



**T.C.  
BATMAN ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**GRAFEN OKSİT NANOPARTİKÜL KATKILI BİYODİZEL-DİZEL  
YAKIT KARIŞIMLARININ MOTOR PERFORMANSI VE  
EMİSYONLARINA ETKİSİNİN DENEYSEL  
İNCELENMESİ**

**Mehmet Şirin SAYAR**

**Kasım-2025  
BATMAN**

T.C.  
BATMAN ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GRAFEN OKSİT NANOPARTİKÜL KATKILI BİYODİZEL-DİZEL  
YAKIT KARIŞIMLARININ MOTOR PERFORMANSI VE  
EMİSYONLARINA ETKİSİNİN DENEYSEL  
İNCELENMESİ

Mehmet Şirin SAYAR

Danışman  
Dr. Öğr. Üyesi Umut ERCAN

Diğer Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Cihad  
Fidan

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet  
Ali KALLIOĞLU

Kasım-2025  
BATMAN

## TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet Şirin SAYAR tarafından hazırlanan ‘‘Grafen Oksit Nanopartikül Katkılı Biyodizel-Dizel Yakıt Karışımlarının Motor Performansı ve Emisyonlarına Etkisinin Deneysel İncelenmesi’’ adlı tez çalışması 27/11/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliğı ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Cihad FİDAN

.....

#### Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Umut ERCAN

.....

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali KALLIOĞLU

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr.Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

Bu tez çalışması BTÜBAP tarafından BTÜBAP-2023-BMYO-02 nolu proje ile desteklenmiştir.

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Mehmet Şirin SAYAR

Tarih:27.11.2025

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

# GRAFEN OKSİT NANOPARTİKÜL KATKILI BİYODİZEL- DİZEL YAKIT KARIŞIMLARININ MOTOR PERFORMANSI VE EMİSYONLARINA ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

**Mehmet Şirin SAYAR**

**Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Yenilenebilir Enerji Sistemleri Ana Bilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Umut ERCAN**

**2025, 52 Sayfa**

Bu çalışmada, grafen oksit (GO) nanopartikül katkı B20 biyodizel yakıtının bir dizel motorun yanma karakteristiği, egzoz emisyonları ve yakıt tüketimi üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, baz dizel yakıt referans alınarak 25 ppm, 50 ppm, 75 ppm ve 100 ppm grafen nano partikül katkı oranları ile farklı motor yükleri altında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, grafen nano partikül katkısının yanma sürecini iyileştirdiğini ve silindir içi maksimum basınç değerlerinde baz dizel yakıtla yaklaşık %3–8 oranında artış sağladığını göstermiştir. Egzoz emisyonları açısından, grafen katkıli yakıtlarda karbon monoksit (CO) ve duman koyuluğu (is) emisyonlarında sırasıyla %15–30 ve %20–35 aralığında azalmalar elde edilmiştir. Hidrokarbon (HC) emisyonlarının katkı oranına bağlı olarak değişim gösterdiği, yüksek grafen katkı oranlarında daha düşük HC değerlerinin ölçüldüğü belirlenmiştir. Azot oksitler (NO<sub>x</sub>) emisyonlarında ise iyileşen yanma koşullarına bağlı olarak %5–10 aralığında sınırlı artışlar gözlemlenmiştir. Yakıt tüketimi analizleri, grafen nano partikül katkısının biyodizelin yakıt ekonomisi üzerindeki olumsuz etkisini kısmen telafi edebildiğini ortaya koymuştur. Özellikle 100 ppm grafen katkıli yakıtta özgül yakıt tüketimi değerlerinde yaklaşık %4–7 oranında iyileşme sağlanmıştır. Sonuç olarak, uygun grafen nano partikül konsantrasyonlarının seçilmesi durumunda, grafen katkıli biyodizel yakıtların dizel motorlarda çevresel ve performans açısından uygulanabilir bir alternatif olabileceği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:**B20 biyodizel, dizel motor, egzoz emisyonları, Grafen nano partikül, yanma analizi

## **ABSTRACT**

### **MS THESIS**

# **EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECTS OF GRAPHENE OXIDE NANOPARTICLE ADDED BIODIESEL–DIESEL FUEL BLENDS ON ENGINE PERFORMANCE AND EMISSIONS**

**Mehmet Şirin SAYAR**

**Batman University Graduate Education Institute**

**Department of Renewable Energy System**

**Advisor: Assist. Prof. Dr. Umut ERCAN**

**2025, 52 Pages**

In this study, the effects of graphene oxide (GO) nanoparticle-added B20 biodiesel fuel on combustion characteristics, exhaust emissions, and fuel consumption of a single-cylinder diesel engine were experimentally investigated. The experiments were conducted under different engine load conditions using base diesel fuel as a reference and GO concentrations of 25, 50, 75, and 100 ppm. The results revealed that the addition of GO nanoparticles enhanced the combustion process, resulting in an increase of approximately 3–8% in the maximum in-cylinder pressure compared to base diesel fuel. Significant reductions in carbon monoxide (CO) and smoke opacity emissions were observed, ranging between 15–30% and 20–35%, respectively. Hydrocarbon (HC) emissions decreased at higher nanoparticle concentrations. However, nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) emissions showed a moderate increase (5–10%) due to elevated in-cylinder temperatures associated with improved combustion. Fuel consumption analysis demonstrated that GO addition partially compensated for the lower calorific value of biodiesel. The 100 ppm GO-added B20 fuel exhibited a 4–7% improvement in specific fuel consumption (SFC). Overall, the findings indicate that GO nanoparticle-enhanced biodiesel blends demonstrate strong potential as alternative fuels for diesel engines in terms of combustion efficiency and emission reduction when optimal nanoparticle concentrations are selected.

**Keywords:** B20 biodiesel, diesel engine, exhaust emissions, combustion analysis, Graphene nanoparticle

## ÖN SÖZ

Bu çalışma, grafen oksit nanopartikül katkılı biyodizel–dizel yakıt karışımlarının motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerinin deneysel olarak incelenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Tez süreci boyunca karşılaşılan bilimsel ve teknik zorluklar, edinilen bilgi ve deneyimlerle birlikte bu çalışmanın hem akademik hem de kişisel açıdan önemli bir kazanım olmasını sağlamıştır.

Öncelikle, tez danışmanım Dr. Umut Ercan'a, çalışma süresince sunduğu değerli akademik rehberlik, yapıcı eleştiriler ve her aşamada gösterdiği destek için en içten teşekkürlerimi sunarım. Bilimsel bakış açısının gelişmesinde ve çalışmanın disiplinli bir şekilde ilerlemesinde katkıları son derece kıymetlidir.

Deneysel çalışmaların yürütülmesinde sağladıkları imkân ve desteklerden dolayı Batman Üniversitesi Beşiri Organize Sanayi Bölgesi Meslek Yüksekokulu'na ve Otomotiv Test ve Laboratuvarı'na teşekkür ederim. Laboratuvar altyapısı ve teknik destek, çalışmanın sağlıklı ve güvenilir bir şekilde tamamlanmasında önemli rol oynamıştır.

Ayrıca, tez süreci boyunca sabır, anlayış ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşime ve çocuklarıma teşekkür ederim. Gösterdikleri destek ve anlayış, bu çalışmanın tamamlanmasında en büyük motivasyon kaynaklarından biri olmuştur.

MEHMET ŞİRİN SAYAR  
BATMAN-2025

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>vii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>viii</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ</b> .....	<b>x</b>
<b>TABLolar LİSTESİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	<b>xii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>2</b>
2.1. Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı .....	<b>8</b>
<b>3. KURAMSAL TEMELLER</b> .....	<b>10</b>
3.1. İçten Yanmalı Motorlar .....	10
3.1.1. Dizel motorlar .....	11
3.2. Dizel Yakıt Özellikleri.....	12
3.3. Dizel Motorlarda Kullanılan Alternatif Yakıtlar .....	13
3.4. Dizel Motorlarda Kullanılan Alternatif Yakıt Katkıları .....	13
<b>4.MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>14</b>
4.1. Motor Test Düzenegi ve Ekipmanları.....	14
4.2. Emisyon Cihazının Özellikleri.....	15
4.3. Grafen Oksit Nano Partikülünün Yapısal Özellikleri .....	17
4.4. Yakıt Karışımlarının Hazırlanması .....	18
4.5. Ölçümü Yapılan Motor Performans Parametreleri .....	20
4.6. Ölçümü Yapılan Egzoz Emisyon Parametreleri .....	21
4.7. Belirsizlik Analizi .....	21
<b>5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA</b> .....	<b>24</b>
5.1. Test Yakıtlarının Motor Performans Analizleri.....	24
5.1.1. Silindir basıncı .....	24
5.1.2. Net ısı salınımı .....	28
5.1.3. Kümülatif ısı salınımı .....	33
5.1.4. Basınç artış oranı .....	38
5.2. Test Yakıtlarının Emisyon Analizleri .....	42
5.2.1. Azot oksitler (NO <sub>x</sub> ) (ppm) .....	43
5.2.2. Karbonmonoksit (CO) (%) .....	45
5.2.3. Hidrokarbon (HC) (ppm) .....	46

5.2.4. Duman koyuluğu (%).....	47
5.3. Yakıt Tüketimi ve Özgöl Yakıt Tüketimi (SFC).....	49
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>51</b>
6.1. Sonuçlar .....	51
6.2. Öneriler .....	52
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>53</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Motor test düzeneği .....	14
Şekil 2. Emisyon ölçüm cihazı .....	16
Şekil 3. Grafenoksit nano maddesinin SEM görüntüsü .....	17
Şekil 4. Hassas terazi (1), Manyetik karıştırıcı (2), Ultrasonik karıştırıcı (banyo) (3) ....	19
Şekil 5. Deney yakıtlarının görüntüsü .....	19
Şekil 6. 0.3 bar OEB göre krank açısına bağlı silindir basıncı değişimi (bar).....	25
Şekil 7. 1 bar OEB göre krank açısına bağlı silindir basıncı değişimi (bar).....	26
Şekil 8. 2 bar OEB göre krank açısına bağlı silindir basıncı değişimi (bar).....	27
Şekil 9. 3 bar OEB göre krank açısına bağlı silindir basıncı değişimi (bar).....	28
Şekil 10. 0.3 bar OEB göre krank açısına bağlı Net Isı Salınımı değişimi (J/der) .....	29
Şekil 11. 1 bar OEB göre krank açısına bağlı Net Isı Salınımı değişimi (J/der) .....	30
Şekil 12. 2 bar OEB göre krank açısına bağlı Net Isı Salınımı değişimi (J/der) .....	31
Şekil 13. 3 bar OEB göre krank açısına bağlı Net Isı Salınımı değişimi (J/der) .....	33
Şekil 14. 0.3 bar OEB göre krank açısına bağlı Kümülatif Isı Salınımı değişimi .....	35
Şekil 15. 1 bar OEB göre krank açısına bağlı Kümülatif Isı Salınımı değişimi .....	36
Şekil 16. 2 bar OEB göre krank açısına bağlı Kümülatif Isı Salınımı değişimi .....	37
Şekil 17. 3 bar OEB göre krank açısına bağlı Kümülatif Isı Salınımı değişimi .....	38
Şekil 18. 0.3 bar OEB göre krank açısına bağlı Basınç Artış Oranı değişimi (dp/d□) ..	39
Şekil 19. 1 bar OEB göre krank açısına bağlı Basınç Artış Oranı değişimi (dp/d□) .....	40
Şekil 20. 2 bar OEB göre krank açısına bağlı Basınç Artış Oranı değişimi (dp/d□) .....	41
Şekil 21. 3 bar OEB göre krank açısına bağlı Basınç Artış Oranı değişimi (dp/d□) .....	42
Şekil 22. NO <sub>x</sub> Emisyon Analizi .....	44
Şekil 23. CO Emisyon Analizi.....	45
Şekil 24. HC Emisyon Analizi.....	46
Şekil 25. Duman Koyuluğu .....	48
Şekil 26. Test Yakıtlarının Özgül Yakıt Tüketimi (kg/kWh) ile Ortalama Efektif Basıncı (OEB) değişimi .....	49

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 1. Deney motorunun teknik özellikleri.....	15
Tablo 2. Emisyon cihazı ölçüm teknik özellikleri.....	17
Tablo 3. Yakıtların fiziksel özellikleri.....	20
Tablo 4. Motor performans parametreleri.....	21
Tablo 5. Egzoz emisyon parametreleri.....	21
Tablo 6. Test cihazının ölçüm aralığı, belirsizliği analizi ve hesaplanan parametrelerin tablosu.....	22

## SİMGELER VE KISALTMALAR

P	Motor gücü (kW)
T	Motor torku (Nm)
BSFC	Fren özgül yakıt tüketimi (g/kWh)
$\eta$	Termal verimlilik (%)
EGT	Egzoz gazı sıcaklığı (°C)
P	Yakıt yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
C <sub>v</sub>	Alt ısı değer (kJ/kg)
$\Lambda$	Hava fazlalık katsayısı
BTE	Fren Termal Verimliliği
CI	Sıkıştırılmalı ateşlemeli motor (Compression Ignition)
SI	Kıvılcım ateşlemeli motor (Spark Ignition)
CNG	Sıkıştırılmış doğal gaz
LPG	Sıvılaştırılmış petrol gazı
GNP	Grafen nano maddesi
B10	%10 biyodizel + %90 dizel yakıt karışımı
B20	%20 biyodizel + %80 dizel yakıt karışımı
B30	%30 biyodizel + %70 dizel yakıt karışımı
B50	%50 biyodizel + %50 dizel yakıt karışımı
BSFC	Özgül yakıt tüketimi
CO	Karbon monoksit
GO	Grafen oksit
HC	Hidrokarbon
NO <sub>x</sub>	Azot oksitler
OEB	Ortalama efektif basınç
PM	Partikül madde
ppm	Milyonda bir (parts per million)

## 1. GİRİŞ

Enerji talebinin giderek arttığı günümüzde, fosil yakıt rezervlerinin azalması ve çevresel kaygılar, araştırmacıları alternatif ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönlendirmiştir. Dizel motorlar, yüksek verimlilikleri ve dayanıklılıkları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmekle birlikte, partikül madde (PM), NO<sub>x</sub>, CO ve HC gibi zararlı emisyonlar üretmektedir. Bu nedenle biyodizel gibi oksijenli yenilenebilir yakıtlar ve nano katkı maddeleri son yıllarda yoğun şekilde incelenmektedir.

Biyodizel, dizel motorlarda karışım halinde kullanıldığında yanmayı iyileştirir, kurum ve CO emisyonlarını azaltır. Ancak tek başına kullanıldığında özgül yakıt tüketimini artırabilir ve NO<sub>x</sub> emisyonlarını yükseltebilir. Bu sınırlamaları gidermek için karbon temelli nano malzemeler (örneğin Graphene Oxide, GO) katkıları arasında öne çıkmaktadır.

Biyodizel ve nano madde karışımları, günümüzde fosil yakıtların tükenme tehlikesi ve çevresel kirlilik faktörleri nedeniyle içten yanmalı motorlar için stratejik bir araştırma alanı haline gelmiştir. Biyodizelin yüksek viskozite, düşük oksidasyon kararlılığı ve artan azot oksit (NO<sub>x</sub>) emisyonları gibi dezavantajlarını gidermek amacıyla nano katkı maddeleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, %80 dizel – %20 biyodizel (B20) karışımına grafen nano katkısı ilavesinin dizel motorun yanma, performans ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, aynı motor ve deney düzeneğinde, 0,3, 1, 2 ve 3 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşullarında gerçekleştirilmiştir. Literatürde grafen ve grafen türevli nano katkıların dizel motorlar üzerindeki etkileri incelenmiş olsa da, B20 yakıtı tabanı üzerinde sistematik yük taraması ile optimum grafen katkı oranının belirlenmesine yönelik çalışmalar sınırlıdır. Bu tez çalışmasında, B20 yakıtı için farklı grafen katkı oranlarını karşılaştırarak optimum katkı seviyesini deneysel olarak ortaya koyması açısından literatüre özgün bir katkı sunmaktadır.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Biyodizel ve nanokarbon katkılarının dizel motor performansı ve emisyonlarına etkisi üzerine pek çok çalışma bulunmaktadır. Literatürde  $TiO_2$  ,  $Al_2 O_3$  ,  $CeO_2$  gibi metal oksit nanopartiküller yaygın olarak kullanılmış ve genellikle yanma veriminde artış, CO/HC emisyonlarında azalma rapor edilmiştir. Literatürde nano katkı maddelerinin düşük ve orta konsantrasyonlarda yanma ve emisyon karakteristiklerini iyileştirdiği, ancak yüksek katkı oranlarında aglomerasyon ve doyunluk etkileri nedeniyle bu iyileşmenin sınırlı kaldığı bildirilmektedir. Nano katkı maddeleri için optimum katkı oranının; yakıtın oksijen içeriği, viskozite ve uçuculuk özelliklerine bağlı olarak değiştiği, bu nedenle saf dizel ve biyodizel karışımları için farklı optimum katkı seviyelerinin ortaya çıkabildiği vurgulanmaktadır. Biyodizel içeren yakıt karışımlarının doğal oksijen içeriği, yanma sürecini desteklediğinden, bu tür yakıtlarda nano katkı maddelerinin daha düşük konsantrasyonlarda dahi etkin sonuçlar verebildiği rapor edilmiştir.

Son yıllarda karbon bazlı nanoyapılar (CNT, grafen, GO) üzerine yapılan çalışmalar öne çıkmaktadır. Hoang (2021), grafen oksit katkısının yakıt atomizasyonunu iyileştirdiğini ve HC ile duman emisyonlarını düşürdüğünü rapor etmiştir. Ojha ve Karmakar (2018), GO'nun yüzey fonksiyonel grupları sayesinde yanma reaksiyonlarını hızlandırarak silindir basıncı ve ısı salınımını artırabileceğini göstermiştir. Prabhu ve ark. (2015),  $TiO_2$  katkılı B20 yakıtta verim artışı ve emisyonlarda iyileşme elde etmişlerdir.

Alternatif yakıtlar ve nanoparçacık katkılarının dizel motor performansı ve emisyonlarına etkisi üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda artış göstermektedir. Özellikle biyodizel tabanlı yakıtların farklı katkılarla modifiye edilmesi, motor verimini artırma ve emisyonları azaltma noktasında önemli bulgular ortaya koymuştur.

Tan (2022), mangan katkılı biyodizel-dizel karışımlarının yanma karakteristiklerini incelemiş ve mangan ilavesi ile silindir basıncı ve ısı salınımının arttığını, aynı zamanda CO ve  $NO_x$  emisyonlarında belirgin azalmalar elde edildiğini rapor etmiştir. Benzer şekilde Kuşin (2022), biyodizel-dizel karışımlarına n-bütanol ve metanol ilavesini deneysel olarak incelemiş ve oksijen içeriği yüksek bu alkollerin yanmayı hızlandırarak CO ve HC emisyonlarını düşürdüğünü, fakat özgül yakıt tüketimini artırdığını göstermiştir.

Yıldız (2023), atık sanayi yağları ve plastiklerden elde edilen yakıtların dizel motorlarda kullanımını deneysel olarak incelemiş, elde edilen performans ve emisyon sonuçlarını Yapay Sinir Ağları (YSA) ile optimize etmiştir. Çalışmada atık bazlı yakıtların, dizel ile kıyaslandığında daha düşük emisyon değerleri sunduğu, ancak belirli oranlarda motor performansında düşüşler yaşandığı belirtilmiştir. Atık trafo yağı karışımlarının incelendiği çalışmada ise motor performans parametrelerinin dizel yakıtla kıyaslanabilir seviyede olduğu, egzoz emisyonlarının ise çevresel açıdan daha uygun değerlere düştüğü belirlenmiştir.

Alkol bazlı katkılar da geniş bir araştırma alanı oluşturmuştur. Kıvrak (2023), dizel-biyodizel-bütanol karışımlarında emisyon parametrelerini incelemiş, özellikle NO<sub>x</sub> ve CO emisyonlarında anlamlı azalmalar tespit etmiştir.

Tuncer (2023) ise dizel-pentanol karışımlarının etkilerini araştırmış ve en yüksek efektif verimin %5 pentanol katkılı yakıtta elde edildiğini, pentanol oranı arttıkça özgül yakıt tüketiminin yükseldiğini belirtmiştir.

Biyodizelin üretim yöntemleri de performans ve emisyon sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Söyler (2023), atık zeytinyağından ultrasonik yöntemle üretilen biyodizelin motor performansı üzerindeki etkilerini incelemiş ve ultrasonik transesterifikasyon yöntemiyle üretilen biyodizelin daha verimli yandığını, daha düşük CO ve HC emisyonları ürettiğini göstermiştir.

Karbon bazlı nanoyapıların kullanımı da son yıllarda önemli bir araştırma konusudur. Demirtaş (2023), biyodizel–n-oktanol karışımlarına nanoparçacık ilavesini incelemiş ve özellikle çok duvarlı karbon nanotüplerin (MWCNT) yanma verimini artırarak NO<sub>x</sub> emisyonlarında azalma sağladığını rapor etmiştir. Gökçe (2022) ise susam yağı/dizel karışımlarına grafen oksit ilavesini araştırmış ve katkının motor performansını iyileştirdiğini, özellikle is ve HC emisyonlarında kayda değer azalmalar sağladığını ortaya koymuştur.

Al-Gburi (2022), Fe<sub>3</sub> O<sub>4</sub> nanoparçacıkları ile desteklenmiş biyodizel-dizel karışımlarının performans ve emisyon parametrelerini incelemiş, 75 ppm nanoparçacık katkısının motorun termik verimini artırdığını, CO ve CO<sub>2</sub> emisyonlarını düşürdüğünü ve özellikle tam yük koşullarında özgül yakıt tüketimini azalttığını belirtmiştir.

Gümüş (2012), nano-yakıtların dizel motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkilerini incelemiş, Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub> ve CuO katkılı dizel yakıtlarının motor torkunu yaklaşık %4 artırdığını, egzoz emisyonlarını ise %12 azalttığını tespit etmiştir. Bu sonuç,

nanoparçacıkların yanma odasında atomizasyonu iyileştirerek daha homojen yanma sağladığını göstermektedir.

Soysal (2022), mısır yağından üretilen biyodizelin saf halde ve farklı oranlarda dizel ile karıştırılarak kullanımını incelemiş, B20–B50 arası karışımların özgül yakıt tüketimini artırırken CO ve is emisyonlarını önemli ölçüde azalttığını göstermiştir.

Yeşilyurt (2017), biyodizel–dizel karışımlarına farklı alkollerin (metanol, etanol, bütanol, pentanol) ilavesini incelemiş ve özellikle bütanol ve pentanol katkılarında yanmanın iyileştiğini, CO ve HC emisyonlarının azaldığını, ancak NO<sub>x</sub> değerlerinin kısmen arttığını rapor etmiştir. Benzer şekilde, Öztürk (2023), yüksek molekül ağırlıklı alkollerin (bütanol, pentanol, heksanol, oktanol) dizel-biyodizel karışımlarına ilavesini incelemiş, uzun zincirli alkollerin düşük buhar basıncı sayesinde daha kararlı bir yanma sağladığını, CO ve is emisyonlarını düşürdüğünü, fakat egzoz sıcaklığı ve NO<sub>x</sub> emisyonlarını artırdığını belirtmiştir.

Tosun (2018), biyodizel-alkol ve nanoparçacık katkılı yakıtların motor performansı ve emisyon parametrelerini Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) ile modellemiş, bu tekniklerin deneysel sonuçları yüksek doğrulukla tahmin edebildiğini ortaya koymuştur.

Çakmak (2014), biyodizel-dizel karışımlarının kullanıldığı tek silindirli bir motorda ekserji analizi uygulamış ve biyodizel oranı arttıkça ikinci yasa veriminin düştüğünü, ancak CO ve is emisyonlarının azaldığını göstermiştir. Bu durum, biyodizelin çevresel avantajlarını, fakat enerji verimliliğinde sınırlayıcı etkilerini ortaya koymaktadır.

Ağbulut ve ark. (2022), Grafen oksit (GO) nanopartiküllerinin atık yemeklik yağ metil esteri (WCO) ve dizel yakıt karışımıyla birlikte dizel motorun yanma, enjeksiyon, performans ve emisyon özellikleri üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Grafen Oksit Etkileri, GO nanopartiküllerinin eklenmesinin fren termal verimliliğini %7,90 artırdığını ve fren özgül yakıt tüketimini %9,72 azalttığını belirtmektedir. Yanma İyileştirme, GO nanopartiküllerinin oksijen tamponu ve katalizör görevi görerek daha eksiksiz yanmaya ve CO ve HC emisyonlarında azalmaya yol açtığını, aynı zamanda NO<sub>x</sub> emisyonlarını %15,17 oranında azalttığını açıklamaktadır.

Yadav ve ark. (2025), çalışmalarında, yakıt katkı maddesi olarak kullanılan grafen oksit (GO) nanoparçacıklarının sıkıştırma ateşlemeli bir motorun yanma, performans ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemektedir. Çalışma kapsamında dizel–biyodizel karışımı yakıtlara 20, 40 ve 60

ppm konsantrasyonlarında GO nanoparçacıkları ilave edilerek B20GO20, B20GO40 ve B20GO60 olarak adlandırılan üç farklı yakıt karışımı hazırlanmıştır. Deneyler sırasında silindir içi basınç, ısı salınım oranı (HRR), fren özgül yakıt tüketimi (FOYT), fren termal verimlilik (FTV), karbon monoksit (CO), yanmamış hidrokarbon (HC) ve azot oksit (NO<sub>x</sub>) gibi temel performans ve emisyon parametreleri ayrıntılı biçimde ölçülmüştür. Elde edilen bulgular, özellikle 40 ppm düzeyinde GO ilavesinin motor performansı ve emisyonları üzerinde en olumlu etkiyi sağladığını ortaya koymaktadır. Bu katkı oranında CO emisyonlarında maksimum %36,41, HC emisyonlarında %17,38 ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında %12,56 oranında azalma elde edilmiştir. GO nanoparçacıklarının yüksek yüzey alanı, oksijen içeriği ve ısıl iletkenlik özellikleri sayesinde yanma veriminin arttığı ve bunun emisyon parametrelerine olumlu yansıdığı değerlendirilmektedir. Sonuç olarak, GO katkılı biyodizel–dizel karışımlarının yanma süreçlerini iyileştirme, yakıt tüketimini optimize etme ve zararlı emisyonları azaltma potansiyeline sahip olduğu görülmüştür. Elde edilen veriler, bu tür nano katkılı karışımların herhangi bir motor modifikasyonuna ihtiyaç duymadan mevcut dizel motorlarda alternatif yakıt olarak uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Khan ve ark. (2020), tarafından yapılan çalışmada, *Nigella sativa* metil esterinden elde edilen biyodizel, dizel, n-butanol ve grafen oksit (GO) nanoparçacıklarından oluşan çok bileşenli bir nano-yakıt karışımının, modifiye edilmiş common-rail direkt enjeksiyonlu (CRDI) bir dizel motorun yanma, performans ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkilerini incelemektedir. Deneysel düzenekte simetrik toroidal tip yanma odası ve altı delikli solenoid tipi bir enjektör kullanılmıştır. Yapılan araştırmanın temel amacı, iki katkı maddesinin—n-butanol ve sentezlenmiş asimetrik grafen oksit nanoparçacıklarının—*Nigella sativa* biyodizelinin (NSME25) yakıt özelliklerini iyileştirmedeki etkilerini değerlendirmektir. Bu kapsamda n-butanol oranı sabit tutulmuş (%10) ve GO nanoparçacıkları ile SDBS yüzey aktif maddesi, NSME25–n-butanol karışımına farklı konsantrasyonlarda (30, 60, 90 ve 120 ppm) nanofluid formunda ilave edilmiştir. Nanoparçacıkların homojen dağılması ve aglomerasyonun önlenmesi için tüm nanoyakıt karışımları prob sonikasyon yöntemiyle hazırlanmıştır. Sonuçlar, özellikle 90 ppm GO içeren NSME25B10GO90 karışımının motor performansını belirgin şekilde iyileştirdiğini göstermiştir. Bu karışım, maksimum yük koşullarında fren termal veriminde (FTV) artış ve fren özgül yakıt tüketiminde (FOYT) azalma sağlamıştır. Bu iyileşme, GO nanoparçacıklarının yüksek katalitik aktivitesine ve yakıt içinde gelişen mikro-patlama (micro-explosion) mekanizmasının

atomizasyonu kuvvetlendirmesine bağlanmaktadır. Ayrıca bu karışımda ısı salınım oranı (HRR) ve silindir içi sıcaklık artarken, egzoz gazı sıcaklığı (EGT) azalmıştır. Emisyon sonuçları incelendiğinde, tüm nanoyakıt karışımlarının *Nigella sativa* biyodizeline kıyasla duman, hidrokarbon (HC), karbon monoksit (CO) ve karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonlarında azalma sağladığı görülmüştür. Ancak oksijenli yakıtların karakteristiğiyle uyumlu şekilde NO<sub>x</sub> emisyonlarında hafif bir artış meydana gelmiştir. Genel olarak, 90 ppm GO nanoparçacığı ve %10 n-butanol içeren NSME25 karışımının yanma ve performans açısından dizel yakıtla karşılaştırılabilir nitelik sunduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu bulgular, GO destekli nanoyakıtların dizel motorlarda uygulanabilir alternatif bir yakıt seçeneği olabileceğini göstermektedir.

Elkelawy ve ark. (2023), Atık kızartma yağlarından (WCO) üretilen biyodizelin nanoparçacık katkılarıyla zenginleştirilerek dizel motorlarda yakıt olarak kullanılması, son yıllarda umut vadeden bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Literatürdeki çalışmalar, alternatif yakıtların fosil dizel yakıtla kıyasla daha iyi yakıt özellikleri sağlayabildiğini; yanma, motor performansı ve emisyon karakteristiklerini iyileştirebildiğini göstermektedir. Bu çalışmada, farklı motor yükleri altında dizel motorun yanma, performans ve emisyon davranışlarını karşılaştırmak amacıyla üç farklı yakıt karışımı kullanılmıştır. Saf dizel (B0), %40 WCO biyodizel ve %60 dizel içeren B40 karışımı ile %40 WCO biyodizel, %56 dizel ve %4 toluen içeren karışımlara karbon nanotüp (CNT) veya grafen oksit (GO) nanoparçacıkları 50, 100 ve 150 ppm konsantrasyonlarında eklenerek elde edilen B40-CNT ve B40-GO nanoyakıtları test edilmiştir. Deneysel bulgular, nanoparçacık katkılı B40-CNT ve B40-GO karışımlarının, saf dizel veya katkısız B40 karışımına kıyasla farklı motor yüklerinde daha iyi yanma, performans ve emisyon değerleri sağladığını ortaya koymuştur. Bu iyileşme, nanoparçacıkların karışıma kazandırdığı daha yüksek buharlaşma hızı, artan oksijen içeriği, geniş yüzey alanı-hacim oranı ve gelişmiş ısı iletkenlik özellikleriyle ilişkilendirilmiştir. En yüksek silindir içi tepe basıncı 150 ppm GO içeren B40 karışımında 61 bar olarak ölçülmüştür. Maksimum motor yükünde fren termal verimliliği %43,6'ya ulaşmış olup en yüksek değer B40-150GO karışımında elde edilmiştir. Ayrıca saf dizel yakıtı ile 1240 ppm olarak kaydedilen NO<sub>x</sub> emisyonları, 150 ppm GO içeren B40 karışımıyla 884 ppm'e düşmüş; bu azalma daha düşük yanma sıcaklıkları ve daha kısa yanma süresiyle açıklanmıştır.

Gad ve ark. (2023,) Bu çalışmada, atık kızartma yağından (WCO) üretilen biyodizelin karbon nanotüpler (CNT) ve grafen nano levha (GNS) katkılarıyla

zenginleştirilerek dizel motorlarda yanma, performans ve emisyon karakteristiklerinin iyileştirilmesini amaçlamaktadır. Üretilen biyodizelin yakıt özellikleri ASTM standartlarıyla uyumlu bulunmuştur. Biyodizel karışımı, hacimce %20 biyodizel ve %80 dizel yakıtı içerecek şekilde hazırlanmış ve B20 olarak adlandırılmıştır. CNT ve GNS katkıları sırasıyla 25, 50 ve 100 ppm konsantrasyonlarında B20 karışımına ilave edilmiştir. Nanoparçacıkların yüksek kararlılık ve homojen dağılıma göstermesi amacıyla %2 oranında yüzey aktif madde eklenerek nanofluid formunda hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, özellikle 100 ppm konsantrasyonundaki CNT ve GNS katkılarının motor performansı ve emisyonları önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymuştur. B20CNT100 ve B20GNS100 yakıtlarında termal verimlilik, katkısız B20'ye kıyasla sırasıyla %8 ve %19 oranlarında artış göstermiştir. Aynı katkı oranlarında duman emisyonları sırasıyla %28 ve %54, CO emisyonları ise %27 ve %47 oranında azalmıştır. NO<sub>x</sub> emisyonlarındaki maksimum düşüşler CNT katkılı karışım için %22, GNS katkılı karışım için %44 olarak elde edilmiştir. HC emisyonlarındaki azalmalar ise B20CNT100 için %28 ve B20GNS100 için %52 seviyesinde gerçekleşmiştir. Ayrıca, B20CNT100 ve B20GNS100 karışımlarında tutuşma gecikmesi sırasıyla %10 ve %22 oranlarında azalırken, maksimum silindir basınçları B20'ye kıyasla %3 ve %5,5 oranlarında artmıştır.

Chacko ve ark. (2020), Bu çalışmada, grafen temelli nanoparçacıkların grafen oksit (GO) ve grafen nanoplateletleri (GNP) yakıt katkı maddesi olarak turboşarjlı bir dizel motorun yanma ve emisyon özellikleri üzerindeki etkilerini incelemektedir. Çalışmada fosil dizel ile birlikte karanja biyodizeli ve atık kızartma yağı biyodizeli kullanılmış; nano katkılar dizel ve B20 biyodizel karışımlarına 20, 40 ve 60 ppm oranlarında ilave edilmiştir. Deney sonuçları, 40 ppm GO katkısı ile maksimum %29,2 duman emisyonu azalması elde edildiğini, 60 ppm GNP katkısında ise azot oksit (NO) emisyonlarında %26,4'lük bir düşüş sağlandığını göstermiştir. Test edilen katkılar arasında GO, daha düşük is oluşum eğilimi sergilerken; GNP katkısı NO, CO ve HC emisyonlarında daha etkili bir azaltım sağlamıştır. Hem GO hem de GNP katkılarının filtrelenebilirlik ve enjektör aşınması üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. KBD20 yakıtına 60 ppm GNP eklenmesi, CO emisyonlarında %30, HC emisyonlarında %23,2 ve NO emisyonlarında %26,3 azalma sağlamıştır. Buna karşılık, WBD20 yakıtına 40 ppm GO ilavesiyle maksimum %29,2 duman emisyonu düşüşü gözlenmiştir. WBD20 + 40 ppm GO karışımında fren özgül yakıt tüketimi (FOYT) %9 oranında azalırken, aynı yakıtle 60 ppm GNP katkısı %5,8 azalma sağlamıştır. Nano

katkıların fren termal verimliliği (FTV) üzerindeki etkisi sınırlı olup %0,7–2,3 aralığında artışlar elde edilmiştir. En yüksek iyileşme, WBD20 yakıtına 40 ppm GO eklenmesiyle FTV'nin %2,3 artması şeklinde gerçekleşmiştir.

Bu çalışmalar genel olarak göstermektedir ki; biyodizel–dizel karışımlarına farklı katkı maddelerinin ilavesi motor performansını iyileştirmekte, yanma sürecini hızlandırmakta ve emisyonları önemli ölçüde azaltmaktadır. Ancak katkı oranı kritik bir parametredir; düşük seviyelerde optimum iyileşmeler sağlanırken, yüksek oranlarda özgül yakıt tüketimi artışı ve nanoparçacık aglomerasyonu gibi olumsuzluklar ortaya çıkabilmektedir.

Bu çalışmalar, GO katkısının biyodizel–dizel karışımlarında benzer şekilde olumlu etkiler gösterebileceğini desteklemektedir. Ancak literatürde B20 + Graphene Oxide kombinasyonu üzerine yapılan deneysel çalışmalar sınırlıdır. Bu tez, bu eksikliği gidermeyi amaçlamaktadır.

Literatürde grafen ve grafen türevli nano katkıların dizel ve biyodizel yakıtlar üzerindeki etkileri farklı motor ve çalışma koşullarında incelenmiştir. Ancak, %20 biyodizel içeren dizel yakıt (B20) için grafen nano katkısının farklı yük koşullarında yanma ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkilerinin sistematik olarak karşılaştırıldığı çalışmalar sınırlıdır. Ayrıca, grafen katkısı için optimum ppm değerinin B20 yakıtı özelinde belirlenmesine yönelik deneysel veriler yeterli düzeyde değildir. Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir.

## **2.1. Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı**

Bu tez çalışmasının temel amacı, biyodizel ve dizel karışımlarında Graphene Oxide (GO) katkısının dizel motor yanma, performans ve emisyon karakteristiklerine etkilerini deneysel olarak ortaya koymaktır. Günümüzde biyodizel, yenilenebilir ve çevreci bir yakıt olarak önem kazanmış olmakla birlikte, yüksek viskozitesi ve düşük uçuculuğu nedeniyle yanma veriminde düşümlere ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında artışlara sebep olmaktadır. Bu sınırlamaları giderebilmek için yakıtta nano boyutlu katkıların ilavesi araştırmacılar tarafından önerilmektedir.

Çalışma kapsamında, %20 biyodizel + %80 dizel (B20) taban yakıtı seçilmiş ve bu karışıma farklı oranlarda (0, 25, 50, 75, 100 ppm) Graphene Oxide eklenmiştir. GO, yüksek yüzey alanı, oksijenli fonksiyonel grupları ve termal iletkenliği sayesinde yanma

sürecini hızlandırıcı ve atomizasyonu iyileştirici özelliklere sahiptir. Katkı maddesi ultrasonik ve manyetik karıştırıcılarla yakıtta homojen olarak dağıtılmıştır.

Deneysel çalışmalar, Kirloskar TV-1 tek silindirli, dört zamanlı dizel motor test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Ölçülen başlıca parametreler; silindir içi gaz basıncı, basınç artış oranı, net ısı salınımı, kümülatif ısı salınımı gibi yanma karakteristikleri ile HC, CO, NO<sub>x</sub> ve duman koyuluğu gibi emisyon parametreleridir.

Tezin kapsamı şu şekilde özetlenebilir:

**Yakıt Hazırlama:** B20 taban yakıtına 0–100 ppm arasında değişen GO katkılarının hazırlanması, kararlılık ve homojenlik analizlerinin yapılması.

**Motor Deneyleri:** Sabit devir ve farklı yük koşullarında yanma ve emisyon deneylerinin gerçekleştirilmesi.

**Veri Analizi:** Deneysel verilerden basınç–krank açısı diyagramları, ısı salınım analizleri, emisyon değerleri ve performans parametrelerinin elde edilmesi.

**Karşılaştırmalı Değerlendirme:** Farklı GO derişimlerinin motor performansı ve emisyonlara etkilerinin kıyaslanması.

**Optimum Katkı Düzeyinin Belirlenmesi:** Yanma verimi, düşük emisyon ve yakıt tüketimi kriterlerine göre en uygun GO katkı oranının ortaya konulması.

Bu kapsamda elde edilen bulgular, hem nanoyakıt katkıları üzerine literatüre katkı sağlayacak hem de biyodizel–dizel karışımlarının daha çevreci ve verimli kullanımına yönelik öneriler geliştirilecektir.

### 3. KURAMSAL TEMELLER

#### 3.1. İçten Yanmalı Motorlar

İçten yanmalı motorlar (Internal Combustion Engines – ICE), yakıtın silindir içerisinde hava ile karışarak yanması ve açığa çıkan enerjinin piston aracılığıyla mekanik enerjiye dönüştürülmesi prensibine göre çalışan makinalardır. Bu motorlarda yanma, doğrudan silindir içerisinde gerçekleştiği için “içten yanmalı” ifadesi kullanılmaktadır.

İçten yanmalı motorların ilk prototipleri 19. yüzyılda geliştirilmiş olup, günümüzde ulaşımdan enerji üretimine, tarımdan savunma sanayiine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. İlk dört zamanlı motor, 1876 yılında Nikolaus Otto tarafından geliştirilmiş, Rudolf Diesel ise 1892’de yüksek sıkıştırma oranına sahip dizel motoru icat etmiştir. Günümüzde motor teknolojisi elektronik kontrol sistemleri, doğrudan enjeksiyon, turboşarj ve emisyon kontrol üniteleri ile gelişimini sürdürmektedir.

Bir içten yanmalı motorun temel bileşenleri: silindir, piston, biyel kolu, krank mili, supaplar ve yanma odasıdır. Dört zamanlı motorlarda çevrim;

Emme zamanı: Pistonun aşağı hareketiyle hava (benzinli motorlarda yakıt-hava karışımı) silindire dolar. Sıkıştırma zamanı: Piston yukarı çıkarak karışımı yüksek basınca ve sıcaklığa getirir. Yanma (Güç) zamanı: Dizel motorlarda yakıt sıkıştırmanın sonunda püskürtülür ve kendi kendine tutuşur; benzinli motorlarda ise buji ateşlemesi ile yanma başlatılır. Egzoz zamanı: Yanma ürünleri supapların açılmasıyla dışarı atılır.

Bu çevrim krank milinde sürekli bir dönme hareketi sağlar.

İçten yanmalı motorlar çeşitli kriterlere göre sınıflandırılabilir:

Yakıt türüne göre: Benzinli (SI – Spark Ignition), Dizel (CI – Compression Ignition), LPG, CNG, biyodizel vb.

Zaman çevrimine göre: İki zamanlı ve dört zamanlı motorlar.

Silindir düzenine göre: Tek silindirli, çok silindirli; sıralı, V tipi, boxer tipi.

Soğutma sistemine göre: Hava soğutmalı, su soğutmalı.

Dizel motorlarda yanma süreci, silindir içi basınç değişimi ile doğrudan ilişkilidir. Yanmanın başlangıcı, ilerleme hızı ve tamamlanma süresi; basınç-krank açısı diyagramları yardımıyla analiz edilebilmektedir. Bu nedenle silindir içi basınç, dizel motor yanma analizlerinde temel bir parametre olarak kabul edilmektedir.

### 3.1.1. Dizel motorlar

Dizel motorlar, sıkıştırma ile ateşlemeli (Compression Ignition – CI) motorlardır. Yakıt-hava karışımının bujilerle tutuşturulduğu benzinli motorlardan farklı olarak dizel motorlarda yalnızca hava sıkıştırılır. Yüksek sıkıştırma oranı sayesinde hava sıcaklığı 700–900 °C aralığına kadar yükselir. Enjeksiyon sistemi aracılığıyla püskürtülen dizel veya alternatif yakıt, bu yüksek sıcaklıkta kendi kendine tutuşur ve yanma gerçekleşir.

Dizel motorlar; kara taşıtları (kamyon, otobüs, iş makineleri), deniz taşıtları, trenler, jeneratörler ve tarım makineleri gibi yüksek tork gerektiren uygulamalarda yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Dört zamanlı bir dizel motor çevrimi şu aşamalardan oluşur:

1. **Emme zamanı:** Piston aşağı inerken emme supabı açılır ve yalnızca temiz hava silindire dolar.
2. **Sıkıştırma zamanı:** Supaplar kapanır, piston yukarı çıkarak havayı yüksek basınç ve sıcaklığa getirir. Sıkıştırma oranı genellikle 16:1 ile 22:1 arasındadır.
3. **Yanma (Güç) zamanı:** Enjeksiyon pompası aracılığıyla silindire püskürtülen yakıt, sıcak hava içinde kendi kendine tutuşur. Yanma sonucu açığa çıkan basınç pistonun aşağı hareketini sağlar.
4. **Egzoz zamanı:** Egzoz supabı açılır ve yanma ürünleri silindirden dışarı atılır.

Bu çevrim sonunda krank miline iletilen dönme hareketi motorun mekanik iş üretmesini sağlar.

Yüksek sıkıştırma oranı: Daha yüksek termik verim ve daha düşük özgül yakıt tüketimi sağlar.

Yakıt tüketimi: Benzinli motorlara göre daha düşük olup, özellikle ağır vasıta ve jeneratör uygulamalarında tercih sebebidir.

Tork karakteristiği: Düşük devirlerde daha yüksek tork üretebildiğinden tarım, taşımacılık ve savunma sanayinde yaygın kullanılır.

Dayanıklılık: Yüksek basınçlara dayanıklı sağlam yapıları vardır.

Emisyon Karakteristikleri

Dizel motorların avantajlı yönleri yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır.

NO<sub>x</sub> emisyonları: Yüksek sıkıştırma oranı ve yanma sıcaklığı nedeniyle dizel motorlarda NO<sub>x</sub> oluşumu yüksektir.

Partikül madde (PM): Dizel motorların en önemli çevresel dezavantajıdır. Yakıtın tam yanmaması sonucu kurum ve is parçacıkları oluşur.

HC ve CO: Dizel motorlarda benzinli motorlara göre daha düşük seviyededir.

Günümüzde dizel motorlarda performansı artırmak ve emisyonları azaltmak için çeşitli sistemler kullanılmaktadır:

Common Rail enjeksiyon: Yüksek basınçlı çok kademeli enjeksiyon ile daha iyi atomizasyon ve yanma sağlar.

Turboşarj: Hava yoğunluğunu artırarak daha fazla oksijenin silindire girmesine imkân verir.

### 3.2. Dizel Yakıt Özellikleri

Dizel motorlarda yanma süreci; tutuşma gecikmesi, premiks yanma ve difüzyon yanması olmak üzere üç ana fazdan oluşmaktadır. Bu fazların süresi ve şiddeti, yakıt özellikleri, enjeksiyon karakteristikleri ve motor yüküne bağlı olarak değişmektedir. Yanma sürecindeki bu değişimler, silindir içi basınç, ısı salınımı ve egzoz emisyonları üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

Dizel yakıtın temel özellikleri (yoğunluk, viskozite, alt ısıl değer, setan sayısı) yanma performansını doğrudan etkiler. Biyodizel, içerdiği oksijenli gruplar nedeniyle CO ve HC emisyonlarını azaltırken, viskozitesinin yüksekliği atomizasyonu zorlaştırabilir.

Dizel yakıtın yoğunluğu genellikle  $0,82-0,85 \text{ g/cm}^3$  ( $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de) aralığındadır. Yoğunluk, püskürtme sisteminde yakıt miktarının ayarlanmasında kritik rol oynar. Yüksek yoğunluk, püskürtme sırasında daha büyük damlacıkların oluşmasına yol açarak atomizasyonu zorlaştırabilir.

Yakıtın viskozitesi, püskürtme kalitesi ve yakıtın enjektörlerden geçişi açısından önemlidir. Dizel yakıtların kinematik viskozitesi genellikle  $2-5 \text{ cSt}$  ( $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de) aralığında olmalıdır. Yüksek viskozite, enjektör tıkanmalarına ve kötü atomizasyona neden olurken, düşük viskozite ise yağlama yetersizliği yaratabilir.

Dizel yakıtın alt ısıl değeri (LHV) ortalama  $42-43 \text{ MJ/kg}$  düzeyindedir. Alt ısıl değer, motorun güç çıkışı ve özgül yakıt tüketimini doğrudan etkiler. Biyodizel, oksijen içeriği nedeniyle daha düşük LHV'ye (yaklaşık  $37-39 \text{ MJ/kg}$ ) sahiptir.

Setan sayısı, yakıtın kendi kendine tutuşma kabiliyetini belirler. Yüksek setan sayısı, daha kısa tutuşma gecikmesi ve daha düzgün bir yanma süreci sağlar. Standart

dizel yakıtların setan sayısı 40–55 aralığındadır. Biyodizel yakıtların setan sayısı genellikle daha yüksektir (50–65), bu da daha kararlı bir yanma sağlar.

Yakıtın uçuculuğu, buharlaşma hızını belirler. İyi atomize olmuş ve çabuk buharlaşabilen yakıtlar daha homojen karışım sağlar. Yakıt damlacıklarının Sauter Ortalama Çapı (SMD), atomizasyon kalitesinin göstergesidir.

Daha küçük damla çapı → daha hızlı buharlaşma ve daha iyi yanma.

Kükürt, yanma sonucu  $SO_2$  ve  $SO_3$  gibi zararlı gazlar oluşturur. Bu nedenle modern standartlar dizelde  $\leq 10$  ppm (EN 590 standardı) kükürt sınırı getirmiştir. Düşük kükürt içeriği, partikül filtreleri ve katalitik konvertörlerin ömrünü uzatır.

Dizel yakıtların doğal oksijen içeriği düşük olduğundan yanma sırasında sınırlı oksijen bulunur. Bu durum kurum (PM) oluşumunu artırır. Biyodizel ise yaklaşık %10–12 oranında oksijen içerdiğinden daha temiz yanma sağlar.

Dizel yakıt ile Biyodizel yakıtın farkları şunlardır; Biyodizel dizelden daha yoğundur ( $0,86-0,90$  g/cm<sup>3</sup>). Biyodizel genellikle daha yüksek viskoziteye sahiptir. Biyodizelin alt ısıl değeri daha düşüktür, bu da özgül yakıt tüketimini artırır. Biyodizelin setan sayısı genellikle daha yüksektir, bu da yanma başlangıcını iyileştirir. Biyodizel kullanımı ile CO, HC ve PM emisyonları azalırken, NO<sub>x</sub> emisyonlarında artış gözlemlenebilir.

### **3.3. Dizel Motorlarda Kullanılan Alternatif Yakıtlar**

Biyodizel, biyoetanol, biyobütanol, bitkisel yağlar ve bunların türevleri dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılmaktadır.

### **3.4. Dizel Motorlarda Kullanılan Alternatif Yakıt Katkıları**

Nanopartikül katkıları ( $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $CeO_2$ , grafen, grafen oksit vb.) yanma iyileştirici ve emisyon azaltıcı özellikleriyle öne çıkmaktadır. Grafen oksit (GO) gibi karbon bazlı nano katkıları, yüksek özgül yüzey alanı ve oksijen içeren fonksiyonel grupları sayesinde yanma reaksiyonlarını hızlandırabilmektedir. Bu katkıları, yakıtın atomizasyonunu iyileştirerek daha homojen bir yanma süreci oluşturmakta ve bu durum silindir içi basınç artışı ile emisyonların azalmasına katkı sağlayabilmektedir.

## 4.MATERYAL VE YÖNTEM

### 4.1. Motor Test Düzeneği ve Ekipmanları

Bu çalışmada yapılan deneyler, Kirloskar TV-1 tipi tek silindirli, dört zamanlı, su soğutmalı ve sabit devirli (1500 d/d) bir dizel motor üzerinde gerçekleştirilmiştir, Deney düzeneğinin şematik gösterimi şekil 1’de sunulmuş olup, motor, dinamometre, yakıt ölüm sistemi ve emisyon analiz cihazlarından oluşmaktadır.



şekil 1.Motor test düzeneği

Motorun silindir çapı, strok boyu, sıkıştırma oranı ve maksimum gücü literatürde verilen teknik değerler ile aynı olup, bu zellikler Tablo 1’de sunulmuştur. Motor, elektrikli dinamometre ile yüklenmiş, krank açısı ve silindir basıncı veri toplama sistemi aracılığıyla bilgisayara aktarılmıştır.

**Tablo 1.** Deney motorunun teknik özellikleri

<b>Özellik</b>	<b>Değer</b>
Motor Tipi	Tek Silindirli, Dört Zamanlı
Soğutma Sistemi	Su Soğutmalı
Motor Gücü	5.2 kW @ 1500 rpm
Sıkıştırma Oranı	17.5:1
Silindir Hacmi	661.45 cc
Silindir Çapı	87.5 mm
Strok Uzunluğu	110 mm

#### **4.2. Emisyon Cihazının Özellikleri**

Bu çalışmada dizel motorlardan kaynaklanan egzoz emisyonlarının tespit edilebilmesi amacıyla, karbon monoksit (CO), hidrokarbonlar (HC), azot oksitler (NO<sub>x</sub>) ve duman koyuluğu (is) parametrelerini eş zamanlı olarak ölçebilen çok bileşenli bir egzoz gazı analiz sistemi kullanılmıştır. Seçilen ölçüm sistemi, içten yanmalı motor uygulamalarında yaygın olarak kullanılan ve ölçüm doğruluğu literatürde kabul görmüş bir altyapı sunmaktadır. Tüm emisyon ölçümleri, cihaz üreticisi tarafından belirtilen kullanım talimatları, kalibrasyon prosedürleri ve çalışma koşulları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Egzoz emisyonlarının ölçümünde Capelec C800G Gaz Analizörü ve SmokeMeter kullanılmıştır. Bu sistem, karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO<sub>x</sub>) ve partikül madde emisyonlarının analizine olanak sağlamaktadır. Capelec C800G cihazı, optik lazer sensör teknolojisi ile birlikte yüksek hassasiyetli kızılötesi (NDIR) algılama sistemi kullanarak egzoz gazı bileşenlerinin miktarını güvenilir bir şekilde belirlemektedir. Kullanılan emisyon ölçüm sisteminin genel görünümü Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 2. Emisyon ölçüm cihazı

Kullanılan emisyon ölçüm cihazının teknik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Emisyon ölçümleri her test koşulu için kararlı çalışma durumuna ulaşıldıktan sonra gerçekleştirilmiş ve elde edilen değerlerin ortalaması alınarak değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, geçici rejim etkilerinin ölçüm sonuçları üzerindeki etkisini en aza indirmeyi amaçlamaktadır.

Deneylerde kullanılan egzoz gazı analiz cihazı, motorun farklı yükler altında çalıştırılması ile elde edilen egzoz gazlarını analiz ederek motor performansı ve çevresel etkileri hakkında bilgi sağlamaktadır. Cihaz, hassas sensörleri sayesinde düşük ppm seviyelerindeki emisyonları dahi algılayabilmektedir.

Deneyler sırasında her bir yakıt karışımı için ayrı ayrı egzoz gazı ölçümleri alınmış ve sonuçlar kaydedilmiştir.

Deneyler boyunca her bir katkı oranı için egzoz gazındaki HC, CO, NO<sub>x</sub> ve duman koyuluğu (is) miktarları belirlenmiştir. Ölçümler, motorun farklı yük

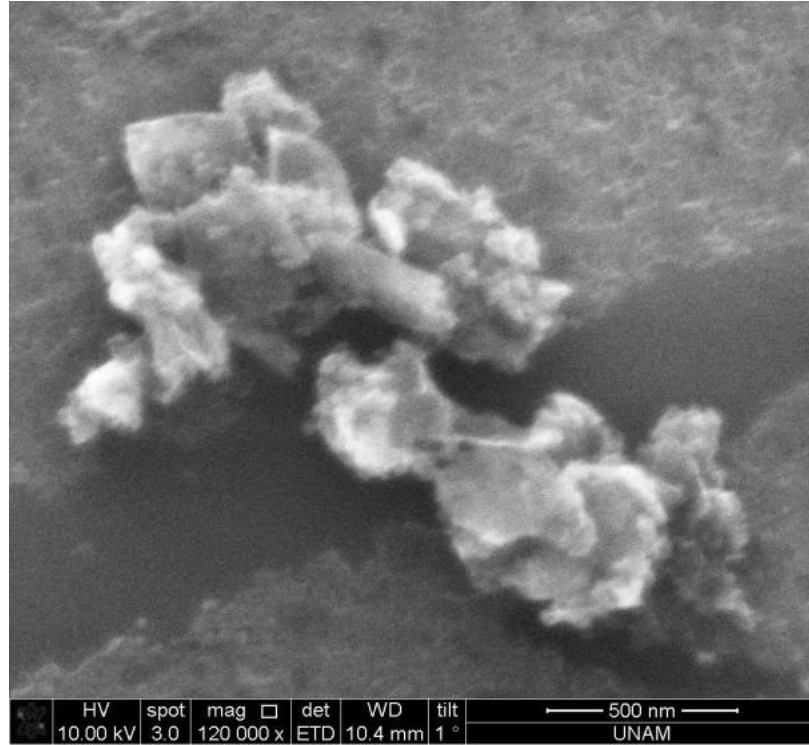
koşullarında çalıştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Emisyon cihazının ölçüm teknik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Emisyon cihazı ölçüm teknik özellikleri

Parametre	Ölçüm Aralığı
Karbon Monoksit (CO)	0 - 10%
Karbon Dioksit (CO <sub>2</sub> )	0 - 20%
Azot Oksitler (NO <sub>x</sub> )	0 - 5000 ppm
Hidrokarbonlar (HC)	0 - 2000 ppm
Partikül Madde (PM)	0 - 100 mg/m <sup>3</sup>

### 4.3. Grafen Oksit Nano Partikülünün Yapısal Özellikleri

Bu çalışmada nano katkı maddesi olarak grafen oksit (GO) nano partikülleri kullanılmıştır. Grafen oksit, yüksek özgül yüzey alanı, tabakalı yapısı ve yüzeyinde bulunan oksijenli fonksiyonel gruplar sayesinde yakıt katkı maddesi olarak tercih edilen önemli bir nano malzemedir. Bu özellikleri, yakıt içerisinde daha iyi dağılım sağlanmasına ve yanma sürecinin iyileştirilmesine katkı sunmaktadır.



**Şekil 3.** Grafenoksit nano maddesinin SEM görüntüsü

Şekil 3’te, çalışmada kullanılan grafen oksit nano partiküllerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü verilmiştir. SEM görüntüsü incelendiğinde, grafen oksit parçacıklarının düzensiz, tabakalı ve yaprak benzeri bir morfolojiye sahip

olduğu görülmektedir. Nano partiküllerin yer yer aglomere yapılar oluşturduğu, ancak genel olarak nano ölçekli tabakaların birbirine bağlı şekilde dağıldığı dikkat çekmektedir. Ölçek ubuğu dikkate alındığında, grafen oksit parçacıklarının yüzlerce nanometre mertebesinde boyutlara sahip olduğu anlaşılmaktadır.

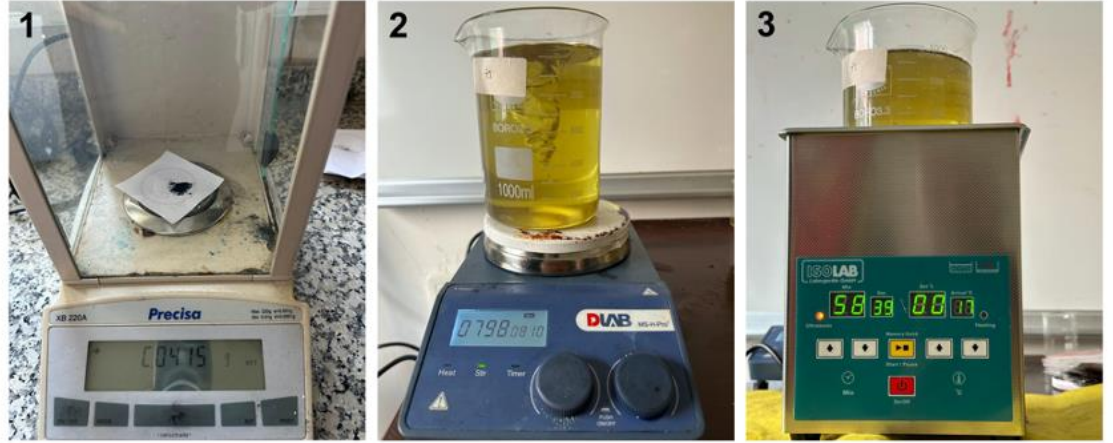
Gözlemlenen tabakalı ve pürüzlü yüzey yapısı, grafen oksitin yüksek aktif yüzey alanına sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, yakıt içerisinde grafen oksit partiküllerinin daha etkin etkileşim göstermesine ve yanma sırasında katalitik etki oluşturmasına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, SEM görüntüsünde kısmi aglomerasyonların bulunması, nano partiküllerin yakıt içerisine homojen şekilde dağıtılabilmesi için ultrasonik karıştırma gibi yöntemlerin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, SEM analizi ile doğrulananan grafen oksit nano partiküllerinin morfolojik özellikleri, bu malzemenin yakıt katkı maddesi olarak kullanılmaya uygun olduğunu göstermektedir. Yüksek yüzey alanı ve tabakalı yapısı sayesinde grafen oksitin yanma sürecini iyileştirerek motor performansı ve emisyon karakteristikleri üzerinde etkili olabilei değerlendirilmektedir.

#### **4.4. Yakıt Karışımlarının Hazırlanması**

Bu çalışmada, referans yakıt olarak %80 dizel ve %20 biyodizel içeren B20 karışımı kullanılmıştır. Grafen nano katkı maddesi, B20 yakıtına 25, 50, 75 ve 100 ppm oranlarında ilave edilmiştir. Yakıt–katkı karışımları, homojen bir dağılım sağlamak amacıyla manyetik karıştırıcı ve ultrasonik banyo kullanılarak hazırlanmıştır.

GO katkılı yakıt numuneleri, öncelikle ultrasonik karıştırıcıda 60 dakika homojenize edilmiştir. Daha sonra yakıt karışımlarının stabilitesini artırmak amacıyla manyetik karıştırıcıda 60 dakika daha karıştırılmıştır. Hazırlanan numuneler, katkı oranına göre B20GO0, B20GO25, B20GO50, B20GO75 ve B20GO100 olarak adlandırılmıştır. şekil 4'te ise yakıt ve GO maddesinin karıştırılmasında kullanılan hassas terazi (1), Manyetik karıştırıcı (2), Ultrasonik karıştırıcı (3) görselleri verilmiştir



Şekil 4. Hassas terazi (1), Manyetik karıştırıcı (2), Ultrasonik karıştırıcı (banyo) (3)

Yakıt karışımları, her test koşulu için ayrı ayrı hazırlanmış ve analiz edilmiştir. Testlerin doğruluğunu sağlamak ve güvenilir veri elde etmek için yakıtın ve GO nano maddesinin tam olarak karışması kritik öneme sahiptir. B20 yakıtına eklenen Grafen katkı maddeli deney yakıtları Şekil 5’te görseli sunulmuştur.



Şekil 5. Deney yakıtlarının görüntüsü

Nano partiküllerin uygun oranlarda kullanılması, yanma sürecinin daha etkin gerçekleşmesine katkı sağlayarak motor performansının iyileştirilmesine, zararlı egzoz emisyonlarının azaltılmasına ve yakıt kullanım verimliliğinin artırılmasına olanak tanımaktadır. Ancak, belirlenen optimum katkı seviyesinin aşılması durumunda, motor çalışma karakteristiğini olumsuz yönde etkileyebilecek bazı problemler ortaya

çıkabilmektedir. Özellikle yüksek nano partikül konsantrasyonları, yakıt sisteminde filtrasyon sorunlarına yol açarak yakıt akışında düzensizlikler oluşturabilmektedir. Bununla birlikte, artan nano partikül miktarı yakıtın kinematik viskozitesini yükselterek enjektörlerden püskürtme kalitesinin bozulmasına neden olabilmektedir. Bu durum, yanma odasında yakıt–hava karışımının yeterince homojen oluşmasını engelleyerek yanma veriminin düşmesine ve dolayısıyla motor performansında azalmaya yol açabilmektedir. Bu nedenle, nano partiküllerin belirlenen sınırlar içerisinde ve kontrollü bir şekilde kullanılması, motorun kararlı çalışması, uzun dönemli dayanımı ve optimum performans koşullarının sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır. Deneylerde kullanılan yakıtların fiziksel özellikleri Tablo 3’te sunulmuştur.

**Tablo 3.** Yakıtların fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	B20 (Baz Yakıt)	B20 + GNA25 (25 ppm)	B20 + GNA50 (50 ppm)	B20 + GNA75 (75 ppm)	B20 + GNA100 (100 ppm)
Yoğunluk @15°C (kg/m <sup>3</sup> )	<b>845</b>	<b>842</b> (Azalış: %0.36)	<b>840</b> (Azalış: %0.59)	<b>838</b> (Azalış: %0.83)	<b>839</b> (Azalış: %0.71)
Kinematik Viskozite @40°C (mm <sup>2</sup> /s)	<b>6.48</b>	<b>6.38</b> (Azalış: %1.54)	<b>6.36</b> (Azalış: %1.85)	<b>6.352</b> (Azalış: %1.98)	<b>6.364</b> (Azalış: %1.79)
Parlama Noktası (°C)	<b>73.6</b>	<b>71.6</b> (Azalış: %2.72)	<b>69.6</b> (Azalış: %5.43)	<b>67.6</b> (Azalış: %8.15)	<b>65.6</b> (Azalış: %10.87)
Setan İndeksi	<b>52</b>	<b>51.5</b> (Azalış: %0.96)	<b>51</b> (Azalış: %1.92)	<b>50.5</b> (Azalış: %2.88)	<b>50</b> (Azalış: %3.85)
Isıl Değer - Net (kJ/kg)	<b>41173.88</b>	<b>41303.88</b> (Artış: %0.32)	<b>41623.88</b> (Artış: %1.09)	<b>41773.88</b> (Artış: %1.46)	<b>41603.88</b> (Artış: %1.04)

#### 4.5. Ölçümü Yapılan Motor Performans Parametreleri

Deneyler sabit devirde (1500 d/d) ve farklı motor yüklerinde gerçekleştirilmiştir. Her bir deney setinde motor ısıl dengeye ulaştırıldıktan sonra ölçümler alınmıştır. Ölçülen parametreler: Silindir içi basınç, basınç artış oranı, net ısı salınımı, kümülatif ısı salınımıdır. Motor Performans Parametreleri ve Tablo 4’de verilmiştir.

**Tablo 4.** Motor performans parametreleri

Parametre	Değer
Kısıtlayıcı Çapı (mm)	43.00
Boşaltma Katsayısı	0.60
Dinamometre Kol Uzunluğu (mm)	210
Yakıt Boru Çapı (mm)	33.90
Ortam Sıcaklığı (°C)	27
Devir Başına Darbe Sayısı	360
Yakıt Türü	Dizel
Yakıt Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	830
Yakıt Alt Isıl Değeri (kJ/kg)	42500

Tüm deneyler, motor kararlı hâl koşullarına ulaştıktan sonra gerçekleştirilmiştir. Her test noktası için ölçümler en az üç kez tekrarlanmış ve elde edilen verilerin aritmetik ortalamaları alınmıştır.

#### 4.6. Ölçümü Yapılan Egzoz Emisyon Parametreleri

Ölçüm yapılan emisyon parametreleri: CO, HC, NO<sub>x</sub> ve duman koyuluğu'dur. Her bir deney en az üç kez tekrarlanarak ortalama değerler kaydedilmiştir. Egzoz Emisyon Parametreleri Tablo 5'te verilmiştir.

**Tablo 5.** Egzoz emisyon parametreleri

Parametre	Ölçüm Birimi	Açıklama
Karbon Monoksit (CO)	ppm (mg/m <sup>3</sup> )	Yanma sürecinin eksik olduğunu gösterir, zehirli gazdır.
Azot Oksitler (NO <sub>x</sub> )	ppm (mg/m <sup>3</sup> )	Yüksek yanma sıcaklıklarında oluşur, çevresel açıdan zararlıdır.
Hidrokarbonlar (HC)	ppm	Yanma sürecinde eksik oksidasyonun bir göstergesidir.
Duman (İs)	Koyuluğu	Yakıtın tam yanmamasından kaynaklanan katı partikülleri ifade eder.

#### 4.7. Belirsizlik Analizi

Belirsizlik analizi, deneysel süreç boyunca ölçüm sonuçlarını etkileyen hata kaynaklarının bütüncül olarak değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Deneysel çalışmalarda motor performans çıktıları, çevresel koşullar, ölçüm cihazlarının kalibrasyonu, bakım durumu ve çalışma şartları gibi etkenler ölçüm sapmalarına neden

olabilmektedir (Uslu ve ark., 2023). Bu nedenle, her deneysel çalışma belirli bir belirsizlik düzeyi içermektedir. Söz konusu belirsizlikler temel olarak ölçüm sensörleri, kalibrasyon doğruluğu, deney prosedürü, gözlemsel hatalar ve çevresel etkilerden kaynaklanmaktadır (Devarajan, Nagappan ve Subbiah, 2019). Ayrıca, ölçüm güvenilirliğini artırmak amacıyla her bir deney üç kez tekrarlanarak ortalama değerler esas alınmıştır.

Deneysel verilerin hata ve belirsizliklerinin belirlenmesinde, Holman tarafından önerilen belirsizlik analizi yaklaşımı kullanılmıştır (Holman, 2021). Bu yöntemde, ölçülen sonuç büyüklüğü  $R$ , sonucu etkileyen  $n$  adet bağımsız değişkenin ( $x_i$ ) bir fonksiyonu olarak ele alınmakta ve her bir değişkene ait belirsizlik katkısı kısmi türevler yardımıyla hesaplanmaktadır. Toplam belirsizlik, bu bireysel katkıların birleştirilmesiyle elde edilmektedir. Deneysel ölçümlere ilişkin belirsizlik değerleri Tablo 6’da sunulmaktadır.

**Tablo 6.** Test cihazının ölçüm aralığı, belirsizliği analizi ve hesaplanan parametrelerin tablosu

Parametreler	Ölçüm aralığı	Doğruluk	% Belirsizlik
Fren Gücü	0-3.5kW	0.3kW	0.84
Motor Devri	0-1500rpm	0.1rpm	0.07
Motor Yüğü	0-12kg	-	0.83
Yakıt Tüketiminin Kütlesi	-	0.1°C	1.55
Egzoz Gazı Sıcaklığı	-	0.1cc	1.0
Büret Sistemi	-	0.2s	1.0
Dijital Saat	-	-	0.3
Fren Termal Verimliliği	-	-	1.76
Fren Spesifik Yakıt Tüketimi	-	-	1.76
Fren Özgöl Enerji Tüketimi	-	-	1.76
CO	0-10%	0.01%	0.84
HC	0-20000ppm	1.0ppm	0.83
NO <sub>x</sub>	0-5000ppm	1.0ppm	0.83
Duman	0-99.9% vol	0.001%	0.83

$$U_R = \left[ \left( \frac{x_1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_1} U_1 \right)^2 + \left( \frac{x_2}{R} \frac{\partial R}{\partial x_2} U_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{x_n}{R} \frac{\partial R}{\partial x_n} U_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Tüm sistemi kapsayan Tablo 6 ve Denklem 1 incelendiğinde; fren gücü, motor devri, motor yüğü, yakıt kütleli tüketimi, egzoz gazı sıcaklığı, büret sistemi, dijital zaman ölçümü ile fren termal verimliliği, fren özgöl yakıt tüketimi, fren özgöl enerji tüketimi, CO, HC, NO<sub>x</sub> ve duman koyuluğu parametrelerine ait birleşik belirsizlik oranının %3,1587 olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bu değer, mühendislik

uygulamalarında genel olarak kabul edilen %5 belirsizlik sınırının altında olup, gerçekleştirilen ölçüm ve hesaplamaların yüksek hassasiyet ve güvenilirlik düzeyine sahip olduğunu göstermektedir (Chapra ve Canale, 2010).

Yapılan belirsizlik analizi sonucunda, ölçüm sistemlerinin deney sonuçları üzerinde kabul edilebilir düzeyde etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

## 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 5.1. Test Yakıtlarının Motor Performans Analizleri

Bu bölümde, %80 dizel – %20 biyodizel (B20) yakıtına farklı oranlarda grafen nano katkısı ilavesinin dizel motorun performans ve yanma karakteristikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel analizler, 0,3, 1, 2 ve 3 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşullarında gerçekleştirilmiş ve silindir içi basınç, ısı salınımı ve basınç artış oranı gibi temel yanma parametreleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, grafen nano katkısının motor performansı üzerindeki etkilerinin katkı oranına ve motor yüküne bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Bu kapsamda, farklı yük koşullarında test yakıtlarının karşılaştırmalı analizi yapılmış ve optimum grafen katkı oranı belirlenmiştir.

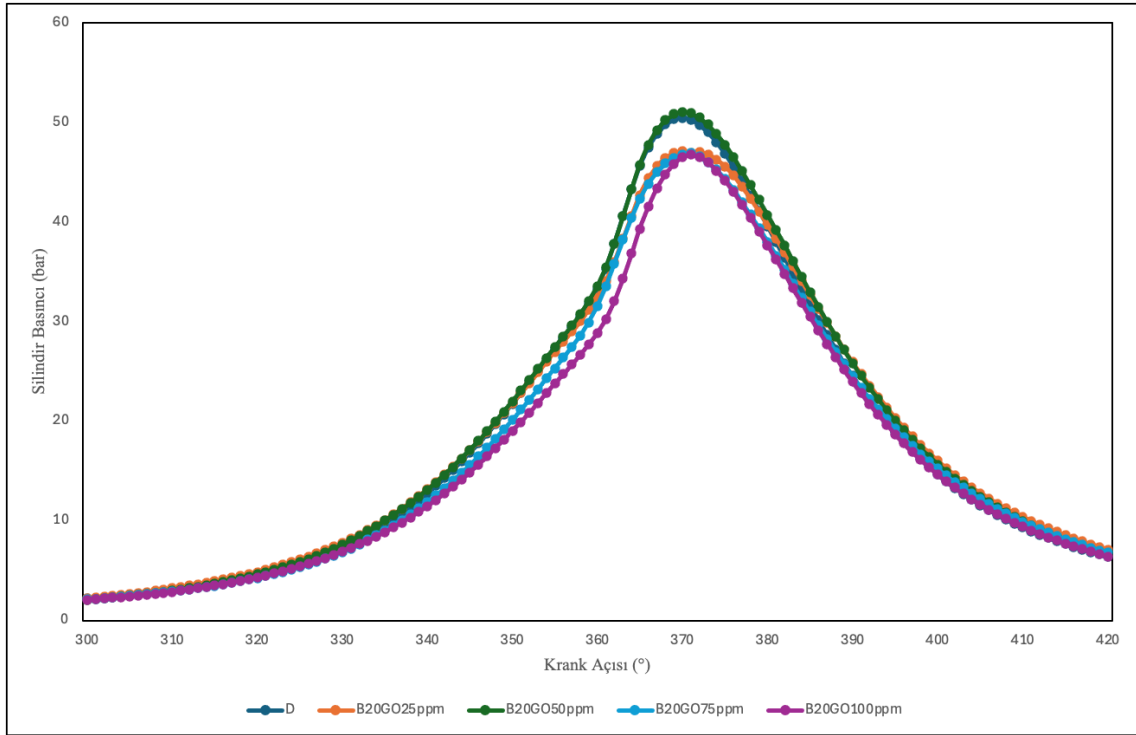
#### 5.1.1. Silindir basıncı

Silindir içi basınç, dizel motorlarda yanma sürecinin değerlendirilmesinde en temel parametrelerden biridir. Yanmanın başlangıcı, ilerleme hızı ve şiddeti, krank açısına bağlı olarak değişen silindir basıncı eğrileri üzerinden analiz edilebilmektedir. Yakıt özelliklerindeki değişimler, özellikle tutuşma gecikmesi ve premiks yanma fazı üzerinde etkili olarak silindir içi basınç gelişimini doğrudan etkilemektedir.

Biyodizel içeren dizel yakıtlar, oksijen içeriği nedeniyle yanma karakteristiklerini değiştirirken; grafen nano katkı maddeleri, yüksek özgül yüzey alanları sayesinde yanma reaksiyonlarını hızlandırabilmektedir. Bu çalışmada, B20 yakıtına farklı oranlarda grafen nano katkısı ilavesinin, farklı yük koşullarında silindir içi basınç gelişimi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Şekil 6'da, 0,3 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda B20 yakıtı ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren test yakıtları için krank açısına bağlı silindir içi basınç değişimleri gösterilmektedir. Düşük yük koşulunda tüm yakıtlar için maksimum silindir basıncının üst ölü nokta (ÜÖN) civarında meydana geldiği görülmektedir. Grafen nano katkısı ilavesiyle birlikte silindir içi basınç değerlerinde genel bir artış eğilimi gözlenmiştir. Özellikle 50 ppm grafen katkılı B20 yakıtı, yaklaşık 50–51 bar seviyesine ulaşan maksimum silindir basıncı ile en yüksek değeri sergilemiştir. Katkısız Dizel yakıtında ise maksimum silindir basıncı yaklaşık 46–47 bar civarında

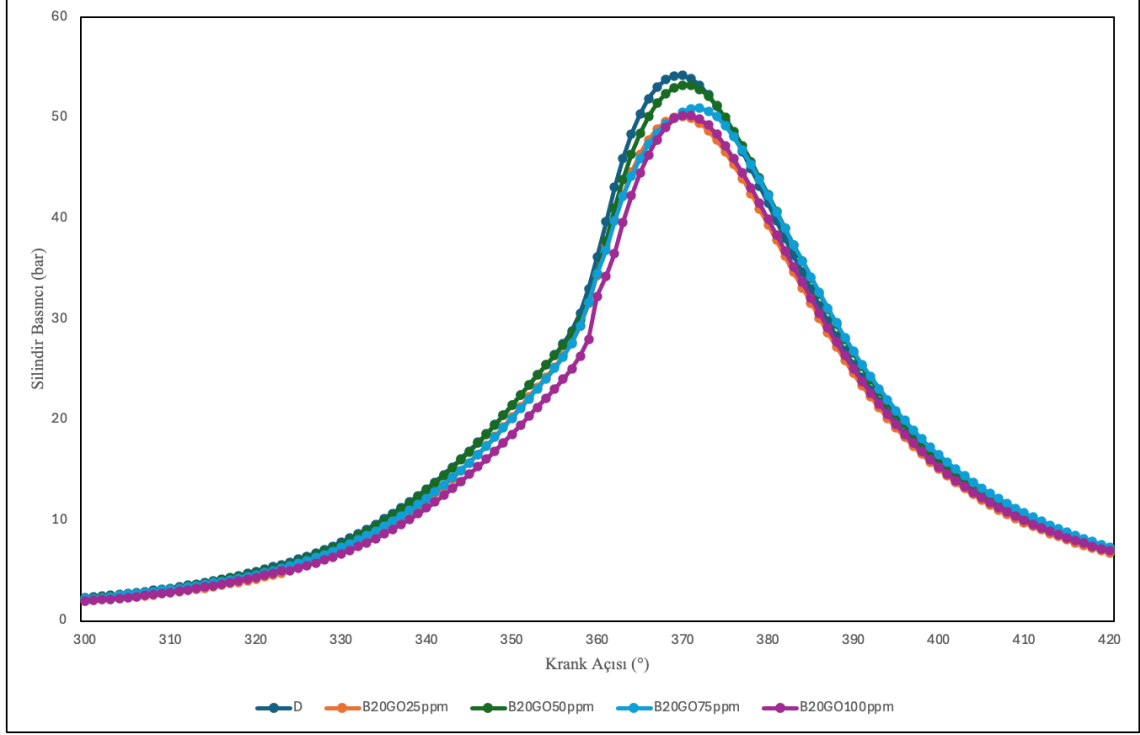
gerçekleşmiştir. Bu durum, grafen nano katkısının yanma reaksiyonlarını hızlandırarak premiks yanma fazında daha etkin bir ısı açığa çıkmasına katkı sağladığını göstermektedir. Daha yüksek grafen katkı oranlarında (75 ve 100 ppm) ise maksimum silindir basıncı değerlerinin 50 ppm seviyesine kıyasla sınırlı kaldığı görülmektedir. Düşük yük koşullarında yakıt–hava karışımının sınırlı olması ve yüksek katkı oranlarında nano parçacıkların aglomerasyon eğilimi göstermesi, bu durumun olası nedenleri olarak değerlendirilebilir. Elde edilen sonuçlar, 0,3 bar OEB koşulunda grafen nano katkısının silindir içi basınç gelişimi açısından en etkili katkı oranının 50 ppm olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 6.0,3 bar OEB göre krank açısına bağlı silindir basıncı değişimi (bar)

Şekil 7’de, 1 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda B20 yakıtı ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren test yakıtları için krank açısına bağlı silindir içi basınç değişimleri sunulmaktadır. Orta yük koşulunda, tüm yakıtlar için maksimum silindir basıncının ÜÖN civarında gerçekleştiği ve düşük yük koşuluna kıyasla daha yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Grafen nano katkısının ilavesiyle birlikte silindir içi basınç değerlerinde belirgin bir artış gözlenmiştir. Özellikle 50 ppm grafen katkılı B20 yakıtı, yaklaşık 53–54 bar seviyesine ulaşan maksimum silindir basıncı ile en yüksek değeri sergilemiştir. Katkısız Dizel yakıtında ise maksimum silindir basıncı yaklaşık 51–52 bar civarında gerçekleşmiştir. Bu artış, artan motor yüküyle birlikte grafen nano katkısının yanma hızını artırarak daha etkin bir premiks yanma fazı oluşturmasına

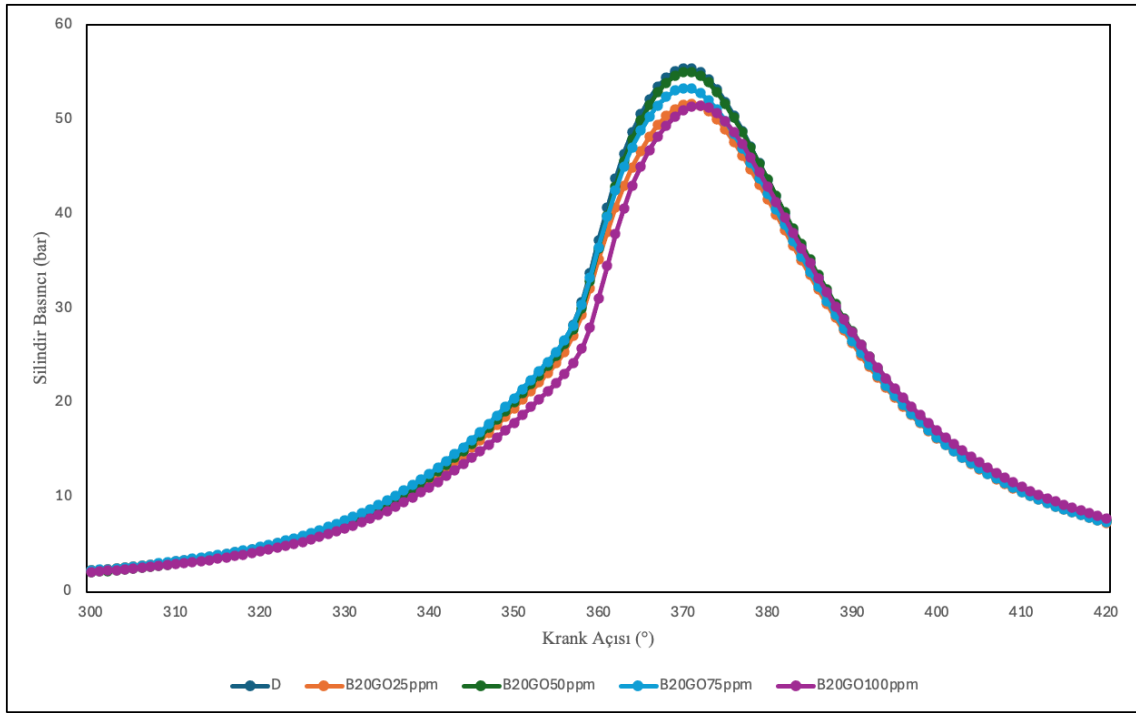
bağlanabilir. Daha yüksek katkı oranlarında (75 ve 100 ppm) maksimum silindir basıncı değerlerinin 50 ppm seviyesine kıyasla sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu durum, artan yük koşullarında dahi yüksek katkı oranlarının yanma sürecine ek bir avantaj sağlamadığını ve optimum katkı oranının 50 ppm seviyesinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 7. 1 bar OEB göre krank açısına bağlı silindir basıncı değişimi (bar)

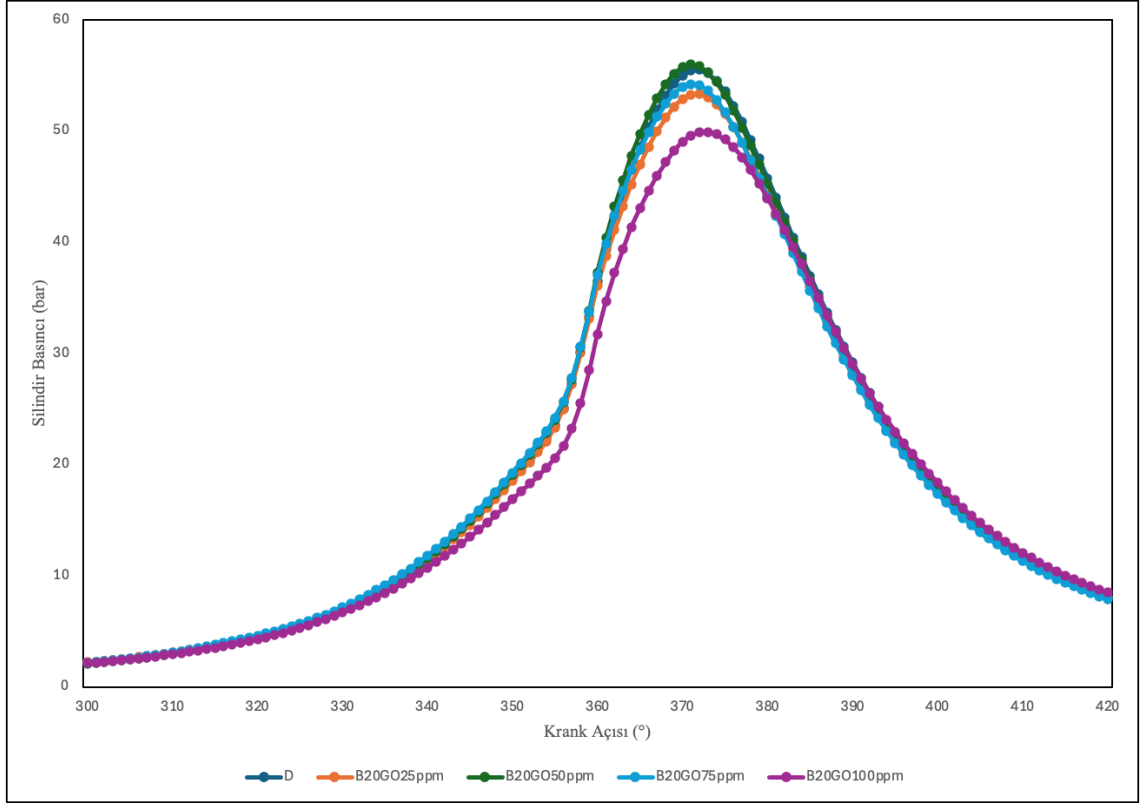
Şekil 8’de, 2 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda B20 yakıtı ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren test yakıtları için krank açısına bağlı silindir içi basınç değişimleri sunulmaktadır. Yük artışıyla birlikte tüm yakıtlar için maksimum silindir basınçlarının arttığı ve basınç tepe noktalarının ÜÖN civarında oluştuğu görülmektedir. Grafen nano katkısı içeren yakıtlar arasında en yüksek maksimum silindir basıncı değerinin 50 ppm grafen katkılı B20 yakıtında elde edildiği belirlenmiştir. Bu yakıt için maksimum silindir basıncı yaklaşık 55–56 bar seviyelerine ulaşırken, katkısız Dizel yakıtında bu değer yaklaşık 53–54 bar civarında gerçekleşmiştir. Elde edilen artış, grafen nano katkısının artan yük koşullarında yanma sürecini hızlandırarak daha düzenli ve etkin bir ısı açığa çıkmasına katkı sağladığını göstermektedir. Daha yüksek katkı oranlarında (75 ve 100 ppm) maksimum silindir basıncı değerlerinin 50 ppm seviyesine göre daha düşük kaldığı gözlenmiştir. Bu durum, artan yük koşullarında dahi yüksek katkı oranlarının yanma sürecine ilave bir

avantaj sağlamadığını ve grafen nano katkısı için optimum katkı oranının 2 bar OEB koşulunda da 50 ppm seviyesinde olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 8. 2 bar OEB göre krank açısına bağlı silindir basıncı değişimi (bar)

Şekil 9’da, 3 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda B20 yakıtı ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren test yakıtları için krank açısına bağlı silindir içi basınç değişimleri gösterilmektedir. Yükün artmasıyla birlikte tüm yakıtlar için maksimum silindir basınçlarının önceki yük koşullarına kıyasla daha yüksek seviyelere ulaştığı ve basınç tepe noktalarının ÜÖN civarında oluştuğu görülmektedir. Grafen nano katkılı yakıtlar arasında en yüksek maksimum silindir basıncı değeri, yaklaşık 55–56 bar ile 50 ppm grafen katkılı B20 yakıtında elde edilmiştir. Katkısız Dizel yakıtında maksimum silindir basıncı yaklaşık 53 bar civarında gerçekleşirken, 25 ppm grafen katkılı yakıtta bu değer yaklaşık 54 bar seviyesine ulaşmıştır. Bu sonuçlar, artan yük koşullarında grafen nano katkısının yanma sürecini destekleyici etkisinin devam ettiğini göstermektedir. Buna karşılık, 75 ve 100 ppm grafen katkı oranlarında maksimum silindir basıncı değerlerinin 50 ppm seviyesine kıyasla daha düşük kaldığı gözlenmiştir. Yüksek katkı oranlarında görülen bu sınırlı artış, yakıt-hava karışımının doygunluğa ulaşması ve nano parçacıkların aglomerasyon eğilimi göstermesiyle ilişkilendirilebilir. Elde edilen bulgular, 3 bar OEB koşulunda da grafen nano katkısı için optimum katkı oranının 50 ppm olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 9.3 3 bar OEB göre krank açısına bağlı silindir basıncı değişimi (bar)

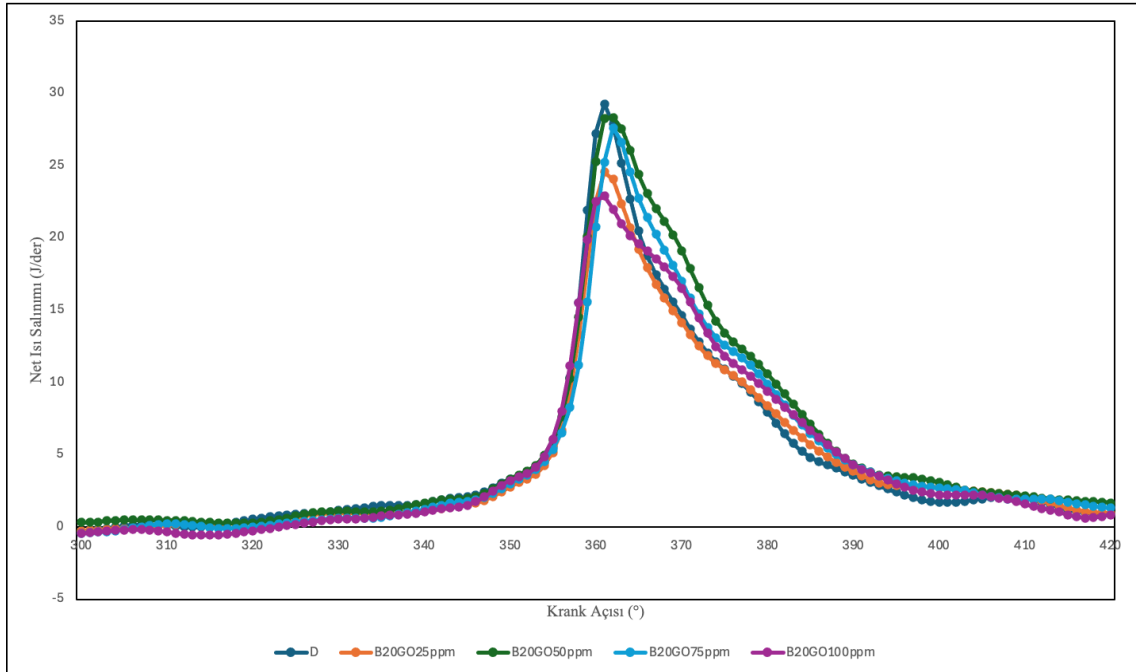
### 5.1.2. Net ısı salınımı

Net ısı salınımı, dizel motorlarda yanma sürecinin zamana ve krank açısına bağlı olarak nasıl geliştiğini ortaya koyan önemli bir parametredir. Isı salınımı eğrileri, tutuşma gecikmesi süresi, premiks yanma fazı ve difüzyon yanması hakkında doğrudan bilgi sağlamaktadır. Yakıt özellikleri ve katkı maddeleri, yanma hızını ve ısı açığa çıkış karakterini değiştirerek net ısı salınımı eğrilerinin şeklini ve tepe değerlerini etkilemektedir.

Bu çalışmada, B20 yakıtına farklı oranlarda grafen nano katkısı ilavesinin, farklı yük koşullarında net ısı salınımı karakteristikleri üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen net ısı salınımı eğrileri yardımıyla, grafen nano katkısının yanma sürecine olan katkısı ve optimum katkı oranı değerlendirilmiştir. Sabit devirdeki motora (1500 d/dk) ve krank açısına bağlı olarak sırasıyla 0.3, 1, 2 ve 3 bar OEB motor yükleri altında deney yakıtlarının net ısı salınımı (J/der) değerleri ölçülmüş ve Şekil 10-11-12-13'te sunulmuştur.

Şekil 10'da, 0,3 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda B20 yakıtı ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren test yakıtları için krank açısına bağlı net ısı salınımı değişimleri gösterilmektedir. Düşük yük koşulunda, tüm yakıtlar için net ısı salınımının tutuşma gecikmesinin ardından ÜÖN civarında ani bir artış gösterdiği ve premiks yanma fazında tepe değerine ulaştığı görülmektedir. Grafen nano katkısı ilavesiyle birlikte net ısı salınımı tepe değerlerinde belirgin artışlar gözlenmiştir. Özellikle 50 ppm grafen katkılı B20 yakıtında, yaklaşık 28–29 J/°CA seviyelerine ulaşan en yüksek net ısı salınımı değeri elde edilmiştir.

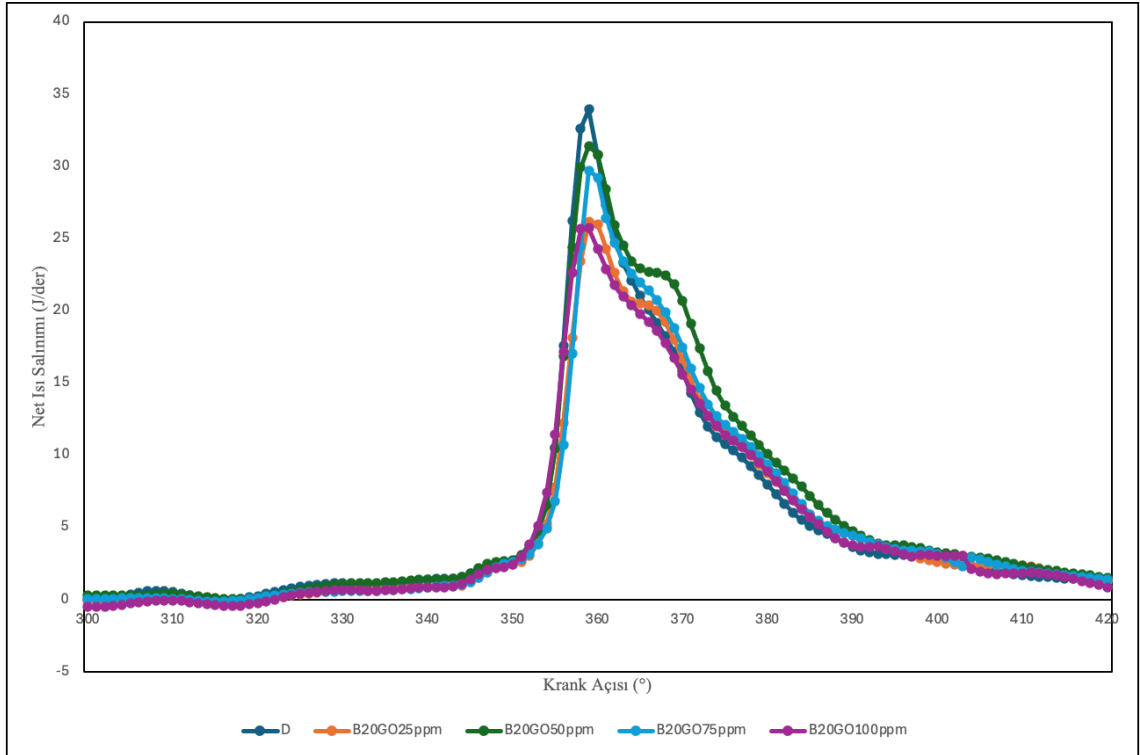
Katkısız Dizel yakıtında ise net ısı salınımı tepe değeri yaklaşık 26–27 J/°CA civarında gerçekleşmiştir. Bu artış, grafen nano katkısının yanma başlangıcını hızlandırarak premiks yanma fazında daha yoğun bir ısı açığa çıkmasına katkı sağladığını göstermektedir. Daha yüksek katkı oranlarında (75 ve 100 ppm) net ısı salınımı tepe değerlerinin 50 ppm seviyesine kıyasla daha düşük kaldığı görülmektedir. Düşük yük koşullarında yüksek katkı oranlarında ortaya çıkan bu sınırlı artış, yakıt–hava karışımının sınırlı olması ve nano parçacıkların aglomerasyon eğilimi göstermesi ile ilişkilendirilebilir. Elde edilen bulgular, 0,3 bar OEB koşulunda net ısı salınımı açısından grafen nano katkısının en etkili olduğu katkı oranının 50 ppm olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 10. 0,3 bar OEB göre krank açısına bağlı Net Isı Salınımı değişimi (J/der)

Şekil 11’de, 1 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda B20 yakıtı ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren test yakıtları için krank açısına bağlı net ısı salınımı değişimleri sunulmaktadır. Orta yük koşulunda, net ısı salınımı eğrilerinin 0,3 bar OEB koşuluna kıyasla daha yüksek tepe değerlerine ulaştığı ve yanma sürecinin daha düzenli bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir.

Grafen nano katkılı yakıtlar arasında en yüksek net ısı salınımı tepe değeri, yaklaşık 31–32 J/°CA ile 50 ppm grafen katkılı B20 yakıtında elde edilmiştir. Katkısız Dizel yakıtında net ısı salınımı tepe değeri yaklaşık 29–30 J/°CA seviyesinde gerçekleşirken, 25 ppm grafen katkılı yakıtta bu değer yaklaşık 27–28 J/°CA civarında kalmıştır. Bu sonuçlar, artan motor yüküyle birlikte grafen nano katkısının yanma hızını artırarak premiks yanma fazında daha yoğun bir ısı açığa çıkmasına katkı sağladığını göstermektedir. Daha yüksek grafen katkı oranlarında (75 ve 100 ppm), net ısı salınımı tepe değerlerinin 50 ppm seviyesine kıyasla daha düşük kaldığı gözlenmiştir. Bu durum, orta yük koşullarında yüksek katkı oranlarının yanma sürecine ilave bir avantaj sağlamadığını ve grafen nano katkısı için optimum katkı oranının 1 bar OEB koşulunda da 50 ppm seviyesinde oluştuğunu ortaya koymaktadır.

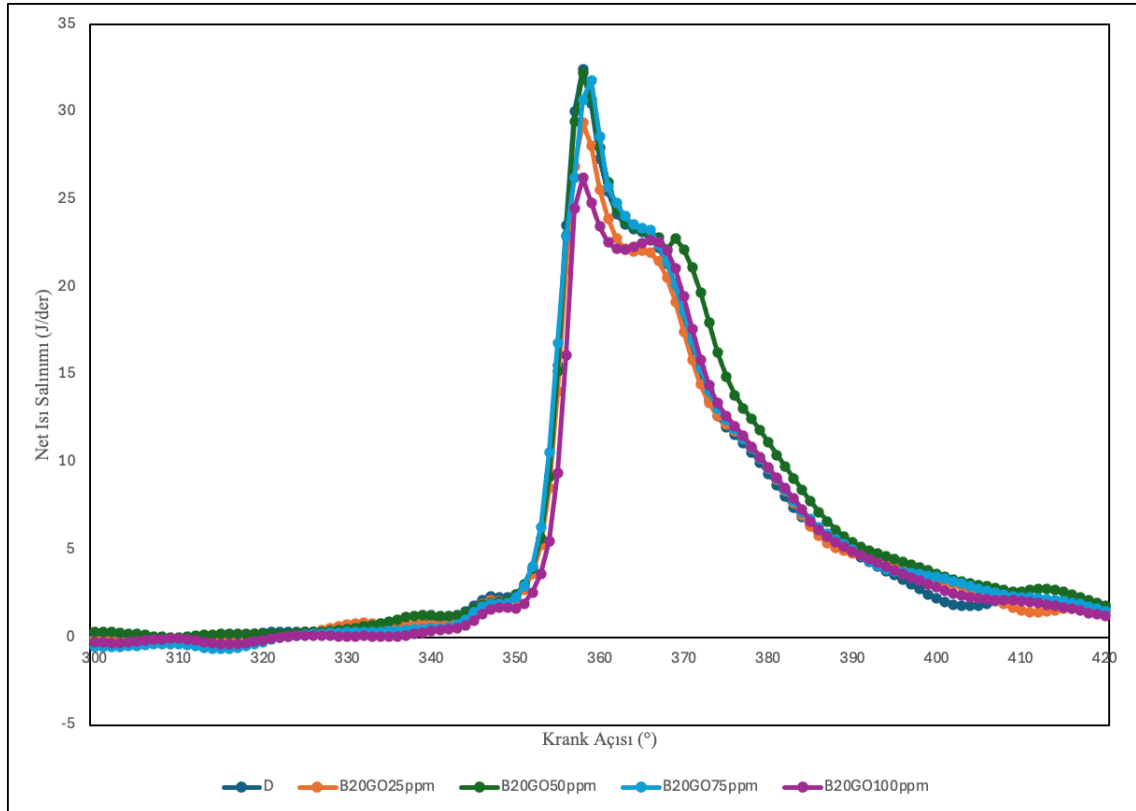


**Şekil 11.** 1 bar OEB göre krank açısına bağlı Net Isı Salınımı değişimi (J/der)

Şekil 12’de, 2 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda B20 yakıtı ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren test yakıtları için krank açısına bağlı net ısı salınımı

değişimleri gösterilmektedir. Yük artışıyla birlikte, net ısı salınımı eğrilerinin daha yüksek tepe değerlerine ulaştığı ve yanma sürecinin premiks ve difüzyon yanması fazlarının daha belirgin hale geldiği görülmektedir.

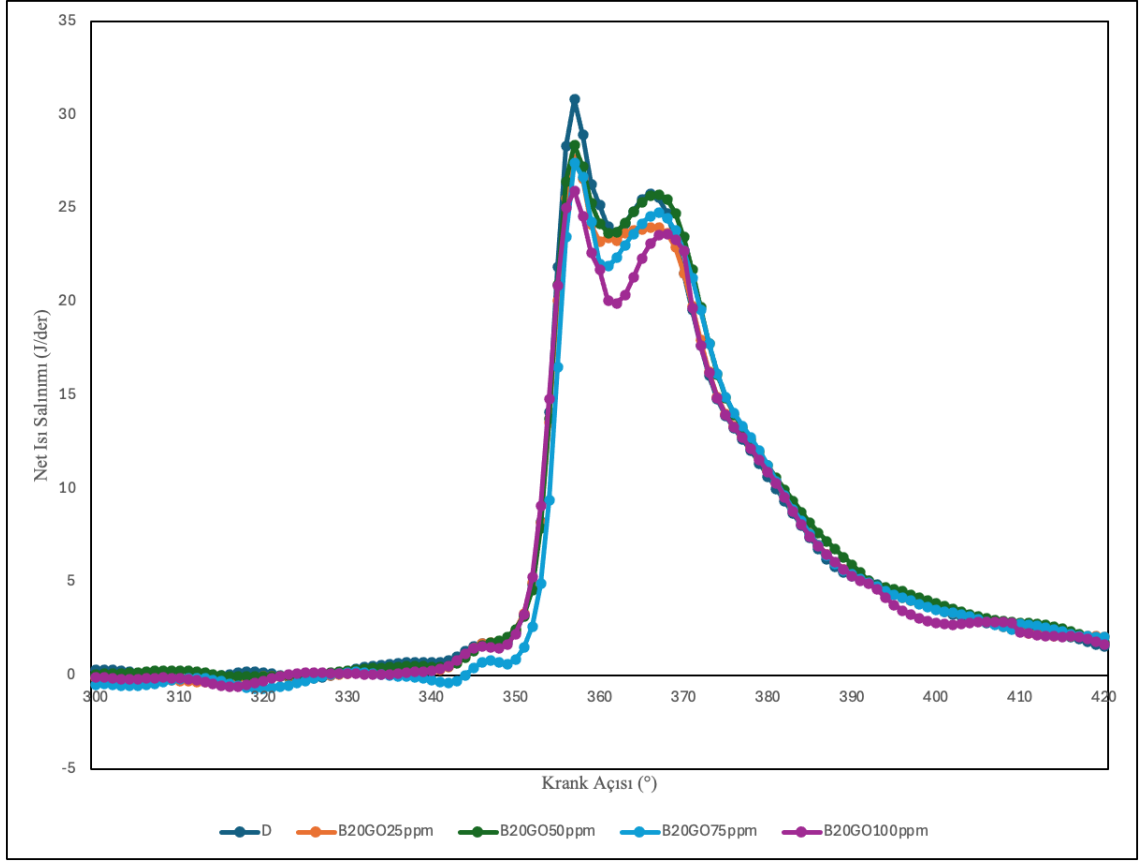
Grafen nano katkılı yakıtlar arasında en yüksek net ısı salınımı tepe değeri, yaklaşık 32–33 J/°CA ile 50 ppm grafen katkılı B20 yakıtında elde edilmiştir. Katkısız Dizel yakıtında net ısı salınımı tepe değeri yaklaşık 30–31 J/°CA seviyesinde gerçekleşirken, 25 ppm grafen katkılı yakıtta bu değer yaklaşık 29–30 J/°CA civarında kalmıştır. Bu sonuçlar, artan yük koşullarında grafen nano katkısının yanma hızını artırarak premiks yanma fazında daha etkin bir ısı açığa çıkmasına katkı sağladığını göstermektedir. Daha yüksek grafen katkı oranlarında (75 ve 100 ppm), net ısı salınımı tepe değerlerinin 50 ppm seviyesine göre daha düşük olduğu ve yanma sürecinin daha yayvan bir karakter sergilediği gözlenmiştir. Bu durum, yüksek katkı oranlarında nano parçacıkların aglomerasyon eğilimi göstermesi ve yanma veriminin sınırlanması ile ilişkilendirilebilir. Elde edilen bulgular, 2 bar OEB koşulunda da net ısı salınımı açısından grafen nano katkısı için optimum katkı oranının 50 ppm olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 12. 2 bar OEB göre krank açısına bağlı Net Isı Salınımı değişimi (J/der)

Şekil 13'te, 3 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda B20 yakıtı ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren test yakıtları için krank açısına bağlı net ısı salınımı değişimleri gösterilmektedir. Yükün artmasıyla birlikte, net ısı salınımı eğrilerinin daha karmaşık bir yapı sergilediği ve premiks yanma ile difüzyon yanması fazlarının daha belirgin şekilde ayrıştığı görülmektedir.

Grafen nano katkılı yakıtlar arasında, 50 ppm grafen katkılı B20 yakıtı hem premiks yanma fazında hem de difüzyon yanması sürecinde daha dengeli bir ısı açığa çıkışı sergilemiştir. Bu yakıt için net ısı salınımı tepe değeri yaklaşık 28–29 J/°CA seviyelerinde gerçekleşmiş olup, katkısız Dizel yakıtına kıyasla daha düzenli bir yanma karakteri ortaya koymuştur. Katkısız Dizel yakıtında premiks yanma fazında daha ani ve yüksek bir tepe değeri gözlenirken, bu durum yüksek yük koşullarında yanma sertliğini artırabilecek bir etki oluşturmaktadır. Daha yüksek grafen katkı oranlarında (75 ve 100 ppm), net ısı salınımı eğrilerinin daha yayvan bir karakter sergilediği ve tepe değerlerinin 50 ppm seviyesine kıyasla daha düşük kaldığı belirlenmiştir. Yüksek katkı oranlarında gözlenen bu durum, yanma sürecinin uzaması ve nano parçacıkların aglomerasyon eğilimi göstermesiyle ilişkilendirilebilir. Elde edilen bulgular, 3 bar OEB koşulunda da net ısı salınımı açısından grafen nano katkısı için optimum katkı oranının 50 ppm olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 13. 3 bar OEB göre krank açısına bağlı Net Isı Salınımı değişimi (J/der)

### 5.1.3. Kümülatif ısı salınımı

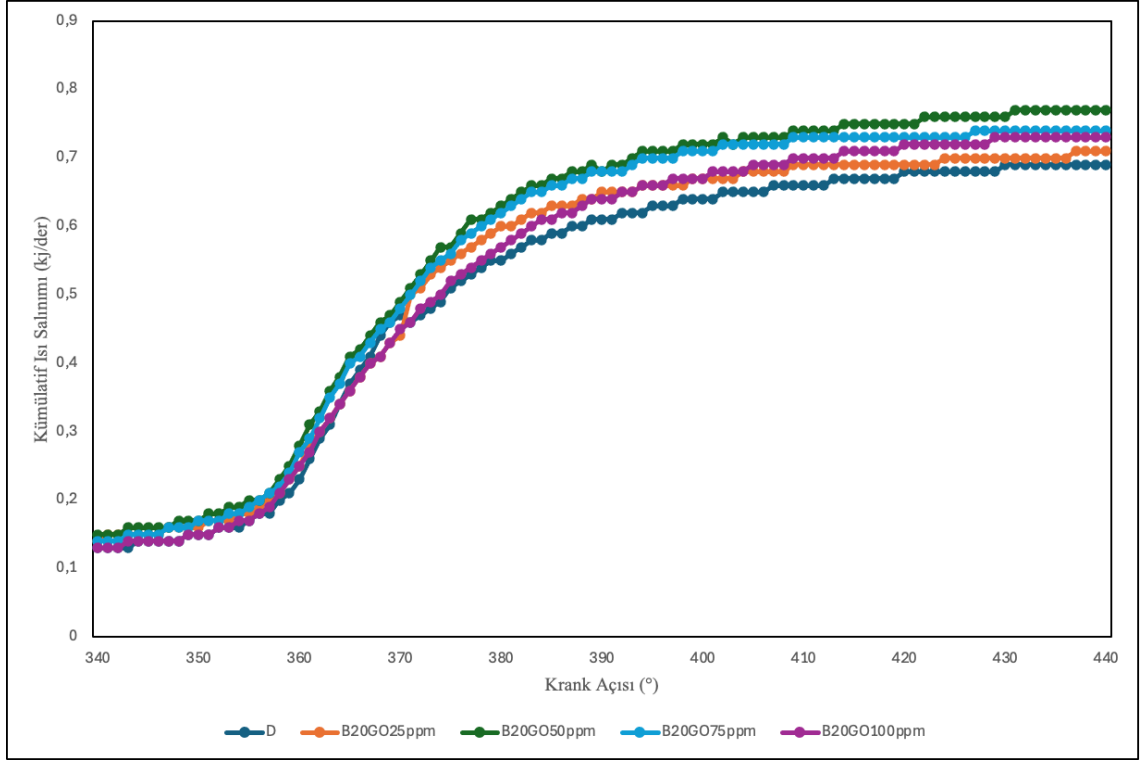
Kümülatif ısı salınımı, yanma süreci boyunca silindir içerisinde açığa çıkan toplam ısı miktarının krank açısına bağlı olarak değişimini ifade etmektedir. Bu parametre, yakıtın enerji potansiyelinin ne ölçüde ve ne zaman açığa çıktığını ortaya koyarak, yanma verimi ve motor performansı hakkında bütüncül bir değerlendirme yapılmasına olanak sağlamaktadır. Net ısı salınımı eğrilerinin integrali olarak elde edilen kümülatif ısı salınımı, yanmanın ilerleme sürecini ve tamamlanma karakterini yansıtan önemli bir göstergedir.

Yakıt özellikleri ve katkı maddeleri, yanma sürecinin hızını ve süresini değiştirerek kümülatif ısı salınımı eğrilerinin eğimini ve nihai seviyesini etkilemektedir. Bu çalışmada, B20 yakıtına farklı oranlarda ilave edilen grafen nano katkısının, farklı yük koşullarında kümülatif ısı salınımı karakteristikleri üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen kümülatif ısı salınımı eğrileri yardımıyla, grafen nano katkısının yanma sürecine olan katkısı ve optimum katkı oranı değerlendirilmiştir.

Kümülatif ısı salınımı, 1500 d/dk sabit motor devrinde, D, B20GO25ppm, B20GO50ppm, B20GO75ppm ve B20GO100ppm yakıt karışımlarına ait ve 0,3, 1, 2 ve 3 bar OEB yük koşullarında ölçülerek sırasıyla Şekil 14-15-16-17’de krank mili açısına göre kJ/der cinsinden sunulmuştur.

Şekil 14’te, 0,3 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda B20 yakıtı ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren test yakıtları için krank açısına bağlı kümülatif ısı salınımı değişimleri gösterilmektedir. Düşük yük koşulunda, tüm yakıtlar için kümülatif ısı salınımının ÜÖN sonrasında artış gösterdiği ve yanma sürecinin ilerlemesiyle birlikte plato bölgesine ulaştığı görülmektedir.

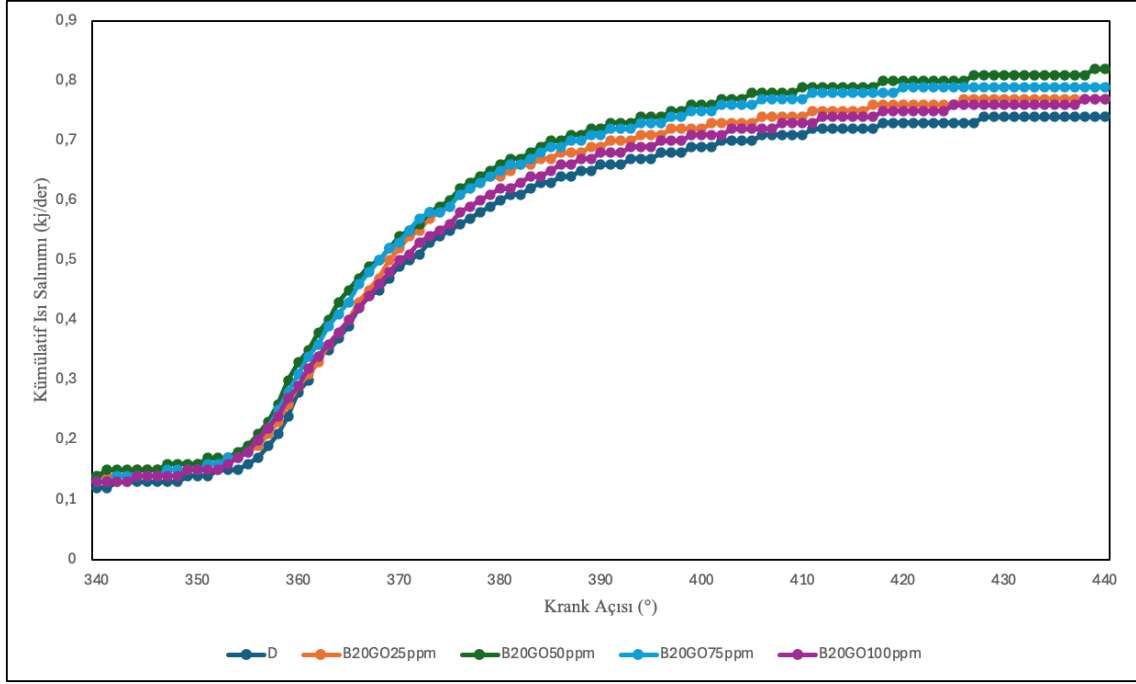
Grafen nano katkısı ilavesiyle birlikte kümülatif ısı salınımı değerlerinde belirgin artışlar elde edilmiştir. Özellikle 50 ppm grafen katkılı B20 yakıtında, yaklaşık 0,76–0,77 kJ/°CA seviyelerine ulaşan en yüksek kümülatif ısı salınımı değeri belirlenmiştir. Katkısız Dizel yakıtında bu değer yaklaşık 0,68–0,69 kJ/°CA seviyesinde gerçekleşmiştir. Elde edilen artış, grafen nano katkısının düşük yük koşullarında dahi yanma sürecini destekleyerek yakıt enerjisinin daha etkin şekilde açığa çıkmasını sağladığını göstermektedir. Daha yüksek katkı oranlarında (75 ve 100 ppm) kümülatif ısı salınımı değerlerinin 50 ppm seviyesine kıyasla daha düşük kaldığı gözlenmiştir. Bu durum, düşük yük koşullarında yüksek katkı oranlarının yanma sürecine ilave bir avantaj sağlamadığını ve grafen nano katkısı için optimum katkı oranının 0,3 bar OEB koşulunda 50 ppm olduğunu ortaya koymaktadır.



**Şekil 14.** 0,3 bar OEB göre krank açısına bağlı Kümülatif Isı Salınımı değişimi

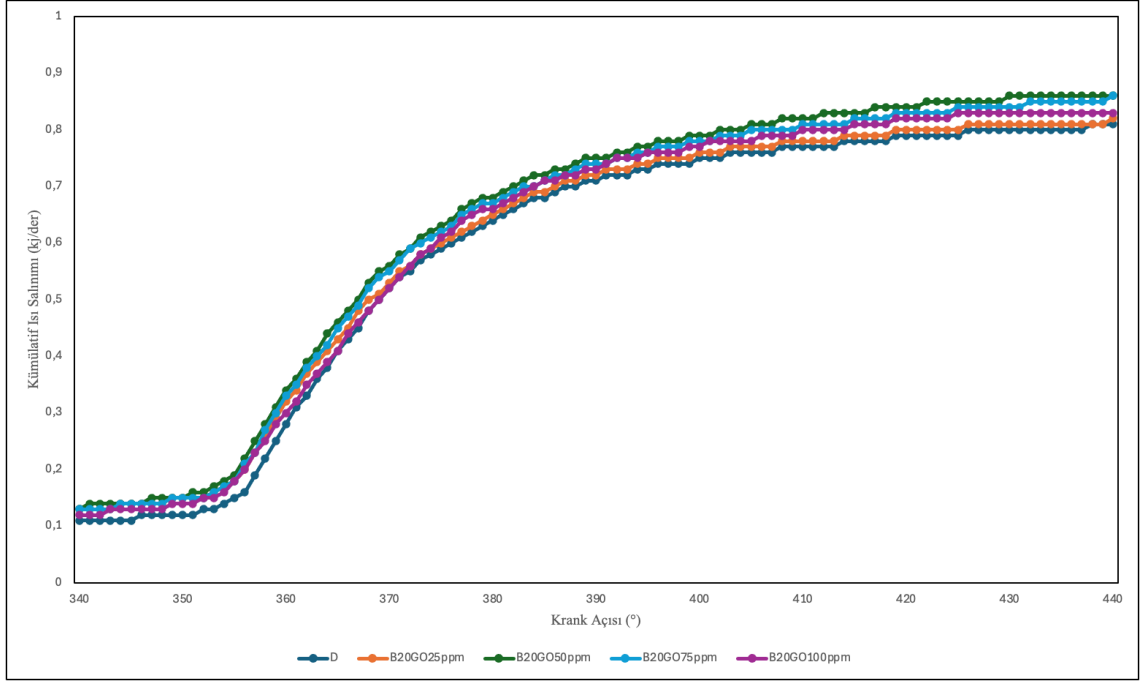
Şekil 15’te, 1 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda B20 yakıtı ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren test yakıtları için krank açısına bağlı kümülatif ısı salınımı değişimleri gösterilmektedir. Orta yük koşulunda, kümülatif ısı salınımı eğrilerinin 0,3 bar OEB koşuluna kıyasla daha yüksek seviyelere ulaştığı ve yanma sürecinin daha erken krank açıları civarında tamamlandığı görülmektedir.

Grafen nano katkılı yakıtlar arasında en yüksek kümülatif ısı salınımı değeri, yaklaşık 0,80–0,81 kJ/°CA ile 50 ppm grafen katkılı B20 yakıtında elde edilmiştir. Katkisiz Dizel yakıtında kümülatif ısı salınımı değeri yaklaşık 0,73–0,74 kJ/°CA seviyesinde gerçekleşirken, 25 ppm grafen katkılı yakıtta bu değer yaklaşık 0,75 kJ/°CA civarında kalmıştır. Bu sonuçlar, artan yük koşulunda grafen nano katkısının yanma sürecini hızlandırarak yakıt enerjisinin daha etkin şekilde kullanılmasına katkı sağladığını göstermektedir. Daha yüksek grafen katkı oranlarında (75 ve 100 ppm) kümülatif ısı salınımı değerlerinin 50 ppm seviyesine göre daha düşük kaldığı gözlenmiştir. Bu durum, orta yük koşullarında yüksek katkı oranlarının yanma sürecine ek bir avantaj sağlamadığını ve grafen nano katkısı için optimum katkı oranının 1 bar OEB koşulunda da 50 ppm olduğunu ortaya koymaktadır.



**Şekil 15.** 1 bar OEB göre krank açısına bağlı Kümülatif Isı Salınımı değişimi  
 Şekil 16'da, 2 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda B20 yakıtı ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren test yakıtları için krank açısına bağlı kümülatif ısı salınımı değişimleri sunulmaktadır. Yük artışıyla birlikte, kümülatif ısı salınımı eğrilerinin daha yüksek seviyelere ulaştığı ve yanma sürecinin daha kısa bir krank açısı aralığında tamamlandığı görülmektedir.

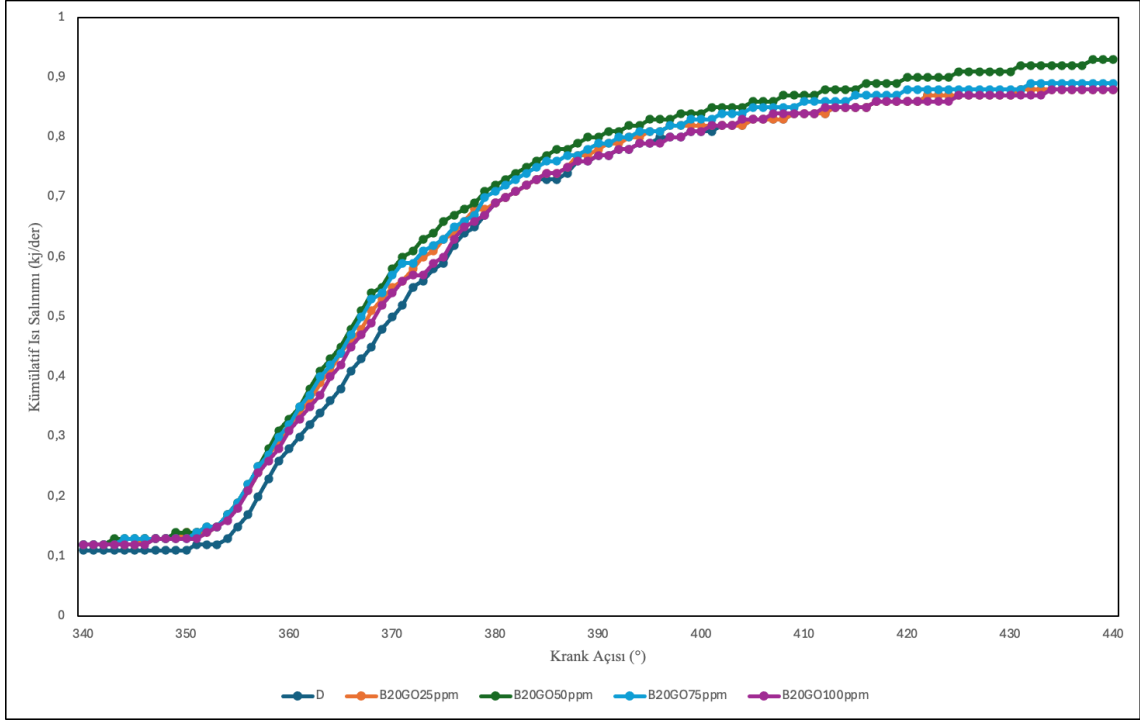
Grafen nano katkılı yakıtlar arasında en yüksek kümülatif ısı salınımı değeri, yaklaşık 0,85–0,86 kJ/°CA ile 50 ppm grafen katkılı B20 yakıtında elde edilmiştir. Katkisiz Dizel yakıtında kümülatif ısı salınımı değeri yaklaşık 0,80 kJ/°CA seviyesinde gerçekleşirken, 25 ppm grafen katkılı yakıtta bu değer yaklaşık 0,82 kJ/°CA civarında kalmıştır. Bu sonuçlar, artan yük koşullarında grafen nano katkısının yanma verimini artırarak yakıt enerjisinin daha etkin şekilde açığa çıkmasını sağladığını göstermektedir. Daha yüksek grafen katkı oranlarında (75 ve 100 ppm), kümülatif ısı salınımı değerlerinin 50 ppm seviyesine kıyasla sınırlı bir artış gösterdiği gözlenmiştir. Bu durum, yüksek katkı oranlarında yanma sürecinin yayılması ve nano parçacıkların aglomerasyon eğilimi göstermesi ile ilişkilendirilebilir. Elde edilen bulgular, 2 bar OEB koşulunda da kümülatif ısı salınımı açısından grafen nano katkısı için optimum katkı oranının 50 ppm olduğunu ortaya koymaktadır.



**Şekil 16.** 2 bar OEB göre krank açısına bağlı Kümülatif Isı Salınımı değişimi

Şekil 17’de, 3 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda B20 yakıtı ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren test yakıtları için krank açısına bağlı kümülatif ısı salınımı değişimleri gösterilmektedir. Yükün artmasıyla birlikte, kümülatif ısı salınımı eğrilerinin önceki yük koşullarına kıyasla daha yüksek seviyelere ulaştığı ve yanma sürecinin daha erken krank açıları civarında büyük ölçüde tamamlandığı görülmektedir.

Grafen nano katkılı yakıtlar arasında en yüksek kümülatif ısı salınımı değeri, yaklaşık 0,92–0,93 kJ/°CA ile 50 ppm grafen katkılı B20 yakıtında elde edilmiştir. Katkisiz Dizel yakıtında kümülatif ısı salınımı değeri yaklaşık 0,88–0,89 kJ/°CA seviyesinde gerçekleşirken, 25 ppm grafen katkılı yakıtta bu değer yaklaşık 0,90 kJ/°CA civarında kalmıştır. Bu sonuçlar, yüksek yük koşullarında grafen nano katkısının yanma sürecini daha etkin hale getirerek toplam açığa çıkan enerji miktarını artırdığını göstermektedir. Daha yüksek grafen katkı oranlarında (75 ve 100 ppm), kümülatif ısı salınımı değerlerinin 50 ppm seviyesine kıyasla sınırlı kaldığı ve eğrilerin daha yayvan bir karakter sergilediği belirlenmiştir. Bu durum, yüksek katkı oranlarında yanma sürecinin uzaması ve nano parçacıkların aglomerasyon eğilimi göstermesiyle ilişkilendirilebilir. Elde edilen bulgular, 3 bar OEB koşulunda da kümülatif ısı salınımı açısından grafen nano katkısı için optimum katkı oranının 50 ppm olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 17. 3 bar OEB göre krank açısına bağlı Kümülatif Isı Salınımı değişimi

#### 5.1.4. Basınç artış oranı

Basınç artış oranı ( $dp/d\theta$ ), silindir içerisindeki basıncın krank açısına bağlı olarak değişim hızını ifade eden ve yanma sürecinin şiddeti hakkında doğrudan bilgi sağlayan önemli bir yanma parametresidir. Bu parametre, özellikle premiks yanma fazında meydana gelen hızlı basınç artışlarını ortaya koyarak, yanma sertliği, mekanik yükler ve motor gürültüsü ile yakından ilişkilendirilmektedir.

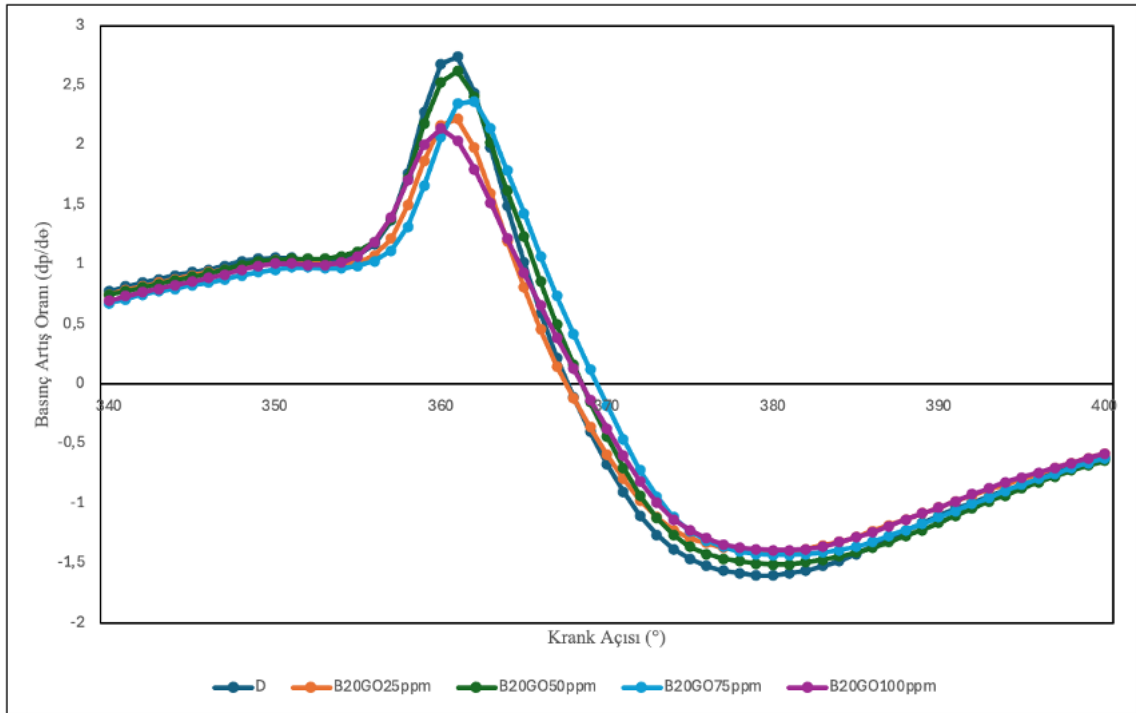
Yakıt özellikleri ve katkı maddeleri, tutuşma gecikmesi süresini ve yanma hızını etkileyerek basınç artış oranı eğrilerinin tepe değerlerini ve oluştuğu krank açısını değiştirebilmektedir. Bu çalışmada, B20 yakıtına farklı oranlarda ilave edilen grafen nano katkısının, farklı yük koşullarında basınç artış oranı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen  $dp/d\theta$  eğrileri yardımıyla, grafen nano katkısının yanma sertliği üzerindeki etkisi ve optimum katkı oranı değerlendirilmiştir.

Deney yakıtlarının (D, B20GO25ppm, B20GO50ppm, B20GO75ppm ve B20GO100ppm) basınç artış oranı ( $dp/d\theta$ ) değerleri, 1500 d/dk sabit motor devrinde ve 0,3, 1, 2 ve 3 bar OEB yük koşullarında krank açısına bağlı olarak ölçülmüş ve sırasıyla Şekil 18-19-20-21'de sunulmuştur.

Şekil 18'de, 0,3 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda B20 yakıtı ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren test yakıtları için krank açısına bağlı basınç

artış oranı ( $dp/d\theta$ ) değişimleri gösterilmektedir. Düşük yük koşulunda, tüm yakıtlar için basınç artış oranının ÜÖN civarında ani bir artış gösterdiği ve premiks yanma fazında maksimum değerine ulaştığı görülmektedir.

Grafen nano katkılı yakıtlar arasında en yüksek basınç artış oranı tepe değeri, yaklaşık 2,6–2,7 bar/°CA ile 50 ppm grafen katkılı B20 yakıtında elde edilmiştir. Katkisız Dizel yakıtında bu değer yaklaşık 2,4–2,5 bar/°CA seviyesinde gerçekleşirken, 25 ppm grafen katkılı yakıtta basınç artış oranı tepe değeri yaklaşık 2,2–2,3 bar/°CA civarında kalmıştır. Bu sonuçlar, grafen nano katkısının düşük yük koşullarında yanma hızını artırarak premiks yanma fazında daha hızlı bir basınç artışına neden olduğunu göstermektedir. Daha yüksek grafen katkı oranlarında (75 ve 100 ppm), basınç artış oranı tepe değerlerinin 50 ppm seviyesine kıyasla daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu durum, yüksek katkı oranlarında yanma sürecinin daha yayvan gerçekleşmesi ve basınç artış hızının sınırlanması ile ilişkilendirilebilir. Elde edilen bulgular, 0,3 bar OEB koşulunda grafen nano katkısının yanma sertliğini kontrol altında tutarak en dengeli etkiyi 50 ppm katkı oranında sağladığını ortaya koymaktadır.

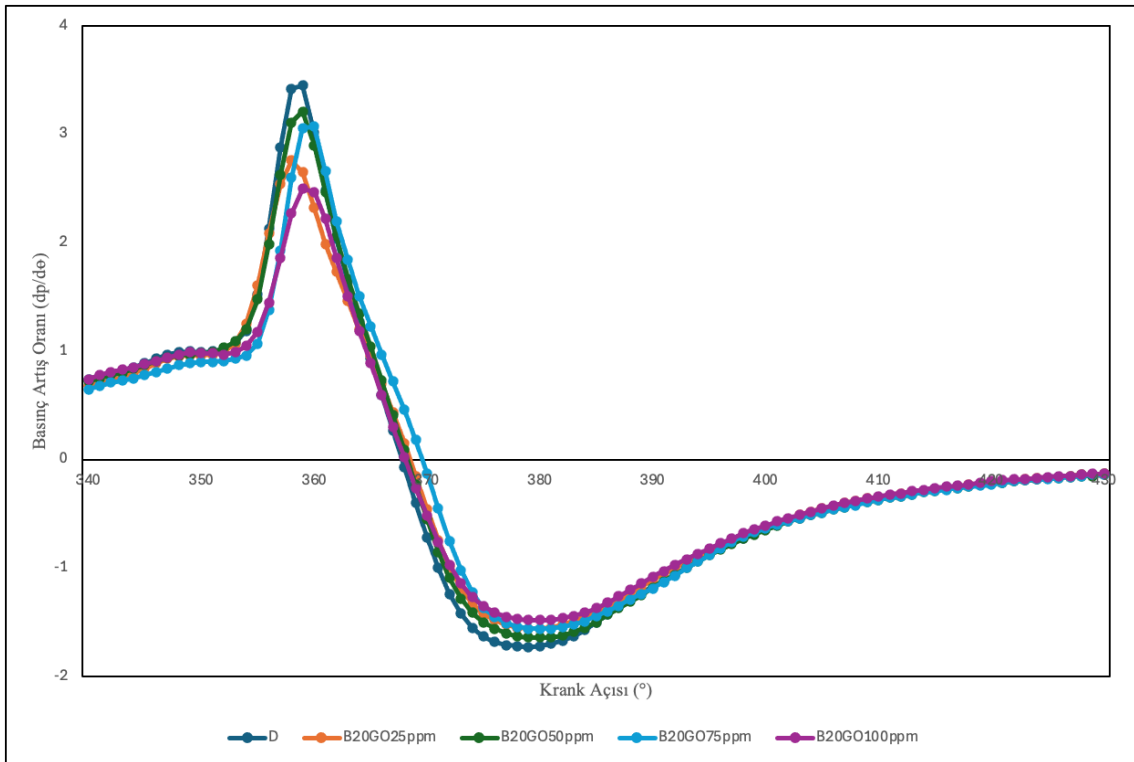


**Şekil 18.** 0,3 bar OEB göre krank açısına bağlı Basınç Artış Oranı değişimi ( $dp/d\theta$ )

Şekil 19'da, 1 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda B20 yakıtı ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren test yakıtları için krank açısına bağlı basınç artış oranı ( $dp/d\theta$ ) değişimleri gösterilmektedir. Orta yük koşulunda, basınç artış oranı

eğrilerinin 0,3 bar OEB koşuluna kıyasla daha yüksek tepe değerlerine ulaştığı ve premiks yanma fazının daha belirgin hale geldiği görülmektedir.

Grafen nano katkılı yakıtlar arasında en yüksek basınç artış oranı tepe değeri, yaklaşık 3,2–3,3 bar/°CA ile 50 ppm grafen katkılı B20 yakıtında elde edilmiştir. Katkisiz Dizel yakıtında basınç artış oranı tepe değeri yaklaşık 3,0–3,1 bar/°CA seviyesinde gerçekleşirken, 25 ppm grafen katkılı yakıtta bu değer yaklaşık 2,8–2,9 bar/°CA civarında kalmıştır. Bu artış, grafen nano katkısının artan yük koşullarında yanma hızını artırarak daha hızlı bir basınç yükselmesine neden olduğunu göstermektedir. Daha yüksek grafen katkı oranlarında (75 ve 100 ppm), basınç artış oranı tepe değerlerinin 50 ppm seviyesine kıyasla daha düşük olduğu ve eğrilerin daha yayvan bir karakter sergilediği gözlenmiştir. Bu durum, orta yük koşullarında yüksek katkı oranlarının yanma sertliğini sınırladığı ve grafen nano katkısı için optimum katkı oranının 1 bar OEB koşulunda da 50 ppm seviyesinde olduğunu ortaya koymaktadır.

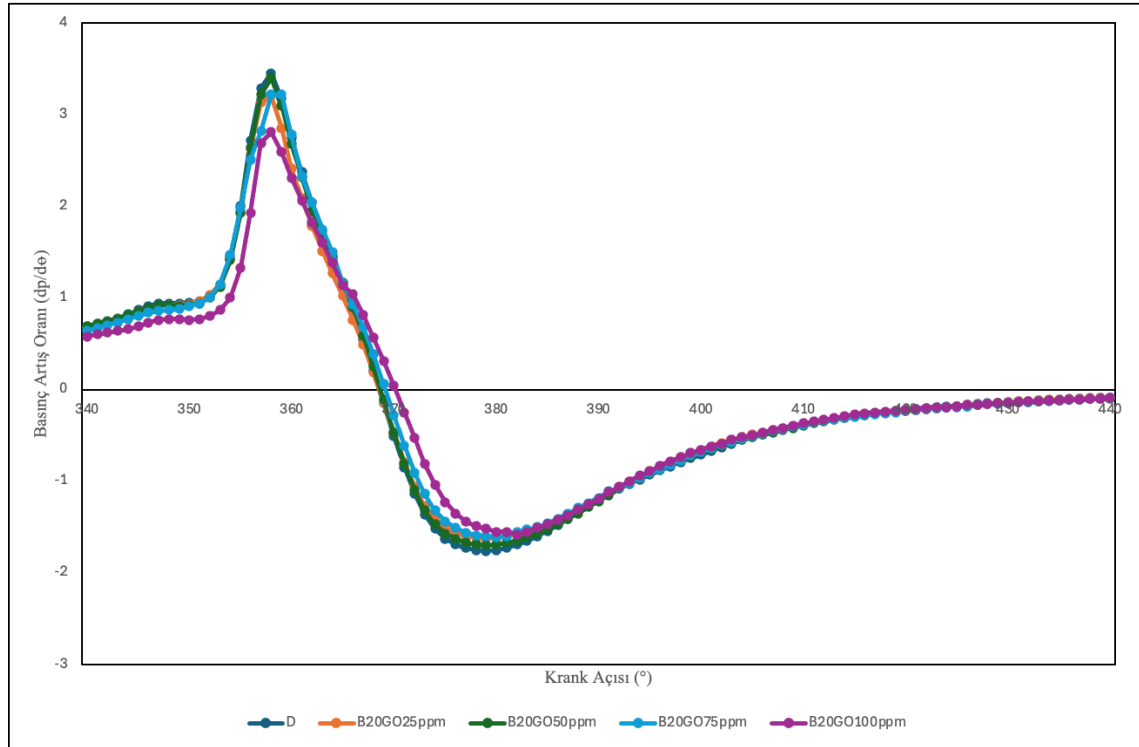


Şekil 19. 1 bar OEB göre krank açısına bağlı Basınç Artış Oranı değişimi (dp/dθ)

Şekil 20'de, 2 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda B20 yakıtı ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren test yakıtları için krank açısına bağlı basınç artış oranı (dp/dθ) değişimleri sunulmaktadır. Yük artışıyla birlikte, basınç artış oranı

eğrilerinin daha yüksek tepe değerlerine ulaştığı ve premiks yanma fazında basınç yükselme hızının belirgin şekilde arttığı görülmektedir.

Grafen nano katkılı yakıtlar arasında en yüksek basınç artış oranı tepe değeri, yaklaşık 3,3–3,4 bar/°CA ile 50 ppm grafen katkılı B20 yakıtında elde edilmiştir. Katkisiz Dizel yakıtında basınç artış oranı tepe değeri yaklaşık 3,1–3,2 bar/°CA seviyesinde gerçekleşirken, 25 ppm grafen katkılı yakıtta bu değer yaklaşık 3,0 bar/°CA civarında kalmıştır. Bu sonuçlar, artan yük koşullarında grafen nano katkısının yanma hızını artırarak premiks yanma fazında daha hızlı bir basınç artışına neden olduğunu göstermektedir. Daha yüksek grafen katkı oranlarında (75 ve 100 ppm), basınç artış oranı tepe değerlerinin 50 ppm seviyesine kıyasla daha düşük olduğu ve basınç yükselme hızının daha sınırlı kaldığı gözlenmiştir. Bu durum, yüksek katkı oranlarında yanma sürecinin daha yayvan gerçekleşmesi ve nano parçacıkların aglomerasyon eğilimi göstermesi ile ilişkilendirilebilir. Elde edilen bulgular, 2 bar OEB koşulunda grafen nano katkısının yanma sertliğini kontrol altında tutarak en dengeli etkiyi 50 ppm katkı oranında sağladığını ortaya koymaktadır.

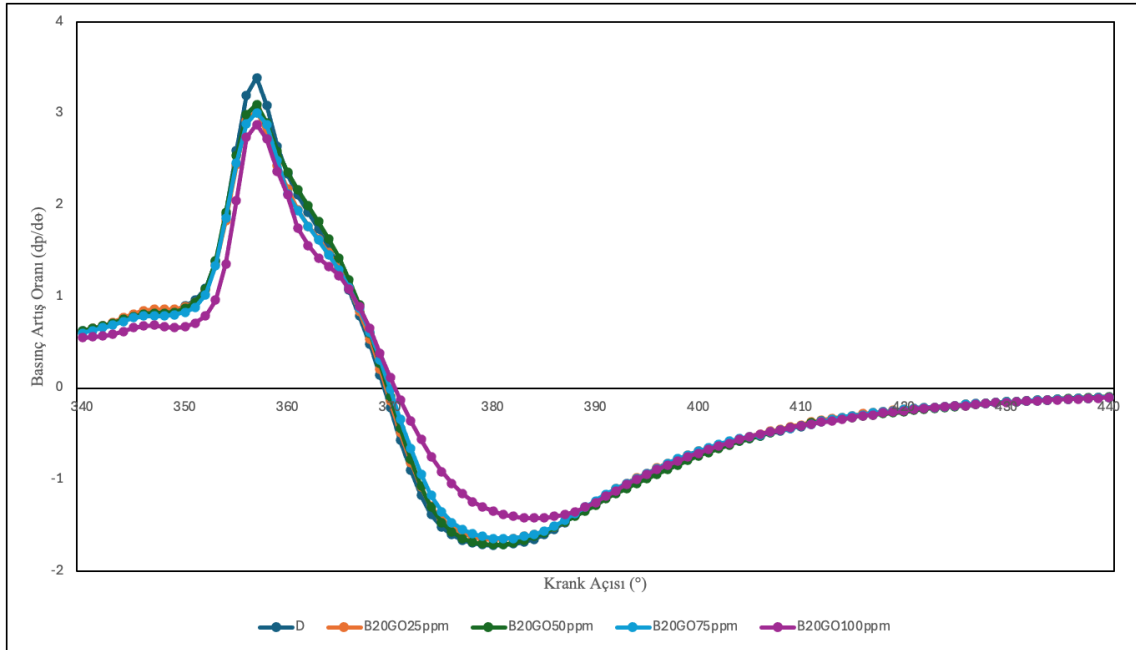


Şekil 20. 2 bar OEB göre krank açısına bağlı Basınç Artış Oranı değişimi (dp/dθ)

Şekil 21’de, 3 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda B20 yakıtı ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren test yakıtları için krank açısına bağlı basınç artış

oranı ( $dp/d\theta$ ) değişimleri gösterilmektedir. Yükün artmasıyla birlikte, premiks yanma fazında basınç artış oranı eğrilerinin belirgin bir tepe değeri oluşturduğu ve yanma sürecinin daha hızlı gerçekleştiği görülmektedir.

Grafen nano katkılı yakıtlar arasında en yüksek basınç artış oranı tepe değeri, yaklaşık 3,3–3,4 bar/°CA ile 50 ppm grafen katkılı B20 yakıtında elde edilmiştir. Katkısız Dizel yakıtında basınç artış oranı tepe değeri yaklaşık 3,1–3,2 bar/°CA seviyesinde gerçekleşirken, 25 ppm grafen katkılı yakıtta bu değer yaklaşık 3,0 bar/°CA civarında kalmıştır. Bu sonuçlar, yüksek yük koşullarında grafen nano katkısının yanma başlangıcını hızlandırarak basınç yükselme hızını artırdığını göstermektedir. Buna karşılık, 75 ve 100 ppm grafen katkı oranlarında basınç artış oranı tepe değerlerinin 50 ppm seviyesine kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir. Yüksek katkı oranlarında gözlenen bu durum, yanma sürecinin daha yavaş gerçekleşmesi ve nano parçacıkların aglomerasyon eğilimi göstermesiyle ilişkilendirilebilir. Elde edilen bulgular, 3 bar OEB koşulunda grafen nano katkısının yanma sertliğini kontrollü bir şekilde artırarak en dengeli etkiyi 50 ppm katkı oranında sağladığını ortaya koymaktadır.



Şekil 21. 3 bar OEB göre krank açısına bağlı Basınç Artış Oranı değişimi ( $dp/d\theta$ )

## 5.2. Test Yakıtlarının Emisyon Analizleri

Dizel motorlarda egzoz emisyonları; yakıtın kimyasal bileşimi, yanma karakteristiği, motor yükü ve çalışma koşullarına bağlı olarak değişim göstermektedir.

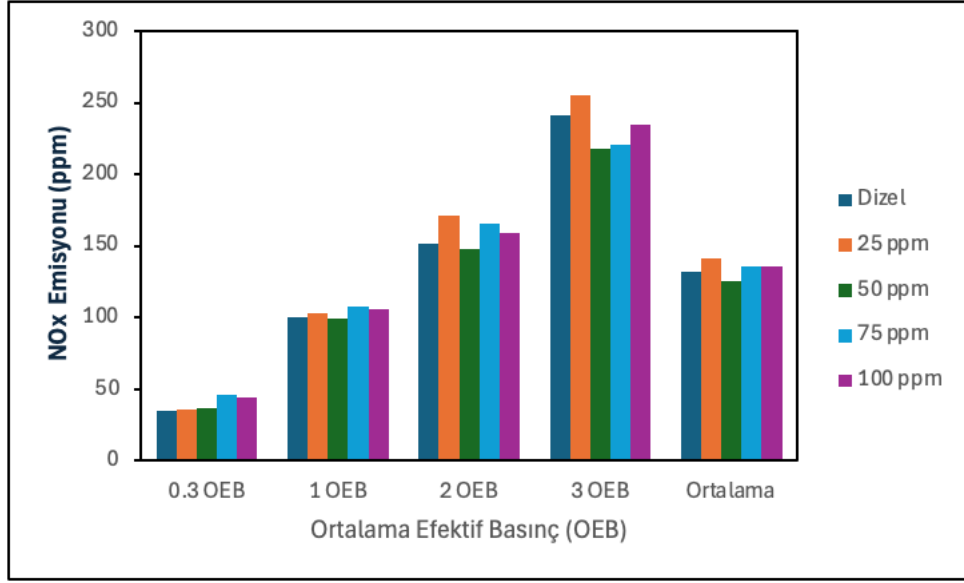
Özellikle biyodizel ve nano katkı maddelerinin kullanımı, yanma sürecini doğrudan etkileyerek zararlı emisyonların miktarında artış veya azalışlara neden olabilmektedir. Bu nedenle, alternatif yakıtların çevresel etkilerinin ortaya konulabilmesi açısından emisyon analizleri büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, baz dizel yakıt, B20 biyodizel karışımı ve farklı konsantrasyonlarda grafen nano partikül katkısı içeren yakıtların egzoz emisyonları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Emisyon analizleri kapsamında karbon monoksit (CO), hidrokarbon (HC), azot oksitler (NO<sub>x</sub>) ve duman koyuluğu (is) parametreleri değerlendirilmiştir. Ölçümler, farklı motor yükleri altında gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar grafikler yardımıyla sunulmuştur.

Grafen nano partiküllerinin yüksek özgül yüzey alanı ve ısı iletim özellikleri sayesinde yanma sürecini iyileştirdiği, yakıt-hava karışımının daha homojen hale gelmesine katkı sağladığı bilinmektedir. Bunun yanı sıra, biyodizelin oksijen içeren yapısı da yanma reaksiyonlarını destekleyerek emisyon karakteristiğinde belirgin değişimlere neden olmaktadır. Bu bölümde elde edilen emisyon sonuçları, baz dizel yakıt referans alınarak değerlendirilmiştir.

### **5.2.1. Azot oksitler (NO<sub>x</sub>) (ppm)**

Azot oksitler (NO<sub>x</sub>), dizel motorlarda yüksek yanma sıcaklığı ve yeterli oksijen varlığı altında oluşan önemli egzoz emisyonları arasında yer almaktadır. NO<sub>x</sub> oluşumu, silindir içi maksimum sıcaklık, yanma süresi ve oksijen konsantrasyonu ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle motor yükündeki değişimler ve yakıt bileşimi, NO<sub>x</sub> emisyonları üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir.



**Şekil 22.** NO<sub>x</sub> Emisyon Analizi

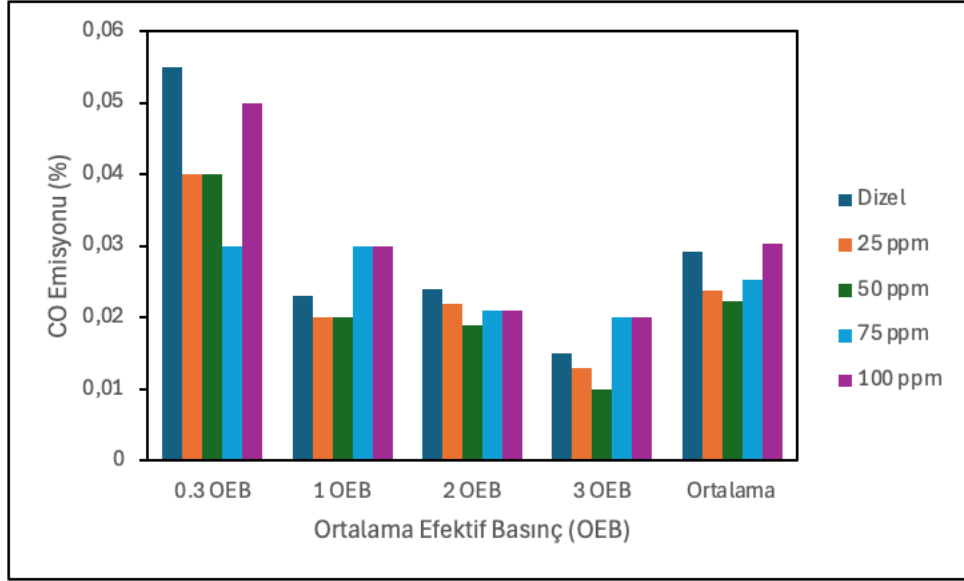
Şekil 22’de, baz dizel yakıt ile farklı konsantrasyonlarda grafen nano partikül katkısı içeren yakıtların farklı ortalama efektif basınç (OEB) değerlerindeki NO<sub>x</sub> emisyonları verilmiştir. Grafik incelendiğinde, tüm yakıt türleri için motor yükünün artmasına bağlı olarak NO<sub>x</sub> emisyonlarının belirgin şekilde arttığı görülmektedir. En düşük NO<sub>x</sub> değerleri 0.3 OEB koşulunda elde edilirken, en yüksek emisyonlar 3 OEB motor yükünde ölçülmüştür. Bu durum, artan motor yüküyle birlikte silindir içi sıcaklıkların yükselmesine bağlanmaktadır.

Grafen nano partikül katkılı yakıtlarda, baz dizel yakıtı kıyasla NO<sub>x</sub> emisyonlarının genel olarak daha yüksek seviyelerde gerçekleştiği belirlenmiştir. Özellikle 25 ppm ve 100 ppm grafen katkılı yakıtlarda, 3 OEB yük koşulunda NO<sub>x</sub> emisyonlarının maksimum değerlere ulaştığı görülmektedir. Bu artışın temel nedeni, grafen nano partiküllerinin yüksek ısı iletim kabiliyeti ve katalitik etkisi sayesinde yanma sürecinin iyileşmesi ve silindir içi sıcaklıkların artmasıdır. Ayrıca B20 yakıtının oksijen içeren yapısı da NO<sub>x</sub> oluşumunu destekleyici bir etki göstermektedir.

50 ppm grafen katkılı yakıtın, diğer grafen katkılı yakıtlara kıyasla daha düşük NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri sergilediği dikkat çekmektedir. Bu durum, grafen konsantrasyonunun belirli bir seviyeye kadar yanma iyileşmesine katkı sağladığını, ancak daha yüksek konsantrasyonlarda artan sıcaklık etkisiyle NO<sub>x</sub> oluşumunun hızlandığını göstermektedir.

## 5.2.2. Karbonmonoksit (CO) (%)

Karbon monoksit (CO) emisyonları, dizel motorlarda yakıtın tam olarak yanmaması sonucu oluşan önemli bir egzoz emisyonu bileşenidir. CO oluşumu; yanma verimliliği, yakıt–hava karışım kalitesi ve silindir içi sıcaklık ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle düşük motor yüklerinde yanma sıcaklıklarının yetersiz olması, CO emisyonlarının artmasına neden olmaktadır.



Şekil 23. CO Emisyon Analizi

Şekil 23'te, baz dizel yakıt ile farklı konsantrasyonlarda grafen nano partikül katkısı içeren yakıtların farklı ortalama efektif basınç (OEB) değerlerindeki CO emisyonları verilmiştir. Grafik incelendiğinde, tüm yakıt türleri için motor yükünün artmasına bağlı olarak CO emisyonlarının genel olarak azaldığı görülmektedir. En yüksek CO emisyonları 0.3 OEB koşulunda ölçülürken, en düşük değerler 3 OEB motor yükünde elde edilmiştir. Bu durum, artan motor yüküyle birlikte yanma sıcaklıklarının yükselmesi ve oksidasyon reaksiyonlarının daha etkin gerçekleşmesine bağlanmaktadır.

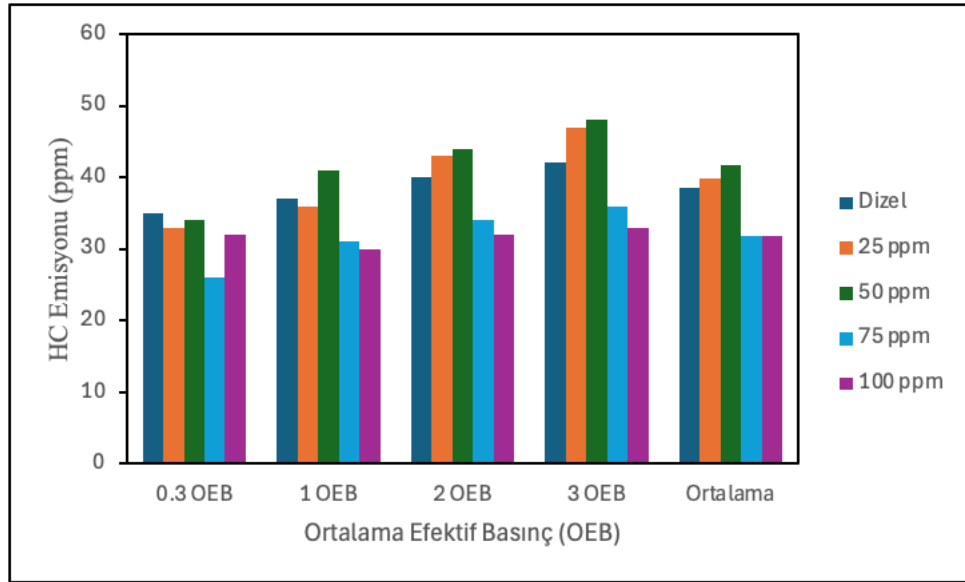
Grafen nano partikül katkılı yakıtlarda, baz dizel yakıtla kıyasla CO emisyonlarının belirgin şekilde azaldığı tespit edilmiştir. Özellikle 50 ppm ve 75 ppm grafen katkılı yakıtların, tüm yük koşullarında daha düşük CO emisyonu değerleri sergilediği görülmektedir. Bu azalma, grafen nano partiküllerinin katalitik etkisi ve biyodizelin oksijen içeren yapısının yanma sürecini iyileştirmesiyle ilişkilendirilmektedir.

25 ppm grafen katkılı yakıtın CO emisyonları, baz dizel yakıtı göre daha düşük seviyelerde gerçekleşirken, 100 ppm grafen katkılı yakıtta düşük yük koşullarında (0.3 OEB) nispeten daha yüksek CO emisyonu değerleri elde edilmiştir. Bu durum, yüksek nano katkı konsantrasyonlarında yakıt içerisindeki aglomerasyon eğiliminin artması ve yanma homojenliğinin sınırlı ölçüde azalması ile açıklanabilir.

Sonuç olarak, grafen nano partikül katkısı ve biyodizel içeriği, CO emisyonlarını azaltıcı yönde etki göstermiştir. Ancak nano katkı konsantrasyonunun optimum bir seviyede tutulması gerektiği, yüksek konsantrasyonlarda CO emisyonlarında sınırlı artışlar gözlemlenebileceği belirlenmiştir.

### 5.2.3. Hidrokarbon (HC) (ppm)

Hidrokarbon (HC) emisyonları, dizel motorlarda yanmamış veya kısmen yanmış yakıt bileşenlerinin egzoz gazları ile dışarı atılması sonucu oluşmaktadır. HC emisyonları; yakıt atomizasyonu, silindir içi türbülans, yanma süresi ve oksijen mevcudiyeti gibi parametrelerden doğrudan etkilenmektedir. Özellikle düşük yanma sıcaklıkları ve homojen olmayan yakıt-hava karışımı, HC oluşumunu artırmaktadır.



Şekil 24. HC Emisyon Analizi

Şekil 24'te, baz dizel yakıt ile farklı konsantrasyonlarda grafen nano partikül katkısı içeren yakıtların farklı ortalama efektif basınç (OEB) değerlerindeki HC emisyonları sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, tüm yakıt türleri için motor yükünün artmasına bağlı olarak HC emisyonlarının artış eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. En düşük HC emisyonları 0.3 OEB koşulunda ölçülürken, en yüksek değerler 3 OEB motor

yükünde elde edilmiştir. Bu durum, artan yakıt püskürtme miktarı ve yükte birlikte silindir içerisinde yanmamış yakıt miktarının artmasına bağlanmaktadır.

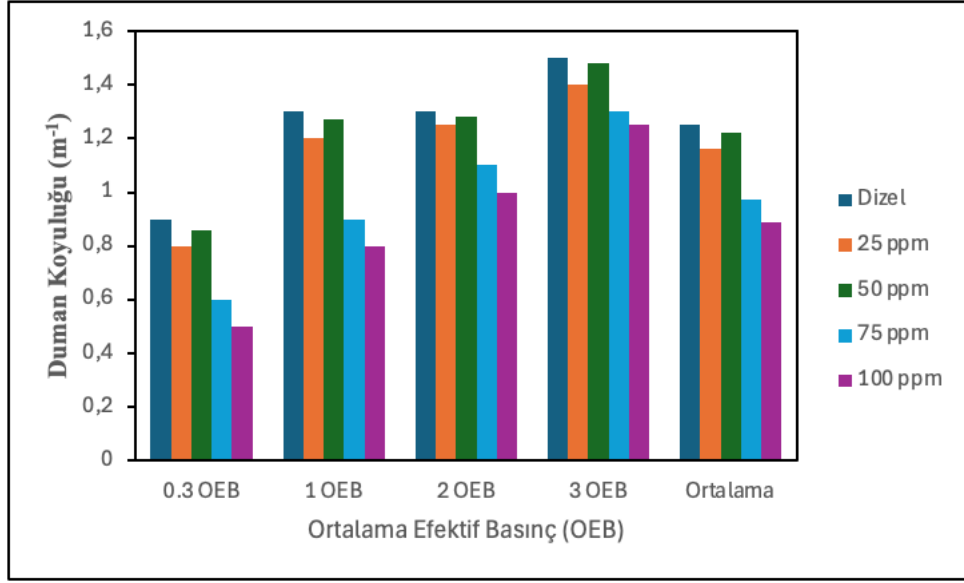
Grafen nano partikül katkılı yakıtlar arasında, 75 ppm ve 100 ppm grafen katkılı yakıtların, baz dizel ve diğer grafen katkılı yakıtlara kıyasla daha düşük HC emisyonu değerleri sergilediği görülmektedir. Bu durum, grafen nano partiküllerinin yüksek özgül yüzey alanı ve katalitik etkisi sayesinde yanma sürecinin daha etkin gerçekleşmesi ve yanmamış yakıt miktarının azalması ile açıklanmaktadır.

Buna karşılık, 25 ppm ve özellikle 50 ppm grafen katkılı yakıtların HC emisyonlarının, baz dizel yakıtıya kıyasla daha yüksek seviyelerde gerçekleştiği dikkat çekmektedir. Bu artış, orta seviyedeki nano katkı konsantrasyonlarında yanma sürecinin HC oluşumunu tamamen bastırarak ölçüde iyileşmemesi ve artan yakıt miktarı ile birlikte kısmi yanma ürünlerinin oluşması ile ilişkilendirilebilir.

Sonuç olarak, grafen nano partikül katkısının HC emisyonları üzerindeki etkisinin konsantrasyona bağlı olduğu belirlenmiştir. Yüksek grafen katkı oranlarında HC emisyonlarının azaldığı, düşük ve orta katkı oranlarında ise sınırlı artışlar gözlemlendiği tespit edilmiştir. Bu bulgu, nano katkı miktarının optimum bir değer aralığında seçilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

#### **5.2.4. Duman koyuluğu (%)**

Duman koyuluğu (is), dizel motorlarda yanma sürecinde oluşan kurum partiküllerinin bir göstergesi olup, yakıtın atomizasyon kalitesi, yanma homojenliği ve silindir içi oksijen mevcudiyeti ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle zengin karışım koşulları ve yetersiz oksijen varlığı, kurum oluşumunu artırarak duman koyuluğunun yükselmesine neden olmaktadır.



**Şekil 25.** Duman Koyuluğu

Şekil 25'te, baz dizel yakıt ile farklı konsantrasyonlarda grafen nano partikül katkısı içeren yakıtların farklı ortalama efektif basınç (OEB) değerlerindeki duman koyuluğu sonuçları sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, tüm yakıt türleri için motor yükünün artmasına bağlı olarak duman koyuluğunun arttığı, en yüksek değerlerin 3 OEB yük koşulunda elde edildiği görülmektedir. Bu durum, artan motor yüküyle birlikte silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarının artması ve kurum oluşumunun hızlanması ile ilişkilendirilmektedir.

Grafen nano partikül katkılı yakıtların, baz dizel yakıtla tüm yük koşullarında daha düşük duman koyuluğu değerleri sergilediği belirlenmiştir. Özellikle 75 ppm ve 100 ppm grafen katkılı yakıtların, tüm OEB değerlerinde en düşük is emisyonlarını verdiği görülmektedir. Bu azalma, grafen nano partiküllerinin yüksek ısı iletim kabiliyeti ve katalitik etkisi sayesinde yanma sürecinin daha homojen gerçekleşmesi ve kurum oluşumunun baskılanması ile açıklanmaktadır.

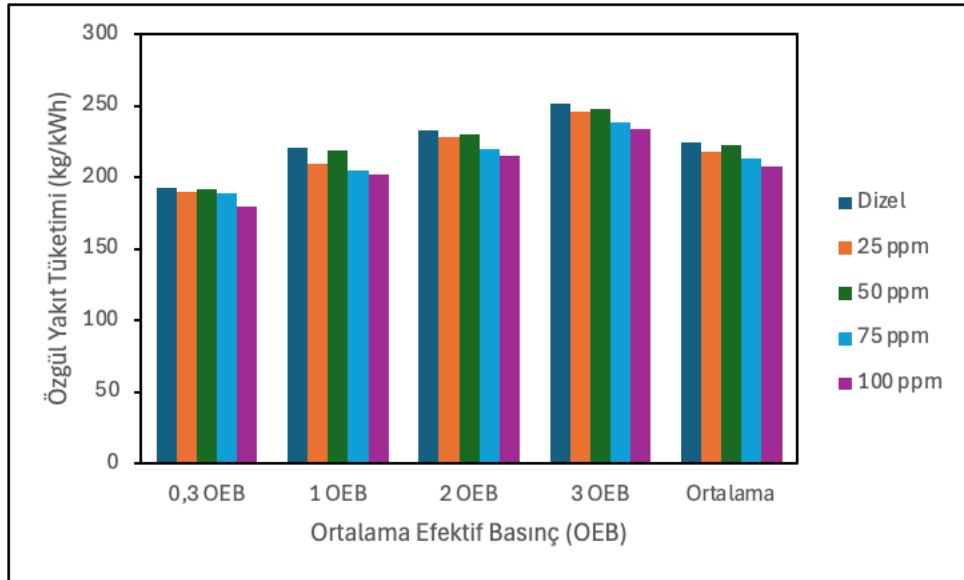
25 ppm ve 50 ppm grafen katkılı yakıtlarda da baz dizel yakıtla kıyasla duman koyuluğunda az da olsa azalmalar gözlemlenmiştir. Ancak grafen katkı oranının artmasıyla birlikte duman koyuluğundaki azalma eğiliminin daha belirgin hale geldiği dikkat çekmektedir. Bu durum, nano katkı konsantrasyonunun artmasıyla birlikte yakıt atomizasyonunun ve oksidasyon reaksiyonlarının daha etkin gerçekleştiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, grafen nano partikül katkısının ve biyodizel içeriğinin, dizel motorlarda kurum oluşumunu önemli ölçüde azalttığı ve duman koyuluğu emisyonları

üzerinde belirgin bir iyileşme sağladığı belirlenmiştir. Bu bulgu, nano katkılı ve oksijenli yakıtların duman emisyonlarını azaltıcı etkisini rapor eden literatür çalışmaları ile uyum içerisindedir.

### 5.3. Yakıt Tüketimi ve Özgül Yakıt Tüketimi (SFC)

Özgül yakıt tüketimi (Specific Fuel Consumption – SFC), motorun ürettiği birim güç başına tükettiği yakıt miktarını ifade eden ve motorun termal verimliliğini değerlendirmede yaygın olarak kullanılan önemli bir parametredir. Düşük SFC değerleri, motorun yakıtı daha verimli kullandığını ve yanma sürecinin daha etkin gerçekleştiğini göstermektedir.



**Şekil 26.** Test Yakıtlarının Özgül Yakıt Tüketimi (kg/kWh) ile Ortalama Efektif Basıncı (OEB) değişimi

Şekil 26’da, baz dizel yakıt ile farklı konsantrasyonlarda grafen nano partikül katkısı içeren yakıtların farklı ortalama efektif basınç (OEB) değerlerindeki özgül yakıt tüketimi sonuçları sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, tüm yakıt türleri için motor yükünün artmasına bağlı olarak özgül yakıt tüketiminin arttığı görülmektedir. En düşük SFC değerleri 0.3 OEB koşulunda elde edilirken, en yüksek değerler 3 OEB motor yükünde ölçülmüştür. Bu durum, artan yükte birlikte silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarının artmasına bağlanmaktadır.

Grafen nano partikül katkılı yakıtlarda, baz dizel yakıtla kıyasla SFC değerlerinin genel olarak yaklaşık seviyelerde gerçekleştiği belirlenmiştir. Özellikle 25 ppm ve 50 ppm grafen katkılı yakıtların, tüm yük koşullarında daha yüksek özgül yakıt tüketimi

değerleri sergilediği görülmektedir. Bu artış, biyodizelin dizel yakıta kıyasla daha düşük alt ısı değere sahip olması ve artan yakıt tüketimi ile ilişkilendirilmektedir.

Buna karşın, grafen katkı oranının artmasıyla birlikte SFC değerlerinde sınırlı bir iyileşme eğilimi gözlemlenmiştir. Özellikle 75 ppm ve 100 ppm grafen katkı yakıtların, 25 ppm ve 50 ppm katkı yakıtlara kıyasla daha düşük SFC değerleri sergilediği dikkat çekmektedir. Bu durum, grafen nano partiküllerinin yanma sürecini iyileştirici etkisi sayesinde yakıtın daha etkin kullanılması ile açıklanmaktadır.

Ortalama SFC değerleri incelendiğinde grafen nano partikül katkı B20 yakıtlar arasında 100 ppm grafen katkı yakıtın en düşük ortalama SFC değerini verdiği belirlenmiştir. Bu bulgu, grafen katkı oranının artırılmasıyla birlikte biyodizelin yakıt ekonomisi üzerindeki olumsuz etkisinin kısmen telafi edilebildiğini göstermektedir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, grafen oksit (GO) nanopartikül katkılı B20 (hacimce %20 biyodizel + %80 dizel) yakıt karışımlarının tek silindirli, dört zamanlı bir dizel motorda yanma, performans ve egzoz emisyon karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler sabit devir koşullarında ve farklı ortalama efektif basınç (OEB) değerlerinde gerçekleştirilmiş; yakıtta 0, 25, 50, 75 ve 100 ppm oranlarında GO ilave edilmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

Grafen oksit katkısının silindir içi yanma sürecini iyileştirdiği belirlenmiştir. GO ilavesi ile birlikte maksimum silindir içi basınç değerlerinde baz dizel yakıtla kıyasla yaklaşık %3–8 aralığında artış gözlenmiştir. Bu durum, nanopartiküllerin yüksek özgül yüzey alanı ve oksijenli fonksiyonel grupları sayesinde atomizasyonu iyileştirmesi ve yanma reaksiyonlarını hızlandırması ile ilişkilendirilmektedir. Basınç artış oranı ve net ısı salınımı analizleri de yanmanın daha kısa sürede ve daha etkin şekilde gerçekleştiğini göstermiştir.

Egzoz emisyonları açısından değerlendirildiğinde, GO katkılı yakıt karışımlarında karbon monoksit (CO) ve duman koyuluğu emisyonlarında belirgin azalmalar tespit edilmiştir. CO emisyonlarında %15–30, duman koyuluğunda ise %20–35 aralığında düşüş elde edilmiştir. Bu iyileşmenin, daha homojen hava–yakıt karışımı ve daha tam yanma koşullarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Hidrokarbon (HC) emisyonları ise katkı oranına bağlı olarak azalma eğilimi göstermiş; özellikle yüksek ppm seviyelerinde daha düşük HC değerleri ölçülmüştür.

Buna karşılık, iyileşen yanma koşullarına bağlı olarak silindir içi sıcaklıkların artması, azot oksit (NO<sub>x</sub>) emisyonlarında %5–10 aralığında sınırlı bir artışa neden olmuştur. Bu sonuç, oksijen içeriği yüksek yakıtların ve daha etkin yanma sürecinin NO<sub>x</sub> oluşum mekanizmasını desteklediğini göstermektedir.

Yakıt tüketimi analizleri, grafen oksit katkısının biyodizelin nispeten düşük alt ısıl değerinden kaynaklanan olumsuz etkiyi kısmen telafi ettiğini ortaya koymuştur. Özellikle 100 ppm GO katkılı B20 yakıtında özgül yakıt tüketimi (SFC) değerlerinde yaklaşık %4–7 oranında iyileşme sağlanmıştır. Bu bulgu, nano katkının yanma verimini artırarak enerji dönüşüm etkinliğini iyileştirdiğini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, grafen oksit nanopartikül katkısının B20 yakıtında yanma karakteristiklerini iyileştirdiği, CO, HC ve duman emisyonlarını azalttığı ve özgül yakıt tüketimini düşürdüğü belirlenmiştir. Ancak katkı oranının artmasıyla birlikte NOx emisyonlarında sınırlı bir yükselme eğilimi gözlenmiştir. Bu sonuçlar, uygun katkı konsantrasyonunun seçilmesi durumunda GO katkılı biyodizel–dizel karışımlarının dizel motorlarda performans ve çevresel açıdan uygulanabilir bir alternatif oluşturabileceğini göstermektedir.

## **6.2. Öneriler**

Bu çalışmadan elde edilen bulgular doğrultusunda, grafen nano partikül katkılı biyodizel yakıtların dizel motorlardaki etkilerinin daha kapsamlı biçimde ortaya konulabilmesi için farklı deneysel koşulları içeren çalışmaların yapılması önerilmektedir. Özellikle farklı biyodizel oranları (B10, B30, B50) ile karşılaştırmalı deneyler gerçekleştirilerek, grafen nano partikül katkısının biyodizel oranına bağlı olarak motor performansı, yanma karakteristiği, egzoz emisyonları ve yakıt tüketimi üzerindeki etkileri ayrıntılı şekilde analiz edilebilir. Bunun yanı sıra, farklı motor devirleri, enjeksiyon zamanlamaları ve enjeksiyon basınçları altında yapılacak deneysel çalışmalar, nano katkılı yakıtların optimum çalışma koşullarının belirlenmesine katkı sağlayacaktır. Ayrıca farklı nano katkı türleri veya hibrit nano katkı kombinasyonlarının grafen ile birlikte kullanılması, emisyon ve performans açısından elde edilen kazanımların artırılmasına yönelik önemli bir araştırma alanı olarak değerlendirilmektedir.

## KAYNAKLAR

- Aalam, C. S., Saravanan, C. G., & Kannan, M. (2015). Experimental investigations on a CRDI system assisted diesel engine fuelled with aluminium oxide nanoparticles blended biodiesel. *Alexandria Engineering Journal*, 54(3), 351–358.
- Ağbulut, Ü., Elibol, E., Demirci, T., Sarıdemir, S., Gürel, A. E., Rajak, U., & Verma, T. N. (2022). Synthesis of graphene oxide nanoparticles and the influences of their usage as fuel additives on CI engine behaviors. *Energy*, 244, 122603.
- Al-Gburi, A. S. K. (2022). *Investigation of the effects of nanoparticle addition in diesel engine running with biodiesel/diesel fuel blends* (Master's thesis, Karabük University).
- Basha, S. J., & Anand, R. B. (2011). Role of nano-additive blended biodiesel emulsion fuel on working characteristics of a diesel engine. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 3(2), 023106.
- 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.
- Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2010). *Numerical methods for engineers*. McGraw-Hill Higher Education.
- Çakmak, A. (2014). *Yakıt olarak biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kullanıldığı tek silindirli bir dizel motoruna ekserji analizinin uygulanması* (Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Demirtaş, G. (2023). *Biyodizel n-oktanol yakıt karışımına nanoparçacık ilavesinin motor performansı ve yanma üzerine etkisinin incelenmesi* (Doktora tezi, Marmara Üniversitesi).
- Devarajan, Y., Nagappan, B., & Subbiah, G. (2019). A comprehensive study on emission and performance characteristics of a diesel engine fueled with nanoparticle-blended biodiesel. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 10662–10672.
- Elkelawy, M., El Shenawy, E. S. A., Bastawissi, H. A. E., & Shams, M. M. (2023). Impact of carbon nanotubes and graphene oxide nanomaterials on the performance and emissions of diesel engine fueled with diesel/biodiesel blend. *Processes*, 11(11), 3204.
- Gad, M. S., Kamel, B. M., & Badruddin, I. A. (2021). Improving the diesel engine performance, emissions and combustion characteristics using biodiesel with carbon nanomaterials. *Fuel*, 288, 119665.

- Gökçe, İ. (2022). *Tek silindirli dizel bir motorda susam yağı/dizel yakıt karışımlarına grafen oksit ilavesinin performans ve emisyon parametrelerine etkisinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi).
- Gümüş, A. S. (2012). *Nano yakıtların dizel motor performansı ve egzoz emisyonu üzerine etkilerinin deneysel olarak incelenmesi* (Yüksek lisans tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Hoang, A. T. (2021). Combustion and emission characteristics of diesel–biodiesel–graphene oxide nanoparticle blends in diesel engines. *Fuel*, 285, 119149.
- Hoang, A. T., Le, M. X., Nizetic, S., Huang, Z., Ağbulut, Ü., Veza, I., & Nguyen, X. P. (2022). Understanding behaviors of compression ignition engine running on metal nanoparticle additives-included fuels: A control comparison between biodiesel and diesel fuel. *Fuel*, 326, 124981.
- Holman, J. P. (2021). *Experimental methods for engineers* (8th ed.). McGraw-Hill.
- 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.
- Kıvrak, A. N. (2023). *Dizel-biyodizel-bütanol ve biyodizel-bütanol karışımlarının performans ve emisyonlara etkisinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi).
- Kuşin, C. (2022). *Biyodizel-dizel yakıt karışımına n-bütanol ve metanol ilavesinin içten yanmalı bir motorun performans ve emisyonlarına etkisinin deneysel olarak incelenmesi* (Yüksek lisans tezi, Bitlis Eren Üniversitesi).
- Ojha, D. K., & Karmakar, A. (2018). Effect of graphene oxide nanoparticles on combustion performance of biodiesel blends. *Energy*, 153, 554–567.
- Örs, İ., Sarıkoç, S., Atabani, A. E., Ünal, S., & Akansu, S. O. (2018). The effects on performance, combustion and emission characteristics of DIC engine fuelled with TiO<sub>2</sub> nanoparticles addition in diesel/biodiesel/n-butanol blends. *Fuel*, 234, 177–188.
- Öztürk, H. (2023). *Dizel-biyodizel yakıt karışımına yüksek molekül ağırlıklı alkol ilavesinin motor performans, yanma ve emisyon karakteristiklerine etkisi* (Yüksek lisans tezi, Muş Alparslan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Pachaiyappan, K., Sengodan, N., Sekar, P., Ramalingam, V., & Periyasamy, P. (2024). Enhancing combustion efficiency: Utilizing graphene oxide nanofluids as fuel additives with tomato oil methyl ester in CI engines. *Turkish Journal of Engineering*, 8(4), 720–728.

- Prabhu, A., Anand, R., & Senthilkumar, K. (2015). Experimental investigation on the effect of TiO<sub>2</sub> nanoadditives in biodiesel–diesel blends. *Renewable Energy*, 83, 280–287.
- Sezer, İ. (2019). Effect of nano materials additives on fuel properties and combustion characteristics. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(1), 115–136.
- Soudagar, M. E. M., Nik-Ghazali, N. N., Kalam, M. A., Badruddin, I. A., Banapurmath, N., & Akram, N. (2018). The effect of nano-additives in diesel-biodiesel fuel blends: A comprehensive review on stability, engine performance and emission characteristics. *Energy Conversion and Management*, 178, 146–177.
- Soysal, M. (2022). *Mısır yağından elde edilen biyodizelin saf ve dizel karışımları halinde tek silindirli bir dizel motorda kullanılmasının performans, yanma ve emisyon karakteristikleri üzerine etkisi* (Yüksek lisans tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Söyler, H. (2023). *Atık zeytinden ultrasonik yöntem ile üretilen biyodizelin bir dizel motorda performans ve yanma karakteristikleri üzerine etkisinin incelenmesi* (Doktora tezi, Marmara Üniversitesi).
- Şen, N. S. (2023). *Atık trafo yağı ve dizel yakıt karışımlarının karakterizasyonu ile motor performans ve egzoz emisyon parametrelerinin tek silindirli dizel bir motorda deneysel olarak incelenmesi* (Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi).
- Tan, T. (2022). *Mangan esaslı dizel-biyodizel yakıt karışımlarının bir dizel motorda kullanımının araştırılması* (Yüksek lisans tezi, Batman Üniversitesi).
- Tosun, E. (2018). *Prediction of various engine-out parameters by use of artificial intelligence techniques* (Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Tuncer, A. (2023). *Dizel yakıtı–pentanol karışımlarının dizel motorda kullanımının performans ve emisyonlara etkisi* (Yüksek lisans tezi, Karabük Üniversitesi).
- Uslu, S., Şimşek, S., & Şimşek, H. (2023). RSM modeling of different amounts of nano-TiO<sub>2</sub> supplementation to a diesel engine running with hemp seed oil biodiesel/diesel fuel blends. *Energy*, 266, 126439.
- Verma, T. N., ... (2023). Synergistic effects of nanoparticle additives and biodiesel on CI engine combustion and emissions. *Fuel Processing Technology*, 240, 107527.
- Yadav, M., Karimi, M. N., & Yadav, A. K. (2025). Effect of graphene oxide nanoparticles dispersed biodiesel on combustion, performance and emission characteristics of a diesel engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 239(5), 2612–2624.

- Yeşilyurt, M. (2017). *Biyodizel–dizel karışımlarına farklı alkol türlerinin ilavesinin motor performansı ve emisyonlarına etkisinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Yıldız, A. (2023). *Atık sanayi yağları ve atık plastiklerden elde edilmiş yakıtın bir dizel motorunda performans, emisyon ve yanma karakteristiklerinin deneysel analizi ve yapay sinir ağları yöntemi ile optimizasyonu* (Doktora tezi, Batman Üniversitesi).
- Yusuf, A. A., Inambao, F. L., & Ampah, J. D. (2022). Nanoparticle additives for improving biodiesel performance: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112398.