test yakıtı içerisindeki nanopartikül dozajı arttıkça yanma süresindeki kısalma da daha belirgin hale gelmiştir. Şekil 4.26'da değişen nanopartikül dozajlarına göre elde edilen yanma süreleri gösterilmiştir.



Şekil 4.25. Test yakıtlarının değişen nanopartikül dozajlarına göre ortalama yanma süreleri.

Nanopartikül dozajındaki artış ile birlikte kısalan yanma süresinin iyileşen yakıt özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. En yüksek ısıl değerler, 1000 ppm nanopartikül içeren test yakıtlarında gözlemlenmiştir (Bkz: Çizelge 3.4). Dolayısıyla, ısıl değeri yüksek olan yüksek nanopartikül içerikli test yakıtında set edilen motor yüküne erişebilmek için daha az miktarda yakıtın yakılması yeterli olmuştur. Bu yüzden, yüksek dozajlı nanopartikül içerikli test yakıtlarının yanma sürelerinin daha kısa sürdüğü düşünülmektedir.

4.3. Performans Karakteristikleri

Bu çalışmada, modifiye edilen yakıt tiplerinin motor performansı üzerindeki etkisi iki önemli performans göstergesi olan ve literatürde de sıklıkla kullanılan ÖYT ve IV ile tartışılacaktır. İlerleyen bölümlerde, bu göstergeler detaylı bir şekilde değişen test yakıtları ve motor yükleri için açıklanmıştır.

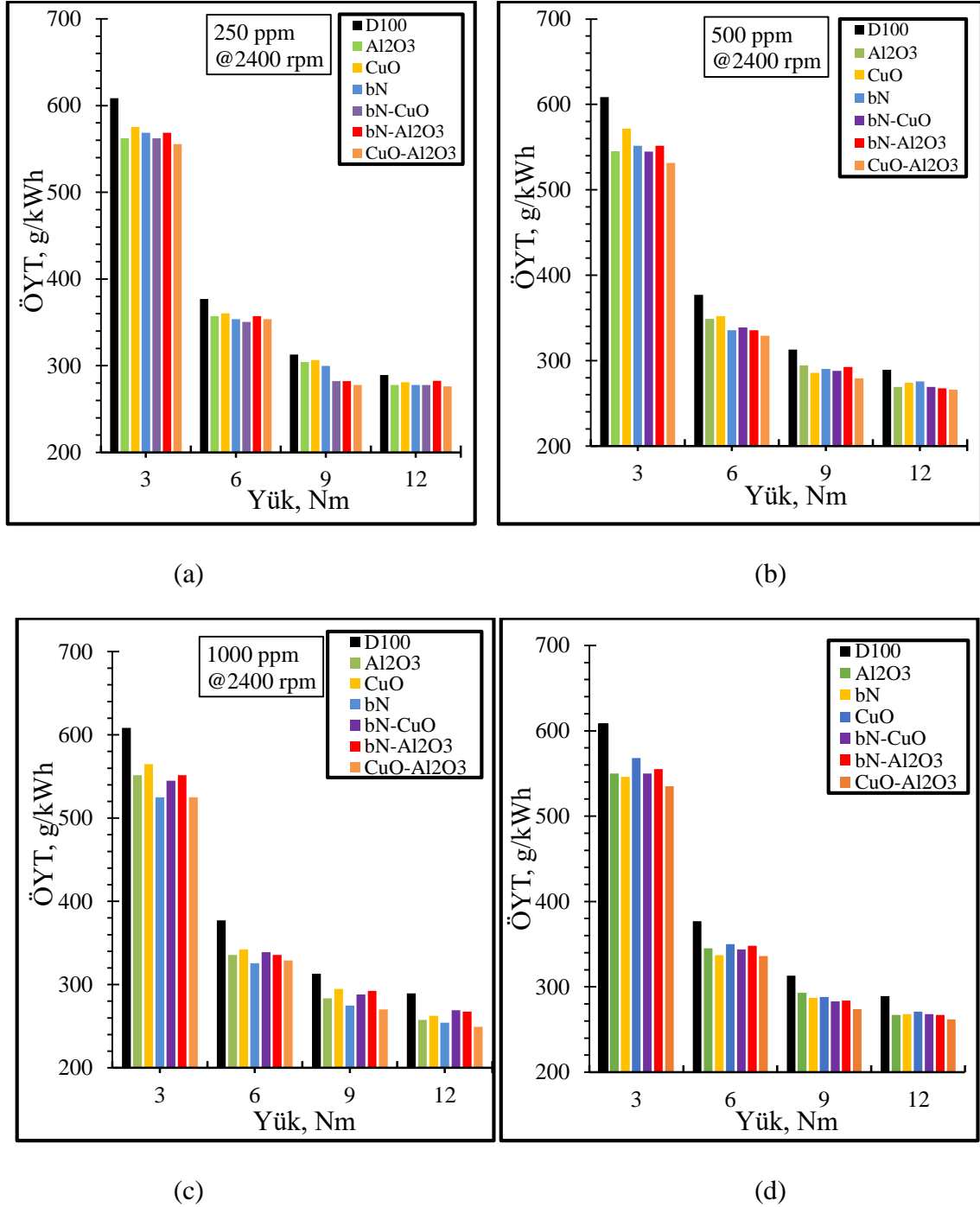
4.3.1. Özgül Yakıt Tüketimi

Özgül yakıt tüketimi (ÖYT) içten yanmalı bir motorun çıkış gücüne bağlı olarak tüketmiş olduğu yakıt miktarını ifade etmektedir. Düşük özgül yakıt tüketimi, ilgili test yakıtı ile yanma işleminin daha verimli gerçekleştiğinin ya da ilgili test yakıtının enerji yoğunluğunun daha yüksek olduğunun bir göstergesidir. Bu sebeple, modifiye edilen bir test yakıtı için düşük özgül yakıt tüketimi arzu edilen bir özelliktir.

Şekil 4.27a, 4.27b ve 4.27c’de değişen motor yüklerine göre sırasıyla 250, 500 ve 1000 ppm dozajlarında nanopartikül içeren test yakıtları ve referans test yakıtının –D100- ÖYT değişimleri gösterilmiştir. ÖYT üzerindeki ortalama değişimler ise Şekil 4.27d ile gösterilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere, özgül yakıt tüketimi tüm test yakıtları için motor yükünün artmasıyla birlikte azalmaktadır. Özgül yakıt tüketimindeki bu azalmanın sebebi motor yüküne bağlı olarak artan motor çıkış gücüne atfedilebilir. Sabit motor devrinde motor yükü arttıkça sürtünme gücünde önemli bir değişim olmaz iken mekanik verimin artması çıkış gücünde dikkate değer artış sağlamaktadır. Ayrıca, bu düşüşü tetikleyen diğer bir sebep ise motor yükü arttıkça silindir içi sıcaklık değerinin yükselmesi olabilir (Kodate ve ark, 2021). Bu sıcaklık artışı dizel motorlarda çevrim başına olan ısı kayıplarını azalttığından verimi artırmaktadır. Çizelge 4.1, 4.2 ve 4.3’ten görüldüğü üzere motor yükünün artması ile birlikte yükselen silindir içi gaz sıcaklığı, yakıtın tutuşabilmesi için beklenen sürenin kısalmasına sebebiyet vermiştir. Öte yandan, Şekil 4.27’den ÖYT’deki en büyük düşüşün tüm nanopartikül dozajları için 3 Nm motor yükünden 6 Nm motor yüküne geçişte olduğu görülmektedir. Daha sonra ise motor yükündeki herhangi bir artışın ÖYT üzerindeki etki derecesi azalmıştır. Bu olayın temel sebebi, sabit motor devrinden dolayı emme zamanında emilen hava miktarının tüm motor yüklerinde aynı oranda olmasına rağmen, artan motor yükü ile birlikte enjekte edilen yakıt miktarının artmasıdır. 6 Nm motor yükünden sonra yüke bağlı olarak karışımın daha fazla oranda zenginleşmesi, tam yanma için gerekli hava oranını düşürerek yanma verimini düşürmüştür. 6 Nm motor yükünden sonra yanma veriminin düşmeside, motor yüküne bağlı olarak özgül yakıt tüketiminin düşme oranını sınırlandırmıştır.

Benzer, çıkarımlar daha önceki çalışmalarda da yapılmıştır (Simsek ve Uslu, 2020b; Verma ve ark., 2019). Nanopartikül eklenmiş test yakıtları tüm yüklerde geleneksel dizel yakıt ile kıyaslandığında daha düşük ÖYT değerlerine sahiptir. Nanopartikül ilaveli test yakıtlarında gözlemlenen bu düşük ÖYT, nanopartiküllerin sahip oldukları yüksek enerji yoğunluklarına bağlanabilir (Lakshmi ve ark., 2021; Anderson ve ark, 2019). Ayrıca,

nanopartikül ilavesi ile iyileşen yakıt özellikleri; yanma verimini de artırarak yakıt tüketiminin azalmasına sebebiyet vermiştir (Ağbulut ve ark., 2021, Srinivasan ve ark., 2021; Naik ve Kumar, 2018).



Şekil 4.26. Değişen motor yüklerine göre özgül yakıt tüketimleri (a) 250 ppm (b) 500 ppm (c) 1000 ppm (d) ortalama değişimler.

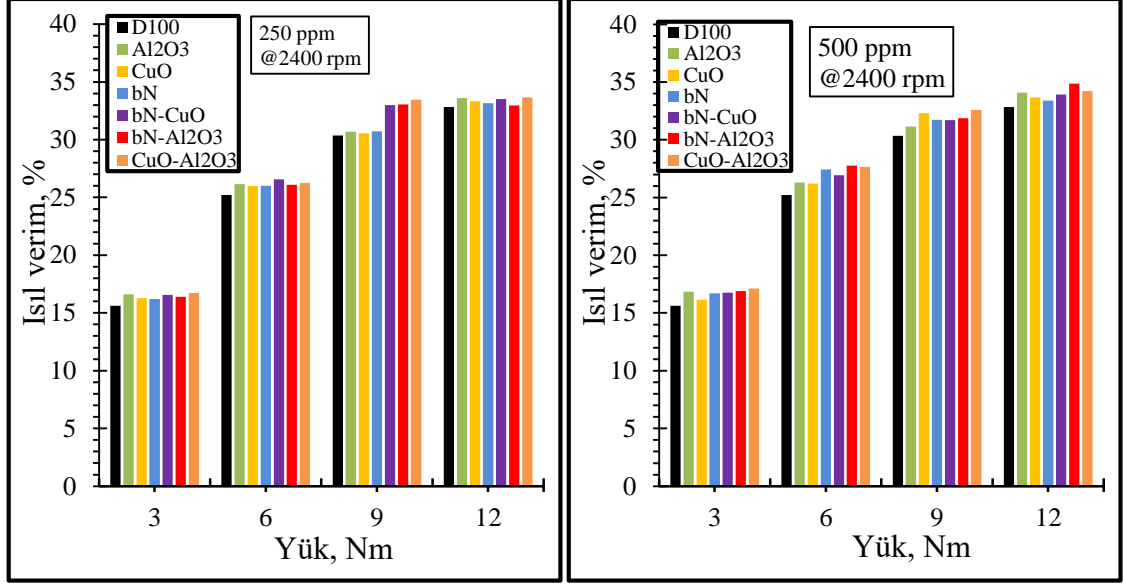
Ayrıca, nanopartikül oranı arttıkça, geleneksel dizel yakıt ve nanopartikül ilave edilmiş test yakıtları arasındaki ÖYT farkı da açılmıştır. Bu durum, Çizelge 3.4'te gösterilen nanopartikül dozajı ile yakıt karışımlarının artan alt ısıl değerleri ile de tutarlılık arz etmektedir. Daha önce de belirtildiği üzere, nanopartikül dozajındaki artış ile birlikte yanma sonu açığa çıkan enerji miktarının artışı, geleneksel dizel yakıt ve nanopartikül ilave edilmiş test yakıtları arasındaki ÖYT farkını artırmıştır. Ayrıca, Şekil 4.25 ve Şekil 4.27 bir arada ele alındığında, en düşük özgül yakıt tüketiminin CuO-Al₂O₃ test yakıtında gerçekleştiği de görülmektedir.

Çalışmada en düşük ÖYT değerleri tüm test yakıtları için motor 12 Nm'de çalışırken gözlemlenmiştir. Buna göre, 12 Nm motor yükü ve 1000 ppm nanopartikül dozajlarında sırasıyla D100, Al₂O₃, CuO, bN, bN-CuO, bN-Al₂O₃ ve CuO-Al₂O₃ test yakıtları için ÖYT değerleri 289,3, 256,3, 261,2, 252,9, 257,9 ve 252,9 g/kWh olarak hesaplanmıştır. Tüm motor yükleri ve nanopartikül dozajları bir arada düşünüldüğünde, ÖYT miktarı Al₂O₃, CuO, bN, bN-CuO, bN-Al₂O₃ ve CuO-Al₂O₃ test yakıtları için %8,05, 9,33, 6,28, 8,75, 8,18 ve 11,08 oranlarında düşmüştür. Benzer sonuçlar, literatürdeki birçok çalışma ile de rapor edilmiştir. Örneğin, Srinivasan ve ark., Al₂O₃ ve TiO₂ nanopartiküllerini %100 biyodizel içerikli yakıtın içerisine 25 ve 50 ppm dozajlarında ilave etmiş ve sonuçlarda ÖYT'de %10,24'lük bir azalma gözlemlenmiştir (Srinivasan ve ark., 2021). Başka bir çalışmada ise, Patnaik ve ark., %15 dietil eter- %85 dizel yakıtından oluşan karışıma 0,2 g/L oranında FeCl₃ (Demir III Klorür) nanopartikülü ilave etmiş ve ÖYT'de yaklaşık %9'lük bir azalma saptamıştır (Patnaik ve ark., 2017). Wei ve ark. ise, dizel ve metanolden oluşan test yakıtlarına 25 ve 100 ppm dozajlarında Al₂O₃ nanopartikülü ilave etmiş ve ÖYT değerinin %3,7'ye kadar düşürüldüğünü bildirmiştir (Wei ve ark., 2021). Benzer şekilde, Ghafoori ve ark., karbon nanotüpler kullanarak ÖYT'de %38,5, Ashley ve Ramesha, ZnO nanopartikülleri kullanarak %12 (Ashley ve Ramesha, 2019), Perumal ve Ilangkumaran, CuO nanopartikülleri kullanarak %1 (Perumal ve Ilangkumaran, 2018), Srinidhi ve Madhusudhan NiO nanopartikülleri kullanarak %5,6 (Srinidhi ve Madhusudhan, 2017), Kumar ve ark., demir bazlı nanopartikül kullanarak %8 (Kumar ve ark., 2017), Vellaiyan karbon nanotüp kullanarak %4,5 (Vellaiyan, 2019), Gavhane ve ark., SiO₂ nanopartikülü kullanarak %9,88 (Gavhane ve ark., 2021), Saxena ve ark., TiO₂ nanopartikülü kullanarak %18,42 (Saxena ve ark., 2019), Channappagoudra ise CuO nanopartikülü kullanarak %1,67'lik (Channappagoudra, 2018) düşüş tespit edildiğini rapor etmiştir. ÖYT'lerin çalışmadan çalışmaya farklılık göstermesi test motorunun

çalışma parametrelerine, baz yakıtın özelliklerine, süspansedilen nanopartikülün cinsine, tane boyutuna, morfolojisine ve dozajına, yakıtların üçüncü bir eklenti ile desteklenip desteklenmemeye durumlarına bağlanabilir.

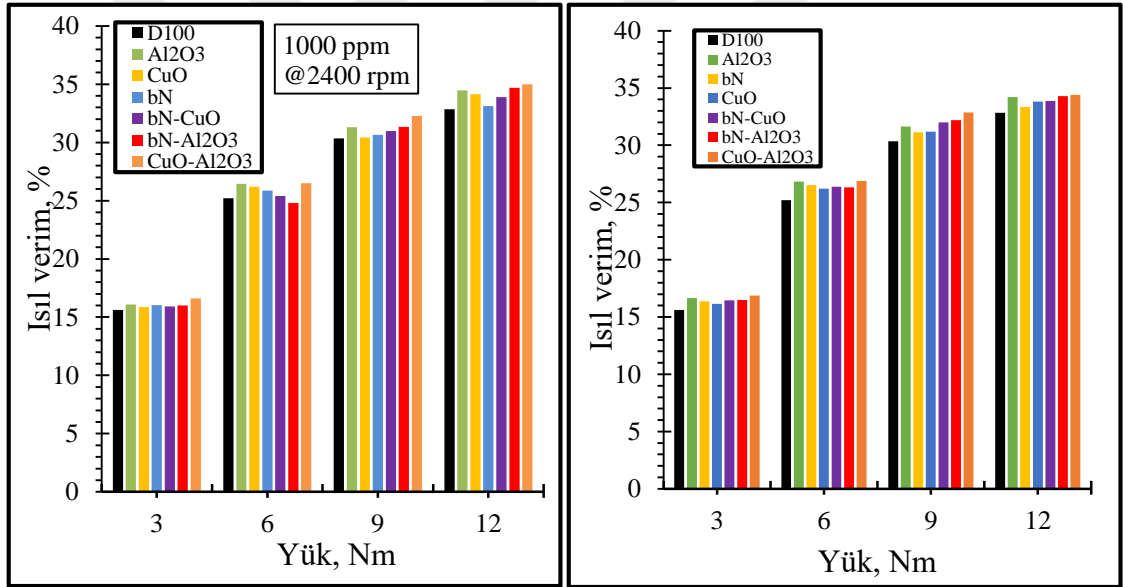
4.3.2. Isıl Verim

Isıl verim, yakıt içerisinde bulunan kimyasal enerjinin yanma sonucu mekanik enerjiye dönüştürülebilme kabiliyetinin bir göstergesidir. Bu nedenle, yüksek ısı verim, modifiye edilen test yakıtları için arzu edilen önemli performans göstergesidir. Isıl verim çalışma parametrelerinin yanı sıra yüksek oranda yakıt tüketimine ve bazı önemli kimyasal ve fiziksel yakıt özelliklerine (alt ısı değer, viskozite, yoğunluk, setan sayısı, yakıtın C/H oranı gibi) bağlıdır. Şekil 4.28a, 4.28b ve 4.28c’de motor yüklerine göre sırasıyla 250, 500 ve 1000 ppm’deki ısı verim değişimleri gösterilmektedir. Isıl verim üzerindeki ortalama değişimler ise Şekil 4.28d ile gösterilmiştir. Şekillerden de görüldüğü üzere, tüm test yakıtlarına ait ısı verim değerleri motor yükünün artması ile birlikte artmaktadır. Dolayısıyla, en yüksek ısı verim değerleri her nanopartikül dozajı için 12 Nm motor yükünde gözlemlenmiştir. Diğer bir ifadeyle, en düşük ÖYT’nin elde edildiği motor yükünde en yüksek ısı verim tespit edilmiştir. ÖYT ve ısı verim grafikleri bir arada düşünüldüğünde ise, bu iki eğri arasında ters ilişki olduğu görülmektedir. Yük arttıkça motor çıkış gücü ve yanma sonu sıcaklık değeri de yükselmiştir. Yanma sonu sıcaklığındaki artış ile yanma odasına püskürtülen yakıt tutuşabilmek için yüksek yüklerde daha uygun bir ortamla karşılaşmaktadır. Bu durum, yüksek yüklerdeki ısı verim artışını açıklamaktadır. D100 referans test yakıtına nanopartikül ilavesi ise ısı verim değerinin yaklaşık %3-6,5 aralığında artırdığı tespit edilmiştir. Nanopartikül eklenmesi ile dizel motorlarda artan ısı verim değeri birçok araştırmacı tarafından nanopartiküllerin yüksek enerji içeriklerine, yakıtta kazandırdıkları yüksek kalorifik değerlerine ve yüksek setan sayılarına, yanma prosesi boyunca üstlenmiş olduğu katalizör rollerine, yanma anındaki kimyasal reaksiyonları hızlandırmalarına, yanma odasındaki ısı transfer mekanizması geliştirmelerine ve yanmamış yakıtları oksitleyerek yanmaya teşvik etmelerine atfedilmiştir (Ağbulut ve ark., 2021; Singh ve ark., 2021; Nanthagopal ve ark., 2020; Reddy ve Wani, 2020; Dewangan ve ark., 2020; Saxena ve ark., 2017). Test yakıtları arasındaki en yüksek ısı değere sahip olan ve yanma periyodunun en kısa sürdüğü test yakıtı olan CuO-Al₂O₃ hibrit test yakıtında en yüksek ısı verim değerlerine ulaşılmıştır.



(a)

(b)



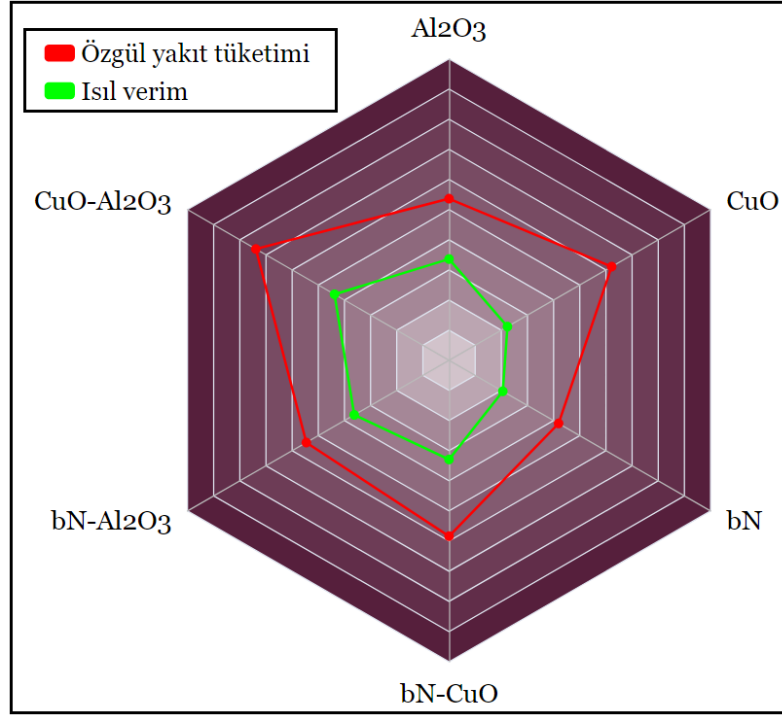
(a)

(d)

Şekil 4.27. Değişen motor yüklerine göre ısıl verimdeki değişimler (a) 250 ppm (b) 500 ppm (c) 1000 ppm (d) ortalama değerler.

Tüm motor yükleri ve nanopartikül dozajları bir arada düşünüldüğünde, D100 yakıtına kıyasla ısıl verimde Al₂O₃, CuO, bN, bN-CuO, bN-Al₂O₃ ve CuO-Al₂O₃ test yakıtları için %5,04, 3,35, 3,08, 4,94, 5,44 ve 6,57'lik artışlar gözlemlenmiştir. Nanopartikül ilavesi ile artan ısıl verim değeri birçok araştırmacı tarafından genellikle yakıtın yükselen kalorifik değerine bağlanmıştır (Al-Hartomy ve ark., 2021; Elumalai ve ark., 2021b;

Suhel ve ark., 2020; Mustaba ve ark., 2020). Benzer sonuçlar birçok araştırmacı tarafından da rapor edilmiştir. Örneğin, Chen ve ark., 25, 50 ve 100 ppm dozajlarında karbon nanotüp, Al₂O₃ ve SiO₂ nanopartiküllerini dizel yakıtı karıştırmışlardır. Deneyler 1800 rpm sabit motor devrinde ve %0, 25, 50, 75, 100 motor yüklenme durumlarında gerçekleştirilmiştir. Sonuçta, nanopartikül içermeyen test yakıtına kıyasla ısıl verimde Al₂O₃ nanopartikülü ilave edilmiş test yakıtında maksimum %18,6, karbon nanotüp içeren test yakıtında %18,8 ve SiO₂ nanopartikülü içeren test yakıtında %15,4'lük artışlar gözlemlendiği belirtilmiştir (Chen ve ark., 2018). Başka bir çalışmada ise, Nutakki ve Gugulothu ayrı ayrı Al₂O₃ ve Fe₂O₃ nanopartiküllerini 40, 80 ve 120 ppm dozajlarında %20 biyodizel içeren dizel-biyodizel yakıt karışımına ilave etmişlerdir. Çalışmada, 120 ppm nanopartikül içeren test yakıtları ile ısıl verim değerinin yaklaşık %8,8 oranında düşürülebileceği bildirilmiştir (Nutakki ve Gugulothu, 2021). Ayrıca, Chen ve ark., Al₂O₃, CNT and SiO₂ nanopartikülü ilavesi ile %15,4 (Chen ve ark., 2018), Hosseini ve ark., Al₂O₃ ilavesi ile %10,63 (Hosseini ve ark., 2017), Vali ve ark., ZnO ilavesi ile %3,67 (Vali ve ark., 2020), Mei ve ark., karbon nanotüp ilavesi ile %5,2 (Mei ve ark., 2019), Jaikumar ve ark., CoCl and CuCl₂ nanopartikül ilaveleri ile %8,28 (Jaikumar ve ark., 2021b), Manigandan ve ark., TiO₂, karbon nanotüp, Al₂O₃, CuO ve CeO₂ nanopartikülleri ile maksimum %4,3, (Manigandan ve ark., 2020), CNT and TiO₂ nanopartikülleri ile %9,88'lik artışlar gözlemlediklerini rapor etmişlerdir. Şekil 4.29, bu çalışmada elde edilen özgül yakıt tüketimi ve ısıl verimin referans D100 yakıtına göre ortalama değişimlerini tüm nanopartiküller için özetlemektedir.



Şekil 4.28. Ortalama performans değişimlerinin tüm nanopartiküller için radar grafiği üzerinde görünümü (%0-%15 aralığında ölçeklendirilmiştir).

4.4. Emisyon Karakteristikleri

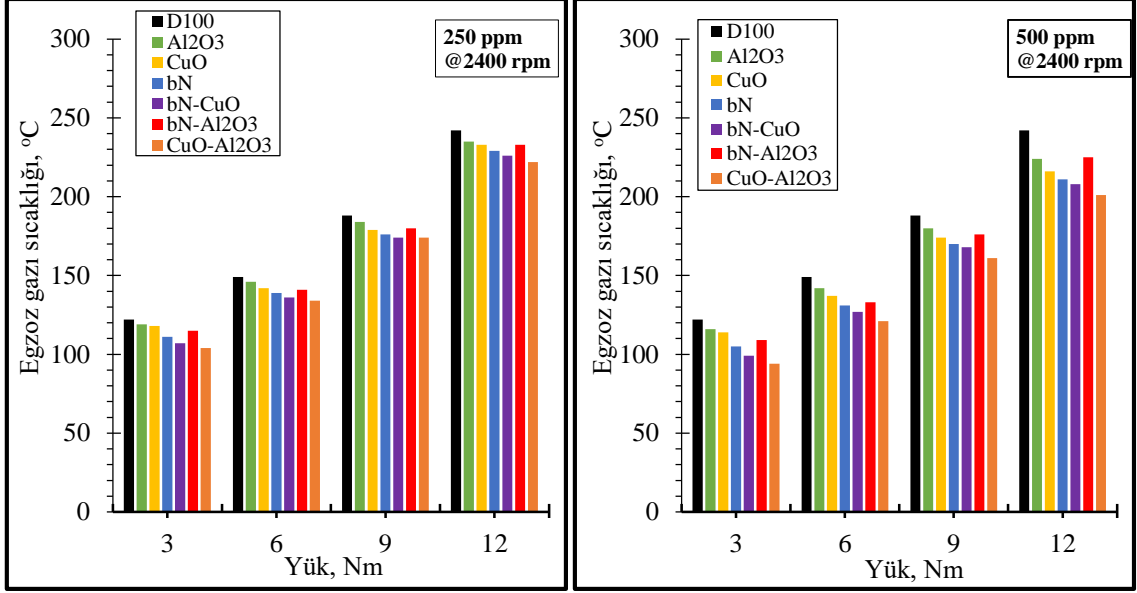
Bu bölümde, nanopartikül ilavesi ile birlikte egzoz emisyonlarında meydana gelen değişimler, değişen nanopartikül dozajları için farklı yüklere göre tartışılmıştır. Bu çalışmada incelenen egzoz emisyonları sırasıyla CO, NO_x ve yanmamış HC emisyonlarıdır. Bu bölümde, emisyonlara geçilmeden önce emisyonların oluşumu anlamlandırmak ve daha iyi bir tartışma sunabilmek amacıyla egzoz gazı sıcaklığındaki değişimler de değişen test yakıtları ve motor yükü için incelenecektir.

4.4.1. Egzoz gazı sıcaklığı

EGS, motor performansını ve emisyonların miktarları hakkında bilgi veren önemli bir göstergedir. Ayrıca, egzoz gazı yanma olayının da bir yansımasıdır, bu sebeple genellikle yakıtı modifiye eden araştırmacılar motor performans ve emisyonlarının ve hatta yanma karakteristiklerinin değişimlerinin açıklanmasında egzoz gazı sıcaklık grafiklerini sıklıkla referans alarak, elde etmiş oldukları sonuçların muhtemel sebeplerini açıklamaktadır. Bu çalışmada, egzoz gazı sıcaklığı, motor çıkışından yaklaşık 50 cm uzaklıkta Ni/Cr kaplı bir termokupl yardımı ile ölçülmüştür. EGS'lerin yüke bağlı olarak

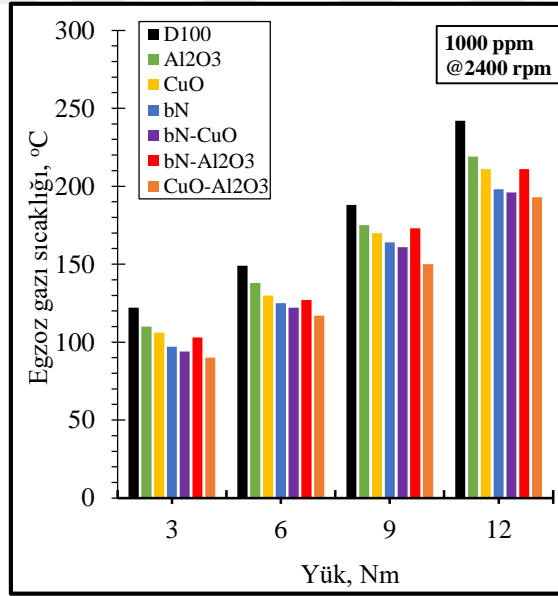
değişimi Şekil 4.30a, 4.30b ve 4.30c’de sırasıyla 250, 500 ve 1000 ppm nanopartikül takviyeli test yakıtları için verilmiştir. Şekil 4.30’dan görüldüğü üzere, egzoz gazı sıcaklığı motor yükünün artması ile birlikte tüm test yakıtlarında bir artış eğilimine girmiştir. Egzoz gazı sıcaklıklarındaki bu artışın, sabit devirde (2400 rpm) motorun daha yüksek yüklere ulaşabilmesi için yanma odasına daha fazla yakıt püskürtmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Başka bir ifade ile motor yükü arttıkça yanma odasında yakılan yakıtın miktarı da artmakta ve daha fazla miktardaki yakıtın yanması sonucunda oluşan egzoz gazı sıcaklığı da yüksek motor yüklerinde artmaktadır. Öte yandan, nanopartikül takviye edilen test yakıtları için ölçülen düşük egzoz gazı sıcaklık değerleri bu yakıtlarda yanma süresinin kısılması ile de ilişkilendirilebilir. Hatırlanacağı üzere, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26’da ortalama yanma sürelerinin nanopartikül ilave edilmesi ile birlikte kısaldığı gözlemlenmiştir. Nanopartikül içerikli test yakıtlarında yanma prosesinin kısa sürmesinin de EGS’lerdeki düşüşte etkili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, test yakıtları içerisindeki nanopartikül dozajındaki artış, egzoz gazı emisyonlarında önemli seviyelerde azalmalara da sebebiyet vermiştir. Nanopartikül dozajı arttıkça ısı değerinin D100 test yakıtına göre daha da iyileşmesi ve bunun bir sonucu olarak yakıt performansının iyileşmesi ile bu olay ilişkilendirilebilir. EGS’lerdeki düşüşün arkasında yatan bir diğer önemli mekanizma da nanopartiküllerin test yakıtlarının ısı iletim katsayılarını ve ısı depolama kabiliyetlerini iyileştirmesi ile açıklanabilir (Fayad ve Dhahad, 2021). Artan ısı iletim katsayısının nanopartikül içeren test yakıtları için ısı transfer mekanizmasını ya da başka bir ifade ile ısı iletim kabiliyetini artırarak sıcaklık artışını yavaşlattığı düşünülmektedir. Ayrıca, test yakıtları içerisinde bulunan nanopartikül konsantrasyonlarının artması ile nanoyakıt karışımlarının ısı iletim katsayıları da artmaya devam etmiştir. Bu olayda, nanopartikül dozajı arttıkça D100 test yakıtına göre EGS farkının neden açıldığının diğer bir göstergesi olabilir.

Tüm bu sebeplerden dolayı, yanma odasında geleneksel dizel yakıt ile kıyaslandığında nanopartikül takviye edilmiş test yakıtları için nispeten daha düşük sıcaklıklara ulaşılmış ve yanma odası sıcaklığının bir yansıması olan egzoz gazı sıcaklığı değerleri de nanopartikül içeren test yakıtları için daha düşük seviyelerde seyretmiştir. En yüksek EGS değerleri tüm test yakıtları için en yüksek motor yükü olan 12 Nm’de görülmüştür. Bu motor yükünde, 250, 500 ve 1000 ppm dozajlardaki ortalama egzoz gazı sıcaklığı D100, Al₂O₃, CuO, bN, bN–CuO, bN–Al₂O₃ ve CuO–Al₂O₃ test yakıtları için sırasıyla 242, 226, 220, 212,7, 210, 223 ve 205,3 °C olarak ölçülmüştür.



(a)

(b)



(c)

Şekil 4.29. Değişen motor yükleri için egzoz gazı sıcaklıkları (a) 250 ppm (b) 500 ppm ve (c) 1000 ppm.

Ayrıca, Şekil 4.27'den hatırlanacağı üzere, nanopartikül ilavesi ile birlikte iyileşen yakıt özellikleri ve bu yakıtların artan enerji yoğunlukları set edilen motor yüküne daha az miktarda yakıt tüketerek erişebilmeye olanak sağlamıştır (düşük özgül yakıt tüketimi ve yüksek ısıl verim). Dolayısıyla, nanopartikül içerikli test yakıtlarında tüketilen yakıt miktarı daha az seviyelerdir. Bu sebeple, yanma sonu ölçülen EGS değerleri de daha

düşük seviyelerde gözlemlenmiştir. Test yakıtları kendi aralarında değerlendirildiğinde ise CuO-Al₂O₃ test yakıtının diğer tüm test yakıtlarından daha düşük bir EGS'ye sebebiyet verdiği tespit edilmiştir. Bu değerler, daha önce de belirtildiği gibi bu test yakıtında ortalama ÖYT değerinin en küçük, ısıl veriminin en büyük ve yanma süresinin en kısa olması ile de ilişkilendirilebilir.

Öte yandan, dizel yakıtına nanopartikül süspansiyonu edilmesi ile birlikte egzoz gazı sıcaklığının düştüğü daha önceki birçok çalışma ile de bildirilmiştir. Örneğin, Shaafi ve Velraj dizel-biyodizel karışımına 100 mg/L oranında Al₂O₃ ilave etmişlerdir. En düşük egzoz gazı sıcaklıklarını, tüm motor yüklerinde Al₂O₃ içeren yakıt tiplerinde gözlemlemişlerdir. Yazarlar, nanopartikül ilavesi ile azalan egzoz sıcaklığını bu yakıt tipinde iyileşen ısı transfer mekanizmasına bağlamışlardır (Shaafi ve Velraj, 2015). Başka bir çalışmada ise, Prabu dizel-biyodizel karışımlarına 30 ppm CNT (karbon nanotüp) ilave etmiş ve egzoz gazı sıcaklığını büyük oranda düşürmeyi başarmıştır. Böylelikle, çalışmada NO_x emisyonu da saf dizel yakıtına kıyasla nanopartikül ilave edilmiş yakıt ile %30 daha düşük elde edilmiştir (Prabu, 2018). Öte yandan, egzoz gazı sıcaklıklarını düşürmek için sıklıkla başvurulan bir yöntem de saf dizel yakıtına su ilave etmektedir. Dizel ve su emülsiyonlarında egzoz gazı sıcaklığını düşürmek ve böylece daha düşük NO_x emisyonları elde etmek mümkündür. Bu bakış açısıyla, Basha ve Anand, dizel-su emülsiyonlarına Al₂O₃ nanopartikülü ilave etmişlerdir. Deneyler, değişken yükler altında yapılmıştır. Sonuçta, dizel yakıtı en yüksek egzoz gazı sıcaklığına sahipken, dizel-su emülsiyonu ile egzoz gazı sıcaklığı önemli seviyelerde düşürülmüştür. Ayrıca, Al₂O₃ ilavesi ile birlikte su-dizel emülsiyonunda düşürülen egzoz gazı sıcaklığından da daha düşük EGS'ler ölçülmüştür. Yazarlar, egzoz gazı sıcaklığındaki bu düşüşü takviye edilen nanopartikül ve su ilavelerinin yakıtın yanma süresini kısaltmasına bağlamışlar (Basha ve Anand, 2012). Başka bir çalışmada ise, Arockiasamy ve Anand, saf dizel ve saf biyodizel yakıtlarına ayrı ayrı 30 ppm Al₂O₃ ve CeO₂ nanopartiküllerini ilave etmişlerdir. Sonuçlarda, en düşük egzoz gazı sıcaklığı nanopartikül ilave edilmiş yakıt tiplerinde gözlemlenmiştir. Yazarlar, egzoz sıcaklığındaki bu düşüşün nedenini aynı zamanda NO_x emisyonlarının oluşumu için de gerekli olan yüksek sıcaklıkların yanma odasında nanopartiküller üzerine depolanmasına ve böylece hızlı bir şekilde bertaraf edilmesine bağlamışlardır (Arockiasamy ve Anand, 2015). Venu ve Madhavan ise dizel-biyodizel ve alkolden üçlü yakıt karışımına Al₂O₃ nanopartikülü ilave etmiştir. Gözlemledikleri düşük egzoz gazı sıcaklığını, artan tutuşma gecikmesi sürecine ve kısalan yanma süresine

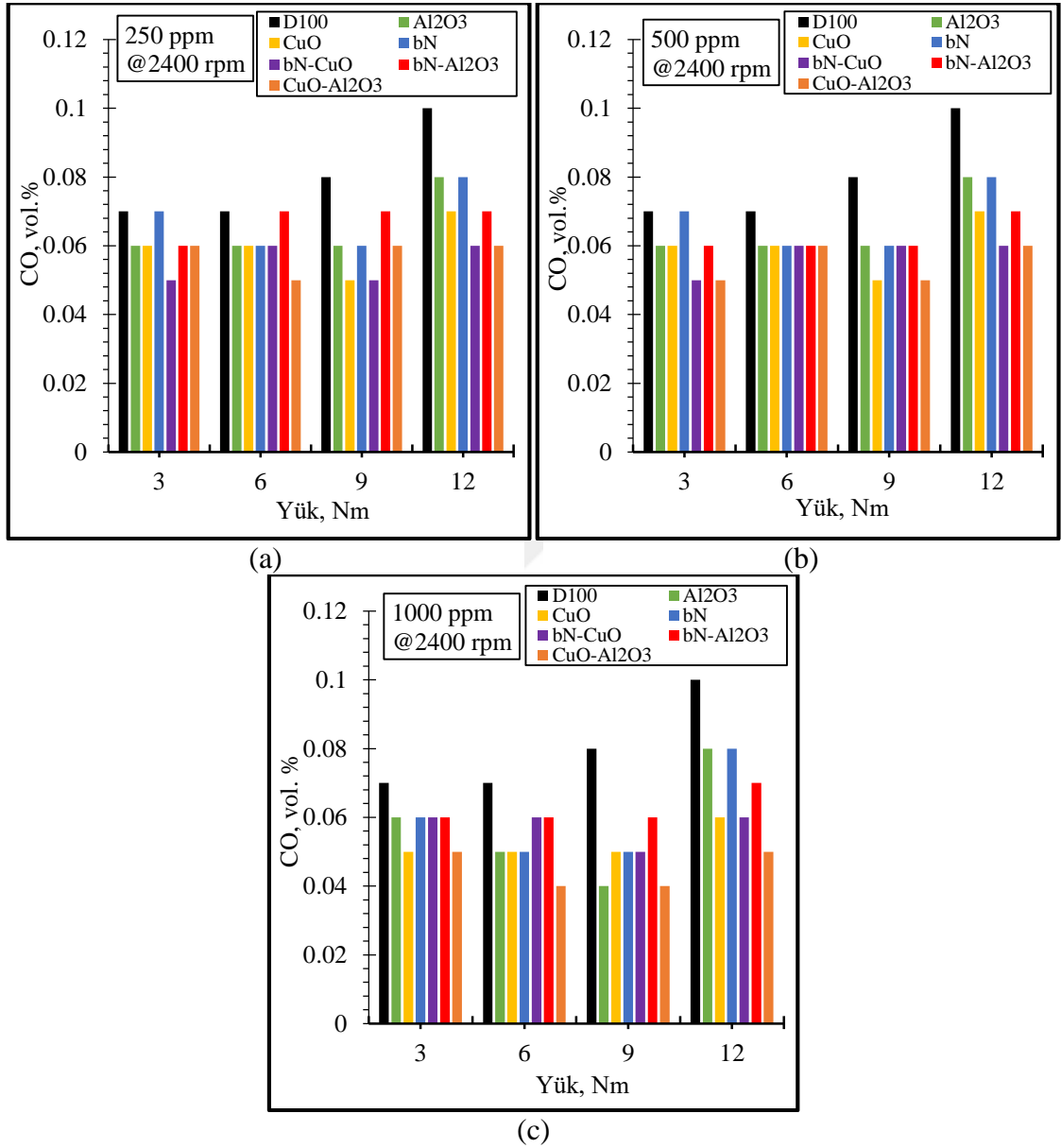
bağlamışlardır (Venu ve Madhavan, 2016). Başka bir çalışmada ise, Heydari-Maleny ve ark., etanol-dizel karışımına CNT nanopartikülü takviye etmiş ve EGS'lerde ortalama %2,32'lik bir düşüş gözlemlemiştir (Heydari-Maleny ve ark., 2017). Ayrıca, EGS'lerin nanopartikül ilave ile azalması yakıtın yanma oranının gelişmesine ve kontrollü yanma bölgelerindeki ısı yayılım eğrilerindeki azalmaya da bağlanmaktadır (Nour ve ark., 2018; Basha ve Anand, 2011). Bu çalışmalara ek olarak literatürdeki birçok çalışma, dizel yakıtlar içerisinde nanopartiküllerin varlığı EGS'lerde ciddi azalmalara sebebiyet verdiğini deneysel olarak ortaya koymuştur. Örneğin, yazarlar EGS'lerde 100 ppm TiO_2 ile %13,8 (Vellaiyan et al., 2020), 100 ppm CNT ile %4,7 (Vellaiyan et al., 2019), 25 ppm Al_2O_3 ile %18,71 (Venu and Madhavan, 2016), 100 ppm Al_2O_3 ile %7,1 (Vellaiyan et al., 2018) oranlarında nanopartikül takviye edilmemiş test yakıtlarına kıyasla düşüşleri bildirmişlerdir. Buna göre, elde edilen verilerin literatürdeki çalışmalar ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

4.4.2. Karbon monoksit emisyonu

Şekil 4.31'de D100, Al_2O_3 , CuO, bN, bN-CuO, bN- Al_2O_3 ve CuO- Al_2O_3 test yakıtlarının değişen motor yüklerine göre CO (karbon monoksit) emisyonlarındaki değişimler gösterilmiştir. CO emisyonunun egzoz emisyonları arasında görülmesinin en büyük nedeni yanma esnasında silindir içerisine gönderilen yakıtın yeteri kadar oksitlenmemesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, oluşan CO emisyonlarının ise egzozdan atılmadan önce ikinci kez oksijen atomuyla tepkimeye girebilecek fırsatı bulamama durumu da CO emisyonlarının seviyesinin artmasına neden olan bir diğer önemli unsurdur. Kısacası, CO bir eksik yanma ürünüdür ve ilgili test yakıtında kullanılmayan/kaybolan kimyasal enerjinin de bir göstergesidir. Yani CO, tam yanma prosesinin artması ile azalmaktadır. Bilindiği üzere, tam yanma oranı uygun şartlar altında ancak yeteri kadar oksijenin karbon atomları ile birlikte tepkimeye girmesi ile birlikte artmaktadır. Bu sebeple, yakıt içerisindeki oksijen atomlarının artması ya da yakıt içerisindeki karbon atomlarının daha çok oksijen ile tepkimeye teşvik edilmesi sonucunda CO emisyonlarında da bir azalma beklenir. Ayrıca, CO emisyonu çalışma şartlarına, silindir içi sıcaklık dağılımlarının homojenliğine, test yakıtının kimyasal kompozisyonuna, setan sayısına, viskozitesine, ısıl değerine ve enerji içeriğine de büyük oranda bağlıdır.

Şekil 4.31'den görüldüğü üzere, test yakıtları içerisine nanopartikül ilave edilmesi ile birlikte CO emisyonlarında genelde bir düşüş gözlemlenmektedir. Ayrıca, yakıt

içerisinde bulunan nanopartikül dozajı arttıkça CO emisyonundaki azalma hacmi de daha belirgin bir hale dönüşmüştür. Bu olay, artan nanopartikül konsantrasyonuna paralel olarak yakıtın kalorifik değerindeki artış ile açıklanabilir. CO emisyonu geleneksel dizel yakıt ile kıyaslandığında Al_2O_3 , CuO, bN, bN-CuO, bN- Al_2O_3 ve CuO- Al_2O_3 test yakıtları için tüm nanopartikül dozajları göz önüne alındığında ortalama %21,9, 28,1, 18,7, 29,2, 19,8 ve 34,4 oranlarında düşüşler hesaplanmıştır.



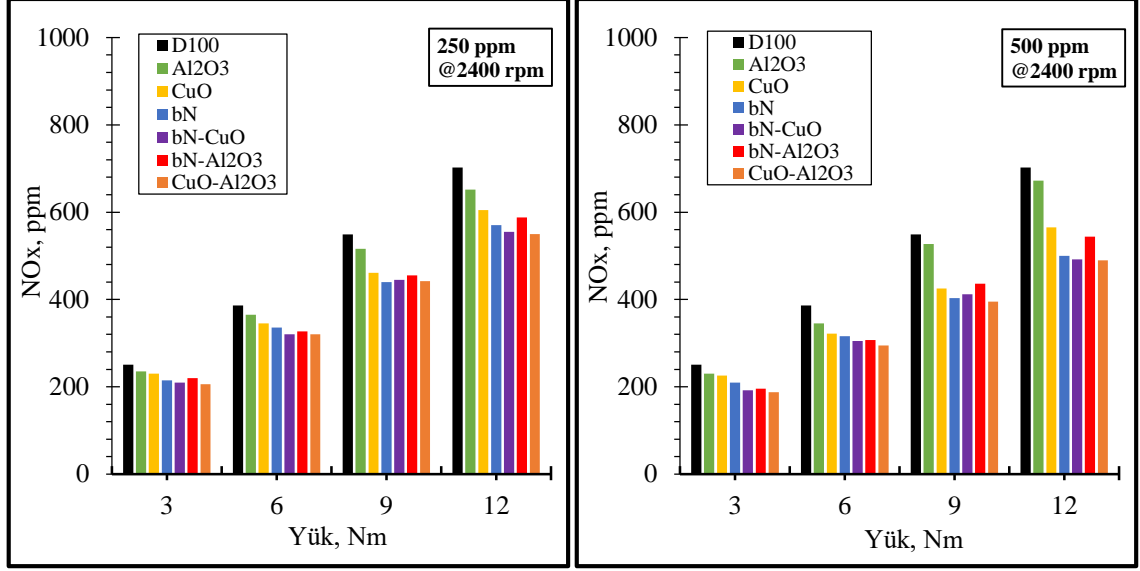
Şekil 4.30. Değişen motor yükleri için CO emisyonlarının değişimi (a) 250 ppm (b) 500 ppm (c) 1000 ppm.

Şekil 4.31 incelendiğinde, en yüksek CO emisyonlarının genellikle D100 yakıtında elde edildiği görülmektedir çünkü saf dizel yakıtı, içerisinde hiç oksijen atomu bulundurmamaktadır (Şen, 2019) ve dolayısıyla tam yanma potansiyeli diğer test yakıtlarına kıyasla daha düşüktür. Nanopartiküllerin yakıt içerisine takviye edilmesi ile birlikte, nanopartikül içerikli test yakıtlarının ısıl değeri artmıştır (Ağbulut ve ark., 2020; Aalam ve Saravanan, 2017). Yakıt özelliklerinin iyileşmesi ile birlikte, yakıtlardaki yanma kabiliyeti artmakta, tam yanma prosesi daha çok görülmekte ve yakıt tüketimi azalmaktadır. Ayrıca, CO emisyonundaki azalmanın diğer bir sebebi ise, özellikle oksit bazlı nanopartiküllerin yüksek oksijen içeriği sayesinde yanmamış yakıtlardaki daha fazla karbon atomlarının, okside olmasına olanak sağlayan katalizör/aktivatör rolü ile de açıklanabilir (Özener ve ark., 2014). Dahası, birçok araştırmacı test yakıtı ile birlikte yanma odasına gönderilen nanopartiküllerin burada kimyasal tepkimeleri hızlandırdığını da bildirmiştir (Venu ve Appavu, 2020; Mei ve ark., 2019; Yaşar ve ark., 2019). Bu durumun da yanma odasında oluşan CO emisyonları için oksijen ile ikinci kez tepkimeye girme fırsatı oluşturarak CO emisyon seviyelerinde azalmalara sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Tüm bu açıklamaların bir sonucu olarak, nanopartikül içeren yakıt tiplerinde D100 yakıtı ile kıyaslandığında CO emisyonlarında önemli seviyelerde azalmalar tespit edilmiştir. Nanopartikül ilavesi ile birlikte CO emisyonlarında meydana gelen bu düşüş; ilgili test yakıtları için eksik yanma miktarının azaldığının ve yanma verimliliğinin iyileştiğinin de bir göstergesi olarak kabul edilebilir (Özener ve ark., 2014; Gill ve ark., 2012). Literatürdeki birçok çalışma, benzer şekilde nanopartiküllerin dizel yakıt içerisine takviye edilmesi ile birlikte CO emisyonlarda önemli miktarlarda azalmalar görüldüğünü rapor etmiştir. Örneğin, Rastogi ve ark. %20 biyodizel ve %80 dizel yakıtından oluşan ikili test yakıtına 50 ppm CuO nanopartikülü ilave etmiş ve CO emisyonunda %13,15'lik bir düşüş tespit etmişlerdir (Rastogi ve ark., 2021). Başka bir çalışmada ise Gad ve ark., direkt olarak dizel yakıt içerisine 20, 30 ve 40 mg/litre oranlarında Al₂O₃ takviye etmiş ve CO emisyonunda 40 mg/litre Al₂O₃ içeren test yakıtı ile %30'luk bir düşüş gözlemlemiştir (Gad ve ark., 2021a). Nutakkiand ve Gugulothu ise %20 biyodizel ve %80 dizel yakıtından oluşan ikili test yakıtına 40, 80 ve 120 ppm Al₂O₃ ve Fe₂O₃ nanopartikülleri ilave etmiş ve 120 ppm nanopartikül içeren test yakıtlarının CO emisyonlarında %10,24'lük azalma saptamıştır (Nutakki ve Gugulothu, 2021). Jaikumar ve ark. ise CoCl ve CuCl₂ nanopartiküllerini 50, 75 ve 100 ppm oranlarında B20 test yakıtına ilave etmiş ve CO emisyonlarında %65,7'ye kadar bir azalma görmüşlerdir (Jaikumar ve ark., 2021b). Dolayısıyla, çalışmada elde edilen CO emisyonundaki

değişimlerin literatürdeki birçok çalışma ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Literatürden görüldüğü üzere, çalışmadan elde edilen CO emisyonları üzerindeki değişiklikler birçok çalışma ile uyum içerisinde.

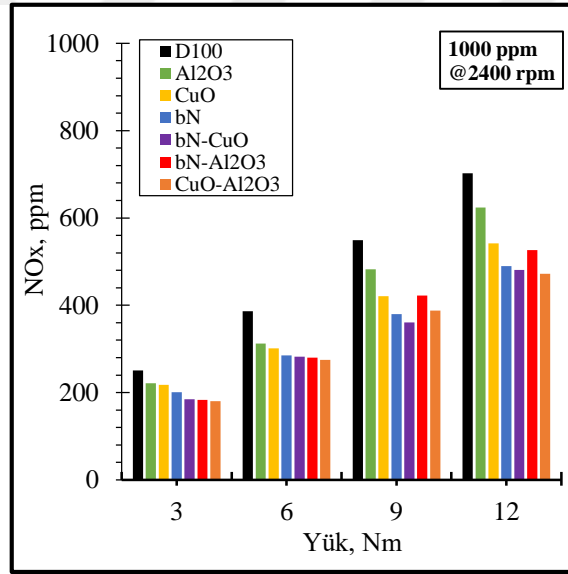
4.4.3. Nitrojen Oksit emisyonu

Şekil 4.32'den D100, Al₂O₃, CuO, bN, bN-CuO, bN-Al₂O₃ ve CuO-Al₂O₃ test yakıtlarının değişen motor yüklerine göre NO_x (nitrojen oksit) emisyonlarındaki değişimi gösterilmektedir. NO_x emisyonları N₂O₂, NO₂ ve NO emisyonlarının tümüne verilen hem insan sağlığı hem de ekolojik düzene ciddi zararlar veren bir egzoz emisyonudur. Bilindiği üzere, azot havanın %78'ini oluşturmaktadır ve normal şartlar altında yanma reaksiyonuna katılmamaktadır (Yeşilyurt, 2018). Ancak, silindir içerisinde meydana gelen yanma prosesi ile birlikte açığa çıkan yüksek sıcaklık, silindir içerisine emilen hava içerisindeki yoğun miktarda bulunan azotu ve oksijeni aktive ederek reaksiyona girmeye teşvik etmektedir (Murillo ve ark., 2011). Bu olayın bir sonucu olarak, NO_x emisyonu egzoz emisyonları arasında görülmektedir. Bu yüzden, NO_x emisyonlarını açıklarken önceki literatür çalışmaları genellikle egzoz gazı sıcaklığına başvururlar (Emiroğlu ve Şen, 2018; Ağbulut ve ark., 2019). NO_x emisyonunu etkileyen diğer önemli parametreler ise karışımların oksijen içerikleri, yakıtın ısı değeri, hava-yakıt oranı ve yanma için gerekli olan sürenin varlığıdır (Gharehghani ve ark., 2019; Ağbulut ve ark., 2019; Gharehghani ve ark., 2017; Özener ve ark., 2014).



(a)

(b)



(c)

Şekil 4.31. Değişen motor yükleri için NOx emisyonlarının değişimi.

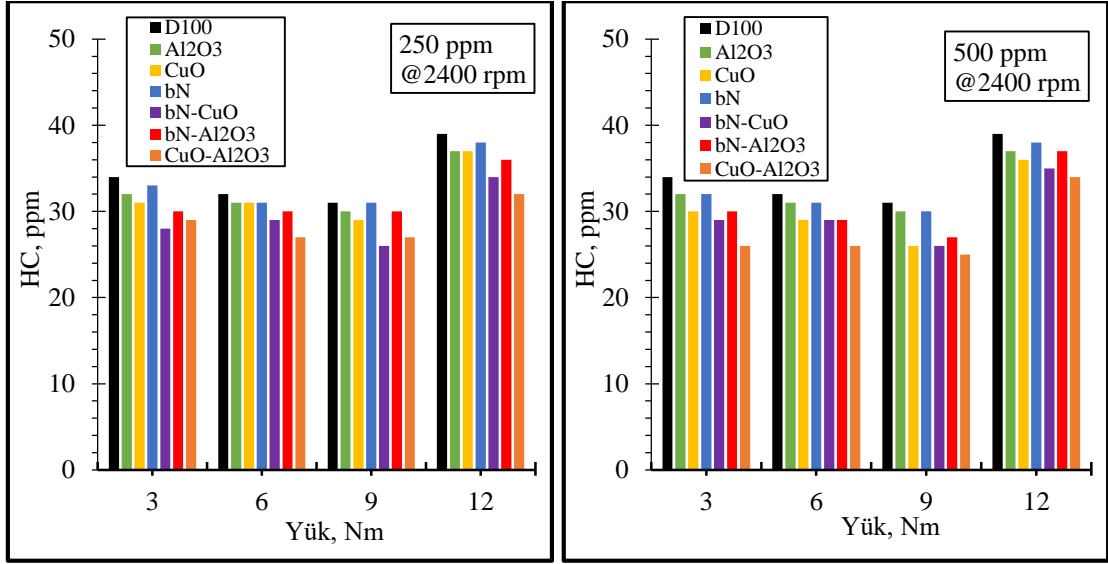
Şekil 4.32'den görüldüğü üzere, NOx emisyonu yakıt içerisinde nanopartikül takviye edilmesiyle birlikte bir düşüş eğilimine girmiştir. Artan nanopartikül dozajına paralel olarak, D100 referans yakıtına kıyasla nanopartikül içeren test yakıtların NOx emisyonlarında da azalma hacmi genişlemiştir. Bu sebeple, en yüksek NOx emisyonları en yüksek egzoz gazı sıcaklığının da elde edildiği (Bkz: Şekil 4.32) motor yükü olan 12 Nm'de ve 1000 ppm nanopartikül içeren test yakıtlarında gözlemlenmiştir. Bu motor yükünde ve dozajında, D100, Al₂O₃, CuO, bN, bN-CuO, bN-Al₂O₃ ve CuO-Al₂O₃ test

yakıtlarının NO_x emisyonları sırasıyla 702, 624, 542, 490, 481, 526 ve 472 ppm olarak ölçülmüştür. Tüm dozajlar ve motor yükleri bir arada düşünüldüğünde ise, D100 test yakıtına kıyasla NO_x emisyonu Al₂O₃, CuO, bN, bN-CuO, bN-Al₂O₃ ve CuO-Al₂O₃ test yakıtları için sırasıyla ortalama olarak %8,5, 17,7, 23,3, 25,1, 20,8 ve 25,8 oranlarında azalmıştır. Bir dizel motorda, NO_x emisyonlarının nanopartikül ilavesi ile düştüğü daha önceki birçok çalışma ile de rapor edilmiştir (Debbarma ve Misra, 2018; El-Seesy ve ark., 2018; Hoseini ve ark., 2020; Basha ve Anand, 2011). Örneğin, Ozgur ve ark. 9 farklı oksit bazlı nanopartikülü (MgO, Al₂O₃, TiO₂, ZnO, SiO₂, Fe₂O₃, NiO, NiFe₂O₄ ve Zn_{0.5}Ni_{0.5}Fe₂O₄), 25, 50 ve 100 ppm oranlarında saf dizel yakıtı karıştırmış ve 1200-2800 rpm arasında 200 rpm'lik değişen motor hızlarında test etmişlerdir. Yazarlar, çalışmada sadece NO_x emisyonunun değişimi incelemişlerdir. Çalışma sonucunda ise, kullanılan bu dokuz nanopartikülün 8'inde NO_x'in düştüğü bildirilmiştir. NO_x emisyonu sadece Al₂O₃ nanopartikül ilavesi ile saf dizel yakıttan elde edilen NO_x seviyesinin üzerine çıkmıştır (Ozgur ve ark., 2015). Ancak birçok literatür çalışması, Al₂O₃ ilavesinin de dizel motorda NO_x emisyonlarını düşürdüğünü rapor etmiştir (Prabu, 2018; Kao et al., 2008). Örneğin, Mahalingam ve Ganesan, saf dizel yakıtı sırasıyla 10, 20 ve 30 ppm konsantrasyonlarında Al₂O₃ eklemişlerdir. Sonuçta, en yüksek NO_x tüm motor yüklerinde saf dizel ile elde edildiğini ve nanopartikül eklenerek NO_x emisyonlarının düşürüldüğünü kanıtlamışlardır (Mahalingam ve Ganesan, 2020). Basha ve Anand yaptıkları çalışmada karbon nanotüp ilavesi ile birlikte NO_x emisyonlarında %29 azalma tespit etmişlerdir (Basha ve Anand, 2011). Başka bir çalışmada ise, Prabu ve Anand Al₂O₃ ve CeO₂ kullanarak NO_x, CO, HC ve is emisyonlarında sırasıyla %13, 60, 33 ve 32'lik azalmalar gözlemlemişlerdir (Prabu ve Anand, 2016). Yapılan literatür taramasına dayanarak, çalışmada elde edilen NO_x emisyonlarında gözlemlenen değişimlerin birçok çalışma ile uyum içerisinde olduğu da görülmüştür.

4.4.4. Hidrokarbon emisyonu

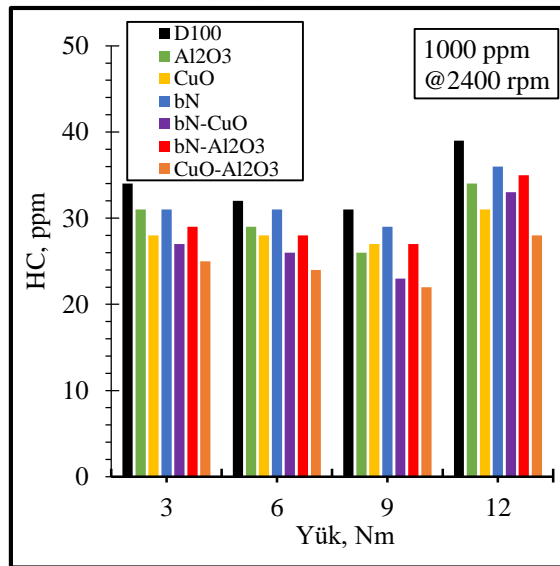
Bu çalışmada modifiye edilen test yakıtları için tartışılan diğer bir egzoz emisyonu ise hidrokarbon (HC) emisyonudur. Şekil 4.33'te D100, Al₂O₃, CuO, bN, bN-CuO, bN-Al₂O₃ ve CuO-Al₂O₃ test yakıtlarının değişen motor yüklerine göre HC emisyonlarındaki değişimi gösterilmektedir. HC emisyonu da tıpkı CO emisyonu gibi bir eksik yanma ürünüdür. HC emisyonunun oluşumunda çok zengin ya da çok fakir hava yakıt karışımları, düşük sıcaklıklar ve karışımların oksijen içerikleri etkilidir (Yeşilyurt ve ark., 2020). HC emisyonlarının tüm durumlarda nanopartikül ilave edilmiş yakıtlar

için daha düşük seviyelerde ölçülmüştür. HC emisyonunda meydana gelen bu azalmanın sebebi; daha önce CO emisyonunda görülen azalma mekanizması ile benzerdir. Yani, yüksek oksijen içeriği, iyileşen yanma prosesi, alt ısıl değerin ve enerji yoğunluğunun artması yanma prosesini ve yakıtın tam yanmasını teşvik etmiş ve eksik yanma ürünü olan HC emisyonları nanopartikül ilavesi ile azalmıştır.



(a)

(b)



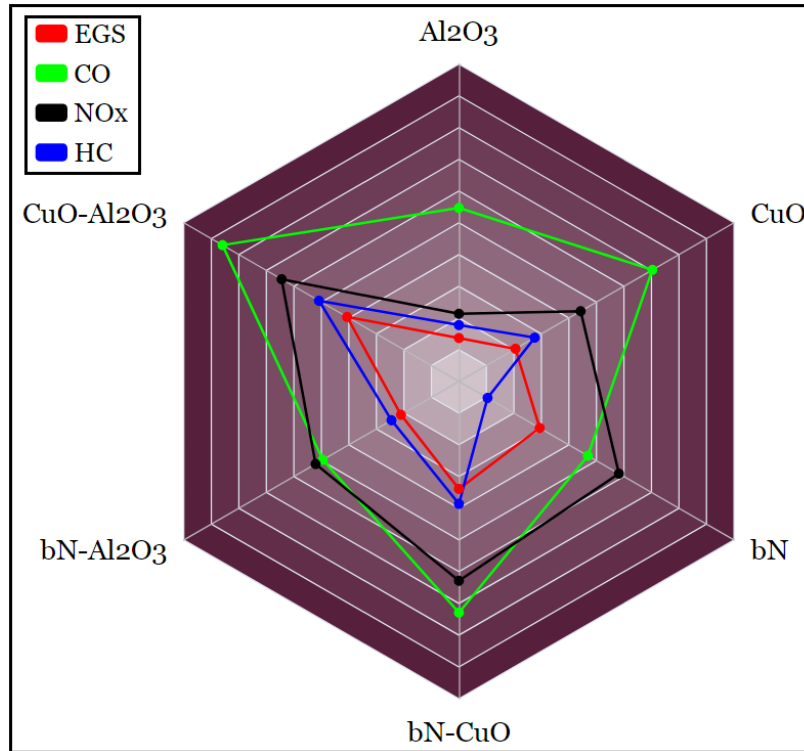
(c)

Şekil 4.32. Değişen motor yükleri için HC emisyonlarının değişimi.

HC emisyonu 3 ve 12 Nm motor yüklerinde tüm test yakıtları için tüm nanopartikül dozajlarında en yüksek değerlerine ulaşmıştır. Bunun sebebinin, hava/yakıt oranının orta yüklerde (6 ve 9 Nm) ideale daha yakın olmasından, düşük ve yüksek yüklerde ise çok zengin ve fakir olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Testler boyunca, yanma odasına alınan hava miktarı sabittir. Dolayısıyla, hava/yakıt oranını değiştirecek unsur silindir içerisine alınan yakıtın yüke bağlı olarak değişimidir. Düşük yüklerde yakıt tüketimi daha az seviyelerde iken yük arttıkça motorun yüksek yüklerle erişebilmesi için daha çok miktarda yakıtın silindir içerisine püskürtülmesi gerekir. Bu sebeple, düşük (3 Nm) ve yüksek (12 Nm) motor yüklerinde çalışma aralıkları için en fakir ve en zengin hava/yakıt karışımının görülmesi muhtemeldir. HC emisyonu ise çok zengin ve çok fakir hava/yakıt karışımlarında artan, ideal durumlarda azalan bir egzoz emisyonudur (Yeşilyurt, 2020). Bu sebeple, HC emisyonunun maksimum değerlerinin 3 ve 12 Nm motor yüklerinde görüldüğü düşünülmektedir. HC emisyonu saf dizel yakıt ile kıyaslandığında Al_2O_3 , CuO, bN, bN-CuO, bN- Al_2O_3 ve CuO- Al_2O_3 test yakıtları için sırasıyla tüm dozajlar göz önüne alındığında ortalama %7,1, 11,0, 4,2, 15,4, 9,8 ve 20,3 oranlarında düşmüştür. Benzer sonuçlar literatürdeki birçok çalışma tarafından da bildirilmiştir. Örneğin, Annamalai ve ark., dizel-limon otu biyodizeli ve sudan oluşan üçlü emülsiyon karışımının içerisine 30 ppm CeO_2 (Seryum IV Oksit) ilave etmiş ve değişken yüklerde motor performansı ve emisyonlarında meydana gelen değişimleri gözlemlemiştir. Sonuçlarda, nanopartikül ilavesi ile HC emisyonunda %35,5'lük bir düşüş tespit etmişlerdir (Annamalai ve ark., 2016). Başka bir çalışmada ise, Chacko ve Jeyaseelan %20 dizel içerikli dizel-biyodizel ikili karışımına 20, 40 ve 60 ppm farklı morfolojide grafen bazlı nanopartikülleri ilave etmişlerdir. Çalışmada, HC emisyonu için 60 ppm takviye edilen test yakıtlarında %23,2'lik bir düşüş saptanmıştır (Chacko ve Jeyaseelan, 2020). Başka bir çalışmada ise 100 ppm TiO_2 nanopartikülü içeren dizel-biyodizel karışımında HC emisyonu saf dizel yakıtla kıyasla %34,12 oranında azaldığı saptanmıştır (Örs ve ark., 2018). Gad ve ark., ise 20, 30 ve 40 mg/L oranlarında TiO_2 nanopartikülleri direkt olarak dizel yakıt içerisine ilave etmiş ve 40 mg/L oranında TiO_2 nanopartikülü içeren test yakıtında HC emisyonlarının saf dizel yakıtla kıyas ile %25 oranında düşürüldüğünü bildirmişlerdir (Gad ve ark., 2021b). Pandian ve ark., %100 biyodizelden oluşan test yakıtın içerisine 100 ve 200 ppm dozajlarında TiO_2 ilave etmiş ve sonuçta 200 ppm TiO_2 içeren test yakıtında HC emisyonu için %5,8'lik bir düşüş gözlemlemiştir (Pandian ve ark., 2017). Başka bir çalışmada ise Gumus ve ark., 25, 50 ve 100 ppm dozajlarında Al_2O_3 ve CuO nanopartiküllerini dizel yakıt içerisine takviye

etmiş ve HC emisyonlarında Al_2O_3 ile %13 ve CuO ile %8'lik düşüşler belirlemiştir (Gumus ve ark, 2016).

Şekil 4.34' te verilen radar grafikte emisyon ve egzoz gazı sıcaklığındaki düşüşler %0-40 aralığında ölçeklendirilerek değişimlerin bir arada gözlemlenmesi hedeflenmiştir. Şekilden görüleceği üzere, D100 test yakıtına kıyasla en fazla azalma CO emisyonunda gözlemlenirken, bu emisyonu sırasıyla NOx ve HC emisyonları takip etmektedir. Düşüş miktarları test yakıtları arasında farklılık gösterse de genellikle en düşük azalma seviyesi egzoz gazı sıcaklığında gözlemlenmiştir. Ayrıca, yakıt bazlı düşünüldüğünde ise, CuO- Al_2O_3 hibrit yakıtı genellikle sıfır noktasından en uzağa konumlanmıştır. Diğer bir ifade ile, emisyon ve egzoz gazı değerleri için genellikle CuO- Al_2O_3 en düşük seviyelerde seyretmiştir.



Şekil 4.33. Emisyonların ortalama yüzdesel değişimi (%0-%40 aralığında ölçeklendirilmiştir).

Sonuçta, EGS, NOx, HC ve CO emisyonlarında gözlemlenen düşüşler birçok araştırmacı tarafından desteklense de aksini iddia eden çalışmalarda mevcuttur. Temelde bu farklılıkların, baz yakıtın temel özelliklerinden, nanopartiküllerin saflığından, geometrisinden, tane boyutundan, test yakıtının homojenliğinden, test düzeneğinden ve test motorundan, ölçüm aletlerinin hassasiyetlerinden ve kalibrasyon süreçlerinden ve

deney şartlarından kaynaklabileceği düşünölmektedir. Elde edilen sonuçların güvenilirliği ve tekrar edilebilirliği açısından testler birden fazla kez yapılarak ortalama değer alınabilir ve deneysel sonuçlar için belirsizlik ve hata analizleri de verilebilir ancak yine de bu kargaşanın giderilmesi için daha fazla bilimsel çalışmanın gerçekleştirilmesi ve literatüre kazandırılması gerekmektedir.

5. BULGULAR

Bu çalışmada üç farklı nanopartikül (Al_2O_3 , CuO ve bN) mono ve hibrit formlarda 250, 500 ve 1000 ppm kütle oranlarında geleneksel dizel yakıt ile ultrasonikasyon yöntemi ile karıştırılmıştır. Deneyler tek silindri ve hava soğutmalı bir dizel motorda 2400 rpm sabit motor devrinde ve 3, 6, 9, 12 Nm motor yüklerinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen bulgular kısaca aşağıda verilmiştir:

- Nanopartikül takviyesi ile birlikte yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri önemli oranda değişmiştir. Nanopartikül dozajına da bağlı olarak nanopartikül takviye edilen test yakıtlarında viskozite, ısı değeri ve setan sayısı gibi önemli yakıt özelliklerinde artışlar tespit edilmiştir.
- Nanopartiküllerin bulk yoğunluklarının geleneksel hidrokarbon yakıtlardan oldukça yüksek olması sebebiyle yakıt içerisindeki nanopartiküller zamanla çökmektedir. Çalışmada görüntüleme yöntemi ile nanoyakıtlar üzerinde numuneler hazırlandıktan 12 saat sonra faz ayrımı başladığı tespit edilmiştir. Bu sebeple, hazırlanan test yakıtlarının en geç 12 saat içerisinde tüketilmesi gerekmektedir.
- Bor nanopartikülün, yakıt eklentisi olarak kullanılması motorun performans, yanma ve emisyon karakteristiklerinde önemli seviyelerde iyileşmeler sağlamıştır. Mono ve hibrit bor nanopartikülünün kullanımı diğer sıklıkla kullanılan nanopartiküller ile rekabet edebilir sonuçlar sunmaktadır.
- Nanopartikül takviye edilen test yakıtlarında setan sayıları yükselmiştir. Yükselen setan değeri sayesinde nanopartikül içerikli test yakıtlarında tutuşması için gerekli olan buharlaşma gizli ısı ihtiyacı düşük seviyelerdedir. Bu sebeple, nanopartikül takviye edilmiş test yakıtlarında tutuşma gecikmesi için beklenen süre bir miktar kısalmıştır (ortalama olarak maksimum 1 °KA). Nanopartikül takviye edilmesi ile birlikte tutuşma gecikmesi süresinde ortalama olarak tüm yük ve nanopartikül dozajları için Al_2O_3 test yakıtında %7,69, bN test yakıtında %4,20, CuO test yakıtında %5,59, bN-CuO test yakıtında %13,75, bN- Al_2O_3 test yakıtında %8,16 ve CuO- Al_2O_3 test yakıtında %9,32'lik kısaltmalar sağlanmıştır.

- Nanopartiküllerin yanma esnasında kimyasal tepkimeleri hızlandırması, yanmamış ya da eksik yanmış ürünleri oksitleyerek tam yanmaya teşvik etmesi, kalorifik değeri artırarak performansı iyileştirmesi sonucunda eksik yanma ürünleri olan CO ve HC emisyonlarında büyük düşüşler tespit edilmiştir. CO emisyonu geleneksel dizel yakıt ile kıyaslandığında tüm motor yükleri ve tüm nanopartikül dozajları için Al_2O_3 , CuO, bN, bN-CuO, bN- Al_2O_3 ve CuO- Al_2O_3 için sırasıyla ortalama %21,9, 28,1, 18,7, 29,2, 19,8 ve 34,4 oranlarında düşüşler saptanmıştır. Bu düşüş, yanmamış HC emisyonları için ise yine geleneksel dizel yakıt ile kıyaslandığında tüm motor yükleri ve tüm nanopartikül dozajları gözönüne alındığında Al_2O_3 , CuO, bN, bN-CuO, bN- Al_2O_3 ve CuO- Al_2O_3 test yakıtları için %7,1, 11,0, 4,2, 15,4, 9,8 ve 20,3 oranlarında seyretmiştir.
- Nanopartiküller ilave edildikleri test yakıtlarının enerji içeriklerini ve enerji yoğunluklarını artırmışlardır. Bu sayede, artan ısı değerinin de etkisiyle birlikte ısı verim yükselmiş, özgül yakıt tüketimi düşürülmüştür. Deneylerde kullanılan tüm motor yükleri ve nanopartikül dozajları bir arada düşünüldüğünde, D100 referans yakıtına kıyasla nanopartikül takviye edilmiş test yakıtlarının ısı verimlerinde Al_2O_3 , CuO, bN, bN-CuO, bN- Al_2O_3 ve CuO- Al_2O_3 için %5,04, 3,35, 3,08, 4,94, 5,44 ve 6,57'lik iyileşmeler gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, nanopartikül takviye edilmesi ile birlikte özgül yakıt tüketim miktarlarında Al_2O_3 , CuO, bN, bN-CuO, bN- Al_2O_3 ve CuO- Al_2O_3 test yakıtları için %8,05, 9,33, 6,28, 8,75, 8,18 ve 11,08 oranlarında azalmalar tespit edilmiştir.
- Nanopartikül ilave edilen test yakıtlarında özgül yakıt tüketiminin düşmesi ve ısı veriminin iyileşmesinin bir sonucu olarak egzoz gazı sıcaklığında da önemli seviyelerde düşüşler gözlemlenmiştir. Düşük EGS ile birlikte NOx emisyonlarında da azalmalar tespit edilmiştir. Motor yükünün artması ile birlikte silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarındaki artış ve buna paralel olarak egzoz gazı sıcaklığında ve NOx emisyonlarında da artışlar gözlemlenmiştir. Tüm nanopartikül katkı dozajları ve motor yükleri bir arada düşünüldüğünde D100 test yakıtına kıyasla NOx emisyonunda Al_2O_3 , CuO, bN, bN-CuO, bN- Al_2O_3 ve CuO- Al_2O_3 test yakıtları için sırasıyla ortalama %8,5, 17,7, 23,3, 25,1, 20,8 ve 25,8 düşüşler tespit edilmiştir.
- Nanopartikül içerikli test yakıtlarında hem yakıt tüketiminin azalması hem de yakıtın tutuşabilmesi için beklenen fiziksel ve kimyasal gecikme süresinin

kısalması ile birlikte silindir içi gaz basıncı değerlerinde D100 referans test yakıtına kıyasla önemli azalmalar saptanmıştır. Örneğin, bN test yakıtı için %4,13'lük, Al₂O₃ test yakıtı için %2,01, CuO test yakıtı için %2,45, bN-CuO test yakıtı için %2,47, bN- Al₂O₃ için %2,12, CuO- Al₂O₃ test yakıtı için ise %1,2'lik silindir içi gaz basıncı değerlerinde düşüşler tespit edilmiştir.

- Nanopartikül süspansiyon edilmiş test yakıtlarında yanma prosesi iyileşmiştir. Nanodizel karışımlarında set edilen motor yüklerine geleneksel dizel yakıtına kıyasla daha kısa yanma süreleri ile ulaşılabilmektedir. Test yakıtları arasında ortalama yanma süresi 35,10 °KA ile D100 test yakıtında gözlemlenmiştir. Daha sonra, nanopartikül takviyesi ile birlikte ortalama yanma süresininin Al₂O₃ test yakıtında %9,16, bN test yakıtında %8,26, CuO test yakıtında %6,93, bN-CuO test yakıtında %8,78, bN-Al₂O₃ test yakıtında %9,59 ve CuO-Al₂O₃ test yakıtında %11,78'lik kısaldığı gözlemlenmiştir.

6. DENEYSEL TECRÜBELER, KARŞILAŞILAN ZORLUKLAR VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ

Gerçekleştirilen deneysel çalışmadan elde edilen tecrübeler, karşılaşılan zorluklar ve gelecekteki çalışmalar için öneriler bu başlık altında toplanmıştır.

- Bu çalışmada, nanopartikül dozajındaki artışla birlikte yanma, performans ve emisyon üzerindeki iyileşmelerin oranları da genellikle artmıştır. Bu yüzden, çalışmadan “*yakıt içerisindeki nanopartikül dozajı arttıkça daha iyi sonuçlar elde edilir*” çıkarımı yapılabilmektedir. Ancak, unutulmaması gereken önemli bir husus nanopartikül oranı arttıkça viskozite değerinde de bir artış gözlemlenmesidir. Viskozitedeki bu artış bu çalışma için tolere edilebilen seviyelerde kalmıştır. Nanopartikül oranını daha fazla artırmak bir noktadan sonra artık viskoziteyi o kadar artıracaktır ki yakıtın atomizasyonu ve buna bağlı olarak yanma, performans ve emisyon karakteristiklerinde kötüleşmeler gözlemlenmesi kuvvetle muhtemeldir. Bu sebeple, nanopartikül oranının iyileşmeden kötüleşmeye dönüş dozajının tespitine yönelik çalışmalar gelecekteki araştırmacılar tarafından çalışılabilir önemli konular arasındadır.
- Bor malzemesinin kullanımının yaygınlaştırılması ve katma değerinin artırılması için özellikle daha küçük tane boyutunda test edilmesi ve daha fazla çalışmanın gerçekleştirilmesi gerekmektedir.
- Nanopartikül-dizel yakıtı karıştırma işleminde sıkça kullanılan ultrasonikasyon yönteminde süre uzadıkça ultrasonik banyo suyunun sıcaklığı artmaktadır. Bu sıcaklık, banyo içerisinde ses dalgalarına maruz kalan yakıtın da sıcaklığını artırarak bu yakıtlara bir ön ısıtma avantajı sağlamaktadır. Test yakıtları arasında daha doğru bir karşılaştırma yapabilmek için gelecek çalışmalarda araştırmacıların değerlendirdikleri test yakıtlarını aynı sıcaklık değerlerinde yakıt tankına boşaltmaları önemlidir.
- Dizel ve benzinli motorlarda nanopartikül kullanımı ile ilgili çalışacak araştırmacıların, test edecekleri nanopartiküllerin tane boyutu seçiminde dikkat etmesi gereken iki önemli husus vardır. Bunlar, yakıt filtresinin elek çapı ve enjektör nozulunun delik çapıdır. Bu iki çap değerinin, yakıt içerisinde test

edilecek olan nanopartiküllerin ortalama tane boyutlarından daha büyük olması gerekmektedir. Aksi halde, nanopartiküller yakıt filtresinde takılı kalır ve yanma odasına gönderilemez. Bu durum, yakıt filtresinde erken tıkanmalara ve yanlış deneysel sonuçlara yol açabilir. Ayrıca, yakıt filresinden geçen ancak yakıt hattında topaklaşan/kümeleşen nanopartiküllerin de enjektör sistemi üzerinde problemlere yol açabileceği düşünülmektedir. Bu sebeple, test edilecek nanopartiküllerin ortalama tane boyutu seçimi ve karışımlarının stabilitesini uzun sürdürmek için atılacak adımlar deneylere başlamadan önce dikkat edilmesi ve iyi planlanması gereken önemli konulardır.

- Günümüz teknolojisinde, nanopartiküllerin sonsuza kadar baz akışkan içerisinde asılı kalması mümkün değildir. Nanopartikülleri akışkan içerisinde daha uzun süreler boyunca homojen bir şekilde topaklaşmaya ve kümelenmeye izin vermeden asılı tutabilecek çalışmalar önem arz etmektedir. Günümüzde nanopartiküllerin herhangi bir akışkan içerisinde kullanımının yaygınlaşmasını ve ticarileşmesini önleyen en önemli faktörlerden birisi şüphesiz nanoakışkanların stabilite problemidir. Çökelme süresi bazı yöntemler ile geliştirilebilir. Bu yüzden, gelecek çalışmalar ultrasonikasyon süresinin, ultrasonik dalga boylarının, karışımların pH değerlerinin ve karışımlarda yüzey aktifleştirici madde (surfactant) kullanımlarının çökelme süresini uzatmak için optimum değerlerinin tespit edilmesi üzerine yoğunlaşabilir.
- Günümüzde nanopartiküllerin birim maliyeti oldukça yüksektir. Bu sebeple, gelecek çalışmalar maliyeti düşürmek ve deney sürelerini kısaltmak amacıyla optimizasyon çalışmaları üzerine yoğunlaşabilirler.
- Nanopartiküllerin tane boyutlarının oldukça küçük olması sebebiyle insan derisinden nüfuz edebilme ve solunum yoluyla akciğere kadar gidebilme riski vardır. Nanopartiküllerin bu toksik etkileri düşünüldüğünde laboratuvar ortamında özellikle nanoakışkan hazırlama sürecinde hassas maske, eldiven ve gözlük gibi koruyucuların kullanılması önerilmektedir.
- Bu tez kapsamı boyunca, yazar tarafından yapılan literatür taramasında dizel ve benzinli motorlarda hibrit nanopartikül kullanımının yanma, performans ve emisyon üzerindeki etkileri inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır. Mevcut çalışma bu bağlamda hibrit nanopartikül kullanımının mono nanopartikül kullanımına göre üstün olduğu birçok çıktıyı deneysel olarak rapor etmektedir.

Ancak, bu alanda hibrit nanopartikül kullanımlarının motor karakteristikleri üzerinde etkilerini inceleyen ve mono nanopartikül kullanımı ile kıyaslayan daha fazla sayıda çalışma yapılmasına ihtiyaç vardır.

- Literatürde bulunan mevcut çalışmalar genellikle baz yakıt tipine (dizel, biyoyakıt gibi), mono nanopartiküllerin cinsine ve oranına yöneliktir. Oysa farklı alanlarda gerçekleştirilen birçok çalışmada nanopartiküllerin geometrilerinin ve tane boyutlarının sistem performanslarını büyük oranda değiştirebileceği kanıtlanmıştır. Bu bağlamda, aynı tip nanopartiküllerin geometri ve tane boyutu değişiklikleri ile motor çıktıları üzerindeki etkilerinin tartışılması da önem arz eden konular içerisindedir. Şu ana kadar, tez çalışması kapsamında yapılan literatür taramasında aynı nanopartikülün (bakır oksit nanopartikülü) tane boyutlarının (10 ve 20 nm) motor performansı ve emisyonları üzerinde etkisini göstermeye yönelik sadece bir adet çalışmaya rastlanmıştır (Devarajan ve ark., 2019). Bu yüzden gelecek çalışmalar, aynı oranda ve aynı tip nanopartiküller kullanarak geometri ve boyut değişikliğinin motor karakteristikleri üzerindeki etkilerine odaklanabilirler.

Yukarıdaki maddeler ile tez çalışması boyunca gerçekleştirilen deneysel tecrübelerden, karşılaşılan zorluklardan ve bu zorluklar için alınabilecek tedbirler için kısa bir özet sunulmuştur. Ayrıca, bu alanda çalışma yapacak araştırmacılar için bir takım önemli görülen çalışma konuları da önerilmiştir. Tez çalışması boyunca da bahsedildiği gibi, günümüzde nanopartiküllerin bir akışkan içerisinde kullanılması ile birlikte birçok sistem için performansı iyileştirici olumlu sonuçlara ulaşıldığı çok sayıda araştırmacı tarafından rapor edilmiştir. Ancak, ulaşılan bu olumlu sonuçlara rağmen nanopartikül kullanımının yaygınlaşmasını kısıtlayan önemli problemler de yukarıda bahsedilmiştir. Bu problemlerin çözümleri oldukça önem arz eden konular olmasına rağmen bu çalışmanın kapsamı dışında kalmaktadır. Gelecek çalışmalar tarafından bu problemlerin minimize edilmesi ya da tamamen ortadan kaldırılmasına yönelik atılacak adımlar bu alan dâhil birçok alanda şimdiden merak uyandıran son derece önemli konulardır.

7. KAYNAKLAR

- Aalam, C. S., & Saravanan, C. G. (2017). Effects of nano metal oxide blended Mahua biodiesel on CRDI diesel engine. *Ain Shams Engineering Journal*, 8(4), 689-696.
- Abas, N., Kalair, A., & Khan, N. (2015). Review of fossil fuels and future energy technologies. *Futures*, 69, 31-49.
- Ağbulut, Ü., Ayyıldız, M., & Sarıdemir, S. (2020). Prediction of performance, combustion and emission characteristics for a CI engine at varying injection pressures. *Energy*, 197, 117257.
- Ağbulut, Ü., Yeşilyurt, M. K., & Sarıdemir, S. (2021). Wastes to Energy: Improving the poor properties of waste tire pyrolysis oil with waste cooking methyl ester and waste fusel alcohol—A detailed assessment on the combustion, emission, and performance characteristics of a CI engine. *Energy*, 119942.
- Al-Hartomy, O. A., Mujtaba, M. A., Al-Ghamdi, A., Iqbal, J., & Wageh, S. (2021). Combined effect of Phoenix dactylifera biodiesel and multiwalled carbon nanotube—titanium dioxide nanoparticles for modified diesel engines. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-26.
- Anderson, A., Ramanan, M., Prabhu, A., & Jayaprabakar, J. (2019). Influence of nanoparticle with jatropha methyl ester blends in a diesel engine. *Digest Journal of Nanomaterials & Biostructures*, 14(2), 439-446.
- Annamalai, M., Dhinesh, B., Nanthagopal, K., SivaramaKrishnan, P., Lalvani, J. I. J., Parthasarathy, M., & Annamalai, K. (2016). An assessment on performance, combustion and emission behavior of a diesel engine powered by ceria nanoparticle blended emulsified biofuel. *Energy Conversion and Management*, 123, 372-380.
- Appavu, P., & Venkata Ramanan, M. (2020). Study of emission characteristics of a diesel engine using cerium oxide nanoparticle blended pongamia methyl ester. *International Journal of Ambient Energy*, 41(5), 524-527.
- Ardebili, S. M. S., Solmaz, H., Calam, A., & İpci, D. (2021). Modelling of performance, emission, and combustion of an HCCI engine fueled with fusel oil-diethylether fuel blends as a renewable fuel. *Fuel*, 290, 120017.
- Arockiasamy, P., & Anand, R. B. (2015). Performance, combustion and emission characteristics of a DI diesel engine fuelled with nanoparticle blended jatropha biodiesel. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 59(2), 88-93.
- Ashley, L., & Ramesha, D. (2019). Influence of zinc oxide on direct injection ci engine fueled with waste cooking oil biodiesel. *International Advanced Research Journal in Science Engineering and Technology*, 6, 32-40.
- Aydın, M., Uslu, S., & Çelik, M. B. (2020). Performance and emission prediction of a compression ignition engine fueled with biodiesel-diesel blends: A combined application of ANN and RSM based optimization. *Fuel*, 269, 117472.

- Aydın, S. (2020). Detailed evaluation of combustion, performance and emissions of ethyl proxitol and methyl proxitol-safflower biodiesel blends in a power generator diesel engine. *Fuel*, 270, 117492.
- Barik, D., & Vijayaraghavan, R. (2020). Effects of waste chicken fat derived biodiesel on the performance and emission characteristics of a compression ignition engine. *International Journal of Ambient Energy*, 41(1), 88-97.
- Basha, J. S., & Anand, R. B. (2011). An experimental investigation in a diesel engine using carbon nanotubes blended water–diesel emulsion fuel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 225(3), 279-288.
- Basha, J. S., & Anand, R. B. (2012). Effects of nanoparticle additive in the water–diesel emulsion fuel on the performance, emission and combustion characteristics of a diesel engine. *International Journal of Vehicle Design*, 59(2), 164.
- Basha, J. S., & Anand, R. B. (2013). The influence of nano additive blended biodiesel fuels on the working characteristics of a diesel engine. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 35(3), 257-264.
- Baweja, S., Trehan, A., & Kumar, R. (2021). Combustion, performance, and emission analysis of a CI engine fueled with mustard oil biodiesel blended in diesel fuel. *Fuel*, 292, 120346.
- Bhanu Teja, N., & Alagumurthi, N. (2021). Emission, performance and combustion study on watermelon methyl ester in diesel engine. *International Journal of Ambient Energy*, 42(3), 285-291.
- Chacko, N., & Jeyaseelan, T. (2020). Comparative evaluation of graphene oxide and graphene nanoplatelets as fuel additives on the combustion and emission characteristics of a diesel engine fuelled with diesel and biodiesel blend. *Fuel Processing Technology*, 204, 106406.
- Channappagoudra, M. (2018). Effect of copper oxide nanoadditive on diesel engine performance operated with dairy scum biodiesel. *International Journal of Ambient Energy*, 1-10.
- Chapman, L. (2007). Transport and climate change: a review. *Journal of Transport Geography*, 15(5), 354-367.
- Chen, A. F., Adzmi, M. A., Adam, A., Othman, M. F., Kamaruzzaman, M. K., & Mrwan, A. G. (2018). Combustion characteristics, engine performances and emissions of a diesel engine using nanoparticle-diesel fuel blends with aluminium oxide, carbon nanotubes and silicon oxide. *Energy Conversion and Management*, 171, 461-477.
- Chen, H., He, J., Chen, Z., & Geng, L. (2021). A comparative study of combustion and emission characteristics of dual-fuel engine fueled with diesel/methanol and diesel–polyoxymethylene dimethyl ether blend/methanol. *Process Safety and Environmental Protection*, 147, 714-722.
- Choi, S. U., & Eastman, J. A. (1995). Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *International Mechanical Engineering Congress and Exhibition*, (ss. 1-8).
- Çelebi, Y., & Aydın, H. (2019). An overview on the light alcohol fuels in diesel engines. *Fuel*, 236, 890-911.

- Çelik, M., & Bayindirli, C. (2020). Enhancement performance and exhaust emissions of rapeseed methyl ester by using n-hexadecane and n-hexane fuel additives. *Energy*, 202, 117643.
- Çelik, M., Solmaz, H., Yücesu, H. S., & Yılmaz, E. (2016). Kanola metil esterine n-heptan katkısının motor performansı ve yanma karakteristiklerine etkilerinin incelenmesi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 36(1), 9-16.
- Çiftçi, E. (2021). Distilled water-based AlN+ ZnO binary hybrid nanofluid utilization in a heat pipe and investigation of its effects on performance. *International Journal of Thermophysics*, 42(3), 1-21.
- Debbarma, S., & Misra, R. D. (2018). Effects of iron nanoparticle fuel additive on the performance and exhaust emissions of a compression ignition engine fueled with diesel and biodiesel. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 10(4), 1-11.
- Devan, P. K., & Mahalakshmi, N. V. (2009). A study of the performance, emission and combustion characteristics of a compression ignition engine using methyl ester of paradise oil–eucalyptus oil blends. *Applied Energy*, 86(5), 675-680.
- Devarajan, Y., Munuswamy, D. B., & Mahalingam, A. (2019a). Investigation on behavior of diesel engine performance, emission, and combustion characteristics using nano-additive in neat biodiesel. *Heat and Mass Transfer*, 55(6), 1641-1650.
- Devarajan, Y., Nagappan, B., & Subbiah, G. (2019b). A comprehensive study on emission and performance characteristics of a diesel engine fueled with nanoparticle-blended biodiesel. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(11), 10662-10672.
- Dewangan, A., Mallick, A., Yadav, A. K., & 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.
- Dey, P., Ray, S., & Newar, A. (2021). Defining a waste vegetable oil-biodiesel based diesel substitute blend fuel by response surface optimization of density and calorific value. *Fuel*, 283, 118978.
- Dixit, S., Kumar, A., Kumar, S., Waghmare, N., Thakur, H. C., & Khan, S. (2020). CFD analysis of biodiesel blends and combustion using Ansys Fluent. *Materials Today: Proceedings*, 26, 665-670.
- Doudin, K. I. (2021). Quantitative and qualitative analysis of biodiesel by NMR spectroscopic methods. *Fuel*, 284, 119114.
- D’Silva, R., Binu, K. G., & Bhat, T. (2015). Performance and emission characteristics of a CI engine fuelled with diesel and TiO₂ nanoparticles as fuel additive. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 3728-3735.
- Ejder, S. B. (2011). ‘Etanol-Dizel, Biyodizel-Dizel Yakıt Karışımlarının Kullanımının Motor Performansına Etkilerinin Deneysel Araştırılması’, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Ekaab, N. S., Hamza, N. H., & Chaichan, M. T. (2019). Performance and emitted pollutants assessment of diesel engine fuelled with biokerosene. *Case Studies in Thermal Engineering*, 13, 100381.

- Al-Enazi, A., Okonkwo, E. C., Bicer, Y., & Al-Ansari, T. (2021). A review of cleaner alternative fuels for maritime transportation. *Energy Reports*, 7, 1962-1985.
- Elkelawy, M., Bastawissi, H. A. E., Esmail, K. K., Radwan, A. M., Panchal, H., Sadasivuni, K. K., Suresh, M., & Israr, M. (2020). Maximization of biodiesel production from sunflower and soybean oils and prediction of diesel engine performance and emission characteristics through response surface methodology. *Fuel*, 266, 117072.
- El-Seesy, A. I., Abdel-Rahman, A. K., Bady, M., & Ookawara, S. J. E. C. (2017). Performance, combustion, and emission characteristics of a diesel engine fueled by biodiesel-diesel mixtures with multi-walled carbon nanotubes additives. *Energy Conversion and Management*, 135, 373-393.
- El-Seesy, A. I., Hassan, H., & Ookawara, S. (2018). Effects of graphene nanoplatelet addition to jatropha biodiesel–diesel mixture on the performance and emission characteristics of a diesel engine. *Energy*, 147, 1129-1152.
- Elumalai, P. V., Balasubramanian, D., Parthasarathy, M., Pradeepkumar, A. R., Iqbal, S. M., Jayakar, J., & Nambiraj, M. (2021). An experimental study on harmful pollution reduction technique in low heat rejection engine fuelled with blends of pre-heated linseed oil and nano additive. *Journal of Cleaner Production*, 283, 124617.
- Elumalai, P. V., Sivakandhan, C., Parthasarathy, M., Iqbal, S. M., & Arunkumar, M. (2021). Investigation on the mitigation of environmental harmful emissions by incorporating nanoparticles to biofuel water nano emulsion in low heat rejection engine. *Heat and Mass Transfer*, 1-16.
- Emiroğlu, A. O., Keskin, A., & Şen, M. (2018). Experimental investigation of the effects of turkey rendering fat biodiesel on combustion, performance and exhaust emissions of a diesel engine. *Fuel*, 216, 266-273.
- Ertan, B. (2020). Klorlama kavurma işlemi ile bor killerindeki değerli metallerin ekstraksiyonu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(7), 1267-1272.
- Fangsuwannarak, K., & Triratanasirichai, K. (2013). Effect of metalloid compound and bio-solution additives on biodiesel engine performance and exhaust emissions. *American Journal of Applied Sciences*, 10(10), 1201.
- Fayad, M. A., & Dhahad, H. A. (2021). Effects of adding aluminum oxide nanoparticles to butanol-diesel blends on performance, particulate matter, and emission characteristics of diesel engine. *Fuel*, 286, 119363.
- Fayaz, H., Mujtaba, M. A., Soudagar, M. E. M., Razzaq, L., Nawaz, S., Nawaz, M. A., Farooq, M., Afzal, A., Ahmed, W., Yunus Khan, T. M., Bashir, S., Yaqoob, H., El-Seesy, A. I., Wageh, S., Al-Ghamdi, A., & Elfakhany, A. (2021). Collective effect of ternary nano fuel blends on the diesel engine performance and emissions characteristics. *Fuel*, 293, 120420.
- Gad, M. S., Abdel Razeq, S. M., Manu, P. V., & Jayaraj, S. (2021a). Experimental investigations on diesel engine using alumina nanoparticle fuel additive. *Advances in Mechanical Engineering*, 13(2), 1687814020988402.
- Gad, M. S., Kamel, B. M., & Badruddin, I. A. (2021b). Improving the diesel engine performance, emissions and combustion characteristics using biodiesel with carbon nanomaterials. *Fuel*, 288, 119665.

- Ganesan, S., & Devarajan, Y. (2021). Emission investigation of higher alcohol and biodiesel blends in constant speed diesel engine. *International Journal of Ambient Energy*, 42(1), 11-14.
- Ganesan, S., Padmanabhan, S., Mahalingam, S., & Shanjeevi, C. (2020). Environmental impact of VCR diesel engine characteristics using blends of cottonseed oil with nano additives. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(6), 761-772.
- Gavhane, R. S., Kate, A. M., Soudagar, M. E. M., Wakchaure, V. D., Balgude, S., Rizwanul Fattah, I. M., Fayaz, H., Yunus Khan, T. M., Mujtaba, M. A., Kumar, R. & Shahabuddin, M. (2021). Influence of silica nano-additives on performance and emission characteristics of soybean biodiesel fuelled diesel engine. *Energies*, 14(5), 1489.
- George, R. O., Franc, S., James, S. J., John, M., & Sebastian, G. (2015). An experimental analysis on synergetic effect of multiple nanoparticle blended diesel fuel on CI engine. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 1(12), 151-156.
- Ghafoori, M., Ghobadian, B., Najafi, G., Layeghi, M., Rashidi, A., & Mamat, R. (2015). Effect of nano-particles on the performance and emission of a diesel engine using biodiesel-diesel blend. *International Journal of Automotive & Mechanical Engineering*, 12, 3097-3108.
- Gumus, S., Ozcan, H., Ozbey, M., & Topaloglu, B. (2016). Aluminum oxide and copper oxide nanodiesel fuel properties and usage in a compression ignition engine. *Fuel*, 163, 80-87.
- Gürbüz, E. Y., Sözen, A., Variyenli, H. İ., Khanlari, A., & Tuncer, A. D. (2020). A comparative study on utilizing hybrid-type nanofluid in plate heat exchangers with different number of plates. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(10), 1-13.
- Gürel, A. E., Ağbulut, Ü., Ergün, A., & Ceylan, İ. (2020). Environmental and economic assessment of a low energy consumption household refrigerator. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(2), 365-372.
- Hamadi, A. S., & Khudhur, A. G. (2021). Performance and exhaust emissions in a diesel engine fuelled with a blend including ZnO nanoparticles and nano-emulsions. *Materials Science and Engineering*, 1067(1), 012114.
- Hasannuddin, A. K., Yahya, W. J., Sarah, S., Ithnin, A. M., Syahrullail, S., Sugeng, D. A., Razak, I. F. A., Abd Fatah, A. Y., Aqma, W. S., Rahman, A. H. A., & Ramlan, N. A. (2018). Performance, emissions and carbon deposit characteristics of diesel engine operating on emulsion fuel. *Energy*, 142, 496-506.
- Heydari-Maleney, K., Taghizadeh-Alisaraei, A., Ghobadian, B., & Abbaszadeh-Mayvan, A. (2017). Analyzing and evaluation of carbon nanotubes additives to diesohol-B2 fuels on performance and emission of diesel engines. *Fuel*, 196, 110-123.
- Hoseini, S. S., Najafi, G., Ghobadian, B., Ebadi, M. T., Mamat, R., & Yusaf, T. (2020). Biodiesels from three feedstock: The effect of graphene oxide (GO) nanoparticles diesel engine parameters fuelled with biodiesel. *Renewable Energy*, 145, 190-201.
- Hosseini, S. H., Taghizadeh-Alisaraei, A., Ghobadian, B., & Abbaszadeh-Mayvan, A. (2017). Effect of added alumina as nano-catalyst to diesel-biodiesel blends on

- performance and emission characteristics of CI engine. *Energy*, 124, 543-552.
- Hosseinzadeh, K., Moghaddam, M. E., Asadi, A., Mogharrebi, A. R., & Ganji, D. D. (2020). Effect of internal fins along with hybrid nano-particles on solid process in star shape triplex latent heat thermal energy storage system by numerical simulation. *Renewable Energy*, 154, 497-507.
- Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Khanali, M., Khalife, E., Shojaei, T. R., & Mohammadi, P. (2020). Consolidating emission indices of a diesel engine powered by carbon nanoparticle-doped diesel/biodiesel emulsion fuels using life cycle assessment framework. *Fuel*, 267, 117296.
- Huang, H., Huang, R., Guo, X., Pan, M., Teng, W., Chen, Y., & Li, Z. (2019). Effects of pine oil additive and pilot injection strategies on energy distribution, combustion and emissions in a diesel engine at low-load condition. *Applied Energy*, 250, 185-197.
- Işık, M. Z. (2021). Comparative experimental investigation on the effects of heavy alcohols-safflower biodiesel blends on combustion, performance and emissions in a power generator diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 184, 116142.
- Jaikumar, S., Srinivas, V., & Rajasekhar, M. (2021a). Influence of dispersant added nanoparticle additives with diesel-biodiesel blend on direct injection compression ignition engine: Combustion, engine performance, and exhaust emissions approach. *Energy*, 120197.
- Jaikumar, S., Srinivas, V., Prasad, V. V. S., Susmitha, G., Sravya, P., Sajala, A., & Jaswitha, L. (2021b). Experimental studies on the performance and emission parameters of a direct injection diesel engine fueled with nanoparticle-dispersed biodiesel blend. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 6(1), 1-17.
- Jiaqiang, E., Zhang, Z., Chen, J., Pham, M., Zhao, X., Peng, Q., & Yin, Z. (2018). Performance and emission evaluation of a marine diesel engine fueled by water biodiesel-diesel emulsion blends with a fuel additive of a cerium oxide nanoparticle. *Energy Conversion and Management*, 169, 194-205.
- Jobi, X. (2020). Performance and emission characteristics of diesel engine using watermelon seed oil methyl ester. *Journal of Biological Sciences*, 20(2), 88-93.
- Kadapure, S. A., Kadapure, P., Savadatti, A., Bhojvani, N., & Joshi, O. (2020). Experimental investigation on biodiesel production incorporating deep eutectic solvents. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy*, 173(4), 150-156.
- Kalaimurugan, K., Karthikeyan, S., Periyasamy, M., & Mahendran, G. (2020). Combustion studies on CI engine with cerium oxide nanoparticle added neochloris oleoabundans biodiesel-diesel fuel blends. *Materials Today: Proceedings*, 33(7), 2886-2889.
- Kalghatgi, G., Levinsky, H., & Colket, M. (2018). Future transportation fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 69, 103-105.
- Kao, M. J., Ting, C. C., Lin, B. F., & Tsung, T. T. (2008). Aqueous aluminum nanofluid combustion in diesel fuel. *Journal of Testing and Evaluation*, 36(2), 186-190.
- Karagoz, M., Uysal, C., Agbulut, U., & Saridemir, S. (2021). Exergetic and exergoeconomic analyses of a CI engine fueled with diesel-biodiesel blends containing various metal-oxide nanoparticles. *Energy*, 214, 118830.

- Keskin, A. (2019). Pamuk yağı metil esteri-eurodizel yakıt karışımlarının direkt püskürtmeli bir dizel motorunun yanma, performans ve emisyon karakteristiklerine etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(2), 915-928.
- Khan, H., Soudagar, M. E. M., Kumar, R. H., Safaei, M. R., Farooq, M., Khidmatgar, A., & Taqui, S. N. (2020). Effect of nano-graphene oxide and n-butanol fuel additives blended with diesel—Nigella sativa biodiesel fuel emulsion on diesel engine characteristics. *Symmetry*, 12(6), 961.
- Kirubakaran, M., & Selvan, V. A. M. (2018). A comprehensive review of low cost biodiesel production from waste chicken fat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 390-401.
- Kirubakaran, M., & Selvan, V. A. M. (2018). A comprehensive review of low cost biodiesel production from waste chicken fat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 390-401.
- Kodate, S. V., Yadav, A. K., & Kumar, G. N. (2020). Combustion, performance and emission analysis of preheated KOMÉ biodiesel as an alternate fuel for a diesel engine. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 141(6), 2335-2345.
- Kumar, D., & Singh, B. (2019). Algal biorefinery: An integrated approach for sustainable biodiesel production. *Biomass and Bioenergy*, 131, 105398.
- Kumar, R., & Sharma, A. (2016). Carbon footprint of an academic building—A case study. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4(3), 1-3.
- Kumar, S., Dinesha, P., & Bran, I. (2017). Influence of nanoparticles on the performance and emission characteristics of a biodiesel fuelled engine: An experimental analysis. *Energy*, 140, 98-105.
- Kumar, S., Dinesha, P., Ajay, C. M., & Kabbur, P. (2020). Combined effect of oxygenated liquid and metal oxide nanoparticle fuel additives on the combustion characteristics of a biodiesel engine operated with higher blend percentages. *Energy*, 197, 117194.
- Kursam, K., & Sudheer Prem Kumar, B. (2021). An experimental investigation on the performance and emission characteristics of karanja oil methyl ester blend B20 and hydrogen induction with dual-fuel mode direct injection diesel engine with variable compression ratio and injection operating pressure. *International Journal of Ambient Energy*, 42(4), 416-423.
- Lakshmi, R. V., Jaikumar, S., & Srinivas, V. (2021). A comprehensive review on the effect of nanoparticle dispersed diesel–biodiesel blends fuelled CI engine. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 1-11.
- Lee, J. Y., Lee, C. K., & Chun, Y. Y. (2020). Greenhouse gas emissions from high-speed rail infrastructure construction in Korea. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 87, 102514.
- Li, J. F., Ma, Z. Y., Zhang, Y. X., & Wen, Z. C. (2018). Analysis on energy demand and CO₂ emissions in China following the energy production and consumption revolution strategy and China dream target. *Advances in Climate Change Research*, 9(1), 16-26.
- Liang, J., Zhang, Q., Chen, Z., & Zheng, Z. (2021). The effects of EGR rates and ternary blends of biodiesel/n-pentanol/diesel on the combustion and emission characteristics of a CRDI diesel engine. *Fuel*, 286, 119297.

- Liang, Y., Niu, D., Wang, H., & Li, Y. (2017). Factors affecting transportation sector CO₂ emissions growth in China: An LMDI decomposition analysis. *Sustainability*, 9(10), 1730.
- Ma, Q., Zhang, Q., & Zheng, Z. (2021a). An experimental assessment on low temperature combustion using diesel/biodiesel/C2, C5 alcohol blends in a diesel engine. *Fuel*, 288, 119832.
- Ma, Q., Zhang, Q., Liang, J., & Yang, C. (2021b). The performance and emissions characteristics of diesel/biodiesel/alcohol blends in a diesel engine. *Energy Reports*, 7, 1016-1024.
- Maawa, W. N., Mamat, R., Najafi, G., & De Goey, L. P. H. (2020). Performance, combustion, and emission characteristics of a CI engine fueled with emulsified diesel-biodiesel blends at different water contents. *Fuel*, 267, 117265.
- Mahalingam, S., & Ganesan, S. (2020). Effect of nano-fuel additive on performance and emission characteristics of the diesel engine using biodiesel blends with diesel fuel. *International Journal of Ambient Energy*, 41(3), 316-321.
- Mahmood, A. S., Qatta, H. I., Al-Nuzal, S. M., & Abed, T. K. (2020). Characteristics of exhaust emissions for a diesel engine fuelled by corn oil biodiesel and blended with diesel fuel. *Engineering and Technology Journal*, 38(3A), 457-464.
- Manigandan, S., Sarweswaran, R., Devi, P. B., Sohret, Y., Kondratiev, A. Venkatesh, S., & Joshua, J. J. (2020). Comparative study of nanoadditives TiO₂, CNT, Al₂O₃, CuO and CeO₂ on reduction of diesel engine emission operating on hydrogen fuel blends. *Fuel*, 262, 116336.
- Marlina, E., Nanlohy, H. Y., Puja, I. G. K., & Riupassa, H. (2021). Droplet combustion behavior of crude palm oil-carbon nanoparticles blends. *Materials Science and Engineering*, 1034(1), 012039).
- Mehta, R. N., Chakraborty, M., & Parikh, P. A. (2014). Nanofuels: Combustion, engine performance and emissions. *Fuel*, 120, 91-97.
- Mei, D., Li, X., Wu, Q., & Sun, P. (2016). Role of cerium oxide nanoparticles as diesel additives in combustion efficiency improvements and emission reduction. *Journal of Energy Engineering*, 142(4), 04015050.
- Mei, D., Zuo, L., Adu-Mensah, D., Li, X., & Yuan, Y. (2019). Combustion characteristics and emissions of a common rail diesel engine using nanoparticle-diesel blends with carbon nanotube and molybdenum trioxide. *Applied Thermal Engineering*, 162, 114238.
- Mousavi, S. B., & Heris, S. Z. (2020). Experimental investigation of ZnO nanoparticles effects on thermophysical and tribological properties of diesel oil. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(43), 23603-23614.
- Mujtaba, M. A., Kalam, M. A., Masjuki, H. H., Gul, M., Soudagar, M. E. M., Ong, H. C., & Yusoff, M. (2020). Comparative study of nanoparticles and alcoholic fuel additives-biodiesel-diesel blend for performance and emission improvements. *Fuel*, 279, 118434.
- Yuan, C., Feng, H., & He, Y. (2017). An experimental research on the combustion and heat release characteristics of a free-piston diesel engine generator. *Fuel*, 188, 390-400.

- Precht, P., Dorer, F., Mayinger, F., Vogel, C., & Schnurbein, V. (1998). Hydrogen CI large bore four stroke engine: Ignition and combustion process analyzed with high speed optical measurement systems. *Hydrogen Energy Progress*, 2, 1425-1436.
- Ma, Y., Huang, R., Huang, S., Zhang, Y., Xu, S., & Wang, Z. (2017). Experimental investigation on the effect of n-pentanol blending on spray, ignition and combustion characteristics of waste cooking oil biodiesel. *Energy Conversion and Management*, 148, 440-455.
- Naik, V., & Kumar, K. K. (2018). Performance and emission characteristics of diesel engines with Al₂O₃ and CuO nanoparticles as additives. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 9(2), 791-798.
- Nair, J., Prasad Kumar, P., Thakur, A. K., Samhita, & Aravinda. (2021). Influence on emissions and performance of CI engine with graphene nanoparticles blended with Karanja biodiesel. *AIP Conference Proceedings*, 2317(1), 020017.
- Najjar, R., Zarei-Gharehbab, L., & Tazerout, M. (2021). The exhaust emission characteristics of a water-emulsified diesel/sunflower oil blend fuel by ionic liquid surfactants. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-10.
- Nanthagopal, K., Ashok, B., Tamilarasu, A., Johny, A., & Mohan, A. (2017). Influence on the effect of zinc oxide and titanium dioxide nanoparticles as an additive with Calophyllum inophyllum methyl ester in a CI engine. *Energy Conversion and Management*, 146, 8-19.
- Nanthagopal, K., Kishna, R. S., Atabani, A. E., Ala'a, H., Kumar, G., & Ashok, B. (2020). A compressive review on the effects of alcohols and nanoparticles as an oxygenated enhancer in compression ignition engine. *Energy Conversion and Management*, 203, 112244.
- Nour, M., El-Seesy, A. I., Abdel-Rahman, A. K., & Bady, M. (2018). Influence of adding aluminum oxide nanoparticles to diesterol blends on the combustion and exhaust emission characteristics of a diesel engine. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 98, 634-644.
- Nutakki, P. K., & Gugulothu, S. K. (2021). Influence of the effect of nanoparticle additives blended with mahua methyl ester on performance, combustion, and emission characteristics of CRDI diesel engine. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-12.
- Omonhinmin, C. A., Olomukoro, E., Ayoola, A. A., & Egwim, E. (2020). Utilization of Moringa oleifera oil for biodiesel production: A systematic review. *AIMS Energy*, 8(1), 102-121.
- Ozgun, T., Tuccar, G., Uludamar, E., Yilmaz, A. C., Güngör, C., Ozcanli, M., & Aydin, K. (2015). Effect of nanoparticle additives on NO_x emissions of diesel fuelled compression ignition engine. *International Journal of Global Warming*, 7(4), 487-498.
- Önsezen, A., & Çanakçı, M. (2009). Atık palmye ve kanola yağı metil esterlerinin kullanıldığı direkt püskürtmeli bir dizel motorda performans ve yanma. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24(2), 275-284.
- Örs, I., Sarıkoç, S., Atabani, A. E., Ünal, S., Sebahattin., & Akansu, S. O. (2018). The effects on performance, combustion and emission characteristics of DICI engine fuelled with TiO₂ nanoparticles addition in diesel/biodiesel/n-butanol blends. *Fuel*,

- 234, 177-188.
- Özaytürk, G., & Alper, A. E. (2017). Petrol ithalatının cari açık üzerine etkisi: OECD ülkeleri üzerine bir analiz. *Ankara Üniversitesi Siyasal Bilgiler Fakültesi Dergisi*, 72(3), 513-524.
- Özgür, C. Influence of NiFe₂O₄ and Zn_{0.5}Ni_{0.5}Fe₂O₄ nanoparticles on exhaust emissions of 4 stroke-6 cylinders turbocharged diesel engine. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 10(1), 42-49.
- Öztürk, E., Can, Ö., Usta, N., & Yücesu, H. S. (2020). Effects of retarded fuel injection timing on combustion and emissions of a diesel engine fueled with canola biodiesel. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(6), 1466-1475.
- Padmanabhan, S., Rajasekar, S., Ganesan, S., Saravanan, S., & Chandrasekaran, M. (2017). performance and emission analysis on CI engine using Soapnut oil as biofuel. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(8), 2491-95.
- Pan, M., Wang, Y., Qian, W., Wu, C., Huang, H., Li, H., & Zhou, X. (2021). Experimental and numerical study on flow, combustion and emission characteristics of CI engine fueled with n-butanol/diesel blends under post-injection strategy. *Fuel*, 292, 120267.
- Pandian, A. K., Ramakrishnan, R. B. B., & Devarajan, Y. (2017). Emission analysis on the effect of nanoparticles on neat biodiesel in unmodified diesel engine. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(29), 23273-23278.
- Patnaik, P. P., Jena, S. P., Acharya, S. K., & Das, H. C. (2017). Effect of FeCl₃ and diethyl ether as additives on compression ignition engine emissions. *Sustainable Environment Research*, 27(3), 154-161.
- Perumal, V., & Ilangkumaran, M. (2018). The influence of copper oxide nano particle added pongamia methyl ester biodiesel on the performance, combustion and emission of a diesel engine. *Fuel*, 232, 791-802.
- Prabakaran, B., & Udhoji, A. (2016). Experimental investigation into effects of addition of zinc oxide on performance, combustion and emission characteristics of diesel-biodiesel-ethanol blends in CI engine. *Alexandria Engineering Journal*, 55(4), 3355-3362.
- 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.
- Prabu, A., & Anand, R. B. (2016). Emission control strategy by adding alumina and cerium oxide nano particle in biodiesel. *Journal of the Energy Institute*, 89(3), 366-372.
- Prakash, T., Geo, V. E., Martin, L. J., & Nagalingam, B. (2019). Evaluation of pine oil blending to improve the combustion of high viscous (castor oil) biofuel compared to castor oil biodiesel in a CI engine. *Heat and Mass Transfer*, 55(5), 1491-1501.
- Rabbi, H. M. F., & Sahin, A. Z. (2021). Performance improvement of solar still by using hybrid nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143(2), 1345-1360.
- Radhakrishnan, S., Munuswamy, D. B., Devarajan, Y., & Mahalingam, A. (2018). Effect of nanoparticle on emission and performance characteristics of a diesel engine fueled with cashew nut shell biodiesel. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 40(20), 2485-2493.

- Raj, N. M., Gajendiran, M., Pitchandi, K., & Nallusamy, N. (2016). Investigation on aluminium oxide nano particles blended diesel fuel combustion, performance and emission characteristics of a diesel engine. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 8(3), 246-257.
- Raju, C. S. K., Upadhyaya, S. M., & Seth, D. (2020). Thermal convective conditions on MHD radiated flow with suspended hybrid nanoparticles. *Microsystem Technologies*, 1-10.
- Ramesh, P., Vivekanandan, S., & Prakash, D. (2021). Performance optimization of an engine for canola oil blended diesel with Al₂O₃ nanoparticles through single and multi-objective optimization techniques. *Fuel*, 288, 119617.
- Rastogi, P. M., Kumar, N., Sharma, A., Vyas, D., & Gajbhiye, A. (2020). Sustainability of aluminium oxide nanoparticles blended mahua biodiesel to the direct injection diesel engine performance and emission analysis. *Pollution*, 6(1), 25-33.
- Rastogi, P. M., Sharma, A., & Kumar, N. (2021). Effect of CuO nanoparticles concentration on the performance and emission characteristics of the diesel engine running on jojoba (*Simmondsia Chinensis*) biodiesel. *Fuel*, 286, 119358.
- Reddy, S. N. K., & Wani, M. M. (2020). A comprehensive review on effects of nanoparticles-antioxidant additives-biodiesel blends on performance and emissions of diesel engine. *Applied Science and Engineering Progress*, 13(4), 285-298.
- Sajeevan, A. C., & Sajith, V. (2016). Synthesis of stable cerium zirconium oxide nanoparticle–diesel suspension and investigation of its effects on diesel properties and smoke. *Fuel*, 183, 155-163.
- Sajith, V., Sobhan, C. B., & Peterson, G. P. (2010). Experimental investigations on the effects of cerium oxide nanoparticle fuel additives on biodiesel. *Advances in Mechanical Engineering*, 2, 581407.
- Saleh, H. E. (2021). Performance and emissions characteristics of direct injection diesel engine fueled by diesel-jojoba oil-butanol blends with hydrogen peroxide. *Fuel*, 285, 119048.
- Saravanan, A., Murugan, M., Reddy, M. S., & Parida, S. (2020). Performance and emission characteristics of variable compression ratio CI engine fueled with dual biodiesel blends of Rapeseed and Mahua. *Fuel*, 263, 116751.
- Sarıdemir, S., Yıldız, G., & Hanedar, E. (2021). Effect of diesel-biodiesel-methanol blends on performance and combustion characteristics of diesel engine. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(1), 189-201.
- Sathyamurthy, R., Balaji, D., Gorjian, S., Muthiya, S. J., Bharathwaaj, R., Vasanthaseelan, S., & Essa, F. A. (2021). Performance, combustion and emission characteristics of a DI-CI diesel engine fueled with corn oil methyl ester biodiesel blends. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 43, 100981.
- Saxena, V., Kumar, N., & 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.
- Saxena, V., Kumar, N., & Saxena, V. K. (2019). Multi-objective optimization of modified nanofluid fuel blends at different TiO₂ nanoparticle concentration in diesel engine: Experimental assessment and modeling. *Applied Energy*, 248, 330-353.

- Selvabharathi, R., Selvam, M., & Palani, S. K. (2020). Investigation of performance, combustion, and emission characteristics of diesel engine equipped with exhaust gas recirculation using ceria and zirconia nanoparticles-blended rice bran biodiesel. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-19.
- Selvan, V. A. M., Anand, R. B., & Udayakumar, M. (2009). Effects of cerium oxide nanoparticle addition in diesel and diesel-biodiesel-ethanol blends on the performance and emission characteristics of a CI engine. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(7), 1819-6608.
- Selvaraj, K., & Thangavel, M. (2021). The experimental study on the performance, combustion and emission characteristics of a diesel engine using diesel–biodiesel–diethyl ether blends. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 43(2), 145-159.
- Shaafi, T., & Velraj, R. (2015). Influence of alumina nanoparticles, ethanol and isopropanol blend as additive with diesel–soybean biodiesel blend fuel: Combustion, engine performance and emissions. *Renewable Energy*, 80, 655-663.
- Sharma, A. K., Singh, R. K., Tiwari, A. K., Dixit, A. R., & Katiyar, J. K. (2020). Rheological behaviour of hybrid nanofluids: A review. *Tribology in Materials and Applications*, 77-94.
- Shirneshan, A., Bagherzadeh, S. A., Najafi, G., Mamat, R., & Mazlan, M. (2021). Optimization and investigation the effects of using biodiesel-ethanol blends on the performance and emission characteristics of a diesel engine by genetic algorithm. *Fuel*, 289, 119753.
- Sim, H. S., Plascencia, M. A., Vargas, A., Bennewitz, J. W., Smith, O. I., & Karagozian, A. R. (2018). Effects of inert and energetic nanoparticles on burning liquid ethanol droplets. *Combustion Science and Technology*, 191(7), 1079-1100.
- Simsek, S., & Uslu, S. (2020a). Comparative evaluation of the influence of waste vegetable oil and waste animal oil-based biodiesel on diesel engine performance and emissions. *Fuel*, 280, 118613.
- Simsek, S., & Uslu, S. (2020b). Investigation of the impacts of gasoline, biogas and LPG fuels on engine performance and exhaust emissions in different throttle positions on SI engine. *Fuel*, 279, 118528.
- Singh, V. K., Ansari, N. A., & Arora, A. (2021). A review of CI engine performance and emissions with graphene nanoparticle additive in diesel and biodiesel blends. *Advances in Manufacturing and Industrial Engineering*, 1065-1072.
- Sivakumar, M., Sundaram, N. S., & Thasthagir, M. H. S. (2018). Effect of aluminium oxide nanoparticles blended pongamia methyl ester on performance, combustion and emission characteristics of diesel engine. *Renewable Energy*, 116, 518-526.
- Solak, A. O. (2013). Türkiye’de ulaştırma sektörü enerji tüketiminin azaltılması: bir senaryo yaklaşımı. *International Journal of Economic & Social Research*, 9(1), 125-141.
- Soudagar, M. E. M., Mujtaba, M. A., Safaei, M. R., Afzal, A., Ahmed, W., Banapurmath, N. R., & Taqui, S. N. (2021). Effect of Sr@ ZnO nanoparticles and Ricinus communis biodiesel-diesel fuel blends on modified CRDI diesel engine characteristics. *Energy*, 215, 119094.
- Soudagar, M. E. M., Nik-Ghazali, N. N., Kalam, M. A., Badruddin, I. A., Banapurmath,

- N., Khan, T. Y., & Afzal, A. (2019). The effects of graphene oxide nanoparticle additive stably dispersed in dairy scum oil biodiesel-diesel fuel blend on CI engine: performance, emission and combustion characteristics. *Fuel*, 257, 116015.
- Srinidhi, C., & Madhusudhan, A. (2017). A diesel engine performance investigation fuelled with nickel oxide nano fuel-methyl ester. *International Journal of Renewable Energy Research*, 7(2), 676-681.
- Srinidhi, C., Madhusudhan, A., & Channapattana, S. V. (2019). Effect of NiO nanoparticles on performance and emission characteristics at various injection timings using biodiesel-diesel blends. *Fuel*, 235, 185-193.
- Srinivasan, S. K., Kuppasamy, R., & Krishnan, P. (2021). Effect of nanoparticle-blended biodiesel mixtures on diesel engine performance, emission, and combustion characteristics. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-17.
- Suhel, A., Rahim, N. A., Rahman, M. R. A., & Ahmad, K. A. B. (2021). Engine's behaviour on magnetite nanoparticles as additive and hydrogen addition of chicken fat methyl ester fuelled DICI engine: A dual fuel approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(27), 14824-14843.
- Sundaram, D., Geng, L., Li, S., Xiao, Y., Chen, H., Chen, X., & Ma, Y. (2021). Influence of the addition of titanium oxide nanoparticles to Fischer-Tropsch diesel synthesised from coal on the combustion characteristics and particulate emission of a diesel engine. *Process Safety and Environmental Protection*, 145, 411-424.
- Sunil, S., Prasad, B. C., & Kakkeri, S. (2021). Studies on titanium oxide nanoparticles as fuel additive for improving performance and combustion parameters of CI engine fueled with biodiesel blends. *Materials Today: Proceedings*, 44, 489-499.
- Suwanmanee, U., Bangjang, T., Kaewchada, A., & Jaree, A. (2020). Greenhouse gas emissions and energy assessment of modified diesohol using cashew nut shell liquid and biodiesel as additives. *Sustainable Production and Consumption*, 24, 232-253.
- Şanlı, B. G., Uludamar, E., & Özcanlı, M. (2019). Evaluation of energetic-exergetic and sustainability parameters of biodiesel fuels produced from palm oil and opium poppy oil as alternative fuels in diesel engines. *Fuel*, 258, 116116.
- Şen, M. (2019). The effect of the injection pressure on single cylinder diesel engine fueled with propanol–diesel blend. *Fuel*, 254, 115617.
- Tanvir, S., & Qiao, L. (2015). Effect of addition of energetic nanoparticles on droplet-burning rate of liquid fuels. *Journal of Propulsion and Power*, 31(1), 408-415.
- Taufiq-Yap, Y. H., Farabi, M. A., Syazwani, O. N., Ibrahim, M. L., & Marliza, T. S. (2020). Sustainable Production of Bioenergy. İçinde *Innovations in Sustainable Energy and Cleaner Environment* (ss. 541-561). Singapur: Springer International Publishing.
- Tewari, P., Doijode, E., Banapurmath, N. R., & Yaliwal, V. S. (2013). Experimental investigations on a diesel engine fuelled with multiwalled carbon nanotubes blended biodiesel fuels. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(3), 72-76.
- Thangaraj, S., & Govindan, N. (2018). Evaluating combustion, performance and emission characteristics of diesel engine using karanja oil methyl ester biodiesel blends enriched with HHO gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(12), 6443-6455.

- Thapa, S., Indrawan, N., & Bhoi, P. R. (2018). An overview on fuel properties and prospects of Jatropha biodiesel as fuel for engines. *Environmental Technology & Innovation*, 9, 210-219.
- Thiyagarajan, S., Sonthalia, A., Geo, V. E., Prakash, T., Karthickeyan, V., Ashok, B., & Dhinesh, B. (2020). Effect of manifold injection of methanol/n-pentanol in safflower biodiesel fuelled CI engine. *Fuel*, 261, 116378.
- Tyagi, H., Phelan, P. E., Prasher, R., Peck, R., Lee, T., Pacheco, J. R., & Arentzen, P. (2008). Increased hot-plate ignition probability for nanoparticle-laden diesel fuel. *Nano letters*, 8(5), 1410-1416.
- Uluer, O., Karaağaç, İ., Aktaş, M., Durmuş, G., Ağbulut, Ü., Khanlari, A., & Çelik, D. N. (2018). Genleştirilmiş perlitin ısı yalıtım teknolojilerinde kullanılabilirliğinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(1), 36-42.
- Uyumaz, A. (2018). Combustion, performance and emission characteristics of a DI diesel engine fueled with mustard oil biodiesel fuel blends at different engine loads. *Fuel*, 212, 256-267.
- Vali, R. H., & Wani, M. M. (2020). Optimal utilization of ZnO nanoparticles blended diesel-water emulsion by varying compression ratio of a VCR diesel engine. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), 103884.
- Vellaiyan, S. (2019). Enhancement in combustion, performance, and emission characteristics of a diesel engine fueled with diesel, biodiesel, and its blends by using nanoadditive. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(10), 9561-9573.
- Vellaiyan, S. (2020). Combustion, performance and emission evaluation of a diesel engine fueled with soybean biodiesel and its water blends. *Energy*, 201, 117633.
- Vellaiyan, S., & Partheeban, C. A. (2020). Combined effect of water emulsion and ZnO nanoparticle on emissions pattern of soybean biodiesel fuelled diesel engine. *Renewable Energy*, 149, 1157-1166.
- Vellaiyan, S., Subbiah, A., & Chockalingam, P. (2018). Combustion, performance, and emission analysis of diesel engine fueled with water-biodiesel emulsion fuel and nanoadditive. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(33), 33478-33489.
- Vellaiyan, S., Subbiah, A., & Chockalingam, P. (2020). Effect of titanium dioxide nanoparticle as an additive on the exhaust characteristics of diesel-water emulsion fuel blends. *Petroleum Science and Technology*, 38(3), 194-202.
- Venkatesan, S. P., Kadiresh, P. N., Beemkumar, N., & Jeevahan, J. (2019). Combustion, performances, and emissions characteristics of diesel engine fuelled with diesel-aqueous zinc oxide nanofluid blends. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-15.
- Venkatesan, V., Nallusamy, N., & Nagapandiselvi, P. (2021). Performance and emission analysis on the effect of exhaust gas recirculation in a tractor diesel engine using pine oil and soapnut oil methyl ester. *Fuel*, 290, 120077.
- Venu, H. (2019). An experimental assessment on the influence of fuel-borne additives on ternary fuel (diesel–biodiesel–ethanol) blends operated in a single cylinder diesel engine. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(14), 14660-14672.
- Venu, H., & Appavu, P. (2020). Al₂O₃ nano additives blended Polanga biodiesel as a potential alternative fuel for existing unmodified DI diesel engine. *Fuel*, 279,

- 118518.
- Venu, H., & Madhavan, V. (2016). Effect of Al₂O₃ nanoparticles in biodiesel-diesel-ethanol blends at various injection strategies: Performance, combustion and emission characteristics. *Fuel*, *186*, 176-189.
- Venu, H., Raju, V. D., Lingesan, S., & Soudagar, M. E. M. (2021). Influence of Al₂O₃ nano additives in ternary fuel (diesel-biodiesel-ethanol) blends operated in a single cylinder diesel engine: Performance, combustion and emission characteristics. *Energy*, *215*, 119091.
- Verma, S., Das, L. M., Kaushik, S. C., & Bhatti, S. S. (2019). The effects of compression ratio and EGR on the performance and emission characteristics of diesel-biogas dual fuel engine. *Applied Thermal Engineering*, *150*, 1090-1103.
- Vigneswaran, R., Balasubramanian, D., & Sastha, B. S. (2021). Performance, emission and combustion characteristics of unmodified diesel engine with titanium dioxide (TiO₂) nano particle along with water-in-diesel emulsion fuel. *Fuel*, *285*, 119115.
- Villarante, N. R., & Ibarrientos, C. H. (2021). Physicochemical Characterization of Candlenut (Aleurites moluccana)-derived Biodiesel Purified with Deed Eutectic Solvents. *Journal of Oleo Science*, *70*(1), 113-123.
- Wei, J., Yin, Z., Wang, C., Lv, G., Zhuang, Y., Li, X., & Wu, H. (2021). Impact of aluminium oxide nanoparticles as an additive in diesel-methanol blends on a modern DI diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, *185*, 116372.
- Yang, V., & Yetter, R. A. (2017). Metal-based nanoenergetic materials: synthesis, properties, and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, *61*, 293-365.
- Yaşar, A., Keskin, A., Yıldızhan, Ş., & Uludamar, E. (2019). Emission and vibration analysis of diesel engine fuelled diesel fuel containing metallic based nanoparticles. *Fuel*, *239*, 1224-1230.
- Yesilyurt, M. K. (2019). The effects of the fuel injection pressure on the performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with waste cooking oil biodiesel-diesel blends. *Renewable Energy*, *132*, 649-666.
- Yesilyurt, M. K., Aydın, M., Yilbasi, Z., & Arslan, M. (2020). Investigation on the structural effects of the addition of alcohols having various chain lengths into the vegetable oil-biodiesel-diesel fuel blends: An attempt for improving the performance, combustion, and exhaust emission characteristics of a compression ignition engine. *Fuel*, *269*, 117455.
- Yeşilyurt, M. K. (2018). 'Biyodizel-Dizel Yakıt Karışımlarına Farklı Alkol İlavelerinin Dizel Motorlarda Performans, Yanma ve Emisyon Karakteristiklerine Etkilerinin İncelenmesi', Doktora Tezi. Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yozgat, Türkiye.
- Yetter, R. A., Risha, G. A., & Son, S. F. (2009). Metal particle combustion and nanotechnology. *Proceedings of the Combustion Institute*, *32*(2), 1819-1838.
- Yusoff, M. H. M., Ayoub, M., Jusoh, N., & Abdullah, A. Z. (2020). The challenges of a biodiesel implementation program in Malaysia. *Processes*, *8*(10), 1244.
- Zhang, Q., Yang, C., & Li, Y. (2021). Effects of ethanol, n-butanol, and n-pentanol addition to diesel fuel on combustion and emission characteristics in a common-rail

diesel engine with exhaust-gas recirculation. *Journal of Energy Engineering*, 147(1), 04020086.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ümit AĞBULUT

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Makine Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2021
Y. Lisans	İmalat Mühendisliği	Gazi Üniversitesi	2018
Lisans	Makine Mühendisliği	Selçuk Üniversitesi	2015
Lise	Fen Bilimleri	Şevket Sabancı Lisesi	2009