



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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GRAFEN OKSİT NANOPARTİKÜL KATKILI DİZEL
YAKITLARIN DİZEL MOTOR PERFORMANSI VE EMİSYON
KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

Ruken BAYRAM

**Kasım-2025
BATMAN**

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GRAFEN OKSİT NANOPARTİKÜL KATKILI DİZEL
YAKITLARIN DİZEL MOTOR PERFORMANSI VE EMİSYON
KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

Ruken BAYRAM

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

Diğer Jüri Üyeleri

**Dr. Öğr. Üyesi Ali Serkan
AVCI**

**Dr. Öğr. Üyesi Cihad
Fidan**

**Kasım-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Ruken BAYRAM tarafından hazırlanan “Grafen Oksit Nanopartikül Katkılı Dizel Yakıtların Dizel Motor Performansı ve Emisyon Karakteristiklerine Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi” adlı tez çalışması 27/11/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği 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 Ali Serkan AVCI

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

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

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

ETİK BEYAN

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.

ETHICAL STATEMENT

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.

Ruken BAYRAM

Tarih: 27.11.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GRAFEN OKSİT NANOPARTİKÜL KATKILI DİZEL YAKITLARIN DİZEL MOTOR PERFORMANSI VE EMİSYON KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Ruken BAYRAM

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Yenilenebilir Enerji Sistemleri Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Umut ERCAN

2025, 89 Sayfa

Bu çalışmada, grafen nano katkısının dizel motorlarda yanma, performans ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, tek silindirli, direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda, saf dizel yakıt ve farklı oranlarda grafen nano katkısı (25, 50, 75 ve 100 ppm) içeren yakıt karışımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Motor testleri 0,3, 1, 2 ve 3 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşullarında yürütülmüştür.

Yanma analizleri kapsamında silindir içi basınç, net ve kümülatif ısı salınımı ile basınç artış oranı ($dp/d\phi$) parametreleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, grafen nano katkısının düşük ve orta katkı oranlarında yanma sürecini iyileştirdiğini ve özellikle 75 ppm katkı oranında maksimum silindir basıncı ve ısı salınımı değerlerinde belirgin artışlar sağladığını göstermiştir. Daha yüksek katkı oranlarında ise yanma karakteristiklerindeki iyileşmenin sınırlı kaldığı belirlenmiştir.

Emisyon analizlerinde özgül yakıt tüketimi, CO, HC, NO_x ve duman koyuluğu parametreleri incelenmiştir. Grafen nano katkısı ile özgül yakıt tüketimi ile CO ve HC emisyonlarında genel olarak azalma gözlenmiş, NO_x emisyonlarında ise yük ve katkı oranına bağlı yukarı yönlü değişimler tespit edilmiştir. Duman koyuluğu sonuçları, düşük ve orta yük koşullarında grafen katkısının kurum oluşumunu azalttığını, yüksek yük ve yüksek katkı oranlarında ise artış eğilimi gösterebildiğini ortaya koymuştur.

Tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, 75 ppm grafen nano katkı oranının performans, yanma ve emisyon parametreleri açısından en dengeli ve optimum katkı oranı olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Grafen nano katkı, dizel motor, yanma analizi, emisyonlar, özgül yakıt tüketimi

ABSTRACT

MS THESIS

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF GRAPHENE OXIDE NANOPARTICLE-ADDED DIESEL FUELS ON DIESEL ENGINE PERFORMANCE AND EMISSION CHARACTERISTICS

Ruken BAYRAM

Batman University Graduate Education Institute

Department of Renewable Energy System

Advisor: Associate Prof. Dr. Umut ERCAN

2025, 89 Pages

In this study, the effects of graphene nano-additives on combustion, performance, and emission characteristics of a diesel engine were experimentally investigated. Experiments were conducted on a single-cylinder, direct-injection diesel engine using neat diesel fuel and graphene nano-additive blended fuels at different concentrations (25, 50, 75, and 100 ppm). Engine tests were performed under 0.3, 1, 2, and 3 bar brake mean effective pressure (BMEP) conditions.

Combustion analysis was carried out by evaluating in-cylinder pressure, net and cumulative heat release rates, and pressure rise rate ($dp/d\phi$). The results indicated that graphene nano-additives improved the combustion process at low and medium additive concentrations. Notably, the 75 ppm graphene addition resulted in significant increases in maximum in-cylinder pressure and heat release characteristics. However, further increases in additive concentration led to diminishing improvements in combustion behavior.

Emission analyses included specific fuel consumption, CO, HC, NO_x, and smoke opacity measurements. The addition of graphene nano-additives generally reduced specific fuel consumption as well as CO and HC emissions. NO_x emissions increase exhibited variations depending on engine load and additive concentration. Smoke opacity results showed a reduction at low and medium load conditions with graphene addition, whereas higher loads and higher additive concentrations caused an increase in smoke formation.

Overall, the experimental results demonstrated that a graphene nano-additive concentration of 75 ppm provides the most balanced improvement in combustion performance and emission characteristics of the diesel engine.

Keywords: Graphene nano-additive, diesel engine, combustion analysis, emissions, specific fuel consumption

ÖN SÖZ

Bu tez çalışması, dizel motorlarda grafen nanoparçacık katkısının yanma karakteristikleri, motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemek amacıyla hazırlanmıştır. İçten yanmalı motor teknolojilerinin gelişimi, enerji verimliliğinin artırılması ve çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik çalışmalar her geçen gün daha fazla önem taşımaktadır. Yenilikçi bir malzeme olan grafenin yüksek ısı iletkenliği, geniş yüzey alanı ve reaktif yapısı, yakıt katkı maddesi olarak kullanımını özellikle son yıllarda cazip hale getirmiştir. Bu çalışmada, farklı grafen katkı oranlarının motor performansına ve emisyon parametrelerine etkileri ayrıntılı olarak değerlendirilmiş ve elde edilen bulgular literatürle karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Bu araştırmanın yürütülmesi sırasında bilimsel desteğini ve değerli yönlendirmelerini esirgemeyen Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Umut Ercan'a teşekkürü borç bilirim. Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi sürecinde laboratuvar altyapısını kullanmama imkân sağlayan BATMAN Üniversitesi Beşiri OSB MYO'na ve Batman Üniversitesi Otomotiv Test ve Laboratuvarına, katkı sunan tüm akademik ve teknik personele teşekkür ederim. Ayrıca çalışma sürecinde her zaman yanımda olan, sabırları ve motivasyonlarıyla beni destekleyen aileme ve sevgili eşime minnettarım.

Bu tezin, alternatif yakıt katkıları ve nanoteknoloji temelli motor iyileştirme çalışmaları alanında yürütülecek bilimsel araştırmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Ruken BAYRAM
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Alternatif Yakıt Katkı Maddeleri	2
1.1.1. Biyodizel	2
1.1.2. Nano Katkı Maddeleri	4
1.1.3. Oksijenli Katkı Maddeleri	5
1.1.4. Alkol Bazlı Katkı Maddeleri	7
1.1.5. Grafen nano katkı maddesi ve dizel motorlarda kullanım potansiyeli	8
1.2. Araştırmanın Amacı ve Önemi	10
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	11
2.1. Aynı Deney Düzenğinde Yapılan Alternatif Yakıt Çalışmaları	11
2.2. Metal Oksit ve Nano Katkı Dizel Yakıt Çalışmaları	11
2.3. Atık Kökenli Yakıtlar ve Karışım Yakıtların Dizel Motorlarda Kullanımı	12
2.4. Grafen ve Grafen Türevi Nano Katkı Maddeleri ile Yapılan Çalışmalar	13
2.5. Literatür Değerlendirmesi ve Tezin Literatürdeki Yeri	13
3. KURAMSAL TEMELLER	25
3.1. İçten Yanmalı Motorlar	25
3.1.1. İçten yanmalı motor türleri	25
3.1.2. İçten yanmalı motorların çalışma döngüleri	25
3.1.3. İçten yanmalı motorların bileşenleri	26
3.1.4. İçten yanmalı motorlarda kullanılan yakıt türleri	27
3.2. Dizel Motorlar	27
3.2.1. Dizel motorların çalışma prensipleri	28
3.2.2. Dizel motorların performansı ve emisyonları	28
3.2.3. Alternatif yakıt kullanımı ve çevresel etkiler	28
3.3. Benzinli motorlar	29
3.3.1. Benzinli motorların çalışma prensipleri	29
3.4. Dizel motorlarda yanma ve emisyonlar	29
3.4.1. Dizel yakıt özellikleri	30
3.4.2. Kirleticiler ve safsızlıklar	31
3.4.3. Dizel motorlarda kullanılan alternatif yakıtlar	31

3.4.4 Dizel motorlarda kullanılan alternatif yakıt katkıları	32
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	35
4.1. Motor Test Düzeneği ve Ekipmanları	35
4.1.1. Yanma ve performans parametreleri.....	39
4.2. Emisyon Cihazının Özellikleri.....	39
4.3 Deneyde Kullanılan GO Katkısı	41
4.4. Yakıt Karışımlarının Hazırlanması	43
4.5 Motor Performans Parametreleri ve Test Şartları	47
4.5.1 Test koşulları.....	48
4.6. Ölçümü Yapılan Egzoz Emisyon Parametreleri.....	49
4.6.1. Egzoz emisyon test koşulları	49
4.6.2. Ölçülen egzoz gazı bileşenleri ve parametreler	50
4.7. Belirsizlik Analizi	50
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	52
5.1. Motor Performans Analizleri	52
5.1.1. Silindir basıncı	52
5.1.2. Net ısı salınımı	57
5.1.3. Kümülatif ısı salınımı	62
5.1.4. Basınç artış oranı	67
5.1.5. Yakıt tüketimi ve özgül yakıt tüketimi (SFC)	72
5.2. Test Yakıtlarının Emisyon Analizleri	74
5.2.1. Azot oksitler (NO _x) (ppm)	74
5.2.2. Karbonmonoksit (CO) (%)	75
5.2.3. Hidrokarbon (HC) (ppm)	77
5.2.4. Duman koyuluğu (%).....	78
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	81
6.1. Sonuçlar	81
6.2. Öneriler	82
7. KAYNAKLAR	83

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 1.1. Dizel yakıtı ile biyodizelin temel özelliklerinin karşılaştırılması (Usta, Can & Öztürk, 2005)	2
Tablo 1.2. Biyodizelin motor performansına etkileri (Özgür ve ark., 2015).....	3
Tablo 1.3. Biyodizelin egzoz emisyonlarına etkileri (Sipahier, 1990)	3
Tablo 1.4. Nano katkı maddelerinin temel özellikleri (Luo ve ark., 2016; Çılğın ve Deviren, 2024)	4
Tablo 1.5. Nano katkıların motor performansına etkileri (Imdadul ve ark., 2016)	5
Tablo 1.6. Nano katkıların emisyonlara etkileri (Norhafana ve ark., 2020).....	5
Tablo 1.7. Oksijenli katkı maddelerinin temel özellikleri (Candan, 2012; Imdadul ve ark., 2016).....	6
Tablo 1.8. Oksijenli katkıların motor performansına etkileri (Luo ve ark., 2016)	6
Tablo1.9. Oksijenli katkıların emisyonlara etkileri (Norhafana ve ark., 2020).....	6
Tablo1.10. Alkol bazlı katkı maddelerinin temel özellikleri (Haşimoğlu ve ark., 2006; Fırat ve ark., 2017).....	7
Tablo1.11. Alkol Bazlı Katkıların Motor Performansına Etkileri (Karagöz ve ark., 2016).....	8
Tablo1.12. Alkol bazlı katkıların emisyonlara etkileri (Jamali ve ark., 2019)	8
Tablo 1.13. Grafenin temel özellikleri (Balandin ve ark., 2008).....	9
Tablo 1.14. Grafenin motor performansına etkileri (Javad ve ark., 2016)	9
Tablo 1.15. Grafenin egzoz emisyonlarına etkisi (Ferrari, 2006).....	10
Tablo 2. 1: Alternatif yakıt katkılarının motor performansına etkileri (Li ve ark., 2015; Labeckas & Slavinskis, 2013).....	15
Tablo 2. 2:Alternatif yakıt katkılarının emisyonlara etkileri (Dorado ve ark., 2003; Choi & Reitz, 1999).....	16
Tablo 2. 3:Alternatif yakıt katkı maddelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri (Behçet ve ark., 2015; Çakmak, 2022).....	16
Tablo 2. 4:Alternatif yakıt katkılarının motor performansına etkileri (Gülüm, 2023; Behçet ve ark., 2015)	17
Tablo 2. 5:Alternatif yakıt katkılarının emisyonlara etkileri (Çakmak, 2022; Behçet ve ark., 2015).....	17
Tablo 2. 6: Alternatif yakıt katkı maddelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri (Decker ve ark., 2010; Menezes ve ark., 2022)	18
Tablo 2. 7:Alternatif yakıt katkılarının motor performansına etkileri (Zhang ve ark., 2021; Fenimore, 1975).....	18
Tablo 2. 8:Alternatif yakıt katkılarının emisyonlara etkileri (Fenimore, 1975; Heywood, 1988)	18
Tablo 2. 9: Alternatif yakıt katkı maddelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri (Ulukardeşler, 2012; Çılğın, 2015; Luo ve ark., 2016).....	19
Tablo 2. 10: Alternatif yakıt katkılarının motor performansına etkileri (Çılğın & İlkılıç, 2015; Imdadul ve ark., 2016).....	19
Tablo 2. 11: alternatif yakıt katkılarının emisyonlara etkileri (Gülüm ve ark., 2015; Mohd Noor ve ark., 2018)	20
Tablo 2. 12: alternatif yakıt katkı maddelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri (Hazar ve ark., 2016; Deviren & Çılğın, 2024; Arul Mozhi Selvan ve ark., 2014)	20
Tablo 2. 13: Alternatif yakıt katkılarının emisyonlara etkileri (Uyar & Aydın, 2022; Rakopoulos ve ark., 2004)	21
Tablo 2. 14: Motor performansına etkileri (Hoseini ve ark., 2020).....	21
Tablo 2. 15: Emisyon üzerindeki etkiler (Hoseini ve ark., 2020).....	21

Tablo 2. 16: Nano katkılı yakıtların motor performansına etkileri (El-Seesy ve ark., 2019).....	22
Tablo 2. 17: Nano katkılı yakıtların emisyon üzerindeki etkileri (El-Seesy ve ark., 2019)	22
Tablo 2. 18: Nanografen oksit katkılı biyodizelin motor performansına etkileri (Hoseini ve ark., 2020; El-Seesy ve ark., 2018)	22
Tablo 2. 19: Nanografen oksit katkılı biyodizelin emisyon üzerindeki etkileri (Hoseini ve ark., 2018; El-Seesy ve ark., 2018)	23
Tablo 3. 1: Motor türlerine göre verimlilik ve emisyon oranları (Stone, 1999; Lipsch ve ark., 2012; Hartavi, Göl & Akyüz, 2014)	27
Tablo 4. 1: Deney motorunun teknik özellikleri.....	38
Tablo 4. 2: Yanma performans parametreleri	39
Tablo 4. 3: Emisyon ölçüm cihazının teknik özellikleri	41
Tablo 4. 4: Kullanılan GO katkı maddesinin teknik özellikleri.....	43
Tablo 4. 5: Emisyon analizinde kullanılan yakıt karışımları ve katkı oranları	44
Tablo 4. 6: Yakıt karışım örnekleri.....	45
Tablo 4. 7: Yakıtların fiziksel özellikleri.....	47
Tablo 4. 8: Motor performans parametreleri	48
Tablo 4. 9: Egzoz emisyon parametreleri	50
Tablo 4. 10: Test cihazının ölçüm aralığı, belirsizliği analizi ve hesaplanan parametrelerin tablosu.....	51

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 4. 1:Motor test düzeneğinin deney ortamındaki görüntüsü.	36
Şekil 4. 2:Kullanılan emisyon ölçüm cihazı	40
Şekil 4. 3:Grafen katlı maddesi.....	42
Şekil 4. 4:Grafen katkı maddesinin Tem görüntüsü	42
Şekil 4. 5:Hassas terazi (1), Manyetik karıştırıcı (2), Ultrasonik karıştırıcı (banyo) (3)	44
Şekil 4. 6:Dizel yakıtı eklenen grafen katkı maddeli deney yakıtlarının görüntüsü	45
Şekil 5. 1:0,3 bar OEB göre krank açısına bağlı silindir basıncı değişimi (bar)	53
Şekil 5. 2:1 bar OEB göre krank açısına bağlı silindir basıncı değişimi (bar)	54
Şekil 5. 3: 2 bar OEB göre krank açısına bağlı silindir basıncı değişimi (bar)	55
Şekil 5. 4: 3 bar OEB göre krank açısına bağlı silindir basıncı değişimi (bar)	56
Şekil 5. 5: Test yakıtlarının 0.3 bar OEB göre krank açısına bağlı net ısı salınımı değişimi (J/der)	58
Şekil 5. 6: Test yakıtlarının 1 bar OEB göre krank açısına bağlı net ısı salınımı değişimi (J/der)	59
Şekil 5. 7: Test yakıtlarının 2 bar OEB göre krank açısına bağlı net ısı salınımı değişimi (J/der)	60
Şekil 5. 8: Test yakıtlarının 3 bar OEB göre krank açısına bağlı net ısı salınımı değişimi (J/der)	61
Şekil 5. 9: Test yakıtlarının 0.3 bar OEB göre krank açısına bağlı kümülatif ısı salınımı değişimi.....	63
Şekil 5. 10: Test yakıtlarının 1 bar OEB göre krank açısına bağlı Kümülatif Isı salınımı değişimi.....	64
Şekil 5. 11: Test yakıtlarının 2 bar OEB göre krank açısına bağlı kümülatif ısı salınımı değişimi.....	65
Şekil 5. 12: Test yakıtlarının 3 bar OEB göre krank açısına bağlı kümülatif ısı salınımı değişimi.....	66
Şekil 5. 13: Test yakıtlarının 0.3 bar OEB göre krank açısına bağlı basınç artış oranı değişimi (dp/dθ).....	68
Şekil 5. 14: Test yakıtlarının 1 bar OEB göre krank açısına bağlı basınç artış oranı değişimi (dp/dθ).....	69
Şekil 5. 15: Test yakıtlarının 2 bar OEB göre krank açısına bağlı basınç artış oranı değişimi (dp/dθ).....	70
Şekil 5. 16: Test yakıtlarının 3 bar OEB göre krank açısına bağlı basınç artış oranı değişimi (dp/dθ).....	71
Şekil 5. 17: Test yakıtlarının özgül yakıt tüketimi (kg/kwh) ile ortalama efektif basıncı (OEB) değişimi	73
Şekil 5. 18: NOx emisyon analizi	75
Şekil 5. 19: CO emisyon analiz grafiği	76
Şekil 5. 20: HC emisyon analizi grafiği.....	78
Şekil 5. 21: Duman koyuluğu	79

SİMGELER VE KISALTMALAR

P	Motor gücü (kW)
T	Motor torku (Nm)
BSFC	Fren özgül yakıt tüketimi (g/kWh)
η	Termal verimlilik (%)
EGT	Egzoz gazı sıcaklığı (°C)
CO	Karbon monoksit emisyonu (ppm)
NO _x	Azot oksitler (ppm)
PM	Partikül madde (mg/m ³)
HC	Hidrokarbon emisyonları (ppm)
P	Yakıt yoğunluğu (kg/m ³)
C _v	Alt ısı değer (kJ/kg)
Λ	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
HCCI	Homojen şarjlı sıkıştırma ile ateşleme
DPF	Dizel Partikül Filtresi
SCR	Seçici katalitik indirgeme
DOC	Dizel oksidasyon katalizörü
FTIR	Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
GDI	Doğrudan benzin enjeksiyonu
DME	Dimetil eter
GO	Grafen oksit
rGO	İndirgenmiş grafen oksit
MWCNT	Çok duvarlı karbon nanotüpü (Multi-Walled Carbon Nanotube)
GNP	Grafen nano maddesi

1. GİRİŞ

Fosil yakıtların tükenmesi ve küresel enerji talebinin artması, sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyacı artırmıştır. Dizel motorlar, yüksek verimlilikleri ve dayanıklılıkları nedeniyle birçok endüstride temel güç kaynağı olarak kullanılmaktadır. Ancak dizel motorlardan kaynaklanan emisyonların çevresel etkileri, motor performansının artırılması ve zararlı emisyonların azaltılması için alternatif yakıt katkı maddelerinin araştırılmasını zorunlu kılmıştır (Rusev ve ark., 2021).

Alternatif yakıt katkı maddeleri, yakıtın yanma verimliliğini artırmak, motor performansını iyileştirmek ve egzoz emisyonlarını azaltmak amacıyla geliştirilmektedir. Bu katkı maddeleri biyodizel, etanol ve diğer alternatif yakıtlarla birlikte kullanılabilir ve mevcut yakıtlarla ilgili bazı sınırlamaları gidermeyi hedefler (Abraham ve ark., 2020; Cheng ve ark., 2008).

Bu çalışmanın amacı, yenilikçi bir nanomalzeme olan grafenin dizel yakıt katkı maddesi olarak eklenmesinin motor performansı ve emisyonlar üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Grafen, tek atom kalınlığında karbon tabakalarından oluşan olağanüstü özelliklere sahip bir malzemedir. Yüksek yüzey alanı, mükemmel ısı iletkenlik ve katalitik etkileşim potansiyeli sayesinde yakıt içerisinde yanmayı iyileştirici bir rol oynayabileceği düşünülmektedir. Grafen katkısının yakıtta eklenmesiyle, daha verimli bir yanma süreci elde edilerek motorun güç üretiminin artırılması ve zararlı emisyonların düşürülmesi beklenmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, tek silindirli bir dizel motorda farklı oranlarda (0, 25, 50, 75 ve 100 ppm) grafen katkısı ilave edilerek sabit motor devrinde ve farklı yük koşullarında deneyler gerçekleştirilmiş; motor performansı, egzoz emisyonları ve yanma karakteristikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçların, dizel motorlarda nanoteknoloji tabanlı yakıt katkı maddelerinin uygulanabilirliğine ve optimum katkı oranlarının belirlenmesine katkı sağlaması hedeflenmektedir. Çalışma, grafen katkısının motor gücü, torku, yakıt tüketimi ve termal verim gibi performans parametrelerine etkilerini ortaya koyarken; aynı zamanda karbonmonoksit (CO), azot oksitler (NO_x), hidrokarbonlar (HC) ve partikül madde (PM) gibi temel egzoz emisyonlarındaki değişimleri de analiz

etmektedir. Bu kapsamda elde edilen bulgular, literatürdeki benzer çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılarak grafenin dizel motorlarda katkı maddesi olarak potansiyel faydaları ve kısıtları değerlendirilecektir.

1.1. Alternatif Yakıt Katkı Maddeleri

Alternatif katkı maddeleri, motor performansını artırmak, yakıt tüketimini optimize etmek ve egzoz emisyonlarını azaltmak amacıyla geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında biyodizel, etanol, nano-katkılar, metal bazlı katkı maddeleri ve yanma düzenleyici katkılar gibi farklı alternatif katkı maddelerinin motor performansına ve emisyonlar üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Literatürdeki çalışmalar ışığında, alternatif katkı maddelerinin çevresel ve teknik avantajları ortaya konmuştur.

1.1.1. Biyodizel

Biyodizel, genellikle bitkisel yağlar (kanola, soya, palm yağı vb.) veya atık yağların metanol veya etanol ile transesterifikasyonu sonucunda elde edilen bir alternatif dizel yakıtıdır. Tablo 1.1’de standart dizel yakıtlarına kıyasla biyodizelin fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 1.1. Dizel yakıtı ile biyodizelin temel özelliklerinin karşılaştırılması (Usta, Can & Öztürk, 2005)

Özellik	Dizel Yakıtı	Biyodizel
Yoğunluk (g/cm ³)	0.84-0.86	0.86-0.90
Viskozite (mm ² /s)	2.0-4.5	4.0-6.0
Kükürt İçeriği (ppm)	350-500	<10
Setan Sayısı	40-55	48-65
Oksijen İçeriği (%)	0	10-12

Biyodizelin oksijen içeriği daha yüksek olduğu için yanma sürecinde daha verimli bir oksidasyon sağlanarak egzoz gazı emisyonları azaltılmaktadır. Ayrıca, biyodizelin viskozitesi dizel yakıtına göre daha yüksek olup yakıt enjeksiyon sistemlerinde belirli ayarlamaların yapılmasını gerektirebilir (Tyson, 2001).

1.1.1.1 Biyodizelin dizel motorlarda motor performansına etkisi

Biyodizel kullanımının motor performansına etkileri üzerine yapılan çalışmalar, biyodizelin dizel motorlarının verimini koruyabildiğini ancak yakıt tüketimini artırabileceğini göstermektedir (Özgür ve ark., 2015). Biyodizelin setan sayısının yüksek olması, motorun daha düzenli yanmasını sağlarken, yoğunluğunun fazla olması yakıt tüketiminde küçük bir artışa neden olabilir. Tablo 1.2.'de Biyodizelin Motor Performansına Etkileri gösterilmiştir.

Tablo 1.2. Biyodizelin motor performansına etkileri (Özgür ve ark., 2015)

Performans Kriteri	Dizel Yakıtı	Biyodizel (B100)
Güç (kW)	%100	96-98
Yakıt Tüketimi (%)	100	102-105
Termal Verim (%)	35-38	33-36

1.1.1.2. Biyodizelin dizel motorlarda egzoz emisyonları üzerine etkisi

Biyodizelin kullanımı, karbon monoksit (CO), hidrokarbonlar (HC) ve partikül madde (PM) emisyonlarını azaltırken, bazı durumlarda azot oksit (NO_x) emisyonlarını artırabilmektedir (Sipahier, 1990). Bunun temel nedeni, biyodizelin içeriğinde oksijen bulunması ve yanmanın daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmesidir. Biyodizelin Egzoz Emisyonlarına Etkileri (Sipahier, 1990) Tablo 1.3'te verilmiştir.

Tablo 1.3. Biyodizelin egzoz emisyonlarına etkileri (Sipahier, 1990)

Emisyon Türü	Dizel Yakıtı	Biyodizel
CO Emisyonları	%100	%50-70 Azalma
HC Emisyonları	%100	%40-60 Azalma
NO _x Emisyonları	%100	%5-15 Artış
PM Emisyonları	%100	%30-60 Azalma

Biyodizel, dizel motorlar için sürdürülebilir ve çevre dostu bir yakıt alternatifi olarak değerlendirilmektedir. Çalışmalar, biyodizelin CO, HC ve PM emisyonlarını önemli ölçüde azalttığını ancak NO_x emisyonlarını artırabileceğini göstermektedir. Motor performansı açısından, biyodizel geleneksel dizel yakıtına kıyasla küçük performans kayıplarına neden olabilmektedir.

1.1.2. Nano Katkı Maddeleri

Nano katkı maddeleri, partikül büyüklükleri 1-100 nanometre arasında değişen metal oksitler ve karbon bazlı bileşiklerden oluşmaktadır. Bu katkılar, yanma verimini artırarak motor bileşenlerinin aşınmasını azaltmakta ve emisyon değerlerini düşürmektedir (Luo ve ark., 2016). Çalışmada, magnezyum oksit (MgO), alüminyum oksit (Al_2O_3), titanyum dioksit (TiO_2), grafen oksit (GO) ve seryum oksit (CeO_2) gibi nano katkı maddelerinin performans ve çevresel etkileri literatür taraması ile analiz edilmiştir

1.1.2.1 Nano katkıların fiziksel ve kimyasal özellikleri

Nano katkı maddelerinin motor yakıtları ile etkileşimi, yanma süreçlerini iyileştiren çeşitli fiziksel ve kimyasal özelliklere dayanmaktadır. Tablo 1.4'te Nano Katkı Maddelerinin Temel Özellikleri verilmiştir (Luo ve ark., 2016; Çılğın ve Deviren, 2024).

Tablo 1.4. Nano katkı maddelerinin temel özellikleri (Luo ve ark., 2016; Çılğın ve Deviren, 2024)

Katkı Maddesi	Boyut (nm)	Yoğunluk (g/cm^3)	Termal (W/mK)	İletkenlik	Yanma Verimine Etkisi
MgO	20-50	3.58	45		%7 artış
Al_2O_3	10-100	3.95	30		%5 artış
TiO_2	15-40	4.23	8		%6 artış
CeO_2	10-50	7.22	12		%9 artış
Grafen	1-5	2.25	5000		%10 artış

1.1.2.2 Nano katkı maddelerinin dizel motor performansına etkileri

Nano katkı maddeleri, yanma sürecini optimize ederek motorun termal verimini artırmaktadır. İmdadul ve ark., (2016) tarafından yapılan deneysel çalışmalar, nano katkıların yakıt tüketimini %2-5 oranında azalttığı Tablo 1.5'te göstermektedir (İmdadul ve ark., 2016).

Tablo 1.5. Nano katkıların motor performansına etkileri (Imdadul ve ark., 2016)

Performans Kriteri	Standart Dizel	Nano Katkılı Dizel
Yakıt Tüketimi	%100	%95-98
Termal Verimlilik	%35	%38-40

Nano katkıları, egzoz emisyonlarını azaltarak çevresel etkileri minimize etmektedir. Özellikle NO_x ve partikül madde (PM) emisyonlarının azaltılmasında etkilidir (Norhafana ve ark., 2020). Tablo 1.6’da Nano Katkıların Emisyonlara Etkileri Norhafana ve ark., (2020) tarafından yapılan çalışmada gösterilmiştir.

Tablo 1.6. Nano katkıların emisyonlara etkileri (Norhafana ve ark., 2020)

Emisyon Türü	Standart Dizel	Nano Katkılı Dizel
NO _x Emisyonları	%100	%85-90
CO Emisyonları	%100	%70-80
PM Emisyonları	%100	%75-85

Dizel motorlarda nano katkı maddelerinin kullanımı, motor verimliliğini artırmak ve egzoz emisyonlarını düşürmek açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır. Yapılan araştırmalar, nano katkıların yakıt tüketimini optimize ettiğini ve egzoz gazı emisyonlarını büyük ölçüde azalttığını göstermektedir. Ancak, bu katkı maddelerinin uzun vadeli motor aşınması üzerindeki etkileri ve optimum dozaj miktarları konusunda daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

1.1.3. Oksijenli Katkı Maddeleri

Oksijenli katkı maddeleri, molekül yapılarında oksijen içeren bileşikler olup, yakıtın oksijen içeriğini artırarak yanma kalitesini iyileştirmektedir. Bu katkıları, dizel motorların egzoz gazı bileşimini değiştirerek çevre dostu bir alternatif sunmaktadır (Imdadul ve ark., 2016).

1.1.3.1 Oksijenli katkıların fiziksel ve kimyasal özellikleri

Oksijenli katkıların yakıt ile etkileşimi, yanma sürecini iyileştiren fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Oksijenli katkıları, daha verimli yanma sağlayarak karbon monoksit (CO) ve partikül madde (PM) emisyonlarını önemli ölçüde

azaltmaktadır (Candan, 2012). Bu çalışmada, oksijenli katkı maddelerinin motor performansı ve emisyonlara olan etkileri analiz edilerek, en uygun katkı maddelerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Tablo 1.7’de ise Oksijenli Katkı Maddelerinin Temel Özellikleri (Candan, 2012; İmdadul ve ark., 2016) gösterilmiştir.

Tablo 1.7. Oksijenli katkı maddelerinin temel özellikleri (Candan, 2012; İmdadul ve ark., 2016)

Katkı Maddesi	Molekül Formülü	Yoğunluk (g/cm ³)	Oksijen İçeriği (%)	Yanma Verimine Etkisi
Metanol	CH ₃ OH	0.79	50	%8 artış
Etanol	C ₂ H ₅ OH	0.79	34	%7 artış
DME	CH ₃ OCH ₃	0.67	35	%10 artış
DEE	C ₂ H ₅ OCH ₂ CH ₃	0.71	28	%9 artış
Bütanol	C ₄ H ₉ OH	0.81	22	%6 artış

1.1.3.2 Oksijenli katkı maddelerinin dizel motor performansına etkileri

Oksijenli katkılar, dizel motorların termal verimini artırarak yakıt tüketimini azaltmaktadır. Luo ve ark., (2016) yaptıkları deneysel çalışmalar, oksijen içeren katkıların yanma sürecini iyileştirerek özgül yakıt tüketimini (BSFC) %3-7 oranında düşürdüğünü Tablo 1.8’de göstermektedirler.

Tablo 1.8. Oksijenli katkıların motor performansına etkileri (Luo ve ark., 2016)

Performans Kriteri	Standart Dizel	Oksijenli Katkılı Dizel
Yakıt Tüketimi	%100	%93-97
Termal Verimlilik	%35	%40-42

Oksijenli katkılar, egzoz emisyonlarının düşürülmesinde önemli rol oynamaktadır. Norhafana ve ark., (2020) karbonmonoksit (CO) ve partikül madde (PM) emisyonlarının azaltılmasında etkili olduğunu belirtmişler (Norhafana ve ark., 2020). Tablo 1.9’da da Oksijenli Katkıların Emisyonlara Etkileri verilmiştir.

Tablo1.9. Oksijenli katkıların emisyonlara etkileri (Norhafana ve ark., 2020)

Emisyon Türü	Standart Dizel	Oksijenli Katkılı Dizel
NO _x	%100	%92-95
CO	%100	%70-80
PM	%100	%60-75

Dizel motorlarda oksijenli katkı maddelerinin kullanımı hem motor verimliliğini artırmak hem de egzoz emisyonlarını azaltmak açısından büyük avantajlar sunmaktadır.

Yapılan araştırmalar, oksijenli katkıların yakıt tüketimini optimize ettiğini ve çevresel etkileri minimize ettiğini göstermektedir. Ancak, bu katkı maddelerinin optimum dozaj miktarları ve motor aşınmasına uzun vadeli etkileri hakkında daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

1.1.4. Alkol Bazlı Katkı Maddeleri

Alkol bazlı katkı maddeleri, hidroksil (-OH) grubu içeren organik bileşiklerdir ve dizel yakıtın oksijen içeriğini artırarak yanma sürecini iyileştirirler (Haşımoğlu ve ark., 2006). Özellikle metanol ve etanol, düşük viskoziteleri nedeniyle yakıt enjeksiyon sistemlerine uyum sağlayabilmektedir. Alkol bazlı katkı maddeleri, dizel motorlarda kullanılan yakıtların yanma verimini artırmak ve çevresel etkilerini minimize etmek amacıyla yaygın olarak araştırılmaktadır. Metanol, etanol ve bütanol gibi alkoller, dizel yakıt ile karıştırıldığında daha homojen bir yanma sağlamak ve motor performansını iyileştirmektedir (Fırat, Okcu & Varol, 2017). Bu çalışma, dizel motorlarda alkol bazlı katkı maddelerinin etkilerini detaylı olarak inceleyerek motor verimliliği ve egzoz emisyonlarına olan katkılarını değerlendirmektedir.

1.1.4.1 Alkol bazlı katkıların fiziksel ve kimyasal özellikleri

Alkol bazlı katkı maddelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri, yakıt ile olan etkileşimlerini ve yanma sürecini doğrudan etkilemektedir. Haşımoğlu ve ark., (2006); Fırat ve ark., (2017) Alkol Bazlı Katkı Maddelerinin Temel Özellikleri Tablo 1.10'da verilmiştir (Haşımoğlu ve ark., 2006; Fırat ve ark., 2017).

Tablo1.10. Alkol bazlı katkı maddelerinin temel özellikleri (Haşımoğlu ve ark., 2006; Fırat ve ark., 2017)

Katkı Maddesi	Molekül Formülü	Yoğunluk (g/cm ³)	Oksijen İçeriği (%)	Yanma Verimine Etkisi
Metanol	CH ₃ OH	0.79	50	%8 artış
Etanol	C ₂ H ₅ OH	0.79	34	%7 artış
Bütanol	C ₄ H ₉ OH	0.81	22	%6 artış

1.1.4.2 Alkol bazlı katkı maddelerinin dizel motor performansına etkileri

Alkol bazlı katkıları, dizel motorların termal verimini artırarak yakıt tüketimini azaltmaktadır. Deneysel çalışmalar, alkol içeren katkıların özgül yakıt tüketimini (BSFC) %4-8 oranında düşürdüğünü Tablo 1.11’de göstermektedir (Karagöz ve ark., 2016).

Tablo1.11. Alkol bazlı katkıların motor performansına etkileri (Karagöz ve ark., 2016)

Performans Kriteri	Standart Dizel	Alkol Katkılı Dizel
Yakıt Tüketimi	%100	%92-96
Termal Verimlilik	%35	%39-41

Alkol bazlı katkıları, egzoz emisyonlarını azaltarak çevresel etkileri minimize etmektedir. Özellikle karbon monoksit (CO) ve partikül madde (PM) emisyonlarının azaltılmasında etkilidir (Jamali ve ark., 2019).

Tablo1.11. Alkol bazlı katkıların emisyonlara etkileri (Jamali ve ark., 2019)

Emisyon Türü	Standart Dizel	Alkol Katkılı Dizel
NO _x	%100	%90-95
CO	%100	%65-80
PM	%100	%60-75

Dizel motorlarda alkol bazlı katkı maddelerinin kullanımı hem motor verimliliğini artırmak hem de egzoz emisyonlarını azaltmak açısından büyük avantajlar sunmaktadır. Yapılan araştırmalar, alkol bazlı katkıların yakıt tüketimini optimize ettiğini ve çevresel etkileri minimize ettiğini göstermektedir. Ancak, bu katkı maddelerinin optimum dozaj miktarları ve motor aşınmasına uzun vadeli etkileri hakkında daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

1.1.5 Grafen nano katkı maddesi ve dizel motorlarda kullanım potansiyeli

Grafen, karbon atomlarının sp² hibritleşmiş halde bal peteği örgüsü şeklinde düzenlendiği, tek atom kalınlığında bir malzemedir. 2004 yılında Novoselov ve Geim tarafından keşfedilen grafen, olağanüstü elektriksel iletkenliği, yüksek termal iletkenliği ve mekanik dayanımı sayesinde birçok bilimsel araştırmanın odak noktası olmuştur (Katsnelsona & Novoselov, 2007). Dizel motorların verimliliğini artırmak ve egzoz emisyonlarını azaltmak amacıyla çeşitli katkı maddeleri kullanılmaktadır. Son yıllarda nanoteknolojinin gelişmesiyle birlikte, nano katkı maddeleri motor teknolojisinde

önemli bir yer edinmiştir. Grafen, yüksek yüzey alanı, elektriksel ve termal iletkenliği ile dikkat çeken bir karbon bazlı nanomalzemedir (Pietronero ve ark., 1980). Bu çalışmada, grafenin dizel motorlarda katkı maddesi olarak kullanımının avantajları ve potansiyel etkileri ele alınacaktır.

1.1.5.1 Grafenin özellikleri ve motor performansına etkileri

Grafen, tek katmanlı karbon atomlarından oluşan bir malzeme olup, üstün termal ve mekanik özelliklere sahiptir. Dizel yakıtta grafen eklenmesi, yakıtın yanma verimini artırmakta ve emisyonları düşürmektedir (Balandin et al., 2008). Grafenin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri Tablo 1.13'te verilmiştir.

Tablo 1.12. Grafenin temel özellikleri (Balandin ve ark., 2008)

Özellik	Değer
Termal İletkenlik	~5000 W/mK
Elektriksel İletkenlik	6000 S/cm
Mekanik Dayanım (Young Modülü)	1 TPa
Yoğunluk	2.26 g/cm ³

Grafenin yüksek termal iletkenliği, yakıt-hava karışımının daha homojen yanmasını sağlayarak motor verimliliğini artırmaktadır. Yapılan araştırmalar, grafen katkılı yakıtların motor gücünü ve torkunu artırdığını Tablo 1.14'te göstermektedir (Javad ve ark., 2016).

Tablo 1.13. Grafenin motor performansına etkileri (Javad ve ark., 2016)

Performans Kriteri	Standart Dizel	Grafen Katkılı Dizel
Yakıt Tüketimi	%100	%95-97
Termal Verimlilik	%35	%40-42
Motor Gücü	50 kW	53-55 kW

Grafenin dizel yakıtlara katkı olarak kullanılması, egzoz gazlarının zararlı bileşenlerini önemli ölçüde azaltmaktadır. Yüksek yanma verimi sayesinde karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x) ve partikül madde (PM) emisyonları azalırken, motorun çevresel etkileri minimize edilmektedir (Ferrari, 2006). Sonuçlar Tablo 1.15'te verilmiştir.

Tablo 1.14. Grafenin egzoz emisyonlarına etkisi (Ferrari, 2006)

Emisyon Türü	Standart Dizel	Grafen Katkılı Dizel
NO _x Emisyonları	%100	%85-90
CO Emisyonları	%100	%70-80
PM Emisyonları	%100	%60-75

1.1.5.2 Grafenin dizel motorlarda uygulama alanları

Grafen, motor teknolojilerinde çeşitli şekillerde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Grafen partikülleri, yakıtın daha homojen dağılmasını sağlayarak yanma verimini artırmaktadır (Hwang ve ark., 2007). Grafen bazlı yağ katkıları, motor parçalarının aşınmasını azaltarak motor ömrünü uzatmaktadır (Ferrari, 2006). Grafen kaplamalı filtreler, dizel partikül filtrelerinin (DPF) verimini artırarak daha düşük emisyon sağlamaktadır (Yehong ve ark., 2017).

Grafen, dizel motorlarda alternatif katkı maddesi olarak kullanıldığında motor performansını artırmakta ve egzoz emisyonlarını azaltmaktadır. Ancak, grafenin motor aşınmasına uzun vadeli etkileri ve optimum dozaj miktarları konusunda daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, grafenin farklı türleri ve üretim yöntemlerinin dizel motorlara entegrasyonunu araştırmalıdır.

1.2. Araştırmanın Amacı ve Önemi

Bu tez çalışmasında, GO katkı maddesinin dizel motorlardaki performans ve emisyon üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde incelenecektir. Çalışma, farklı konsantrasyonlardaki (0, 25,50,75,100ppm) GO katkı maddelerinin motor performansı, yakıt tüketimi ve emisyon değerleri üzerindeki etkilerini deneysel inceleyip sonuçlar analiz edilecektir. Ayrıca, grafen katkı maddesinin fiziksel özelliklerinin nasıl etkilediği ve bu etkilerin motor performansına nasıl yansıdığı da araştırılacaktır.

Bu araştırmanın sonuçları, dizel motorların verimliliğini artırma ve çevresel etkilerini azaltma konusunda yeni perspektifler sunmayı amaçlamaktadır. Aynı zamanda, GO tabanlı katkı maddelerinin gelecekteki motor teknolojilerinde kullanımı için bir temel oluşturabileceği öngörülmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Aynı Deney Düzeneginde Yapılan Alternatif Yakıt Çalışmaları

Dizel motorlarda alternatif yakıtların ve yakıt katkı maddelerinin performans, emisyon ve yanma karakteristikleri üzerindeki etkileri, literatürde uzun yıllardır araştırma konusu olmuştur. Bu kapsamda, aynı deney düzeneği kullanılarak farklı yakıt türleri ve katkı maddeleri ile gerçekleştirilen çalışmalar, sonuçların doğrudan karşılaştırılabilir olması açısından büyük önem taşımaktadır. Aynı motor, aynı dinamometre ve aynı ölçüm cihazları kullanılarak yürütülen deneysel çalışmalar, yakıt kaynaklı etkilerin daha net bir şekilde ortaya konulmasına olanak sağlamaktadır.

Literatürde, söz konusu deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda; biyodizel–dizel karışımları, alkol bazlı katkılar, metal oksit nano katkı maddeleri ile atık kökenli yakıtların dizel motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmalarda genel olarak, yakıtın fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki değişimlerin, yanma süreci, özgül yakıt tüketimi, termal verimlilik ve egzoz emisyonları üzerinde belirleyici rol oynadığı rapor edilmiştir.

Aynı deney altyapısında yürütülen bu çalışmalar, farklı yakıt türlerinin ve katkı maddelerinin dizel motorlar üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirme imkânı sunmakta; aynı zamanda yeni geliştirilen yakıt katkı maddeleri için güvenilir bir referans çerçevesi oluşturmaktadır. Bu bağlamda, grafen nano katkısının etkilerinin incelendiği bu tez çalışması, aynı deney düzeneğinde daha önce gerçekleştirilen alternatif yakıt ve nano katkı çalışmalarının devamı niteliğinde değerlendirilmiştir.

2.2. Metal Oksit ve Nano Katkılı Dizel Yakıt Çalışmaları

Son yıllarda dizel motorlarda yanma veriminin artırılması ve egzoz emisyonlarının azaltılması amacıyla metal oksit ve çeşitli nano boyutlu katkı maddelerinin kullanımı önemli ölçüde artmıştır. Al_2O_3 , TiO_2 , CuO , Fe_3O_4 ve ZnO gibi metal oksit nano katkılarının dizel yakıtlara ilave edilmesiyle, yakıtın atomizasyon

özelliklerinin iyileştiği, yanma süresinin kısaldığı ve daha homojen bir yanma sürecinin elde edildiği birçok çalışmada rapor edilmiştir.

Nano katkı maddelerinin yüksek özgül yüzey alanı ve katalitik özellikleri sayesinde, yanma odasında ısı transferinin iyileştiği ve oksidasyon reaksiyonlarının hızlandığı belirtilmektedir. Bu durum, özellikle özgül yakıt tüketiminde azalma ve termal verimde artış şeklinde kendini göstermektedir. Bununla birlikte, nano katkı ilavesinin NO_x emisyonları üzerindeki etkisinin katkı türüne ve oranına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği; düşük katkı oranlarında NO_x artışı, yüksek katkı oranlarında ise plato veya azalma eğilimi sergileyebildiği literatürde ifade edilmektedir.

Aynı deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilen metal oksit nano katkılı dizel motor çalışmalarında, optimum katkı oranlarının genellikle ppm mertebesinde olduğu ve bu oranların aşılması durumunda yakıtın viskozite ve yanma karakteristiklerinin olumsuz yönde etkilenebildiği belirtilmiştir. Bu bulgular, nano katkı maddelerinin dizel motorlarda kullanımında katkı oranının belirlenmesinin kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.

2.3. Atık Kökenli Yakıtlar ve Karışım Yakıtların Dizel Motorlarda Kullanımı

Enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği ve atık yönetimi konularındaki artan çevresel kaygılar, atık kökenli yakıtların dizel motorlarda kullanımına yönelik çalışmaların hız kazanmasına neden olmuştur. Atık sanayi yağları, atık kızartma yağları ve atık plastiklerden elde edilen yakıtlar hem çevresel fayda sağlaması hem de fosil yakıt tüketimini azaltma potansiyeli nedeniyle literatürde geniş bir araştırma alanı bulmuştur. Atık kökenli yakıtların dizel motorlarda kullanımı, yakıt özelliklerindeki değişimlere bağlı olarak motor performansı ve emisyon karakteristiklerinde belirgin farklılıklara yol açabilmektedir. Bu tür yakıtların genellikle daha yüksek viskoziteye ve farklı yanma özelliklerine sahip olması, atomizasyon kalitesini olumsuz etkileyebilmekte; bu durum özgül yakıt tüketiminde artış ve bazı emisyon türlerinde yükselme ile sonuçlanabilmektedir. Bu nedenle, atık kökenli yakıtların doğrudan kullanımında motor uyumu ve uzun dönemli işletme kararlılığı önemli bir araştırma konusu olarak öne çıkmaktadır.

Literatürde, aynı deney düzeneği kullanılarak atık kökenli yakıtlar ve bunların dizel yakıt ile karışımlarının incelendiği çalışmalarda, performans ve emisyon

iyileştirmelerinin çoğunlukla belirli karışım oranlarında elde edilebildiği; yüksek oranlarda ise motor performansında düşüşler ve yanma karakteristiğinde olumsuzluklar gözlemlendiği rapor edilmiştir. Bu bulgular, yakıtın temel yapısını değiştirmeden gerçekleştirilen iyileştirme yaklaşımlarının, dizel motorlar için daha kontrollü ve uygulanabilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

2.4. Grafen ve Grafen Türevi Nano Katkı Maddeleri ile Yapılan Çalışmalar

Grafen ve grafen türevi nano malzemeler, yüksek özgül yüzey alanı, üstün termal iletkenlik, mekanik dayanım ve kimyasal kararlılık gibi özellikleri sayesinde son yıllarda enerji ve motor teknolojileri alanında dikkat çekici bir araştırma konusu hâline gelmiştir. Bu özellikler, grafenin dizel yakıtlara nano katkı maddesi olarak ilave edilmesi durumunda, yanma sürecinin iyileştirilmesi ve emisyonların azaltılması açısından önemli bir potansiyel sunduğunu göstermektedir.

Literatürde grafen ve grafen oksit katkılı dizel ve biyodizel yakıtlar ile gerçekleştirilen sınırlı sayıdaki çalışmada, düşük ve orta katkı oranlarında motor performansında artış, özgül yakıt tüketiminde azalma ve bazı zararlı emisyonlarda iyileşme eğilimleri rapor edilmiştir. Bu iyileşmelerin, grafenin yüksek ısı iletim kabiliyeti, yakıt atomizasyonunu iyileştirmesi ve yanma odasındaki reaksiyon kinetiğini olumlu yönde etkilemesi ile ilişkili olduğu belirtilmektedir. Bununla birlikte, grafen ve grafen türevi nano katkı maddelerinin yüksek katkı oranlarında kullanılması durumunda, yakıt homojenliğinin bozulabildiği, aglomerasyon eğiliminin artabildiği ve bunun yanma karakteristikleri üzerinde olumsuz etkilere yol açabildiği literatürde ifade edilmektedir. Ayrıca, mevcut çalışmaların önemli bir kısmının farklı motor tipleri, farklı test koşulları ve farklı katkı oranları ile gerçekleştirilmiş olması, elde edilen sonuçların doğrudan karşılaştırılmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, grafen nano katkısının dizel motorlarda performans, egzoz emisyonları ve yanma karakteristikleri üzerindeki etkilerinin, aynı motor ve aynı deney düzeneği kullanılarak sistematik bir şekilde incelenmesi, literatürdeki bu boşluğun giderilmesi açısından önem arz etmektedir.

2.5. Literatür Değerlendirmesi ve Tezin Literatürdeki Yeri

Yapılan literatür incelemesi, dizel motorlarda alternatif yakıtlar ve nano katkı maddelerinin kullanımına yönelik çok sayıda deneysel çalışmanın bulunduğunu

göstermektedir. Metal oksit nano katkıları, alkol bazlı katkıları ve atık kökenli yakıtlar ile gerçekleştirilen bu çalışmalarda, motor performansı ve egzoz emisyonları üzerinde farklı düzeylerde iyileşmeler elde edilmiştir. Ancak bu iyileştirmelerin önemli bir kısmı, yakıtın temel yapısının değiştirilmesi veya motor uyumuna ilişkin ek düzenlemeler gerektiren yaklaşımlar içermektedir.

Grafen ve grafen türevi nano katkı maddeleri ile gerçekleştirilen çalışmaların ise literatürde sınırlı sayıda olduğu; mevcut çalışmaların çoğunlukla farklı motor tipleri, farklı test koşulları ve farklı katkı oranları kullanılarak yürütüldüğü görülmektedir. Bu durum, grafen katkısının dizel motorlardaki etkileri konusunda genel geçer ve karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmesini zorlaştırmaktadır.

Bu tez çalışması, literatürdeki söz konusu boşluğu doldurmayı hedefleyerek, grafen nano katkısının dizel motor performansı, egzoz emisyonları ve yanma karakteristikleri üzerindeki etkilerini, aynı motor ve aynı deney düzeneği kullanılarak sistematik bir biçimde incelemektedir. Böylece, yakıtın temel yapısı değiştirilmeden gerçekleştirilen nano katkı temelli iyileştirme yaklaşımlarının etkinliği ortaya konulmakta ve grafen katkılı dizel yakıtların uygulanabilirliği literatüre özgün bir katkı olarak sunulmaktadır.

Dizel motorlar, ulaşım ve sanayi sektörlerinde yaygın olarak kullanılan içten yanmalı motorlardır. Ancak, fosil yakıtların kullanımıyla ortaya çıkan egzoz emisyonları, çevresel sorunlara neden olmaktadır (Mishra & Goswami, 2018). Fosil yakıt rezervlerinin tükenmesi ve artan çevresel kaygılar, araştırmacıları dizel motorlar için alternatif yakıt ve katkı maddelerini araştırmaya yöneltmiştir. Biyodizel, alkol ve oksijenli katkı maddeleri, nanopartiküller, nadir toprak elementleri, eterler ve diğer kimyasal katkı maddeleri motor performansını artırmak ve emisyonları azaltmak amacıyla potansiyel çözümler olarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Alternatif yakıtların ve yakıt katkı maddelerinin dizel motorlarda kullanımı, motor performansını iyileştirme ve egzoz emisyonlarını azaltma potansiyelleri nedeniyle büyük ilgi görmüştür.

Farklı yakıt katkı maddelerinin dizel motorun yanma süreci, performansı ve emisyonları üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Dizel motorlar, yüksek verimleri ve dayanıklılıkları nedeniyle çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu motorlar çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri olan yüksek partikül madde (PM), nitrojen oksit (NO_x)

ve diğer kirletici emisyonlar ile de bilinmektedir. Bu emisyonları azaltmaya yönelik yaklaşımlardan biri, alternatif yakıt katkı maddelerinin kullanımıdır.

Bu bölümde, çeşitli yakıt katkı maddelerinin dizel motorlarda motor performansı ve emisyon değerleri üzerindeki etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır.

Yakıt katkı maddelerinin fren termal verimliliği (BTE), fren özgül yakıt tüketimi (BSFC) ve silindir içi basınç gibi motor performans parametreleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Dizel motorlarda kullanılan katkı maddeleri, motorun verimli çalışmasını sağlamakla birlikte egzoz gazı emisyonlarını önemli ölçüde düşürmektedir (Kim ve ark., 2017). Alternatif yakıt katkıları, genellikle karbon bazlı yakıtların yanma özelliklerini iyileştirmek için kullanılmaktadır. LPG, sentetik dizel ve biyodizel gibi alternatif katkılar, yanma sürecini optimize ederek hem motor verimini artırmakta hem de zararlı gaz emisyonlarını azaltmaktadır (Kırmaz, 2019). Oksijenli yakıt katkıları ise yakıt içerisindeki oksijen oranını artırarak yanma verimini yükseltmekte ve is oluşumunu azaltmaktadır (Choi & Reitz, 1999). Tablo 2.1’de Li ve ark., (2015); Labeckas & Slavinskas, (2013) yapılan çalışmalarda Alternatif Yakıt Katkılarının Motor Performansına Etkileri gösterilmiştir.

Tablo 2. 1: Alternatif yakıt katkılarının motor performansına etkileri (Li ve ark., 2015; Labeckas & Slavinskas, 2013)

Performans Kriteri	Standart Dizel	LPG Katkılı Dizel	Biyodizel Katkılı Dizel	Sentetik Dizel	Oksijenli Yakıt
Yakıt Tüketimi	%100	%90-93	%92-96	%91-94	%89-92
Termal Verimlilik	%35	%40-42	%38-41	%39-42	%41-44
Motor Gücü	50 kW	52-54 kW	51-53 kW	52-55 kW	53-56 kW

Alternatif yakıt katkılarının en önemli avantajlarından biri, egzoz emisyonlarını azaltmalarıdır. LPG ve biyodizel, partikül madde (PM) ve karbon monoksit (CO) emisyonlarını düşürürken, oksijenli katkılar yanma verimini artırarak NO_x emisyonlarının azalmasına yardımcı olmaktadır (Dorado ve ark., 2003). Sonuçlar Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2. 2:Alternatif yakıt katkılarının emisyonlara etkileri (Dorado ve ark., 2003; Choi & Reitz, 1999)

Emisyon Türü	Standart Dizel	LPG Katkılı Dizel	Biyodizel Katkılı Dizel	Sentetik Dizel	Oksijenli Yakıt
NO _x	%100	%92-95	%90-93	%88-92	%85-90
CO	%100	%70-80	%60-75	%65-78	%55-72
PM	%100	%75-85	%60-72	%70-80	%58-70

Behçet ve ark. (2015), biyodizelin dizel motorlarda kullanımını inceleyerek, biyodizel katkılı yakıtların motor verimini artırırken egzoz emisyonlarını azalttığını belirtmiştir. Çakmak (2022) ise oksijenli katkı maddelerinin motor performansı ve emisyonlar üzerindeki etkisini araştırmış ve oksijen içeriği yüksek yakıtların yanma sürecini iyileştirdiğini tespit etmiştir.

Gülüm (2023) yaptığı çalışmada, dizel yakıtı diethylene glycol dimethyl ether eklenmesinin motor performansını artırdığını ve CO emisyonlarını azalttığını göstermiştir. Bu tür katkı maddeleri, daha homojen bir yanma sağlayarak motorun genel verimliliğini artırmaktadır. Sonuçlar Tablo 2.3'te gösterilmiştir.

Tablo 2. 3:Alternatif yakıt katkı maddelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri (Behçet ve ark., 2015; Çakmak, 2022).

Katkı Maddesi	Yoğunluk (g/cm ³)	Oksijen İçeriği (%)	Termal Verimlilik Artışı (%)	CO ₂ Emisyonu Azalışı (%)
Biyodizel	0.86-0.90	11	%5-8	%20-25
Oksijenli Katkılar	0.85-0.89	12-15	%8-12	%22-28
Sentetik Dizel	0.78-0.84	5	%7-10	%18-22

Biyodizelin motor performansı üzerindeki etkilerini değerlendiren Mishra & Goswami (2018), biyodizel kullanımının motor verimini artırdığını ancak yakıt tüketimini belirli bir seviyede artırabileceğini ifade etmiştir. Çakmak (2022), oksijen içeriği yüksek katkı maddelerinin yanma sürecini iyileştirerek motor performansını artırdığını ortaya koymuştur, sonuçlar Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2. 4: Alternatif yakıt katkılarının motor performansına etkileri (Gülüm, 2023; Behçet ve ark., 2015)

Performans Kriteri	Standart Dizel	Biyodizel Katkılı Dizel	Oksijenli Katkı Maddesi	Sentetik Dizel
Yakıt Tüketimi	%100	%92-96	%89-92	%91-94
Termal Verimlilik	%35	%38-41	%41-44	%39-42
Motor Gücü	50 kW	51-53 kW	53-56 kW	52-55 kW

Dizel motorlarda egzoz emisyonlarının azaltılması çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Çakmak (2022), oksijen içeriği yüksek katkı maddelerinin NO_x ve CO emisyonlarını düşürdüğünü belirtmiştir. Behçet ve ark. (2015) ise biyodizel kullanımının partikül madde (PM) ve karbon monoksit (CO) emisyonlarını düşürdüğünü tespit etmiştir, Sonuçlar Tablo 2.5’te gösterilmiştir.

Tablo 2. 5: Alternatif yakıt katkılarının emisyonlara etkileri (Çakmak, 2022; Behçet ve ark., 2015)

Emisyon Türü	Standart Dizel	Biyodizel Katkılı Dizel	Oksijenli Katkı Maddesi	Sentetik Dizel
NO _x	%100	%90-93	%85-90	%88-92
CO	%100	%60-75	%55-72	%65-78
PM	%100	%60-72	%58-70	%70-80

Decker ve ark. (2010), yakıt içerisindeki polar bileşenlerin ve doymamış yağ asitlerinin oksidasyon stabilitesi üzerindeki etkilerini incelemiş ve biyodizelin depolama koşullarına bağlı olarak oksidasyona duyarlı hale gelebileceğini tespit etmiştir. Zhang ve ark. (2021), antioksidan katkı maddelerinin biyodizel kristalleşmesini engelleyerek depolama süresini uzattığını ortaya koymuştur.

Menezes ve ark. (2022) yaptıkları çalışmada, farklı hammaddelerden üretilen biyodizellerin depolama kararlılığını Rancimat metodu kullanarak değerlendirmiş ve biyodizelin oksidatif stabilitesinin biyodizel hammaddesine bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini tespit etmiştir. Bu çalışmanın verileri Tablo 2.6’da sunulmuştur.

Tablo 2. 6: Alternatif yakıt katkı maddelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri (Decker ve ark., 2010; Menezes ve ark., 2022)

Katkı Maddesi	Oksijen İçeriği (%)	Oksidasyon Stabilitesi	Yanma Verimliliği Artışı (%)
Biyodizel	11	Düşük	%5-8
Antioksidan Katkılar	-	Yüksek	%3-5
Oksijenli Yakıtlar	12-15	Orta	%8-12

Alternatif yakıt katkılarının motor performansına etkileri, motor gücü, yakıt tüketimi ve yanma verimliliği gibi parametreler üzerinden değerlendirilmektedir. Fenimore (1975) tarafından yapılan çalışmada, oksijen içeriği yüksek yakıtların yanma sürecini iyileştirerek motor verimliliğini artırdığı tespit edilmiştir. Zhang ve ark. (2021), antioksidan katkılarının biyodizelin oksidatif kararlılığını artırarak motor performansını olumlu yönde etkilediğini, Tablo 2.7’de gösterilmiştir.

Tablo 2. 7: Alternatif yakıt katkılarının motor performansına etkileri (Zhang ve ark., 2021; Fenimore, 1975)

Performans Kriteri	Standart Dizel	Biyodizel	Oksijenli Yakıt	Antioksidan Katkılar
Yakıt Tüketimi	%100	%92-96	%89-92	%95-98
Termal Verimlilik	%35	%38-41	%41-44	%37-40
Motor Gücü (kW)	50	51-53	53-56	50-52

Biodizel ve oksijenli katkılar, karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x) ve partikül madde (PM) emisyonlarını azaltmaktadır. Fenimore (1975), oksijen içeriği yüksek yakıtların NO₂/NO oranını düşürerek daha temiz bir yanma sağladığını göstermiştir. Heywood (1988) tarafından yapılan çalışmada, oksijenli katkı maddelerinin partikül madde oluşumunu azalttığı belirlenmiştir, Tablo 2.8’de gösterilmiştir.

Tablo 2. 8: Alternatif yakıt katkılarının emisyonlara etkileri (Fenimore, 1975; Heywood, 1988)

Emisyon Türü	Standart Dizel	Biyodizel	Oksijenli Yakıt	Antioksidan Katkılar
NO _x	%100	%90-93	%85-90	%92-95
CO	%100	%60-75	%55-72	%70-80
PM	%100	%60-72	%58-70	%75-85

Alternatif yakıt katkı maddelerinin dizel motor performansı ve emisyon değerleri üzerindeki olumlu etkileri, yapılan araştırmalar ile kanıtlanmıştır. Zhang ve ark. (2021), antioksidan katkılarının biyodizelin depolama süresini uzattığını belirlemiştir. Fenimore

(1975) ise oksijenli yakıtların NO₂/NO oranını azaltarak daha verimli bir yanma sağladığını göstermiştir.

Ulukardeşler (2012), mikroalg bazlı biyoyakıtların Türkiye’de üretilebilirlik potansiyelini incelemiş ve bu tür yakıtların çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir seçenek olduğunu ortaya koymuştur. Çılgin (2015), mikroalg bazlı biyoyakıtların dizel motor performansı üzerindeki etkisini araştırmış ve mikroalg metil esterlerinin motor performansını olumlu yönde etkileyerek egzoz emisyonlarını azalttığını tespit etmiştir.

Luo ve ark. (2016), nanosize alüminyum katkılarının yakıt yanma sürecini iyileştirdiğini belirlemiş ve bu katkıların dizel motorlarının verimliliğini artırabileceğini göstermiştir. Norhafana ve ark. (2020) ise nano-katkı maddelerinin egzoz emisyonlarını ve toksisite seviyelerini Tablo 2.9’ten de görüldüğü gibi azalttığını ifade etmiştir.

Tablo 2. 9: Alternatif yakıt katkı maddelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri (Ulukardeşler, 2012; Çılgin, 2015; Luo ve ark., 2016)

Katkı Maddesi	Oksijen İçeriği (%)	Termal Verimlilik Artışı (%)	Egzoz Emisyonu Azalışı (%)
Mikroalg	10-12	%6-9	%15-22
Biyodizel			
Nano-Katkılar	-	%5-8	%18-25
Oksijenli Yakıtlar	12-15	%8-12	%22-30

Alternatif yakıt katkılarının motor performansına etkileri, motor gücü, yakıt tüketimi ve yanma verimliliği gibi parametreler üzerinden değerlendirilmektedir. Çılgin ve İlkılıç (2015), mikroalg metil esterlerinin motor gücünü artırarak yakıt tüketimini azalttığını belirlemiştir. İmdadul ve ark. (2016), Tablo 2.10’da de görüldüğü gibi oksijen içeriği yüksek yakıtların yanma sürecini iyileştirerek motor verimliliğini artırdığını tespit etmiştir.

Tablo 2. 10: Alternatif yakıt katkılarının motor performansına etkileri (Çılgin & İlkılıç, 2015; İmdadul ve ark., 2016)

Performans Kriteri	Standart Dizel	Mikroalg Biyodizel	Nano-Katkılar	Oksijenli Yakıtlar
Yakıt Tüketimi	%100	%92-96	%89-92	%91-94
Termal Verimlilik	%35	%38-41	%41-44	%39-42
Motor Gücü (kW)	50	51-53	53-56	52-55

Alternatif yakıt katkılarının en önemli avantajlarından biri, egzoz emisyonlarını azaltmalarıdır. Gülüm ve ark. (2015), oksijen içeriği yüksek yakıtların NO_x

emisyonlarını düşürdüğünü ortaya koymuştur. Mohd Noor ve ark. (2018), Tablo 2.11’de gösterildiği gibi biyodizel bazlı yakıtların PM ve CO emisyonlarını düşürdüğünü tespit etmiştir.

Tablo 2. 11: alternatif yakıt katkılarının emisyonlara etkileri (Gülüm ve ark., 2015; Mohd Noor ve ark., 2018)

Emisyon Türü	Standart Dizel	Mikroalg Biyodizel	Nano-Katkılar	Oksijenli Yakıtlar
NO _x	%100	%90-93	%85-90	%88-92
CO	%100	%60-75	%55-72	%65-78
PM	%100	%60-72	%58-70	%70-80

Alternatif yakıt katkı maddelerinin dizel motor performansı ve emisyon değerleri üzerindeki olumlu etkileri, yapılan araştırmalar ile kanıtlanmıştır. Çılgın ve İlkılıç (2015), mikroalg bazlı biyodizelin motor verimini artırarak emisyonları azalttığını göstermiştir. Luo ve ark. (2016) ise nano-katkıların yanma sürecini iyileştirdiğini ve toksisiteyi düşürdüğünü ortaya koymuştur.

Hazar ve ark. (2016), kayısı çekirdeği yağı biyodizelinin katkıları ile kullanılması durumunda motor performansını artırabileceğini ve egzoz emisyonlarını azaltabileceğini belirtmiştir. Deviren ve Çılgın (2024), akçaağaç yağı biyodizelinin asetona dayalı katkıları ile kullanıldığında motor performansını iyileştirdiğini göstermiştir.

Arul Mozhi Selvan ve ark. (2014), seriyum oksit nano-katkılarının ve karbon nanotüplerin dizel motorlardaki yanma sürecini iyileştirerek yakıt tüketimini azalttığını belirtmiştir. Vijayakumar ve ark. (2018), çinko oksit nano-katkılarının yanma verimliliğini artırdığını göstermiştir. Tablo 2.12’de de sonuçlar verilmiştir.

Tablo 2. 12: alternatif yakıt katkı maddelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri (Hazar ve ark., 2016; Deviren & Çılgın, 2024; Arul Mozhi Selvan ve ark., 2014)

Katkı Maddesi	Oksijen İçeriği (%)	Termal Verimlilik Artışı (%)	Egzoz Emisyonu Azalışı (%)
Biyodizel	10-12	%6-9	%15-22
Nano-Katkılar	-	%5-8	%18-25
Oksijen Zenginleştirilmiş Yakıtlar	12-15	%8-12	%22-30

Alternatif yakıt katkılarının en önemli avantajlarından biri, egzoz emisyonlarını azaltmalarıdır. Uyar ve Aydın (2022), pirolitik damıtma yöntemiyle düşük sülfürlü dizel türevleri üretmenin motor emisyonlarını önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Rakopoulos ve ark. (2004), oksijen zenginleştirilmiş yakıtların NO_x emisyonlarını

azalttığını ve yanma sürecini iyileştirdiğini belirtmiştir. Sonuçlar Tablo 2.13'te gösterilmiştir.

Tablo 2. 13: Alternatif yakıt katkılarının emisyonlara etkileri (Uyar & Aydın, 2022; Rakopoulos ve ark., 2004)

Emisyon Türü	Standart Dizel	Biyodizel	Nano-Katkılar	Oksijen Zenginleştirilmiş Yakıtlar
NO _x	%100	%90-93	%85-90	%88-92
CO	%100	%60-75	%55-72	%65-78
PM	%100	%60-72	%58-70	%70-80

Canakci (2007), biyodizelin motor performansını artırarak emisyonları azalttığını göstermiştir. Arul Mozhi Selvan ve ark. (2014), nano-katkıların yanma sürecini iyileştirdiğini ve toksisiteyi düşürdüğünü ortaya koymuştur.

Bir başka çalışmada ise Hoseini ve ark. (2020), Grafen oksit katkılı biyodizelin dizel motor performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmişler. Elde edilen sonuçlar Tablo 2.14 ve 2.15'te sunulmuştur.

Tablo 2. 14: Motor performansına etkileri (Hoseini ve ark., 2020)

Performans Kriteri	Biyodizel-Dizel Karışımı	Grafen Oksit Katkılı Biyodizel
Yakıt Tüketimi (% düşüş)	-	%5-8
Termal Verimlilik (%)	40-43	45-48
Motor Gücü (kW)	50-53	55-58

Yanma sürecini optimize ederek motor verimini artırdığını ve GO katkılı biyodizelin partikül madde oluşumunu minimize ettiği, biyodizelin termal iletkenliği artırarak yanma sürecini iyileştirdiğini göstermiştir.

Tablo 2. 15: Emisyon üzerindeki etkiler (Hoseini ve ark., 2020)

Emisyon Türü	Biyodizel-Dizel Karışımı	Grafen Oksit Katkılı Biyodizel
NO _x	%100	%80-85
CO	%100	%60-70
PM	%100	%65-75

El-Seesy ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada, nano katkı maddelerinin motor performansına olan etkileri deneysel olarak analiz edilmiştir. Grafen oksit, grafen nano platelet ve karbon nanotüp katkılı biyodizelin, motorun termal verimliliğini artırarak yakıt tüketimini optimize ettiğini tespit etmiştir. Özellikle grafen nano

maddesinin yakıt atomizasyonunu iyileştirerek yanma sürecini optimize ettiği belirlenmiştir. Sonuçlar Tablo 2.16 ve 2.17’de sunulmuştur.

Tablo 2. 16: Nano katkılı yakıtların motor performansına etkileri (El-Seesy ve ark., 2019)

Performans Kriteri	Biyodizel-Dizel Karışımı	GO Yakıt	Katkılı GNP Yakıt	Katkılı MWCNT Yakıt
Yakıt Tüketimi (% düşüş)	-	%4-6	%5-8	%6-9
Termal Verimlilik (%)	40-43	44-47	45-48	46-49
Motor Gücü (kW)	50-53	54-56	55-58	57-60

Nano katkılı yakıtların egzoz emisyonları üzerindeki etkileri incelendiğinde, El-Seesy ve ark. (2019) tarafından yapılan deneylerde, CO emisyonlarının önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Özellikle karbon nanotüp katkılı yakıtın PM emisyonlarını büyük oranda düşürdüğü belirlenmiştir.

Tablo 2. 17: Nano katkılı yakıtların emisyon üzerindeki etkileri (El-Seesy ve ark., 2019)

Emisyon Türü	Biyodizel-Dizel Karışımı	GO Yakıt	Katkılı GNP Yakıt	Katkılı MWCNT Yakıt
NO _x	%100	%85-90	%80-85	%75-80
CO	%100	%60-70	%55-65	%50-60
PM	%100	%65-75	%60-70	%50-60

Grafen oksit, grafen nano platelet ve çok duvarlı karbon nanotüp katkılı biyodizelin dizel motorlarda kullanımı, motor verimliliğini artıran ve emisyonları düşüren yenilikçi bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. El-Seesy ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmalarda, nanografen oksit katkılı biyodizelin daha homojen bir yanma sağladığı ve yanma odasındaki sıcaklık dağılımını iyileştirdiği, nano katkı maddelerinin termal iletkenliği artırarak yanma sürecini optimize ettiği belirtilmiştir.

Nanografen oksit katkılı biyodizelin motor performansı üzerindeki etkilerini değerlendiren Hoseini ve ark. (2020), yanma sürecini optimize ederek motor verimini artırdığını tespit etmiştir. Tablo 2.18 ve 2.19’te sonuçlar verilmiştir.

Tablo 2. 18: Nanografen oksit katkılı biyodizelin motor performansına etkileri (Hoseini ve ark., 2020; El-Seesy ve ark., 2018)

Performans Kriteri	Biyodizel-Dizel Karışımı	Nanografen Oksit Katkılı Biyodizel
Yakıt Tüketimi (% düşüş)	-	%6-10
Termal Verimlilik (%)	40-43	46-50

El-Seesy ve ark. (2018), grafen oksit katkılarının motorun yakıt tüketimini düşürerek güç üretimini artırdığını göstermiştir.

Tablo 2. 19: Nanografen oksit katkılı biyodizelin emisyon üzerindeki etkileri (Hoseini ve ark., 2018; El-Seesy ve ark., 2018)

Emisyon Türü	Biyodizel-Dizel Karışımı	Nanografen Oksit Katkılı Biyodizel
NO _x	%100	%80-85
CO	%100	%55-65
PM	%100	%60-70

Kallioğlu ve ark. (2025), yaptıkları çalışmada $Zn_{0.5}Mn_{0.5}Fe_2O_4$ çok elementli oksit nanoparçacıklarının eurodizel yakıtına farklı oranlarda (25–100 ppm) katılmasının tek silindirli bir dizel motorun yanma, performans ve emisyon özellikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırmışlardır. Nanoparçacık katkısı ile yakıtın yoğunluğu ve viskozitesi azalmış; setan sayısı, ısıl değer ve parlama noktası arttığını tespit etmişler. Deneysel bulgular, nanoparçacık katkısı ile silindir basıncı ve ısı yayılım hızının arttığını göstermiştir. En yüksek iyileştirme 100 ppm katkıda elde edilmiş, fren termal verimi %18,3 artarken özgül yakıt tüketimi %11,7 azaldığı gözlemlenmiştir. Emisyonlarda CO (%30,8), HC (%28,8), NO_x (%38,7) ve duman koyuluğu (%23,8) azalırken, CO₂ emisyonları %54,5 arttığı rapor edilmiştir. RSM analizleri ile optimum katkı oranı 100 ppm ve optimum BMEP değeri 1.58 bar olarak belirlemişler. Bu çalışma, literatürde ilk kez çok elementli $Zn_{0.5}Mn_{0.5}Fe_2O_4$ nanoparçacıklarının dizel motor yakıt katkısı olarak kullanıldığını göstermekte ve daha verimli, çevresel etkileri azaltılmış yakıt geliştirilmesine katkı sağlamakta olduğu vurgulanmıştır. (Kallioğlu ve ark., 2025)

Avcı ve ark. (2025), ise yaptıkları deneysel çalışmada, biyodizel (B20) ve biyodizel–n-bütanol (B20But10) yakıtlarına $Zn_{0.5}Mn_{0.5}Fe_2O_4$ çoklu metal oksit nanoparçacıkları eklenerek dizel motor performansı ve emisyonlara etkilerini incelemiştir. 0–100 ppm aralığında test edilen nanoparçacıklar, özellikle 75 ppm seviyesinde en iyi sonuçları vermiştir. Bu koşulda BTE’de artış, BSFC’de azalma görülmüş; CO, HC ve duman emisyonlarında düşüş sağlanmıştır. Ancak daha yüksek yanma sıcaklıkları nedeniyle NO_x emisyonları artmıştır. Nanoparçacıklar ateşleme gecikmesini yaklaşık 2°C azaltarak daha kontrollü bir yanma sağlamıştır. Çalışma, bu hibrit nanoparçacıkların biyodizel–n-bütanol karışımlarında motor verimini artıran ve

emisyonları iyileştiren etkili bir katkı malzemesi olduğunu göstermektedir (Avcı ve ark., 2025).



3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. İçten Yanmalı Motorlar

İçten yanmalı motorlar, yakıtın kapalı bir silindir içerisinde yanarak genleşmesi sonucu mekanik enerji üretimi sağlayan motorlardır. Bu motorlar, farklı tasarım ve çalışma prensiplerine sahip olup otomotiv, havacılık, denizcilik gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (McDonald, 2012; Stone, 1999).

3.1.1 İçten yanmalı motor türleri

İçten yanmalı motorlar, çalışma prensiplerine ve kullanılan yakıt türlerine bağlı olarak farklı kategorilere ayrılmaktadır:

- **Otto Motorları (Benzinli Motorlar):** Bu motorlar, kıvılcım ateşlemeli olup genellikle benzin ile çalışır ve dört zamanlı veya iki zamanlı olabilir (McDonald, 2012; Stone, 1999).
- **Dizel Motorları:** Sıkıştırma ateşlemeli olup dizel yakıt kullanarak çalışır. Dizel motorlar genellikle daha yüksek verime sahip olup ağır hizmet araçlarında tercih edilir (Hartavi, Göl & Akyüz, 2014).
- **Hibrit Motorlar:** İçten yanmalı motor ile elektrik motorunun bir arada çalıştığı sistemlerdir. Daha düşük emisyon ve yüksek yakıt verimliliği sunar (Samuel & Lucena, 2011).

3.1.2. İçten yanmalı motorların çalışma döngüleri

İçten yanmalı motorlar genellikle dört zamanlı ve iki zamanlı çalışma döngülerine sahiptir:

- **Dört zamanlı motorlar:**
 1. Emme zamanı: Yakıt-hava karışımı silindire alınır.
 2. Sıkıştırma zamanı: Piston yukarı hareket ederek karışımı sıkıştırır.

3. Yanma (Güç) zamanı: Yakıt ateşlenir ve genişleme piston hareketini sağlar.
 4. Egzoz zamanı: Yanmış gazlar dışarı atılır (Schaltz, 2011).
- **İki zamanlı motorlar:** Emme ve egzoz işlemlerini tek bir strok içinde tamamlayan motorlardır. Daha basit ve hafif yapıları sayesinde motosikletlerde yaygın olarak kullanılır (Mohan, 2012).

3.1.3 İçten yanmalı motorların bileşenleri

İçten yanmalı motorlar, çeşitli bileşenlerden oluşmaktadır:

- **Silindir bloğu:** Motorun ana gövdesidir ve silindirleri içerir.
- **Silindir kapağı:** Yanma odasını kapatan ve valflerin monte edildiği bölümdür.
- **Piston:** Yanma sonucu oluşan basıncı mekanik harekete çevirir.
- **Krank mili:** Piston hareketini döner harekete dönüştürür.
- **Eksantrik mili:** Supapların açılma ve kapanma zamanlamasını kontrol eder.
- **Supaplar:** Hava-yakıt karışımının giriş ve çıkışını kontrol eder.
- **Buji:** Otto motorlarında kıvılcım oluşturarak yakıt-hava karışımını ateşleyen bileşendir.
- **Emme supabı:** Hava ve yakıt karışımının silindire girmesini sağlar.
- **Egzoz supabı:** Yanma sonrası oluşan gazların tahliyesini sağlar.
- **Yakıt enjeksiyon sistemi:** Yakıtı yanma odasına enjekte eder (Mohan, 2012).
- **Kam mili:** Supapların açılıp kapanmasını kontrol eder.
- **Biyel kolu:** Piston hareketini krank miline ileten bileşendir.
- **Su gömleği:** Motorun soğutulmasını sağlayan sıvı dolaşım sistemidir.
- **Dengeleme ağırlığı:** Krank milindeki dengesizliği azaltarak motorun titreşimini minimize eder.
- **Yağlama sistemi:** Motor parçalarının sürtünmesini azaltarak aşınmayı önler.
- **Soğutma sistemi:** Motorun aşırı ısınmasını önleyerek çalışma verimliliğini artırır.

3.1.4 İçten yanmalı motorlarda kullanılan yakıt türleri

Motor verimliliği ve çevresel etki açısından farklı yakıt türleri kullanılmaktadır. Bunlar Tablo 35’te verilmiştir.

- **Benzin:** Hafif araçlarda kullanılan en yaygın yakıtlardan biridir (Lipsch ve ark., 2012).
- **Dizel:** Ağır ticari araçlar ve bazı otomobillerde tercih edilir.
- **LPG (Sıvılaştırılmış Petrol Gazı):** Daha düşük emisyon ve maliyet avantajı sunar.
- **Bio-Yakıtlar:** Çevre dostu bir alternatif olarak geliştirilmektedir.
- **CNG (Sıkıştırılmış Doğal Gaz):** Doğalgaz bazlı, düşük karbon salınımına sahip bir alternatiftir.
- **Hidrojen:** Yakıt hücresi motorlar için kullanılabilen sıfır emisyonlu bir enerji kaynağıdır.
- **Etil Alkol (Etanol):** Genellikle benzinle karıştırılarak kullanılan biyoyakıt türüdür.
- **Metanol:** Yüksek oktan değerine sahip bir alkol bazlı yakıttır.
- **Sentetik yakıtlar:** Fosil yakıtların yerine geçebilecek laboratuvar ortamında üretilen yakıtlardır.
-

Tablo 3. 1: Motor türlerine göre verimlilik ve emisyon oranları (Stone, 1999; Lipsch ve ark., 2012; Hartavi, Göl & Akyüz, 2014)

Motor Türü	Yakıt Türü	Verimlilik (%)	CO ₂ Emisyonu (g/km)
Otto Motoru	Benzin	25-30	120-180
Dizel Motor	Dizel	30-40	100-150
Hibrit Motor	Elektrik + Yakıt	40-50	50-100
HCCI Motor	Dizel/Benzin	40-45	80-120
CNG Motor	Sıkıştırılmış Doğal Gaz	30-35	80-140
Hidrojen Yakıtlı Motor	Hidrojen	50-60	0

3.2 Dizel Motorlar

Dizel motorlar, içten yanmalı motor türlerinden biri olup, sıkıştırma ateşlemeli prensibe dayanmaktadır. Bu motorlarda hava, silindir içine alınarak yüksek basınç altında sıkıştırılır ve belirli bir sıcaklığa ulaşıncaya yakıt enjekte edilerek yanma sağlanır

(Bhattacharyya, 2000). Dizel motorlar, yüksek verimlilikleri ve dayanıklılıkları nedeniyle ağır vasıtalar, gemiler, tarım makineleri ve sanayi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.2.1 Dizel motorların çalışma prensipleri

Dizel motorlar genellikle dört zamanlı bir çevrim ile çalışır:

1. **Emme zamanı:** Hava silindire alınır.
2. **Sıkıştırma zamanı:** Hava piston tarafından sıkıştırılır ve sıcaklık artar.
3. **Yanma (Güç) zamanı:** Yakıt enjekte edilir ve yanma gerçekleşir.
4. **Egzoz zamanı:** Yanma sonrası gazlar dışarı atılır (Chen ve ark., 2019).

Bu süreç, Otto motorlarına kıyasla daha yüksek sıkıştırma oranı gerektirir, bu da daha yüksek bir termal verimlilik sunar (Datta & Mandal, 2016).

3.2.2 Dizel motorların performansı ve emisyonları

Dizel motorlarının performansı, sıkıştırma oranı, yakıt enjeksiyon sistemi ve yanma süreci gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Yüksek sıkıştırma oranları, daha yüksek verimlilik sağlarken, yanlış ayarlanmış yakıt enjeksiyonu ve eksik yanma, zararlı emisyonlara neden olabilir (Chen ve ark., 2020). Emisyon kontrol stratejileri arasında:

- Biyodizel ve alkollerle harmanlanmış yakıtlar kullanımı (Çılgin, 2021)
- Ferrosen nanopartikülleri gibi katkı maddeleri kullanımı (Elwardany ve ark., 2020)
- Su ve nanoparçacıkların kullanımıyla NO_x ve CO emisyonlarının azaltılması (Gharehghani ve ark., 2019) gibi yöntemler bulunmaktadır.

3.2.3 Alternatif yakıt kullanımı ve çevresel etkiler

Dizel motorlarının çevresel etkilerini azaltmak amacıyla biyodizel, metanol, etanol ve çeşitli nanopartikül katkıları gibi alternatif yakıtlar üzerine yapılan araştırmalar hız kazanmıştır (Fidan & Alkan, 2014). Özellikle bitkisel bazlı biyoyakıtlar, fosil yakıt kullanımını azaltarak sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır (Devaraj, Nagappan & Yogaraj, 2021).

Bununla birlikte, yüksek sıkıştırma oranlarına sahip dizel motorlarının vuruntu riskini minimize etmek amacıyla farklı yakıt katkılarının etkileri araştırılmaktadır. Örneğin, su ve nanopartiküllerin yakıtta eklenmesiyle NO_x ve CO emisyonlarının düşürülebileceği tespit edilmiştir (Gharehghani ve ark., 2019).

3.3 Benzinli motorlar

Benzinli motorlar, içten yanmalı motorlar sınıfına giren, kıvılcım ateşlemeli sistemlerdir. Genellikle otomobillerde, motosikletlerde ve hafif ticari araçlarda kullanılırlar. Otto çevrimi ile çalışan bu motorlar, verimlilik, performans ve emisyon açısından sürekli olarak geliştirilmektedir (Hartavi & Özgüner, 2012).

3.3.1. Benzinli motorların çalışma prensipleri

Benzinli motorlar, dört zamanlı veya iki zamanlı çevrim ile çalışabilir. En yaygın olanı dört zamanlı çevrimdir:

1. **Emme zamanı:** Hava-yakıt karışımı silindire alınır.
2. **Sıkıştırma zamanı:** Karışım piston tarafından sıkıştırılır.
3. **Yanma (Güç) zamanı:** Buji kıvılcımı ile yanma gerçekleşir.
4. **Egzoz zamanı:** Yanma sonrası gazlar dışarı atılır (Hartavi & Özgüner, 2012).

Otto çevrimi ile çalışan bu motorlar, sıkıştırma oranlarının daha düşük olması sebebiyle dizel motorlardan farklı olarak kıvılcım ateşlemeli sistemler kullanır. Ayrıca, modern motor kontrol sistemleri ile yakıt tüketimi ve emisyonlar optimize edilmektedir (Hartavi, Üstoğlu & İnal, 2013).

3.4. Dizel motorlarda yanma ve emisyonlar

Dizel motorlar, sağlam yapıları ve benzinli motorlara göre daha düşük yanma sıcaklıkları nedeniyle dayanıklılıkları ve uzun ömürleri ile bilinmektedir (Gregory ve ark., 2016). Yağ değişimleri, yakıt filtresi değişimleri ve emisyon kontrol sistemlerinin izlenmesi de dahil olmak üzere düzenli bakım gerektirirler (Gregory ve ark., 2016). Dizel motorlar genellikle benzinli motorlara kıyasla daha yüksek fren termal verimliliğine (BTE) ve daha düşük fren spesifik yakıt tüketimine (BSFC) sahiptir, bu da onları daha verimli bir yakıt haline getirir (Parash ve ark., 2013). Benzinli motorlarla

karşılaştırıldığında daha düşük karbon monoksit (CO) ve hidrokarbon (HC) emisyonları üretirler ancak daha yüksek nitrojen oksit (NO_x) ve partikül madde (PM) emisyonları oluştururlar (Seykens, 2010; Lloyd's Register of Shipping, 2002). Biyodizel ve mikroalg türevi yakıtlar gibi alternatif yakıtların kullanılması PM ve NO_x emisyonlarını azaltabilir, ancak HC ve CO emisyonlarını artırabilir (Resitoglu ve ark., 2015).

Gelişmiş enjeksiyon stratejileri ve yanma optimizasyonu, dizel motorların verimliliğini artırmak ve emisyonlarını azaltmak için büyük önem taşımaktadır. Fenomenolojik sprey penetrasyon modelleri ve çoklu yakıt enjeksiyonu, düşük yanma gürültüsüyle yüksek termal verim elde etmek için geliştirilen teknikler arasındadır (Jung ve ark., 2017; Kass ve ark., 2003).

3.4.1. Dizel yakıt özellikleri

Dizel yakıt spesifikasyonları, motorun düzgün çalışmasını sağlamak ve emisyonları minimize etmek için belirlenmiş standartlara sahiptir. Bu spesifikasyonlar, motor performansını, emisyon kontrolünü ve yakıt sistemi uyumluluğunu sağlamayı amaçlamaktadır (Way ve ark., 2009; Cummins, 2009).

Fiziksel özellikleri

- **Yoğunluk:** Yakıt enjeksiyonunu ve yanmayı etkileyen birim hacim başına kütleyi belirtir (Resitoglu ve ark., 2015).
- **Viskozite:** Yakıt atomizasyonu ve yağlama için hayati önem taşıyan akış direncini tanımlar (Jung ve ark., 2017).
- **Damıtma aralığı:** Yakıtın uçuculuğunu ve yanma özelliklerini etkileyen kaynama noktası aralığını düzenler (Kass ve ark., 2003).
- **Soğuk akış özellikleri:** Yakıtın düşük sıcaklıklarda çalışabilirliğini sağlamak için bulutlanma noktası ve akma noktası gibi parametreleri kapsar (Way ve ark., 2009).

Kimyasal bileşim

- **Setan sayısı:** Yakıtın tutuşma kalitesini ölçer; daha yüksek değerler daha iyi tutuşma ve yanma anlamına gelir (Cummins, 2009).
- **Kükürt içeriği:** Emisyonları kontrol etmek ve korozyonu önlemek için kükürt miktarını sınırlar (Gregory ve ark., 2016).
- **Kayganlık:** Motor bileşenlerinin aşınmasını önlemek için yağlayıcı katkı maddeleri içerir (Seykens, 2010).

3.4.2. Kirleticiler ve safsızlıklar

- **Su ve tortu:** Motorun aşınmasını ve korozyonunu önlemek için belirlenen limitler içinde tutulmalıdır (Parash ve ark., 2013).
- **Karbon kalıntısı:** Yanma sonrası tortuların motor içi birikimini sınırlamak için belirlenen standartlardır (Jordal, 2012).

3.4.3 Dizel motorlarda kullanılan alternatif yakıtlar

Dizel motorların sürdürülebilirliğini artırmak amacıyla birçok alternatif yakıt geliştirilmiştir. Bunlar arasında biyodizel, alkoller, sentetik yakıtlar ve emülsifiye biyoyakıtlar bulunmaktadır (Way ve ark., 2009).

Biyodizel, yenilenebilir yağ kaynaklarından transesterifikasyon yöntemiyle elde edilen, dizel motorlarında kullanılabilen çevre dostu bir yakıttır. Bu yakıt, geleneksel dizel yakıtına kıyasla daha düşük karbon monoksit (CO), hidrokarbon (HC) ve partikül madde (PM) emisyonları sağlamaktadır (Çanakcı & Gerpen, 2001; Crabbe ve ark., 2001). Biyodizelin en yaygın hammaddeleri arasında soya fasulyesi yağı, atık kızartma yağları ve hayvansal yağlar bulunmaktadır (Alcantara ve ark., 2000; Dorado ve ark., 2003).

Bitkisel veya hayvansal yağlardan üretilen biyodizel, dizel motorlarda düşük karbon ayak izi ve biyolojik yenilenebilirlik avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Ancak NO_x emisyonlarını artırma potansiyeli taşımaktadır (Cummins, 2009).

Etanol ve butanol gibi alkoller, dizel motorlarda emisyon azaltımı sağlamak amacıyla katkı maddesi olarak kullanılmaktadır (Gregory ve ark., 2016).

Etanol-dizel karışımları, karbon bazlı emisyonları azaltırken, yanma verimliliğini artırabilir (Fukuda, Kondo & Noda, 2001). Ancak, alkol katkılarının motorun yakıt sistemi ve yanma karakteristikleri üzerindeki uzun vadeli etkileri konusunda daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

Fischer-Tropsch süreciyle üretilen sentetik yakıtlar, düşük kükürt içeriği ve temiz yanma özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir (Parash ve ark., 2013). Sentetik dizel yakıtlar, doğalgaz veya biyokütlenin gazlaştırılması ile üretilmekte olup, geleneksel dizel yakıtlara göre daha düşük kükürt ve aromatik bileşen içeriğine sahiptir.

Sentetik yakıtlar, gelişmiş yanma özellikleri sayesinde NO_x ve PM emisyonlarını azaltmada önemli bir potansiyel taşımaktadır (Beggs, 2001).

3.4.4 Dizel motorlarda kullanılan alternatif yakıt katkıları

Alternatif yakıt katkı maddeleri, yakıt özelliklerini iyileştirmek, motor performansını artırmak ve emisyonları azaltmak amacıyla kullanılır (Marek ve ark., 2016).

3.4.4.1 Oksijenli katkı Maddeleri

Oksijenli katkılar, yakıtın daha verimli yanmasını sağlayarak karbon monoksit ve partikül madde emisyonlarını azaltmaktadır (Crabbe ve ark., 2001). Dietil eter gibi oksijenli bileşenler, dizel yakıtına eklenerek daha düşük yanma sıcaklıklarında daha verimli bir enerji dönüşümü sağlamaktadır (Alcantara ve ark., 2000).

Dietil eter gibi oksijenli bileşikler, yanma verimliliğini artırarak karbon bazlı emisyonları düşürmektedir (Marek ve ark., 2016).

3.4.4.2 Nanopartikül katkı maddeleri

Silikon dioksit (SiO₂) ve titanyum dioksit (TiO₂) gibi nanopartiküller, yakıt atomizasyonunu ve yanma etkinliğini artırarak NO_x ve PM emisyonlarını azaltabilir (Way ve ark., 2009). Grafen oksit (GO) ve indirgenmiş grafen oksit (rGO), dizel motorlarında yakıt katkı maddesi olarak kullanılmaya uygun olan nanomalzemeler arasındadır (Karabulut, Buyruk & Kılınç, 2018).

Grafen, karbon atomlarının tek tabaka halinde düzenlendiği iki boyutlu bir malzeme olup, olağanüstü mekanik, termal ve elektriksel özelliklere sahiptir. Yüksek termal iletkenliği, büyük yüzey alanı ve mükemmel kimyasal kararlılığı nedeniyle nanoteknoloji, enerji depolama, biyomedikal uygulamalar ve malzeme bilimi gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Dörtoğul, 2018). Son yıllarda, grafen bazlı nanomalzemelerin yakıt katkı maddesi olarak kullanımı ve özellikle dizel motorlarında performansı artırma potansiyeli üzerine yapılan araştırmalar hız kazanmıştır (Tiyek ve ark., 2016).

3.4.4.3 Dizel motorlarında yakıt nanokatki maddesi olarak grafen

Dizel motorlarının verimliliğini artırmak ve emisyonları düşürmek için nanoteknolojiye dayalı yakıt katkı maddeleri giderek daha fazla araştırılmaktadır. Grafen, dizel yakıtlarına düşük konsantrasyonlarda eklendiğinde yanma verimliliğini artırabilir ve motor performansını iyileştirebilir (Tiyek ve ark., 2016). Grafen bazlı nano yakıt katkılarının sağladığı avantajlar şunlardır:

- **Yanma verimliliğini artırma:** Grafen nanoparçacıkları, yakıtın yüzey gerilimini azaltarak daha iyi atomizasyon sağlar. Bu sayede yakıt daha homojen dağılır ve daha verimli bir yanma gerçekleşir (Dörtoğul, 2018).
- **Termal iletkenliği artırma:** Grafenin yüksek termal iletkenliği, motor silindirlerinde sıcaklık dağılımını iyileştirerek yanma sürecini optimize eder (Karabulut, Buyruk & Kılınç, 2018).
- **NO_x ve PM emisyonlarını azaltma:** Yapılan çalışmalar, grafen içeren yakıtların partikül madde (PM) ve azot oksit (NO_x) emisyonlarını azaltabileceğini göstermektedir (Tiyek ve ark., 2016).
- **Yakıt tüketimini azaltma:** Grafen katkılı yakıtlar, motorun daha düşük yakıt tüketimi ile aynı gücü üretmesini sağlayarak yakıt ekonomisini artırabilir (Dörtoğul, 2018).

3.4.4.4 Grafenin özellikleri ve sentez yöntemleri

Grafen, karbon atomlarının sp² hibritleşmesi ile altıgen petek yapısında düzenlendiği, yüksek yüzey alanına ve olağanüstü mekanik özelliklere sahip bir malzemedir. Grafenin sentezi için farklı yöntemler kullanılmaktadır:

1. **Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) yöntemi:** Yüksek saflıkta ve büyük yüzey alanına sahip grafen tabakalarının üretimi için kullanılır.
2. **Hummers yöntemi:** Grafit oksidin oksidatif ortamda grafen okside (GO) dönüştürülmesi esasına dayanır (Tiyek ve ark., 2016).
3. **Termal ve kimyasal indirgeme:** Grafen oksidin kimyasal ajanlar veya yüksek sıcaklık ile indirgenerek saf grafene dönüştürülmesini sağlar.

3.4.4.5 Dizel motorlarında grafen kullanımına yönelik deneysel alışmalar

Dizel motorlarında grafen kullanımına yönelik yapılan deneysel çalışmalar, grafenin motor performansı ve emisyonlar üzerindeki etkilerini incelemektedir. Yapılan bazı deneylerde, grafen oksit nanoparçacıklarının taşıma akışkanlarına eklenmesiyle taşınım ısı transferi ve basınç düşüşü gibi parametreler üzerinde olumlu etkiler sağlanmışır (Karabulut, Buyruk & Kılınç, 2018).

Deneysel çalışmaların öne çıkan sonuçları şunlardır:

- Grafen bazlı nano yakıtlar, geleneksel dizel yakıtlara kıyasla daha düşük karbon monoksit (CO) ve hidrokarbon (HC) emisyonları üretmektedir (Dörtoğul, 2018).
- Motor içi termal verimliliğinin artması nedeniyle yakıtın daha iyi yakılması sağlanmış ve NO_x emisyonlarında azalma gözlemlenmiştir (Tiyek ve ark., 2016).
- Grafen oksit katkılı yakıtlar, yanma odasında daha iyi karışım oluşturduğu için motor içi basıncı optimize ederek performansı artırmaktadır (Dörtoğul, 2018).

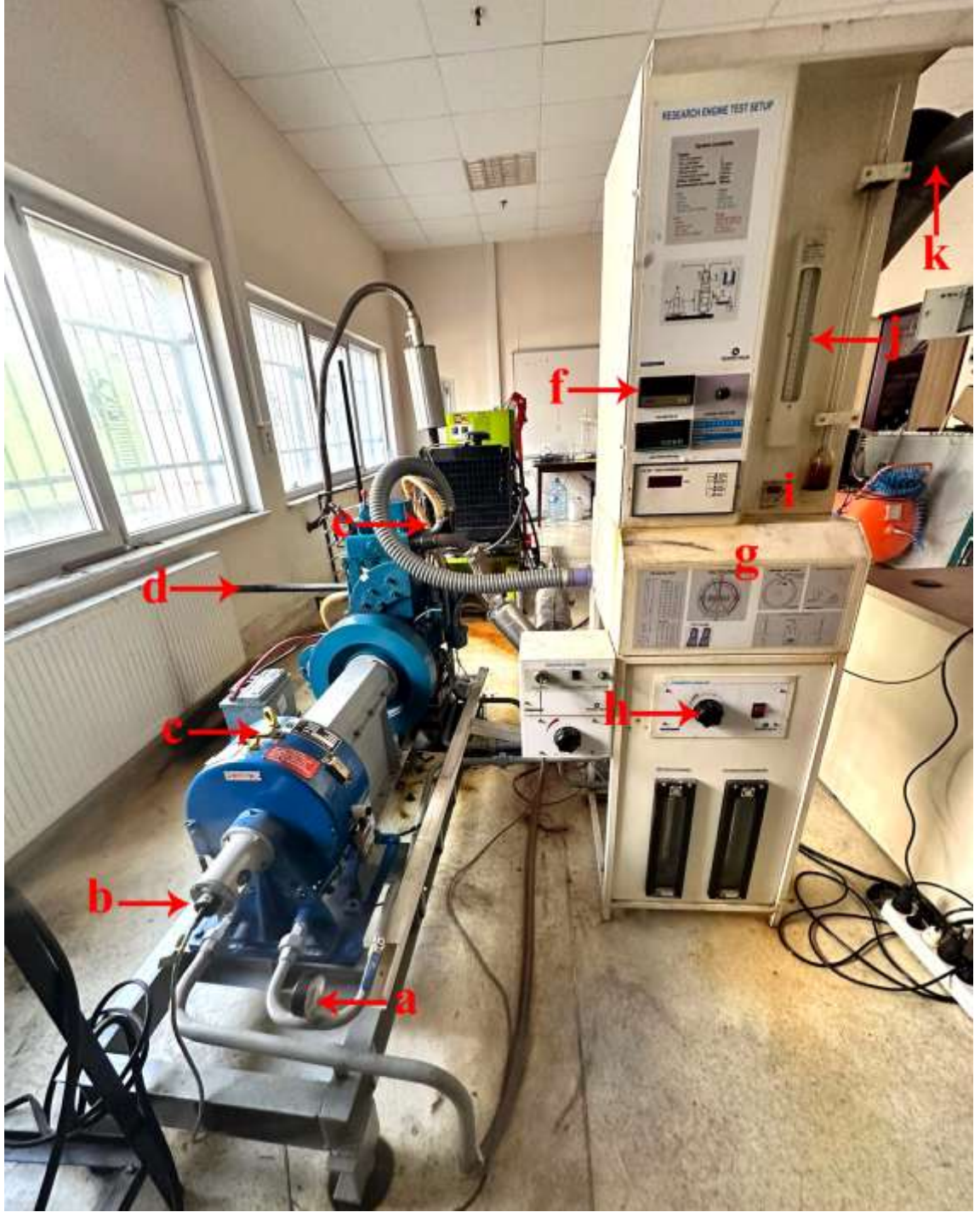
4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada gerçekleştirilen deneyler, Batman Üniversitesi Motor Test ve Deney Atölyesi bünyesinde bulunan tek silindirli, 4 zamanlı, sabit hızlı, su soğutmalı dizel motor üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında, kullanılan tüm ölçüm cihazları kalibre edilerek ölçüm doğruluğu artırılmıştır. Bu bölümde, dizel motorlarda alternatif yakıt katkı maddesi olarak GO kullanılarak yapılan deneysel çalışmaların ayrıntıları açıklanmaktadır. Deneysel sistem, motor test düzenekleri, emisyon ölçüm cihazı, yakıt karışım hazırlama süreci, ölçülen motor performans parametreleri ve egzoz emisyon parametreleri ele alınmıştır.

4.1. Motor Test Düzeneği ve Ekipmanları

Deneyler, tek silindirli, dört zamanlı, sabit hızlı ve su soğutmalı bir araştırma dizel motoru kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Motor, farklı yüklerde test edilerek performans ve egzoz emisyon değerleri belirlenmiştir. Kullanılan motor, içten yanmalı motorların yanma karakteristiklerini analiz etmek için laboratuvar ortamında yaygın olarak kullanılan bir test motorudur. Deney düzeneği, motor performansı ve emisyon değerlerini ölçmek amacıyla çeşitli ekipmanlarla donatılmıştır.

Bu tez çalışmasında kullanılan motor test düzeneği, daha önce aynı laboratuvar altyapısında alternatif yakıtlar, nano katkı maddeleri ve atık kökenli yakıtlar kullanılarak yürütülen birçok deneysel çalışmada da kullanılmıştır. Aynı motor, aynı dinamometre ve aynı ölçüm cihazları ile gerçekleştirilen bu çalışmalar, deneysel sonuçların karşılaştırılabilirliğini artırmakta ve yakıt kaynaklı etkilerin daha güvenilir bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu kapsamda, deneysel çalışmalarda kullanılan test düzeneği, literatürde doğrulanmış ve tekrarlanabilirliği kanıtlanmış bir altyapı sunmaktadır. Şekil 4.1'de, deney düzeneğini oluşturan bileşenler şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4. 1:Motor test düzeneğinin deney ortamındaki görüntüsü.

(a) **Basınç manometresi:** Yakıt veya hava basıncını ölçmek için kullanılan bir ölçüm cihazıdır. Test sırasında motorun doğru yakıt-hava karışımı ile çalıştığını doğrulamak için önemlidir.

(b) **Krank açısı sensörü:** Motorun krank mili pozisyonunu ölçerek motorun dönüş açısını belirler. Yanma zamanlamasının doğru hesaplanması için kritik bir bileşendir.

(c) Dinamometre: Motorun ürettiği gücü ve torku ölçerek performans testleri yapılmasını sağlar. Alternatif yakıt katkılarının motor verimliliğine etkisini değerlendirmek için kullanılır.

(d) Egzoz çıkışı: Motorun yanma sonucu ürettiği egzoz gazlarını dışarı atan borudur. Egzoz gazı analizinde kullanılır.

(f) Dijital voltmetre: Motorun elektriksel parametrelerini ölçer. Alternatif yakıt kullanımı sırasında ateşleme ve elektrik sisteminin nasıl etkilendiğini değerlendirmek için kullanılır.

(g) Piezo güç ünitesi: Basınç sensörlerinden gelen sinyalleri işleyerek motor içi yanma olaylarını analiz eder. Yanma odasındaki basınç değişimlerini hassas bir şekilde ölçmeye yardımcı olur.

(i) Yakıt vanası: Test sırasında yakıt akışını kontrol etmek için kullanılır. Farklı yakıt türleri ve katkı maddeleri arasındaki geçişi sağlamak için kritik bir bileşendir.

(h) Yük indikatörü: Motorun üzerindeki yük durumunu gösterir. Farklı motor yüklerinde performans ve emisyon analizlerinin yapılmasına yardımcı olur.

(j) Büret (yakıt ölçüm ünitesi): Yakıt tüketimini hassas bir şekilde ölçmek için kullanılır. Alternatif yakıt katkılarının tüketim üzerindeki etkisini belirlemek için kullanılır.

(k) Yakıt deposu: Test için gerekli yakıtın depolandığı bölümdür. Büret ile bağlantılı olarak yakıt akışını düzenler.

Deney düzeneğinde kullanılan motorun temel teknik özellikleri ise Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4. 1: Deney motorunun teknik özellikleri

Özellik	Değer
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

Deney düzeneğinde kullanılan ekipmanlar aşağıda detaylandırılmıştır. Bunlar sırasıyla, Motor Test Sistemi, Dinamometre, Yakıt Tüketim Ölçüm Cihazı, Egzoz Gazı Sıcaklık Ölçüm Sensörleri, Dijital Veri Kayıt Sistemidir. Motor performans parametrelerini kaydetmek amacıyla kullanılmıştır. Bu sistem, motorun güç çıkışı, yakıt tüketimi ve egzoz sıcaklıkları gibi parametreleri ölçmek için bir yazılım destekli veri toplama sistemi içermektedir. Motor yüklerini belirlemek ve motorun çıkış gücünü ölçmek için kullanılmıştır. Dinamometre, motor tarafından üretilen torku ve devri ölçerek güç hesaplamalarına olanak tanımaktadır. Yakıt tüketiminin doğru bir şekilde belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Deneylerde farklı yakıt katkı oranlarının motor performansına etkisini değerlendirmek için bu ölçümler kritik öneme sahiptir. Yanma odasından çıkan egzoz gazlarının sıcaklığını belirlemek amacıyla motor egzoz borusu üzerine yerleştirilmiştir. Egzoz gazı sıcaklıkları, yanma sürecinin verimliliği ve motor performans değerlendirmeleri açısından önemlidir. Motor test parametrelerini gerçek zamanlı olarak izleyerek veri kaydı yapılmasını sağlamaktadır.

Motor test düzeneği, deneysel çalışmalarda yüksek hassasiyetle ölçüm yapmayı sağlamak amacıyla kalibre edilmiş sensörlerle donatılmıştır. Ölçülen parametreler, deneysel verilerin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak için belirli aralıklarla kontrol edilmiş ve analiz edilmiştir.

Motor, dinamometre sistemi ile bağlantılı olup, farklı yüklerde motor performansını analiz etmek için kullanılmıştır.

Bu düzenek yardımıyla, farklı yakıt katkı maddeleri içeren yakıtlarla motorun performans parametreleri belirlenmiş ve egzoz emisyonları analiz edilmiştir. Motor test düzeneği üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen veriler, sonraki bölümlerde analiz edilerek yorumlanacaktır. Motorun seçilmesinde, tek silindirli yapısı sayesinde yanma sürecinin ayrıntılı olarak izlenebilmesi ve farklı yakıt katkılarının etkilerinin net bir şekilde değerlendirilebilmesi etkili olmuştur.

4.1.1. Yanma ve performans parametreleri

Bu çalışmada motor performansı ve yanma karakteristiklerinin değerlendirilmesi amacıyla; motor torku, efektif güç, özgül yakıt tüketimi ve termal verimlilik gibi temel performans parametreleri ile silindir içi basınç, net ısı salınımı, basınç artış oranı ve kümülatif ısı salınımı gibi yanma parametreleri birlikte incelenmiştir. Bu parametrelerin birlikte değerlendirilmesi, yakıt katkı maddelerinin motor performansı ve yanma süreci üzerindeki etkilerinin bütüncül bir bakış açısıyla analiz edilmesine olanak sağlamaktadır.

Deney motorunda ölçülebilen yanma ve performans parametreleri Tablo 4.2’de verilmiştir. Bu parametreler, yanma sürecinin fiziksel ve termodinamik koşullarını belirlemektedir. Özgül gaz sabiti ve hava yoğunluğu, motorun standart atmosferik koşullarda çalıştırıldığını gösterirken, adyabatik ve polytropik indeks değerleri, yanma odasındaki gazların sıkıştırma ve genişleme davranışlarını anlamamıza yardımcı olmaktadır. Silindir basınç referansı ve üst ölü nokta referansı, yanma zamanlamasının hesaplanmasında kritik rol oynamaktadır. Silindir içi basınç verileri, her test koşulu için belirli sayıda çevrim boyunca kaydedilmiş ve çevrim ortalaması alınarak değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, ölçüm kaynaklı rastlantısal hataların azaltılmasına ve elde edilen yanma parametrelerinin güvenilirliğinin artırılmasına katkı sağlamaktadır.

Tablo 4. 2:Yanma performans parametreleri

Parametre	Değer
Özgül Gaz Sabiti (kJ/kgK)	1.00
Hava Yoğunluğu (kg/m ³)	1.00
Adyabatik İndeks	1.41
Polytropik İndeks	1.28
Silindir Basınç Referansı	4
Yumuşatma (Smoothing)	2
Üst Ölü Nokta Referansı (TDC)	0

4.2. Emisyon Cihazının Özellikleri

Bu çalışmada dizel motor egzoz emisyonlarının belirlenmesi amacıyla, CO, HC, NO_x ve duman koyuluğu (is) emisyonlarını ölçebilen çok bileşenli bir egzoz gazı analiz cihazı kullanılmıştır. Kullanılan emisyon ölçüm sistemi, içten yanmalı motor uygulamaları için yaygın olarak tercih edilen ve literatürde doğruluğu kabul edilmiş bir

ölçüm altyapısı sunmaktadır. Ölçümler, cihaz üreticisinin önerdiği çalışma prosedürleri ve kalibrasyon koşulları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Emisyon ölçüm cihazı olarak Capelec C800G Gaz Analizörü ve SmokeMeter kullanılmıştır. Bu cihaz, karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x) ve partikül madde emisyonlarını analiz etmek üzere tasarlanmıştır. Capelec C800G, optik lazer sensör teknolojisi kullanarak egzoz gazlarının analizini gerçekleştirir ve yüksek hassasiyetli infrared (NDIR) sensörleri sayesinde gaz bileşenlerinin miktarını kesin olarak belirler. Cihazın genel görüntüsü Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4. 2:Kullanılan emisyon ölçüm cihazı

Emisyon cihazı, araç ve endüstriyel motor testlerinde yaygın olarak kullanılan bir analiz çözümü olup, test süresince belirli zaman aralıklarında numune alımı ve anlık veri kaydı yapabilme özelliğine sahiptir. Cihaz, ISO 8178 uluslararası emisyon standardına uygun olarak testlerin doğruluğunu sağlamaktadır. Kullanılan emisyon ölçüm cihazının teknik özellikleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4. 3:Emisyon ölçüm cihazının teknik özellikleri

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

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_x ve duman koyuluğu (is) miktarları belirlenmiştir. Ölçümler, motorun farklı yük koşullarında çalıştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Deneyler sırasında elde edilen emisyon verileri, yakıt katkı maddesinin farklı oranları ile karşılaştırılarak motorun çevresel performansı hakkında analiz yapılmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen emisyon ölçümleri, deneysel sonuçların tekrarlanabilir ve karşılaştırılabilir olmasını sağlayacak şekilde planlanmıştır.

4.3 Deneyde Kullanılan GO Katkısı

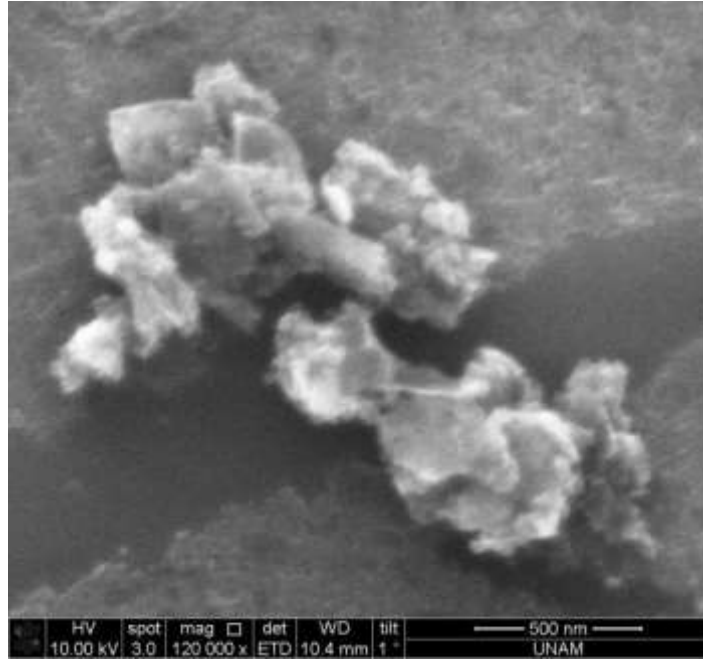
Bu çalışmada, dizel yakıtı nano katkı maddesi olarak grafen ilavesiyle oluşturulan yakıt karışımları, homojenlik ve kararlılık esas alınarak hazırlanmıştır. Grafen nano katkı maddesi, dizel yakıt içerisine farklı oranlarda (0, 25, 50, 75 ve 100 ppm) ilave edilerek deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Katkı oranlarının belirlenmesinde, literatürde nano katkılı dizel yakıt çalışmalarında yaygın olarak tercih

edilen ppm mertebesindeki oranlar dikkate alınmıştır. Yakıt karışımlarının homojenliğinin sağlanması amacıyla, grafen katkılı yakıtlar belirli süre boyunca ultrasonik karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Ultrasonik karıştırma yöntemi, nano partiküllerin yakıt içerisinde daha uniform bir şekilde dağılmasını sağlayarak aglomerasyon eğilimini azaltmak amacıyla tercih edilmiştir.

Deneysel çalışmada kullanılan grafen oksit (GO) katkı maddesi, Nano-Grafi Nanoteknoloji AŞ'den temin edilmiştir. Grafen nano maddesi, düzlemsel bir formda bulunan, kısa, plaka şeklindeki grafen tabakalarından oluşan nanopartiküllerdir. Şekil 4.3-4.4'te ise Grafen nano partikül maddesinin görseli ve TEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4. 3:Grafen katlı maddesi



Şekil 4. 4:Grafen katkı maddesinin Tem görüntüsü

TEM görüntülerinde grafen oksit (GO) nanopartiküllerinin tabakalı (lameller) ve düzensiz morfolojiye sahip olduğu görülmektedir. İnce ve yarı saydam yapılar, GO'nun birkaç katmanlı grafen levhalarından oluştuğunu göstermektedir. Parçacıkların yer yer aglomere olduğu, ancak buna rağmen tabakalı yapının korunduğu dikkat çekmektedir. Yaklaşık yüzlerce nanometre ölçeğinde gözlenen bu morfoloji, grafen oksidin yüksek özgül yüzey alanına ve yakıt katkı maddesi olarak kullanılmaya uygun bir yapısal karakteristiğe sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Grafen, saf grafitik bileşimleri sayesinde mükemmel elektrik ve ısı iletkenleridir. Grafen, ısı ve elektrik iletkenliğini ve kararlılığını artırmaya ve bariyer özelliklerini iyileştirmeye yardımcı olur. GO katkı maddesi teknik özellikleri Tablo 4.4'te verilmiştir. Hazırlanan yakıt karışımları, deneyler süresince görsel olarak gözlemlenmiş ve kısa süreli deney periyotları boyunca belirgin bir çökelme veya faz ayrışması gözlemlenmemiştir.

Tablo 4. 4:Kullanılan GO katkı maddesinin teknik özellikleri

Fiziksel Özellikler	Açıklama
Safılık	%99,8
Ortalama Çap	4,5 (µm)
Yüzey Alanı	(m ² /gm) ≥ 420
Karbon İçeriği	(%C) 60 - 80
Oksijen İçeriği	(%O) 10 - 30
Hidrojen İçeriği	(%H) ≤ 2,00
Azot İçeriği	(%N) ≤ 0,50
Renk	Siyah
Parçacık Boyutu	5 – 40 (µm)

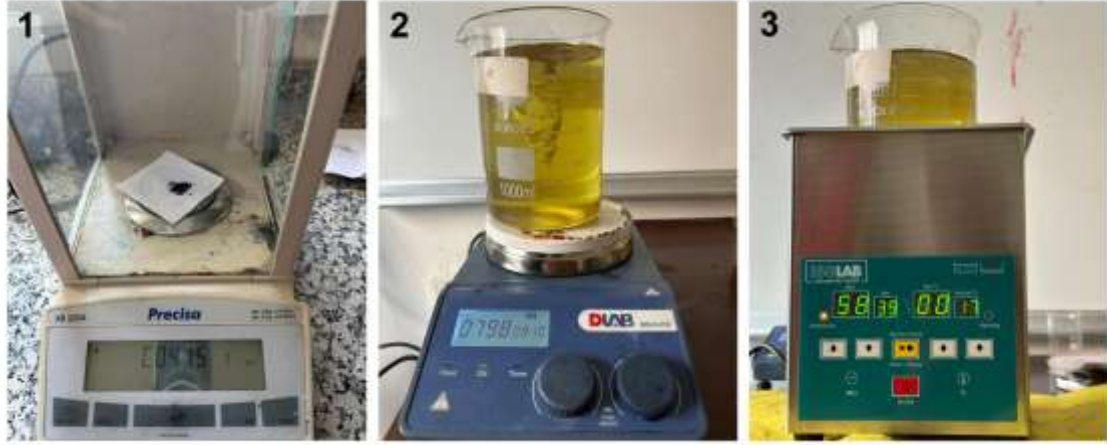
4.4. Yakıt Karışımlarının Hazırlanması

Deneyisel çalışmada kullanılan yakıt numuneleri, Batman Üniversitesi Motor Test ve Deney Atölyesi'nde hazırlanmıştır. Deney kapsamında, yakıt karışımlarının egzoz emisyonları, yanma karakteristikleri ve motor performans parametrelerinin değerlendirilmesinde Eurodizel (D) yakıtı referans (baz) test yakıtı olarak esas alınmıştır. Deneylerde kullanılan yakıt karışımları grafen nanoparçacıklarının belirli ppm seviyelerinde dizel yakıtı eklenmesiyle elde edilmiştir. Testlerde kullanılan yakıt türleri ve katkı oranları Tablo 4.5'da verilmiştir:

Tablo 4. 5: Emisyon analizinde kullanılan yakıt karışımları ve katkı oranları

Yakıt Türü	Grafen Katkı Oranı (ppm)	Test Süresi (dk)
Dizel	0	60
Dizel + Grafen (DGO25)	25	60
Dizel + Grafen (DGO50)	50	60
Dizel + Grafen (DGO75)	75	60
Dizel + Grafen (DGO100)	100	60

Şekil 4.5'te ise yakıt ve GO maddesinin karıştırılmasında kullanılan hassas terazi (1), Manyetik karıştırıcı (2), Ultrasonik karıştırıcı (3) görselleri verilmiştir. Yakıt karışımlarının homojen bir şekilde dağıtılması için ISOLAB ultrasonik karıştırıcı ve Dlab MS-H-ProT manyetik karıştırıcı kullanılmıştır.



Şekil 4. 5:Hassas terazi (1), Manyetik karıştırıcı (2), Ultrasonik karıştırıcı (banyo) (3)

Ultrasonik karıştırıcı, yüksek frekanslı ses dalgaları kullanarak grafen parçacıklarının yakıt içerisinde homojen olarak dağılmasını sağlarken, manyetik karıştırıcı, sabit sıcaklık ve belirli bir hızda mekanik karıştırma işlemiyle grafenin dizel yakıt içinde çözünmesini desteklemiştir.

Hazırlanan yakıt örnekleri 25 ppm, 50 ppm, 75 ppm ve 100 ppm grafen katkısı içermektedir ve karşılaştırma amacıyla saf dizel yakıt örneği de test edilmiştir. Karışımların hazırlanma süreci, oda sıcaklığında ve 60 dakika boyunca devam eden manyetik karıştırma işlemi sonrasında ultrasonik karıştırma işlemiyle tamamlanmıştır. Yapılan işlemler ve Tablo 4.6'de detaylı gösterilmiştir.

Tablo 4. 6:Yakıt karışım örnekleri

Yakıt Türü	Grafen Katkı Oranı (ppm)	Karıştırma Süresi (dk)	Karıştırma Sıcaklığı (°C)
Dizel	0	-	-
Dizel + Grafen (DGO25)	25	60	27
Dizel + Grafen (DGO50)	50	60	27
Dizel + Grafen (DGO75)	75	60	27
Dizel + Grafen (DGO100)	100	60	27

Grafen, ultra ince ve yüksek yüzey alanına sahip bir karbon nanomalzeme olup, yakıt içerisinde eklendiğinde yanma verimliliğini artırma, karbon birikimini azaltma ve motor performansını optimize etme potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, her bir karışımın yakıt tüketimi, egzoz gazı emisyonları ve motor performansı üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

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. Dizel yakıtı eklenen Grafen katkı maddeli deney yakıtları Şekil 4.6’te görseli sunulmuştur.



Şekil 4. 6:Dizel yakıtı eklenen grafen katkı maddeli deney yakıtlarının görüntüsü

Şekil 4.6'dan da görüldüğü üzere grafen nano madde miktarındaki artışa paralel olarak gözlenen bu renk değişimi, grafen nanopartiküllerinin yakıt fazı içerisinde başarıyla disperse edildiğine işaret etmektedir. Numunelerde gözle görülür bir çökme veya faz ayrışmasının bulunmaması, uygulanan karıştırma yöntemlerinin stabilite açısından etkili olduğunu göstermektedir. Bu durum, grafen katkılı dizel yakıtların motor deneylerinde güvenilir biçimde kullanılabileceğini ve katkı oranına bağlı olarak yanma, emisyon ve performans karakteristiklerinde meydana gelecek değişimlerin sağlıklı bir şekilde incelenebileceğini ortaya koymaktadır.

Deney sürecinde hazırlanan yakıt karışımları, motorun yanma karakteristiği üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla belirlenen yük seviyelerinde test edilmiştir. Bu testler sonucunda elde edilen veriler, bir sonraki bölümde detaylı olarak analiz edilecektir.

Bu çalışmada, nano-partikül katkı maddesi miktarı 25, 50, 75 ve 100 ppm aralığında belirlenmiştir. Eurodizel yakıtı ilave edilen nano partiküller, literatürde genellikle çok düşük oranlarda, ppm (milyonda bir parça) seviyesinde kullanılmaktadır. Önceki araştırmalarda, nano partikül katkı oranının 10–100 ppm aralığında tutulmasının uygun olduğunu ortaya koymaktadır. Bu aralık, partiküllerin yanma sürecine olumlu katkılar sağlamasına olanak tanırken, daha yüksek oranlarda kullanım sonucu ortaya çıkabilecek olumsuz etkilerin de sınırlandırılmasını mümkün kılmaktadır.

Nano partiküllerin optimum düzeyde kullanımı, yanma karakteristiklerini iyileştirerek motor performansının artırılmasına, emisyonların azaltılmasına ve yakıt verimliliğinin yükseltilmesine katkı sağlayabilmektedir. Bununla birlikte, belirlenen optimum aralığın aşılması durumunda çeşitli olumsuz etkiler meydana gelebilmektedir. Örneğin, aşırı nano partikül kullanımı yakıt filtresinin tıkanmasına yol açarak yakıt akışında düzensizliklere neden olabilmektedir. Ayrıca, nano partikül yoğunluğundaki artış yakıtın kinematik viskozitesini yükseltebilmekte ve bu durum, yakıtın enjektörlerden uygun şekilde püskürtülmesini zorlaştırabilmektedir. Sonuç olarak, yanma odasında tam ve verimli bir yanma sağlanamamakta ve motor performansında düşüş gözlenebilmektedir. Bu nedenle, nano partiküllerin önerilen oranlarda ve kontrollü bir biçimde kullanılması, motor sistemlerinin uzun ömürlü olması ve optimum çalışma koşullarının sürdürülebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Deneylerde kullanılan yakıtların fiziksel özellikleri Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4. 7:Yakıtların fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	Dizel (Baz)	DGO25 (25 ppm)	DGO50 (50 ppm)	DGO75 (75 ppm)	DGO100 (100 ppm)
Yoğunluk @15°C (kg/m ³)	830	827 (Azalış: %0.36)	825 (Azalış: %0.60)	823 (Azalış: %0.84)	824 (Azalış: %0.72)
Kinematik Viskozite @40°C (mm ² /s)	6.00	5.90 (Azalış: %1.67)	5.88 (Azalış: %2.00)	5.872 (Azalış: %2.13)	5.884 (Azalış: %1.93)
Parlama Noktası (°C)	52	50 (Azalış: %3.85)	49 (Azalış: %5.77)	48 (Azalış: %7.69)	47 (Azalış: %9.62)
Setan İndeksi	51	50.5 (Azalış: %0.98)	50 (Azalış: %1.96)	49.5 (Azalış: %2.94)	49 (Azalış: %3.92)
Isıl Değer- Net (kJ/kg)	42500	42630 (Artış: %0.31)	42950 (Artış: %1.06)	43100 (Artış: %1.41)	42930 (Artış: %1.01)

Grafen oksit (GO) katkılı dizel yakıtların fiziksel özelliklerinin, referans dizel yakıtı göre değişimi tablo 4.7’de gösterilmiştir. GO katkı oranının artmasıyla birlikte, yakıtın yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinde sınırlı ve düzenli bir azalış gözlenmiştir. Bu durum, GO düşük ppm seviyelerinde yakıtın akışkanlık özelliklerini iyileştirici bir etki oluşturduğunu göstermektedir.

Parlama noktası ve setan indeksindeki azalışlar, GO katkısının yanma başlangıcını kolaylaştırdığını ve tutuşma karakteristiklerini değiştirdiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, söz konusu düşüşlerin görece sınırlı seviyelerde kalması, motor çalışması açısından olumsuz bir durum oluşturmadığını göstermektedir.

Net ısı değerinde özellikle orta katkı oranlarında (50–75 ppm) belirgin bir artış gözlenmiş olup, bu durum grafen oksidin yüksek yüzey alanı ve katalitik özellikleri sayesinde yanma sürecine enerji açısından olumlu katkı sağladığını düşündürmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde ise, GO katkısının dizel yakıtın fiziksel özelliklerini önemli ölçüde değiştirmeden, yanma ve enerji içeriği açısından iyileştirici bir etkisi olduğu yorumlanabilir.

4.5 Motor Performans Parametreleri ve Test Şartları

Deneysel çalışmalar, motorun kararlı çalışma koşullarında performans ve emisyon davranışının doğru bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla sabit motor devrinde gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda motor devri, tek silindirli dizel motorlar için yaygın olarak referans alınan 1500 dev/dak değeri olarak seçilmiştir. Sabit devir koşulu, farklı yakıt katkı oranlarının motor performansı ve emisyonları üzerindeki etkilerinin karşılaştırılabilir bir biçimde ortaya konulmasına olanak sağlamaktadır.

Deneylerde kullanılan sistemde motor performansı, farklı yükler ve katkı oranları altında analiz edilmiştir. Motor performans ölçümleri, IEngineSoft_9.0 yazılımı kullanılarak kaydedilmiş ve analiz edilmiştir. IEngineSoft_9.0, motor yanma analizlerini ve veri kaydını sağlarken, Microsoft Excell ve Minitab istatistiksel analizler için kullanılmıştır. Motor performansını değerlendirmek için aşağıdaki parametreler analiz edilmiştir:

Test koşullarında kullanılan ölçüm parametreleri Tablo 4.8’de belirtilmiştir:

Tablo 4. 8: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 ³)	830
Yakıt Alt Isıl Değeri (kJ/kg)	42500

Deneyler boyunca motor gücü, tork, yakıt tüketimi ve silindir basıncı değerleri belirlenmiştir. Ölçümler, motorun belirli yük koşullarında çalıştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Basınç ve yanma süreci analizi yapılarak, farklı grafen katkı oranlarının motorun yanma verimliliği üzerindeki etkisi grafikler yardımıyla değerlendirilmiştir. Tüm deneyler aynı test prosedürü izlenerek gerçekleştirilmiş ve ölçümler, motorun kararlı çalışma koşullarına ulaşmasının ardından alınmıştır. Böylece farklı yakıt karışımları arasında karşılaştırılabilir ve tekrarlanabilir sonuçlar elde edilmesi hedeflenmiştir.

4.5.1 Test koşulları

Deneyisel çalışmalar boyunca motor testleri, laboratuvar ortamında ve kontrol edilebilir koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında motor soğutma suyu sıcaklığı, yağlama yağı sıcaklığı ve emme havası koşulları mümkün olduğunca sabit tutulmuş; her bir test noktasında motorun kararlı çalışma durumuna ulaşması beklenmiştir. Bu yaklaşım, çevresel ve işletme koşullarından kaynaklanabilecek sapmaların deney sonuçları üzerindeki etkisini en aza indirmeyi amaçlamaktadır.

Deneylerde kullanılan dizel motor, farklı yükler (0.3 OEB, 1 OEB, 2 OEB, 3 OEB) ve farklı grafen katkı oranları (0 ppm, 25 ppm, 50 ppm, 75 ppm, 100 ppm) ile test edilmiştir. Motorun performans parametreleri, belirli bir süre boyunca sabit yük ve hız koşullarında ölçülerek kaydedilmiştir. Deneylerde kullanılan farklı yük seviyeleri, motorun düşük, orta ve yüksek yük bölgelerindeki çalışma karakteristiklerinin incelenebilmesi amacıyla seçilmiştir. Bu yaklaşım, yakıt katkı maddelerinin motor davranışı üzerindeki etkilerinin yalnızca tek bir çalışma noktasında değil, geniş bir işletme aralığında değerlendirilmesine imkân sağlamaktadır. Deneylerde kullanılan ortam koşulları, Deney Ortam Sıcaklığı 27°C, Ortam Basıncı: 1 atm, Yakıt Yoğunluğu: 830 kg/m³, Yakıt Alt Isıl Değeri: 42,500 kJ/kg. Farklı yakıt karışımları arasında geçiş yapılmadan önce, yakıt hattı ve enjeksiyon sistemi yeterli süre çalıştırılarak önceki yakıt kalıntılarının sistemden uzaklaştırılması sağlanmıştır. Bu koşullar altında yürütülen deneysel çalışmalar, grafen nano katkısının dizel motor performansı, egzoz emisyonları ve yanma karakteristikleri üzerindeki etkilerinin güvenilir ve tekrarlanabilir bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

4.6. Ölçümü Yapılan Egzoz Emisyon Parametreleri

Bu bölümde, motorun çalışması sırasında ölçülen egzoz emisyon parametreleri detaylı olarak ele alınmaktadır. Egzoz gazlarının bileşimi, motorun yanma verimliliği ve çevresel etkileri açısından kritik bir gösterge olduğundan, testlerde karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x), hidrokarbonlar (HC) ve partikül madde (PM) değerleri ölçülerek analiz edilmiştir.

4.6.1. Egzoz emisyon test koşulları

Deneyler farklı yükler (0.3 OEB, 1 OEB, 2 OEB, 3 OEB) ve farklı grafen katkı oranları (0 ppm, 25 ppm, 50 ppm, 75 ppm, 100 ppm) ile gerçekleştirilmiştir. Emisyon ölçümleri, Capelec C800G Gaz Analizörü ve SmokeMeter cihazları kullanılarak yapılmıştır. Bu cihazlar, ISO 8178 uluslararası emisyon standartlarına uygun olarak egzoz gazı numunelerini analiz etmektedir.

Deneylerde kullanılan ortam koşulları aşağıda belirtilmiştir:

Deney Ortam Sıcaklığı: 27°C, Ortam Basıncı: 1 atm, Yakıt Türü: Dizel ve Grafen Katkılı Dizel, Numune Alma Süresi: 30 saniye süre boyunca yapılmıştır.

4.6.2. Ölçülen egzoz gazı bileşenleri ve parametreler

Egzoz Emisyon ölçüm parametreleri Tablo 4.9’da verilmiştir. Ölçülen parametreler, motorun yanma verimini ve çevresel etkilerini anlamak açısından kritik öneme sahiptir. Grafen nanopartikülünün katkısını emisyon bileşenlerine etkisi analiz edilerek sonuçlar değerlendirilmiştir.

Tablo 4. 9:Egzoz emisyon parametreleri

Parametre	Ölçüm Birimi	Açıklama
Karbon Monoksit (CO)	ppm (mg/m ³)	Yanma sürecinin eksik olduğunu gösterir, zehirli gazdır.
Azot Oksitler (NO _x)	ppm (mg/m ³)	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 vd., 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 RR , 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 4.10’te sunulmaktadır.

Tablo 4. 10: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 Verimliliğı	-	-	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 _x	0-5000ppm	1.0ppm	0.83
Duman	0-99.9% vol	0.001%	0.83

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

Tüm sistemi kapsayan Tablo 4.10 ve Denklem 4.1’i incelendiğinde; fren gücü, motor devri, motor yüğü, yakıt kütleli tüketimi, egzoz gazı sıcaklığı, büret sistemi, dijital zaman ölçümü ile fren termal verimliliğı, fren özgöl yakıt tüketimi, fren özgöl enerji tüketimi, CO, HC, NO_x ve duman koyuluğı parametrelerine ait birleşik belirsizlik oranının %3,1587 olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bu değeri, 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).

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

5.1. Motor Performans Analizleri

Bu çalışmada, GO nano maddesinin farklı katkı oranlarının (0 ppm, 25 ppm, 50 ppm, 75 ppm ve 100 ppm) dizel motor performansı üzerindeki etkileri araştırılmaktadır. Sonuçlar hem deneysel bulgular hem de literatür ışığında incelenmiştir.

5.1.1. Silindir basıncı

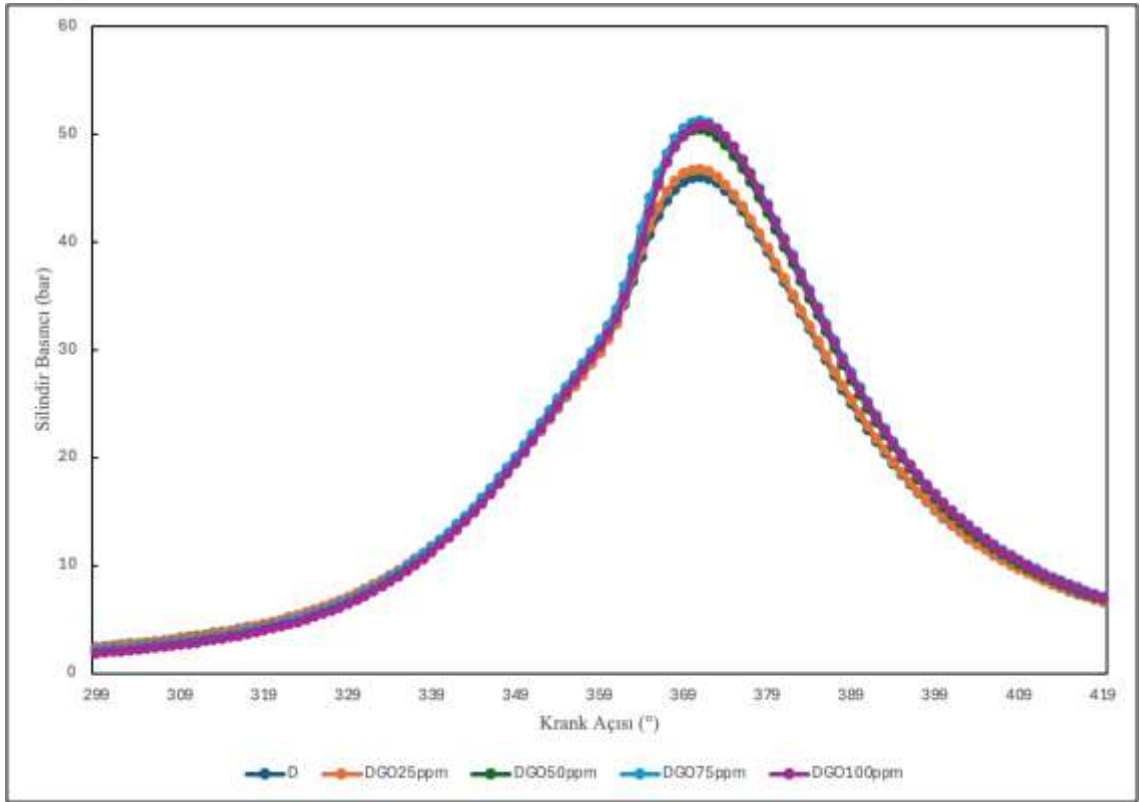
Bu çalışmada, alternatif yakıt katkı maddelerinin tek silindirli, dört zamanlı bir dizel motorun maksimum yanma basıncı üzerindeki etkisi farklı yük koşulları altında analiz edilmiştir. Motor, 1500 rpm sabit hızda çalıştırılmış ve yakıtta grafen nanaopartikül maddesi farklı konsantrasyonlarda (25 ppm, 50 ppm, 75 ppm ve 100 ppm) eklenmiştir. Her koşul için silindir içi gaz basıncı kaydedilmiştir.

Yanma sürecinin detaylı analizi için motorun farklı yük koşulları altında silindir gaz basınç-krank açısı grafikleri elde edilmiştir. Grafen katkısının yakıtın yanma karakteristiği üzerindeki etkisini görmek amacıyla silindir gaz basınç değişimleri ölçülmüş ve yük arttıkça yanma basıncındaki farklılıklar gözlemlenmiştir.

Deney yakıtlarının (D, DGO25ppm, DGO50ppm, DGO75ppm ve DGO100ppm) silindir basıncı (bar) değerleri, sabit motor devrinde (1500 d/dk) ve 0.3, 1, 2 ve 3 bar OEB yük koşullarında krank açısına bağlı olarak sırasıyla Şekil 5.1, 5.2, 5.3 ve 5.4'te sunulmuştur.

Şekil 5.1'de, 0.3 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda saf dizel yakıt ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren yakıtlar için krank açısına bağlı silindir içi basınç değişimleri sunulmaktadır. Saf dizel yakıt için maksimum silindir basıncı yaklaşık 46 bar olarak belirlenmiştir. Grafen nano katkısının ilavesiyle birlikte maksimum silindir basınçlarında artış eğilimi gözlenmiş olup, bu artış katkı oranına bağlı olarak değişim göstermiştir. 25 ppm grafen katkısı ile maksimum silindir basıncı yaklaşık %2 oranında artarken, 50 ppm katkı oranında bu artış yaklaşık %6–7 seviyesine ulaşmıştır. En

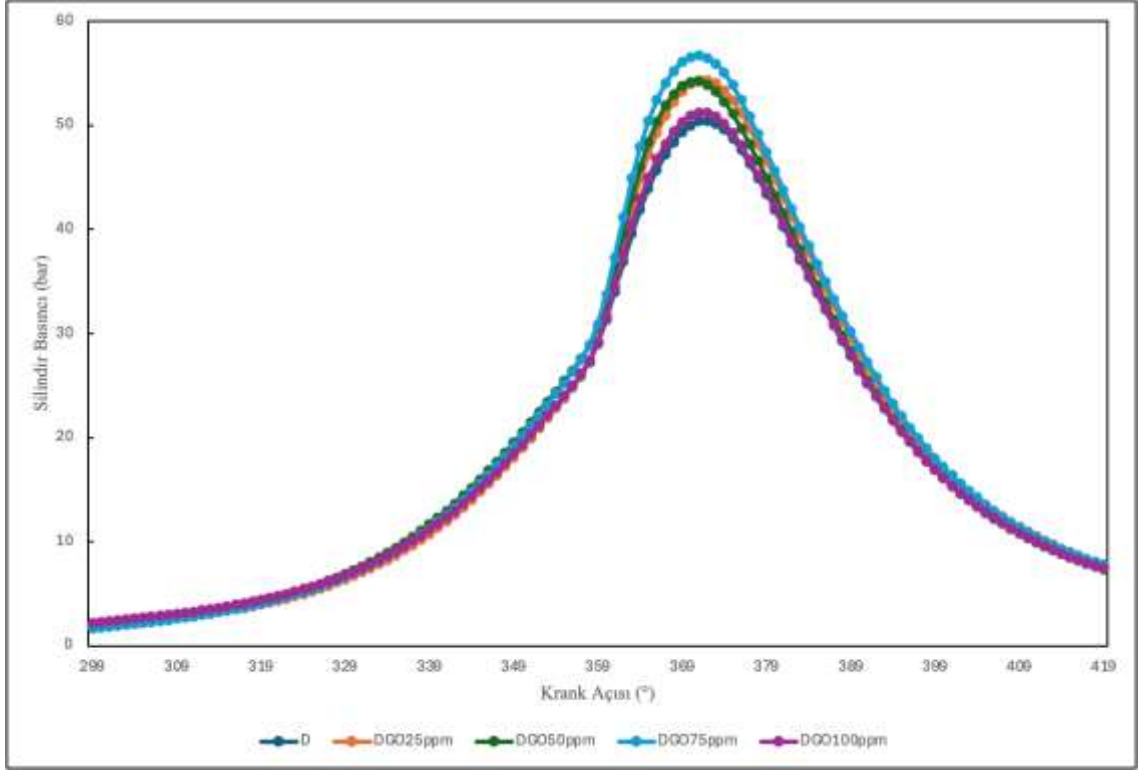
yüksek maksimum silindir basıncı, yaklaşık %10–11 artış ile 75 ppm grafen katkı oranında elde edilmiştir. Ancak katkı oranının 100 ppm seviyesine çıkarılması durumunda maksimum silindir basıncındaki artışın sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar, grafen nano katkısının düşük ve orta katkı oranlarında yanma sürecini iyileştirdiğini, yüksek katkı oranlarında ise etkinliğin doygunluğa ulaştığını göstermektedir.



Şekil 5.1: 1:0,3 bar OEB göre krank açısına bağlı silindir basıncı değişimi (bar)

Şekil 5.2’de, 1 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda saf dizel yakıt ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren yakıtlar için krank açısına bağlı silindir içi basınç değişimleri sunulmaktadır. Yük artışına bağlı olarak, tüm yakıtlar için maksimum silindir basınçlarının 0.3 bar OEB koşuluna kıyasla arttığı görülmektedir. Saf dizel yakıt için maksimum silindir basıncı yaklaşık 52 bar olarak belirlenmiştir. Grafen nano katkısının ilavesiyle birlikte maksimum silindir basınçlarında artış gözlenmiş olup, bu artış katkı oranına bağlı olarak değişim göstermiştir. 25 ppm grafen katkısı ile maksimum silindir basıncı yaklaşık %3–4 oranında artarken, 50 ppm katkı oranında bu artış yaklaşık %6–7 seviyesine ulaşmıştır. En yüksek maksimum silindir basıncı,

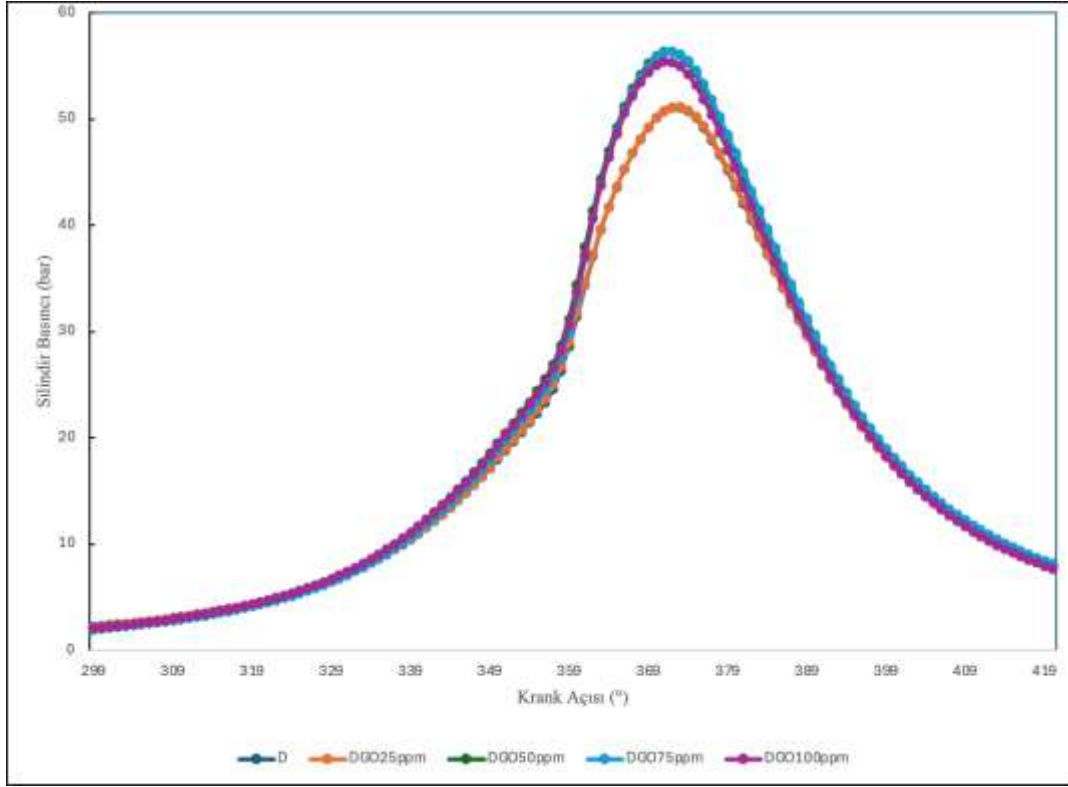
yaklaşık %9–10 artış ile 75 ppm grafen katkı oranında elde edilmiştir. Katkı oranının 100 ppm seviyesine çıkarılması durumunda ise maksimum silindir basıncındaki artışın sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, grafen nano katkısının düşük ve orta katkı oranlarında yanma sürecini olumlu yönde etkilediğini, yüksek katkı oranlarında ise etkinliğin doygunluğa ulaştığını göstermektedir.



Şekil 5. 2:1 bar OEB göre krank açısına bağlı silindir basıncı değişimi (bar)

Şekil 5.3'te, 2 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda saf dizel yakıt ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren yakıtlar için krank açısına bağlı silindir içi basınç değişimleri sunulmaktadır. Yük artışına bağlı olarak, tüm yakıtlar için maksimum silindir basınçlarının 1 bar OEB koşuluna kıyasla arttığı görülmektedir. Saf dizel yakıt için maksimum silindir basıncı yaklaşık 55 bar olarak belirlenmiştir. Grafen nano katkısının ilavesiyle birlikte maksimum silindir basınçlarında artış gözlenmiş olup, bu artış katkı oranına bağlı olarak değişim göstermiştir. 25 ppm grafen katkısı ile maksimum silindir basıncı yaklaşık %4–5 oranında artarken, 50 ppm katkı oranında bu artış yaklaşık %7–8 seviyesine ulaşmıştır. En yüksek maksimum silindir basıncı, yaklaşık %10–11 artış ile 75 ppm grafen katkı oranında elde edilmiştir. Katkı oranının

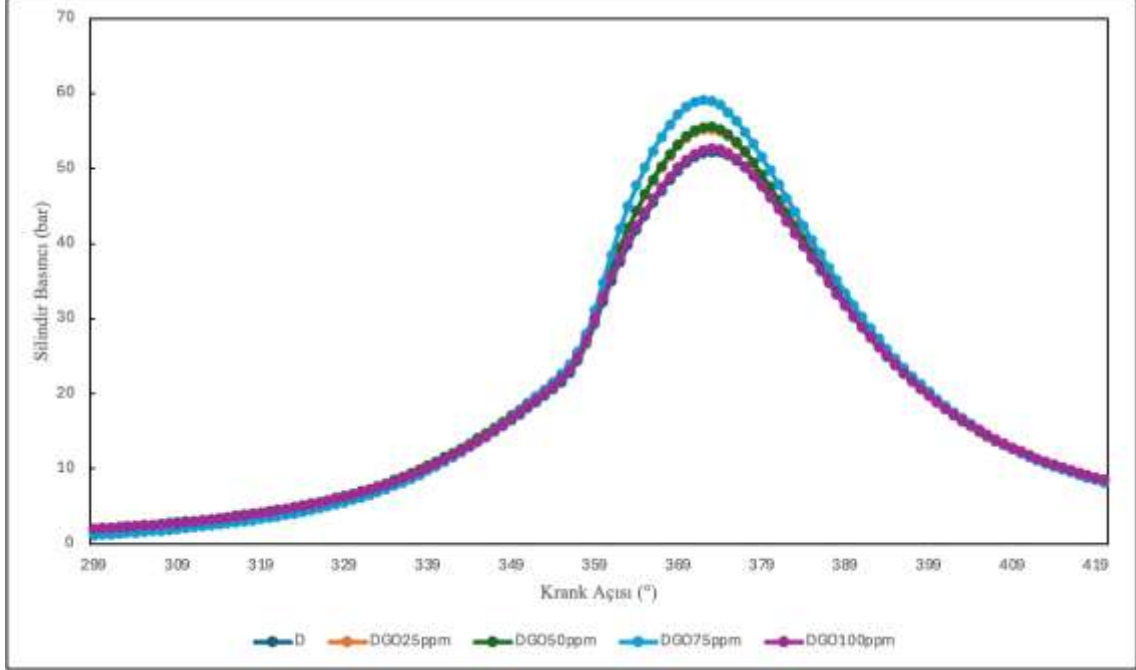
100 ppm seviyesine çıkarılması durumunda ise maksimum silindir basıncındaki artışın sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar, yükün artmasıyla birlikte grafen nano katkısının yanma süreci üzerindeki olumlu etkisinin düşük ve orta katkı oranlarında daha belirgin hâle geldiğini, ancak yüksek katkı oranlarında etkinliğin doygunluğa ulaştığını göstermektedir.



Şekil 5. 3: 2 bar OEB göre krank açısına bağlı silindir basıncı değişimi (bar)

Şekil 5.4'te, 3 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda saf dizel yakıt ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren yakıtlar için krank açısına bağlı silindir içi basınç değişimleri sunulmaktadır. Yükün artmasıyla birlikte, tüm yakıtlar için maksimum silindir basınçlarının 2 bar OEB koşuluna kıyasla arttığı görülmektedir. Saf dizel yakıt için maksimum silindir basıncı yaklaşık 56 bar olarak belirlenmiştir. Grafen nano katkısının ilavesiyle birlikte maksimum silindir basınçlarında artış gözlenmiş olup, bu artış katkı oranına bağlı olarak değişim göstermiştir. 25 ppm grafen katkısı ile maksimum silindir basıncı yaklaşık %4–5 oranında artarken, 50 ppm katkı oranında bu artış yaklaşık %7–8 seviyesine ulaşmıştır. En yüksek maksimum silindir basıncı, yaklaşık %9–10 artış ile 75 ppm grafen katkı oranında elde edilmiştir. Katkı oranının

100 ppm seviyesine çıkarılması durumunda ise maksimum silindir basıncındaki artışın sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar, yüksek yük koşullarında grafen nano katkısının yanma süreci üzerindeki etkisinin düşük ve orta katkı oranlarında daha belirgin olduğunu, ancak yüksek katkı oranlarında etkinliğin doygunluğa ulaştığını göstermektedir.



Şekil 5. 4: 3 bar OEB göre krank açısına bağlı silindir basıncı değişimi (bar)

Elde edilen sonuçlar, grafen oksit katkı oranının artmasıyla birlikte yanma odasında açığa çıkan enerjinin daha etkin bir şekilde basınca dönüştüğünü ve yanma şiddetinin belirgin biçimde arttığını göstermektedir.

Bulgular, grafen bazlı yakıt katkılarının yanma verimliliğini artırarak maksimum yanma basıncını yükselttiğini göstermektedir. Bununla birlikte, aşırı katkı konsantrasyonları motor bileşenleri üzerinde olumsuz etkiler yaratabilecek aşırı basınç birikimine neden olabilmektedir. Elde edilen deneysel bulgular, tez çalışmasının literatür taraması bölümünde yer alan bilgilerle uyumludur. Literatürde nanoparçacık katkılarının yüksek ısı iletkenlikleri, geniş yüzey alanları ve oksijen depolama kapasiteleri sayesinde yanma odası içindeki yakıt-hava karışımını iyileştirdiği, alev yayılım hızını artırdığı ve buna bağlı olarak daha yüksek tepe silindir basıncı oluşturduğu ifade edilmektedir. Luo ve ark. (2016), Mishra ve Goswami (2018) gibi çalışmalarda nanoparçacık içeren yakıtların dizel yakıtına kıyasla daha yüksek

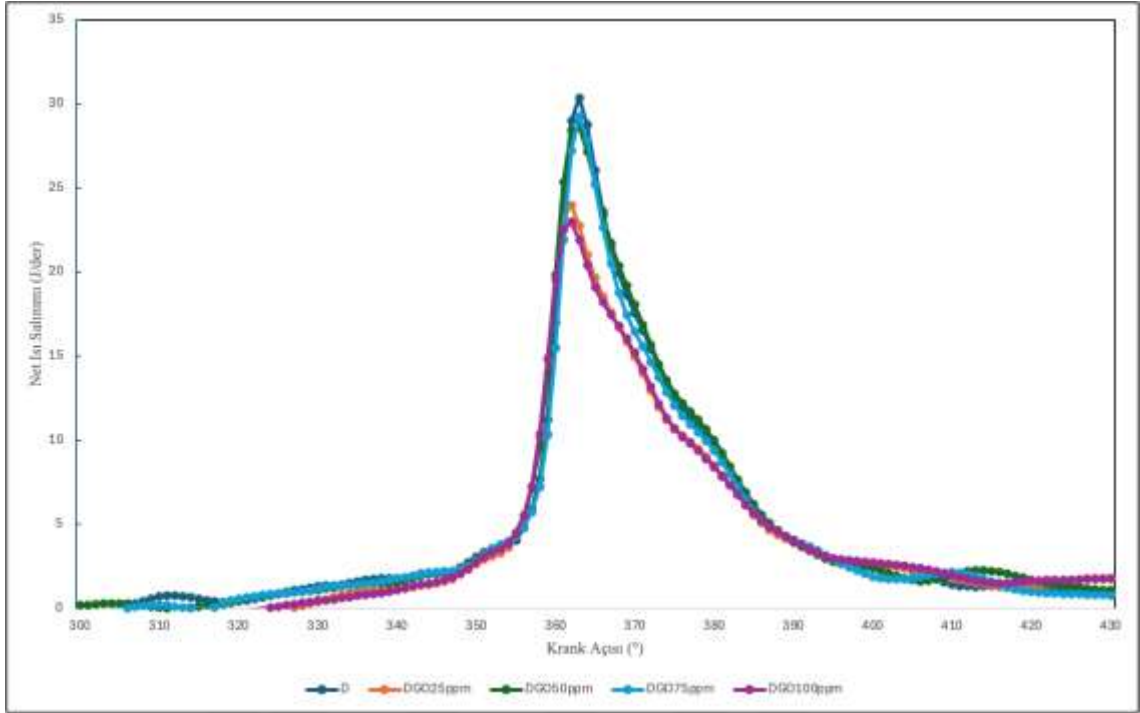
maksimum basınç değerleri ürettiği rapor edilmiştir. Bu bilgiler ışığında, grafen katkılı yakıtlarla elde edilen tepe basıncı artışlarının hem eğilim hem de büyüklük bakımından literatürde yer alan nano katkı çalışmalarını desteklediği görülmektedir.

Literatürde çok yüksek katkı oranlarında nanoparçacıkların aglomerasyon eğilimi gösterebileceği ve bunun yanma verimini sınırlayabileceği belirtilmekle birlikte, bu çalışmada 25–100 ppm arasındaki katkı seviyelerinde silindir basıncı tüm yük koşullarında düzenli bir artış eğilimi sergilemiştir. Bu durum, grafen nanoparçacıklarının çalışılan katkı aralığında yanma sürecine olumlu katkı sağlamaya devam ettiğini ve literatürde bildirilen “optimum katkı aralığı” yaklaşımıyla uyum içinde olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, silindir basıncı bulguları literatürle güçlü bir uyum göstermekte ve grafen katkısının yanma performansını iyileştirici potansiyelini doğrulamaktadır.

5.1.2. Net ısı salınımı

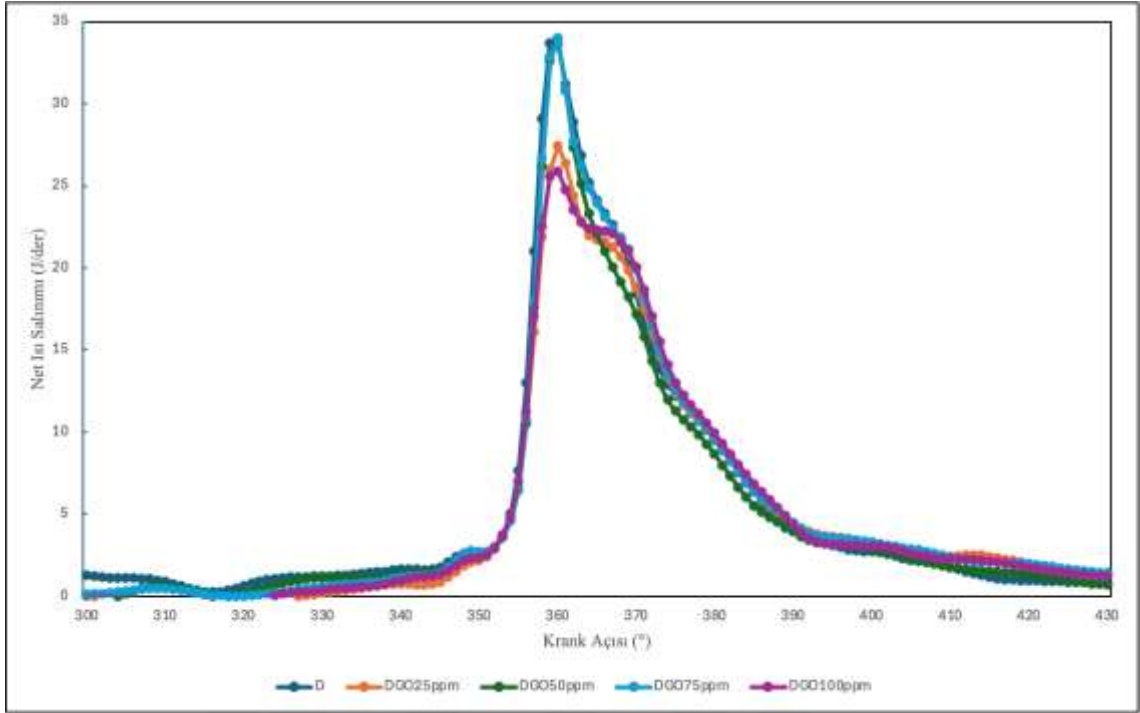
Net ısı salınımı (Net Heat Release - NHR), yanma verimini ve enerjinin ne kadar hızla açığa çıktığını gösteren en temel göstergelerden biridir. Deney yakıtlarına ait net ısı salınımı (J/der) değerleri, sabit motor devrinde (1500 d/dk) ve 0.3, 1, 2 ve 3 bar OEB motor yükleri altında krank açısına bağlı olarak sırasıyla Şekil 5.5, 5.6, 5.7 ve 5.8’de sunulmuştur.

Şekil 5.5’te, 0.3 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda saf dizel yakıt ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren yakıtlar için krank açısına bağlı net ısı salınımı değişimleri sunulmaktadır. Tüm yakıtlar için net ısı salınımının üst ölü nokta (ÜÖN) civarında ani bir artış gösterdiği ve maksimum değerlere ulaştığı görülmektedir. Saf dizel yakıt için maksimum net ısı salınımı yaklaşık 30 J/der olarak belirlenmiştir. Grafen nano katkısının ilavesiyle birlikte maksimum net ısı salınımı değerlerinde değişim gözlenmiştir. 25 ppm grafen katkısında maksimum net ısı salınımı saf dizel yakıtla kıyasla düşüş gösterirken, 50 ppm grafen katkı oranında maksimum net ısı salınımı yaklaşık %5–7 oranında artmıştır. En yüksek maksimum net ısı salınımı, yaklaşık %8–10 artış ile 75 ppm grafen katkı oranında elde edilmiştir. Katkı oranının 100 ppm seviyesine çıkarılması durumunda ise maksimum net ısı salınımındaki artışın sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar, grafen nano katkısının düşük ve orta katkı oranlarında premiks yanma fazını güçlendirdiğini, ancak yüksek katkı oranlarında yanma hızının doygunluğa ulaştığını göstermektedir.



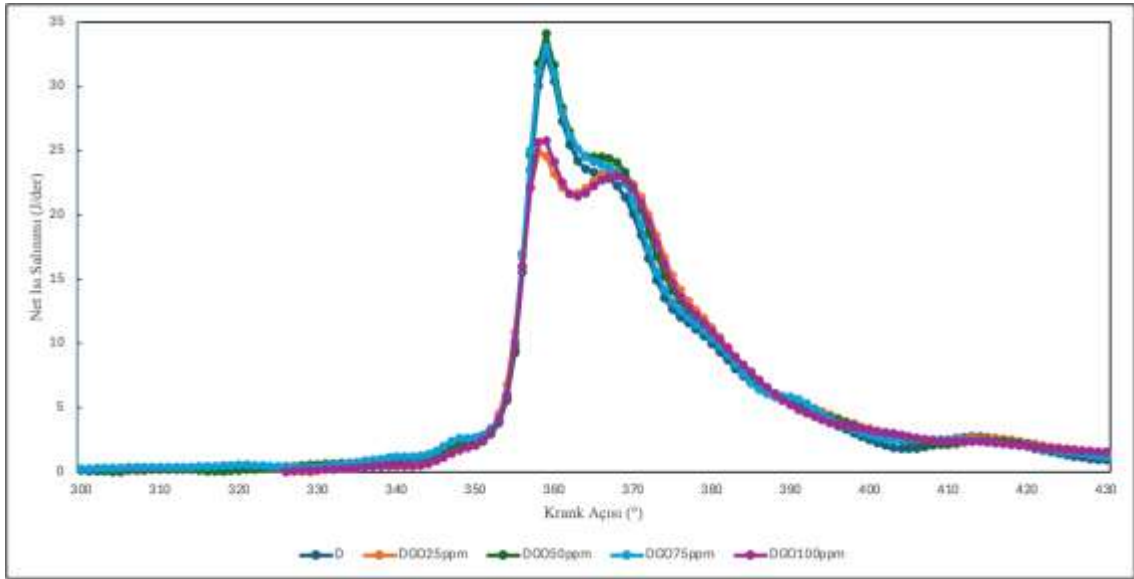
Şekil 5. 5: Test yakıtlarının 0.3 bar OEB göre krank açısına bağlı net ısı salınımı değişimi (J/der)

Şekil 5.6’de, 1 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda saf dizel yakıt ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren yakıtlar için krank açısına bağlı net ısı salınımı değişimleri sunulmaktadır. Yük artışına bağlı olarak, tüm yakıtlar için maksimum net ısı salınımı değerlerinin 0.3 bar OEB koşuluna kıyasla arttığı görülmektedir. Saf dizel yakıt için maksimum net ısı salınımı yaklaşık 33 J/der olarak belirlenmiştir. Grafen nano katkısının ilavesiyle birlikte maksimum net ısı salınımı değerlerinde katkı oranına bağlı değişimler gözlenmiştir. 25 ppm grafen katkısında maksimum net ısı salınımı saf dizel yakıtı göre düşüş gösterirken, 50 ppm grafen katkı oranında yaklaşık %5–7 oranında artış elde edilmiştir. En yüksek maksimum net ısı salınımı, yaklaşık %8–10 artış ile 75 ppm grafen katkı oranında gerçekleşmiştir. Katkı oranının 100 ppm seviyesine çıkarılması durumunda ise maksimum net ısı salınımındaki artışın sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar, artan yük koşulunda grafen nano katkısının düşük ve orta katkı oranlarında premiks yanma fazını güçlendirdiğini, yüksek katkı oranlarında ise yanma hızının doygunluğa ulaştığını göstermektedir.



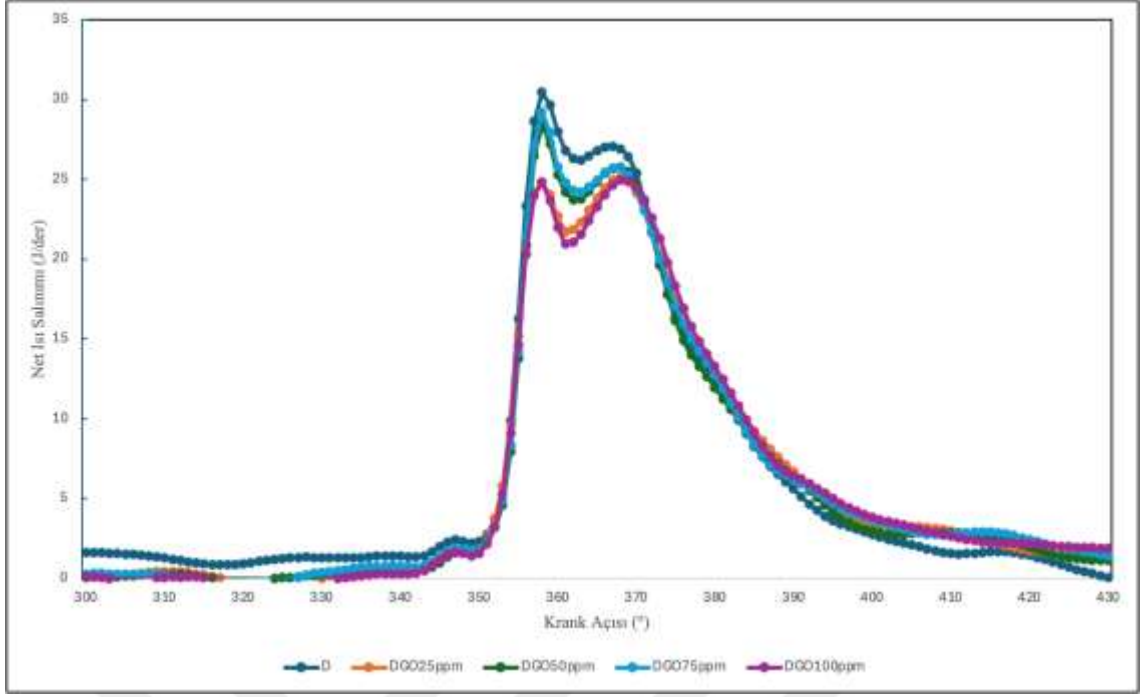
Şekil 5. 6: Test yakıtlarının 1 bar OEB göre krank açısına bağlı net ısı salınımı değişimi (J/der)

Şekil 5.7’te, 2 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda saf dizel yakıt ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren yakıtlar için krank açısına bağlı net ısı salınımı değişimleri sunulmaktadır. Yük artışına bağlı olarak, tüm yakıtlar için maksimum net ısı salınımı değerlerinin 1 bar OEB koşuluna kıyasla arttığı görülmektedir. Saf dizel yakıt için maksimum net ısı salınımı yaklaşık 34 J/der olarak belirlenmiştir. Grafen nano katkısının ilavesiyle birlikte maksimum net ısı salınımı değerlerinde katkı oranına bağlı değişimler gözlenmiştir. 25 ppm grafen katkısında maksimum net ısı salınımı saf dizel yakıtla kıyasla düşüş gösterirken, 50 ppm grafen katkı oranında yaklaşık %6–8 oranında artış elde edilmiştir. En yüksek maksimum net ısı salınımı, yaklaşık %9–11 artış ile 75 ppm grafen katkı oranında gerçekleşmiştir. Katkı oranının 100 ppm seviyesine çıkarılması durumunda ise maksimum net ısı salınımındaki artışın sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar, artan yük koşulunda grafen nano katkısının düşük ve orta katkı oranlarında yanma hızını artırdığını, yüksek katkı oranlarında ise yanma sürecinde doygunluk eğiliminin ortaya çıktığını göstermektedir.



Şekil 5. 7: Test yakıtlarının 2 bar OEB göre krank açısına bağlı net ısı salınımı değişimi (J/der)

Şekil 5.8’te, 3 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda saf dizel yakıt ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren yakıtlar için krank açısına bağlı net ısı salınımı değişimleri sunulmaktadır. Yükün artmasıyla birlikte, tüm yakıtlar için maksimum net ısı salınımı değerlerinin 2 bar OEB koşuluna kıyasla arttığı görülmektedir. Saf dizel yakıt için maksimum net ısı salınımı yaklaşık 35 J/der olarak belirlenmiştir. Grafen nano katkısının ilavesiyle birlikte maksimum net ısı salınımı değerlerinde katkı oranına bağlı değişimler gözlenmiştir. 25 ppm grafen katkısında maksimum net ısı salınımı saf dizel yakıtı göre düşüş gösterirken, 50 ppm grafen katkı oranında yaklaşık %6–8 oranında artış elde edilmiştir. En yüksek maksimum net ısı salınımı, yaklaşık %8–10 artış ile 75 ppm grafen katkı oranında gerçekleşmiştir. Katkı oranının 100 ppm seviyesine çıkarılması durumunda ise maksimum net ısı salınımındaki artışın sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar, yüksek yük koşullarında grafen nano katkısının düşük ve orta katkı oranlarında premiks yanma fazını güçlendirdiğini, yüksek katkı oranlarında ise yanma hızının doygunluğa ulaştığını göstermektedir.



Şekil 5. 8: Test yakıtlarının 3 bar OEB göre krank açısına bağlı net ısı salınımı değişimi (J/der)

Bu çalışmada elde edilen net ısı salınımı (NHRR) eğrileri incelendiğinde, grafen katkılı yakıtların hızlı yanma fazında referans dizel yakıtına kıyasla daha yüksek net ısı salınımı değerleri ürettiği görülmektedir. Nanoparçacık oranı arttıkça maksimum net ısı salınımının belirgin şekilde yükseldiği, özellikle 75 ppm katkılı yakıtın en yüksek $dQ/d\theta$ değerlerine ulaştığı tespit edilmiştir. Bu durum, grafen nanoparçacığının tutuşma gecikmesini kısaltarak reaksiyon hızını artırdığı ve hızlı yanma fazında daha yoğun enerji açığa çıkmasına neden olduğunu göstermektedir. Yük arttıkça NHRR eğrilerindeki farkın daha belirgin hale gelmesi, grafen katkısının yüksek sıcaklık ve yüksek yük koşullarında yanma verimini güçlendirdiğini ortaya koymaktadır.

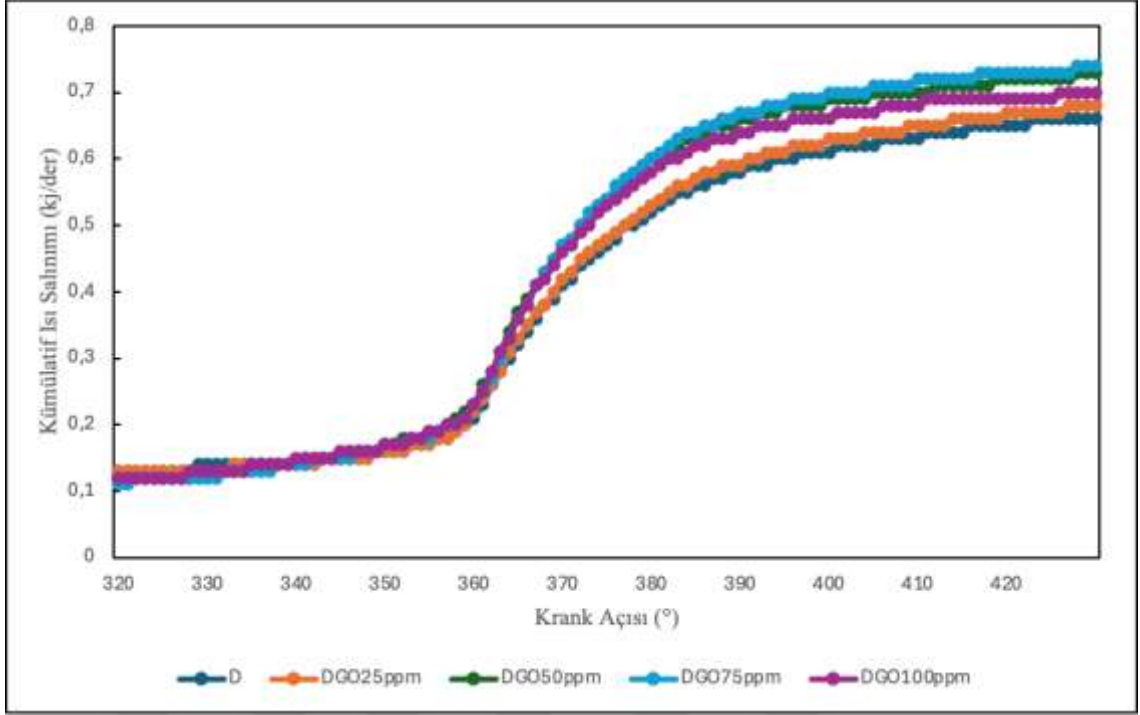
Elde edilen bu bulgular, çalışmadaki literatür araştırmasında sunulan nano katkı çalışmalarının sonuçlarıyla uyumludur. Luo ve ark. (2016) nanoparçacıkların oksidatif reaksiyonları hızlandırarak erken faz ısı salınımını artırdığını belirtmiş; Mishra ve Goswami (2018) nano yakıtların tutuşma gecikmesini azaltarak hızlı yanma anında daha yüksek net ısı açığa çıkışı ürettiğini rapor etmiştir. Hoseini ve ark. (2020) çalışmaları ise nano katkıların yakıt-hava karışım kalitesini artırarak maksimum net ısı salınımı değerlerini yükselttiğini göstermektedir. Literatürde Al_2O_3 , TiO_2 ve GO gibi yüksek ısıl iletkenliğe sahip nanoparçacıkların yanma sürecinde $dQ/d\theta$ değerlerini artırdığı ve hızlı

yanma fazında daha dik ısı salınım eğrileri oluşturduğu vurgulanmıştır. Bu mekanizma, grafenin yüksek ısıl iletkenliği sayesinde ısı transferini hızlandırması ve reaksiyon için daha fazla aktif yüzey sağlamasıyla uyumludur.

5.1.3. Kümülatif ısı salınımı

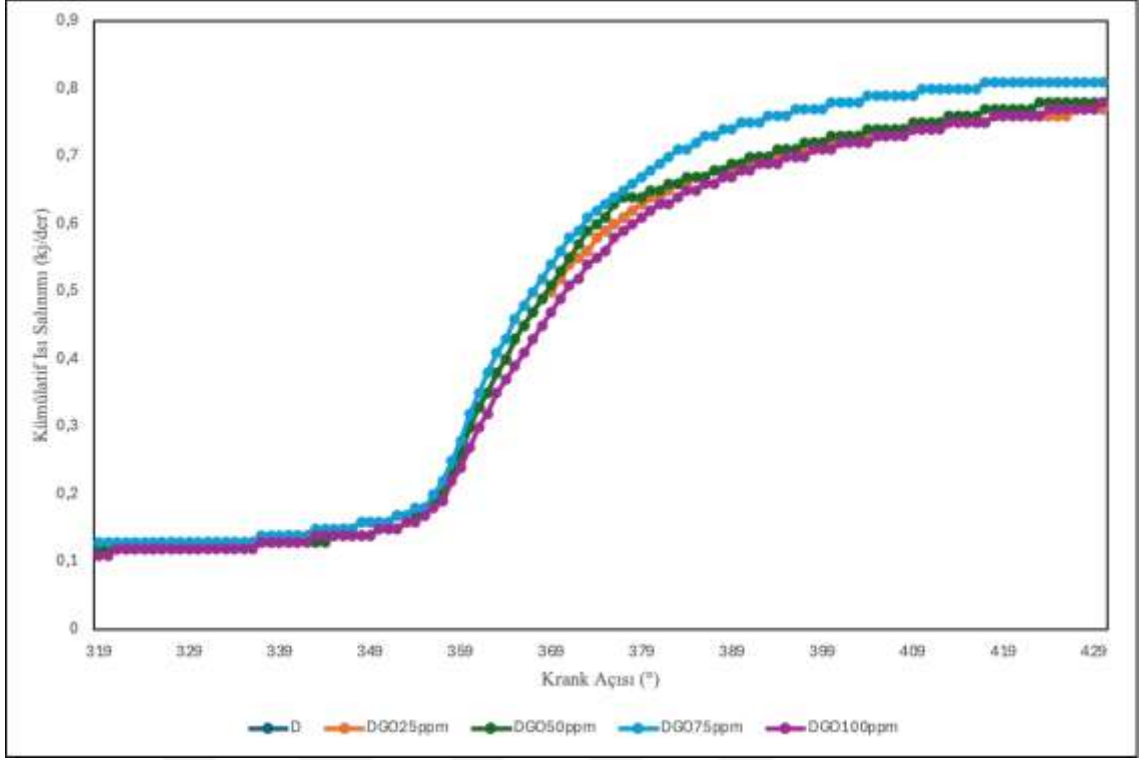
Yanma odasında gerçekleşen yanma sürecinde açığa çıkan toplam ısı enerjisi, krank mili açısına bağlı olarak değişen silindir içi yanma karakteristiğini ifade etmektedir. D, DGO25ppm, DGO50ppm, DGO75ppm ve DGO100ppm yakıt karışımlarına ait kümülatif ısı salınımı, 1500 d/dk sabit motor devrinde ve 0.3, 1, 2 ve 3 bar OEB yük koşullarında ölçülerek sırasıyla Şekil 15-16-17-18’de krank mili açısına göre kJ/der cinsinden sunulmuştur. **340 ile 440 Krank Açısı (KMA)** arasındaki yanma sürecinin en aktif olduğu bölgedir. Bu aralık, yanmanın başlaması, alevin hızla yayılması (hızlı yanma fazı) ve art yanma fazlarını kapsadığı için kümülatif ısı salınımının en dik yükselişini gösterdiği bölgedir.

Şekil 5.9’te, 0.3 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda saf dizel yakıt ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren yakıtlar için krank açısına bağlı kümülatif ısı salınımı değişimleri sunulmaktadır. Tüm yakıtlar için kümülatif ısı salınımının yanma süreci ilerledikçe artış gösterdiği ve yanma sonuna doğru plato eğilimine ulaştığı görülmektedir. Saf dizel yakıt için toplam kümülatif ısı salınımı yaklaşık 0.66 kJ/der olarak belirlenmiştir. Grafen nano katkısının ilavesiyle birlikte toplam kümülatif ısı salınımı değerlerinde artış gözlenmiştir. 25 ppm grafen katkısında toplam kümülatif ısı salınımı saf dizel yakıtı göre sınırlı bir artış gösterirken, 50 ppm katkı oranında bu artış yaklaşık %6–7 seviyesine ulaşmıştır. En yüksek toplam kümülatif ısı salınımı, yaklaşık %10–12 artış ile 75 ppm grafen katkı oranında elde edilmiştir. Katkı oranının 100 ppm seviyesine çıkarılması durumunda ise toplam kümülatif ısı salınımındaki artışın sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar, grafen nano katkısının düşük ve orta katkı oranlarında yanma sürecinin etkinliğini artırdığını, yüksek katkı oranlarında ise kazanımların doygunluğa ulaştığını göstermektedir.



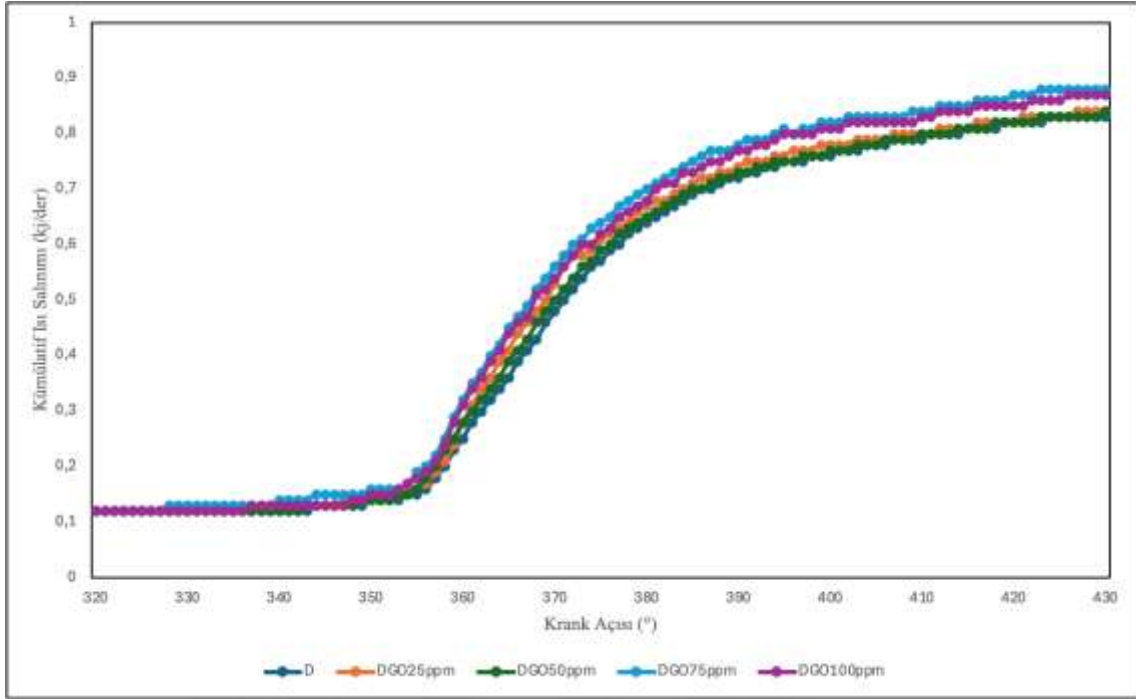
Şekil 5. 9: Test yakıtlarının 0.3 bar OEB göre krank açısına bağlı kümülatif ısı salınımı değişimi

Şekil 5.10'da 1 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda saf dizel yakıt ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren yakıtlar için krank açısına bağlı kümülatif ısı salınımı değişimleri sunulmaktadır. Yük artışına bağlı olarak, tüm yakıtlar için toplam kümülatif ısı salınımı değerlerinin 0.3 bar OEB koşuluna kıyasla arttığı görülmektedir. Saf dizel yakıt için toplam kümülatif ısı salınımı yaklaşık 0.75 kJ/der olarak belirlenmiştir. Grafen nano katkısının ilavesiyle birlikte toplam kümülatif ısı salınımı değerlerinde artış gözlenmiştir. 25 ppm grafen katkısı ile toplam kümülatif ısı salınımı saf dizel yakıtı göre yaklaşık %4–5 oranında artarken, 50 ppm katkı oranında bu artış yaklaşık %7–8 seviyesine ulaşmıştır. En yüksek toplam kümülatif ısı salınımı, yaklaşık %10–12 artış ile 75 ppm grafen katkı oranında elde edilmiştir. Katkı oranının 100 ppm seviyesine çıkarılması durumunda ise toplam kümülatif ısı salınımındaki artışın sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar, artan yük koşulunda grafen nano katkısının yanma sürecinin toplam enerji salınımını artırdığını, ancak yüksek katkı oranlarında kazanımların doygunluğa ulaştığını göstermektedir.



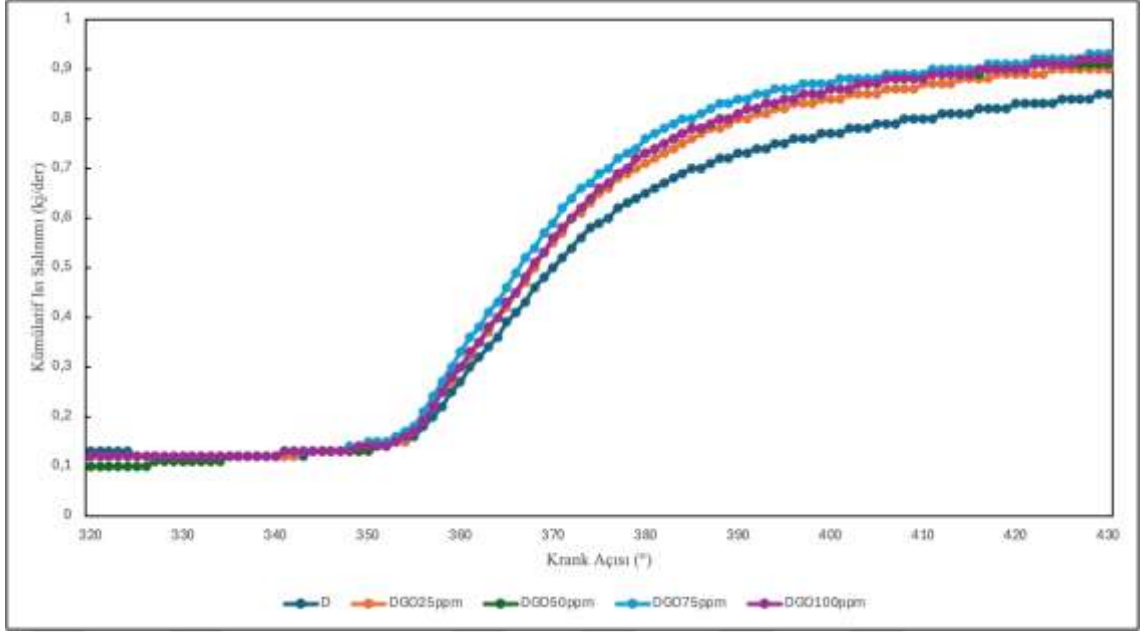
Şekil 5. 10: Test yakıtlarının 1 bar OEB göre krank açısına bağlı Kümülatif Isı salınımı değişimi

Şekil 5.11’de, 2 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda saf dizel yakıt ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren yakıtlar için krank açısına bağlı kümülatif ısı salınımı değişimleri sunulmaktadır. Yükün artmasıyla birlikte, tüm yakıtlar için toplam kümülatif ısı salınımı değerlerinin 1 bar OEB koşuluna kıyasla arttığı görülmektedir. Saf dizel yakıt için toplam kümülatif ısı salınımı yaklaşık 0.82 kJ/der olarak belirlenmiştir. Grafen nano katkısının ilavesiyle birlikte toplam kümülatif ısı salınımı değerlerinde katkı oranına bağlı artışlar gözlenmiştir. 25 ppm grafen katkısı ile toplam kümülatif ısı salınımı saf dizel yakıtı göre yaklaşık %4–5 oranında artarken, 50 ppm katkı oranında bu artış yaklaşık %6–7 seviyesine ulaşmıştır. En yüksek toplam kümülatif ısı salınımı, yaklaşık %9–11 artış ile 75 ppm grafen katkı oranında elde edilmiştir. Katkı oranının 100 ppm seviyesine çıkarılması durumunda ise toplam kümülatif ısı salınımındaki artışın sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar, artan yük koşulunda grafen nano katkısının yanma sürecine ilişkin toplam enerji salınımını artırdığını, ancak yüksek katkı oranlarında kazanımların doygunluğa ulaştığını göstermektedir.



Şekil 5. 11: Test yakıtlarının 2 bar OEB göre krank açısına bağlı kümülatif ısı salınımı değişimi

Şekil 5.12’de, 3 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda saf dizel yakıt ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren yakıtlar için krank açısına bağlı kümülatif ısı salınımı değişimleri sunulmaktadır. Yükün artmasıyla birlikte, tüm yakıtlar için toplam kümülatif ısı salınımı değerlerinin 2 bar OEB koşuluna kıyasla arttığı görülmektedir. Saf dizel yakıt için toplam kümülatif ısı salınımı yaklaşık 0.85 kJ/der olarak belirlenmiştir. Grafen nano katkısının ilavesiyle birlikte toplam kümülatif ısı salınımı değerlerinde katkı oranına bağlı artışlar gözlenmiştir. 25 ppm grafen katkısı ile toplam kümülatif ısı salınımı saf dizel yakıtı göre yaklaşık %4–5 oranında artarken, 50 ppm katkı oranında bu artış yaklaşık %6–7 seviyesine ulaşmıştır. En yüksek toplam kümülatif ısı salınımı, yaklaşık %8–10 artış ile 75 ppm grafen katkı oranında elde edilmiştir. Katkı oranının 100 ppm seviyesine çıkarılması durumunda ise toplam kümülatif ısı salınımındaki artışın sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar, yüksek yük koşullarında grafen nano katkısının yanma sürecine ilişkin toplam enerji salınımını artırdığını, ancak yüksek katkı oranlarında kazanımların doygunluğa ulaştığını göstermektedir.



Şekil 5. 12: Test yakıtlarının 3 bar OEB göre krank açısına bağlı kümülatif ısı salınımı değişimi

Test yakıtlarının, yanma sürecini daha erken tamamladığı ve toplam ısı salınımına daha kısa krank açısı aralığında ulaştığı belirlenmiştir. Bu durum, grafen oksit katkısının yanma reaksiyonlarını hızlandırıldığını ve ısı salınım süresini kısalttığını göstermektedir.

Çalışmada elde edilen kümülatif ısı salınımı sonuçları, grafen katkı oranının artırılmasıyla tüm yük koşullarında toplam ısı açığa çıkışının yükseldiğini göstermektedir. Katkı miktarının artmasıyla kümülatif ısı salınımı değerlerinin düzenli bir artış sergilemesi, grafen nanoparçacığının yanma reaksiyon kinetiğini hızlandırıldığını ve daha verimli bir yanma süreci oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen bu bulgular, yapılan çalışmanın literatür araştırması kısmında sunulan nano katkı çalışmalarının sonuçlarıyla uyumludur. Luo ve ark. (2016) nanoparçacıkların daha erken fazda reaksiyon başlatma ve toplam ısı açığa çıkışını artırma eğiliminde olduğunu rapor etmiş; Mishra ve Goswami (2018) nano yakıtların tutuşma gecikmesini azaltarak hem anlık hem de kümülatif ısı salınımını yükselttiğini belirtmiştir. Benzer şekilde Hoseini ve ark.(2020) çalışmaları, nano katkıların yakıt-hava karışımını iyileştirerek yanma verimini artırdığını ve toplam ısısal enerji açığa çıkışını yükselttiğini göstermektedir. Literatürde Al_2O_3 , TiO_2 ve grafen oksit (GO) gibi yüksek ısısal iletkenliğe sahip nano yapılarla yapılan çalışmalarda da kümülatif ısı salınımının katkı oranına bağlı olarak arttığı bildirilmiştir. Bu çerçevede, grafen katkılı yakıtlarla bu çalışmada

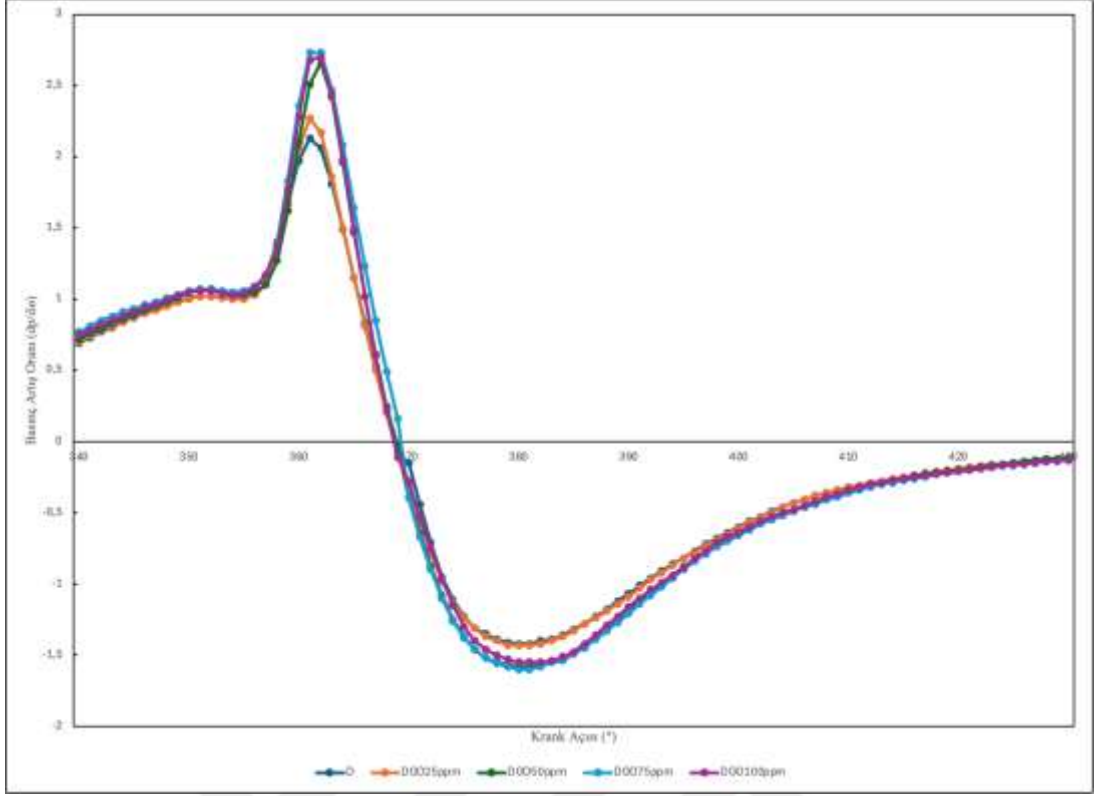
elde edilen kümülatif ısı salınımı artışlarının hem yön hem büyüklük hem de mekanizma bakımından literatürde rapor edilen nano katkı etkileriyle tam uyum içinde olduğu sonucuna varılmaktadır.

5.1.4. Basınç artış oranı

Basınç artış oranı (Pressure Rise Rate - PRR), motorun çalışmasının ne kadar "sert" veya "yumuşak" olduğunu anlaşılması için önemli bir parametredir. Yüksek basınç artış oranları genellikle daha yüksek yanma gürültüsü (dizel vuruntusu) ve mekanik stres anlamına gelirken, çok düşük oranlar yanmanın yavaşladığına işaret edebilir.

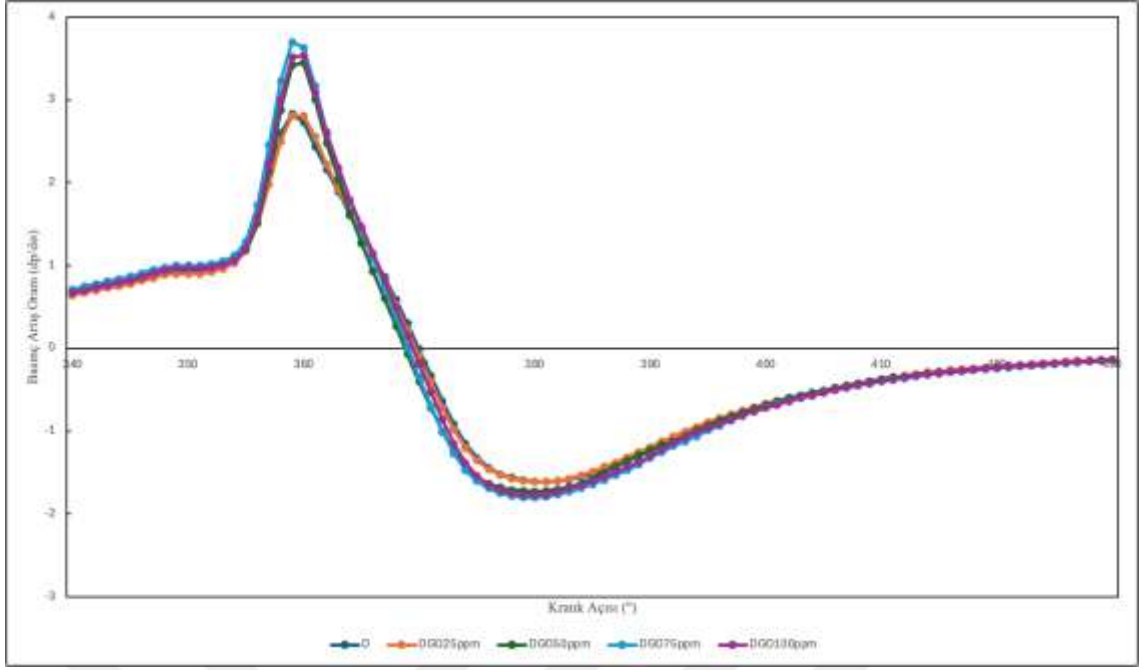
Deney yakıtlarının (D, DGO25ppm, DGO50ppm, DGO75ppm ve DGO100ppm) basınç artış oranı ($dp/d\phi$) değerleri, 1500 d/dk sabit motor devrinde ve 0.3, 1, 2 ve 3 bar OEB yük koşullarında krank açısına bağlı olarak sırasıyla Şekil 19-20-21-22’de sunulmuştur.

Şekil 5.13’da, 0,3 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda saf dizel yakıt ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren yakıtlar için krank açısına bağlı basınç artış oranı ($dp/d\phi$) değişimleri sunulmaktadır. Tüm yakıtlar için basınç artış oranının, yanma başlangıcı ile birlikte hızla arttığı ve üst ölü nokta (ÜÖN) civarında maksimum değerlere ulaştığı görülmektedir. Saf dizel yakıt için maksimum basınç artış oranı yaklaşık 2,3 bar/° olarak belirlenmiştir. Grafen nano katkısının ilavesiyle birlikte maksimum basınç artış oranlarında artış gözlenmiştir. 25 ppm grafen katkısı ile maksimum $dp/d\phi$ değeri saf dizel yakıtı göre sınırlı bir artış gösterirken, 50 ppm katkı oranında bu artış yaklaşık %10 civarına ulaşmıştır. En yüksek maksimum basınç artış oranı, yaklaşık %15’e varan artış ile 75 ppm grafen katkı oranında elde edilmiştir. Katkı oranının 100 ppm seviyesine çıkarılması durumunda ise basınç artış oranındaki artışın sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, grafen nano katkısının düşük ve orta katkı oranlarında yanma hızını artırdığını, ancak yüksek katkı oranlarında yanma şiddetinin doygunluğa ulaştığını göstermektedir.



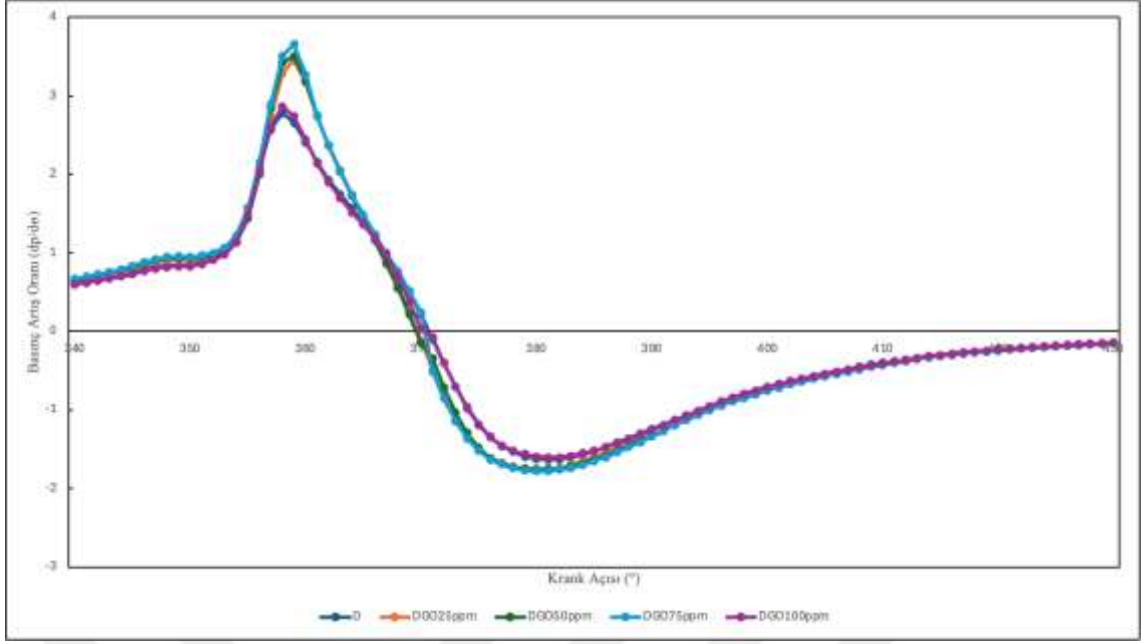
Şekil 5.13: Test yakıtlarının 0.3 bar OEB göre krank açısına bağlı basınç artış oranı değişimi ($dp/d\phi$)

Şekil 5.14’de, 1 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda saf dizel yakıt ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren yakıtlar için krank açısına bağlı basınç artış oranı ($dp/d\phi$) değişimleri sunulmaktadır. Yük artışına bağlı olarak, tüm yakıtlar için maksimum basınç artış oranı değerlerinin 0,3 bar OEB koşuluna kıyasla arttığı görülmektedir. Saf dizel yakıt için maksimum basınç artış oranı yaklaşık 2,8 bar/° olarak belirlenmiştir. Grafen nano katkısının ilavesiyle birlikte maksimum basınç artış oranlarında artış gözlenmiştir. 25 ppm grafen katkısı ile maksimum $dp/d\phi$ değeri saf dizel yakıtı göre yaklaşık %5–7 oranında artarken, 50 ppm katkı oranında bu artış yaklaşık %10–12 seviyesine ulaşmıştır. En yüksek maksimum basınç artış oranı, yaklaşık %15–18 artış ile 75 ppm grafen katkı oranında elde edilmiştir. Katkı oranının 100 ppm seviyesine çıkarılması durumunda ise basınç artış oranındaki artışın sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar, artan yük koşulunda grafen nano katkısının yanma hızını artırdığını, ancak yüksek katkı oranlarında yanma şiddetinin doygunluğa ulaştığını göstermektedir.



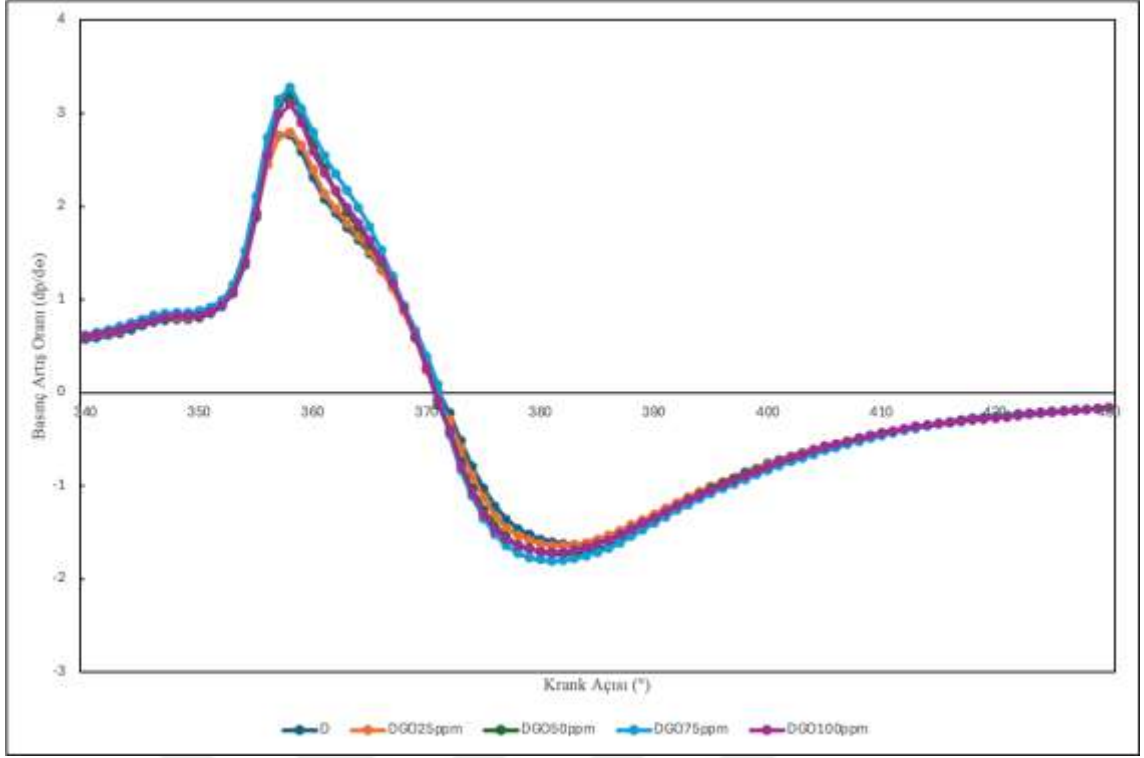
Şekil 5. 14: Test yakıtlarının 1 bar OEB göre krank açısına bağlı basınç artış oranı değişimi ($dp/d\phi$)

Şekil 5.15’de, 2 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda saf dizel yakıt ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren yakıtlar için krank açısına bağlı basınç artış oranı ($dp/d\phi$) değişimleri sunulmaktadır. Yük artışına bağlı olarak, tüm yakıtlar için maksimum basınç artış oranı değerlerinin 1 bar OEB koşuluna kıyasla arttığı görülmektedir. Saf dizel yakıt için maksimum basınç artış oranı yaklaşık 3,3 bar/° olarak belirlenmiştir. Grafen nano katkısının ilavesiyle birlikte maksimum basınç artış oranlarında katkı oranına bağlı artışlar gözlenmiştir. 25 ppm grafen katkısı ile maksimum $dp/d\phi$ değeri saf dizel yakıtı göre yaklaşık %6–8 oranında artarken, 50 ppm katkı oranında bu artış yaklaşık %10–12 seviyesine ulaşmıştır. En yüksek maksimum basınç artış oranı, yaklaşık %15–18 artış ile 75 ppm grafen katkı oranında elde edilmiştir. Katkı oranının 100 ppm seviyesine çıkarılması durumunda ise basınç artış oranındaki artışın sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar, artan yük koşullarında grafen nano katkısının yanma hızını artırdığını, ancak yüksek katkı oranlarında yanma şiddetinin doygunluğa ulaştığını göstermektedir.



Şekil 5. 15: Test yakıtlarının 2 bar OEB göre krank açısına bağlı basınç artış oranı değişimi ($dp/d\phi$)

Şekil 5.16’da, 3 bar ortalama efektif basınç (OEB) koşulunda saf dizel yakıt ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren yakıtlar için krank açısına bağlı basınç artış oranı ($dp/d\phi$) değişimleri sunulmaktadır. Yükün artmasıyla birlikte, tüm yakıtlar için maksimum basınç artış oranı değerlerinin 2 bar OEB koşuluna kıyasla arttığı görülmektedir. Saf dizel yakıt için maksimum basınç artış oranı yaklaşık 3,5 bar/° olarak belirlenmiştir. Grafen nano katkısının ilavesiyle birlikte maksimum basınç artış oranlarında katkı oranına bağlı değişimler gözlenmiştir. 25 ppm grafen katkısı ile maksimum $dp/d\phi$ değeri saf dizel yakıta göre yaklaşık %6–8 oranında artarken, 50 ppm katkı oranında bu artış yaklaşık %10–12 seviyesine ulaşmıştır. En yüksek maksimum basınç artış oranı, yaklaşık %15–18 artış ile 75 ppm grafen katkı oranında elde edilmiştir. Katkı oranının 100 ppm seviyesine çıkarılması durumunda ise basınç artış oranındaki artışın sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar, yüksek yük koşullarında grafen nano katkısının yanma hızını artırdığını, ancak yüksek katkı oranlarında yanma şiddetinin doygunluğa ulaştığını göstermektedir.



Şekil 5. 16: Test yakıtlarının 3 bar OEB göre krank açısına bağlı basınç artış oranı değişimi ($dp/d\theta$)

Yapılan deneysel çalışmada farklı OEB yüklerinde elde edilen basınç artış oranı (PRR) eğrileri incelendiğinde, grafen katkılı yakıtların tüm yük koşullarında dizel yakıtına göre daha yüksek basınç artış oranı değerleri ürettiği görülmektedir. Özellikle DGO75 ppm katkı oranında PRR eğrilerinin daha dik bir artış gösterdiği, hızlı yanma fazında tepe $dp/d\theta$ değerlerinin dizel yakıtına kıyasla belirgin şekilde yükseldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca yük arttıkça PRR değerlerindeki farkın daha da belirginleştiği, bunun grafen katkısının yanma hızını ve reaksiyon kinetiğini güçlendirdiğini ortaya koyduğu anlaşılmaktadır. Bu davranış, grafen katkısının erken tutuşmayı kolaylaştırması ve alev yayılım hızını artırması nedeniyle hızlı yanma fazında daha yüksek basınç artış oranlarına yol açtığını göstermektedir.

Elde edilen bu sonuçlar, tezdeki literatür çalışmasında sunulan nano katkı araştırmalarıyla güçlü bir uyum içerisinde. Luo ve ark. (2016) nanoparçacıkların reaksiyon başlangıcını hızlandırdığını ve hızlı yanma fazında basınç artış oranlarını artırdığını bildirmiştir. Mishra ve Goswami (2018), metal oksit ve karbon temelli nanoparçacıkların tutuşma gecikmesini azaltarak daha yüksek PRR değerlerine yol açtığını ve yanma şiddetini artırdığını rapor etmiştir. Hoseini ve ark. tarafından sunulan

çalışmalar da nano katkıların yakıt-hava karışım kalitesini iyileştirerek daha kararlı ve hızlı yanma oluşturduğunu; bu nedenle basınç artış oranının dizel yakıtına kıyasla daha yüksek gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca literatürde Al_2O_3 , TiO_2 ve GO gibi yüksek ısı iletkenliğe sahip nanoparçacıkların hızlı yanma sürecinde tepe PRR değerlerini artırdığı belirtilmiştir. Bu mekanizma, grafenin yüksek ısı iletkenliği ve reaktif yüzey alanı nedeniyle PRR artışını destekleyen önemli bir faktör olarak açıklanmıştır.

Yapılan yanma analizleri, grafen nano katkısının tüm yük koşullarında dizel motorun yanma karakteristikleri üzerinde belirgin etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Grafen katkısı ile silindir içi maksimum basınç, net ve kümülatif ısı salınımı ile basınç artış oranı değerlerinde genel olarak artış eğilimi gözlenmiştir; bu artışların özellikle düşük ve orta katkı oranlarında daha belirgin olduğu belirlenmiştir. En yüksek yanma performansı çoğu parametre için 75 ppm grafen katkı oranında elde edilmiş, daha yüksek katkı oranlarında ise yanma karakteristiklerindeki iyileşmenin sınırlı kaldığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, grafen nano katkısının premiks yanma fazını güçlendirerek yanma sürecini hızlandırdığını, ancak yüksek katkı oranlarında artan partikül yoğunluğuna bağlı olarak yanma etkinliğinin doygunluğa ulaştığını göstermektedir.

5.1.5. Yakıt tüketimi ve özgül yakıt tüketimi (SFC)

Test Yakıtlarının Özgül Yakıt Tüketimi (kg/kWh) ile Ortalama Efektif Basıncı (OEB) değişimi Şekil 23'te grafiksel olarak verilmiştir. Motor yükü arttıkça (0.3 bar'dan 3 bar'a çıktıkça), motorun daha fazla güç üretmek için doğal olarak daha fazla yakıt tükettiği görülmektedir. Bu beklenen bir fiziksel sonuçtur.

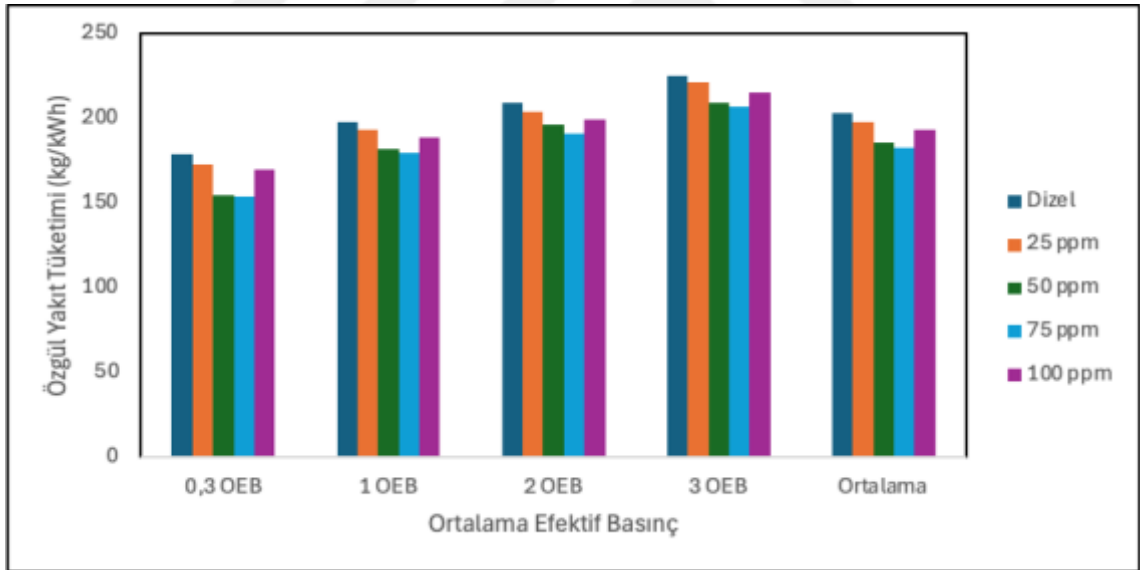
Yakıt tüketimi:

- Deneysel olarak ölçülen yakıt akış miktarıdır.
g/h veya kg/h birimleriyle ifade edilir.

Özgül yakıt tüketimi (Specific Fuel Consumption, SFC):

- Birim güç başına yakıt tüketimidir
- Birimi: kg/kWh.
- Motorun enerji verimliliğini gösterir: düşük SFC → daha yüksek verim.

Şekil 5.17’de, saf dizel yakıt ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren yakıtlar için farklı ortalama efektif basınç (OEB) koşullarında özgül yakıt tüketimi (ÖYT) değerleri sunulmaktadır. Tüm yakıtlar için yük artışına bağlı olarak özgül yakıt tüketiminin arttığı görülmektedir. Saf dizel yakıt için özgül yakıt tüketimi 0,3 OEB koşulunda daha düşük seviyelerde iken, en yüksek değerler 3 OEB koşulunda elde edilmiştir. Grafen nano katkısının ilavesiyle birlikte özgül yakıt tüketimi değerlerinde genel olarak azalma eğilimi gözlenmiştir. Özellikle 50 ve 75 ppm grafen katkı oranlarında, tüm yük koşullarında saf dizel yakıta kıyasla daha düşük özgül yakıt tüketimi değerleri elde edilmiştir. Ortalama özgül yakıt tüketimi açısından en düşük değer 75 ppm grafen katkı oranında belirlenirken, 100 ppm katkı oranında ise özgül yakıt tüketimindeki iyileşmenin sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar, grafen nano katkısının yanma verimini artırarak yakıtın daha etkin kullanılmasını sağladığını, ancak yüksek katkı oranlarında bu etkinin doygunluğa ulaştığını göstermektedir.



Şekil 5. 17: Test yakıtlarının özgül yakıt tüketimi (kg/kwh) ile ortalama efektif basıncı (OEB) değişimi

Literatürde de benzer eğilimler rapor edilmiştir: Canakci ve Hosoz (2006), oksijenli yakıt katkılarında orta seviyelerde SFC’nin düştüğünü, fakat yüksek oranlarda yeniden arttığını belirtmektedir. Sivalakshmi ve Balusamy (2013) ise katkının yanmayı

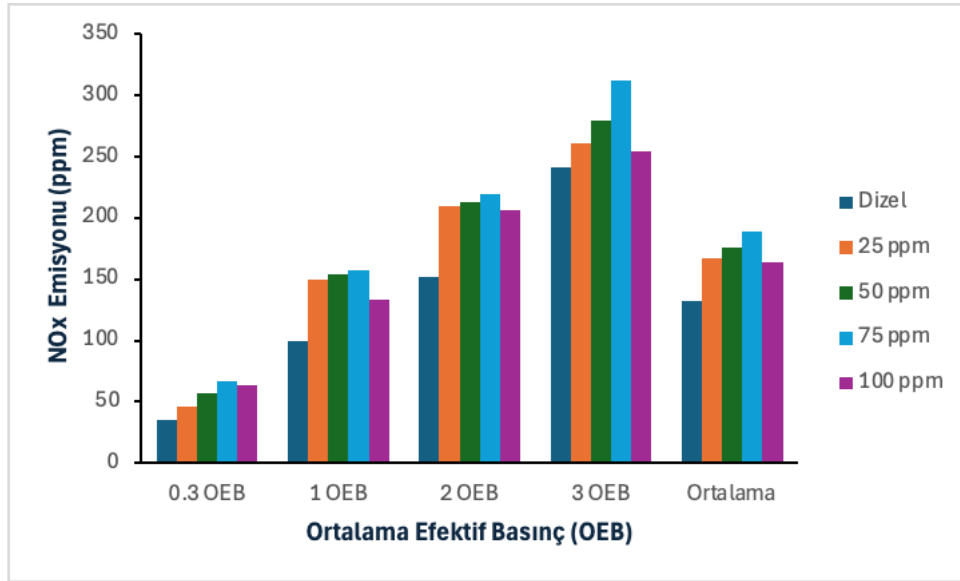
iyileştirip düşük dozlarda verimi artırabileceğini, ancak fazla miktarda katkının olumsuz etkiler yaratabileceğini göstermiştir.

5.2. Test Yakıtlarının Emisyon Analizleri

5.2.1. Azot oksitler (NO_x) (ppm)

Deneylerde NO_x emisyonları, egzoz gazı analizörü kullanılarak ppm cinsinden ölçülmüş, Şekil 24'te de sonuçlar gösterilmiştir. NO_x oluşumu esas olarak, silindir içi maksimum yanma sıcaklığı, mevcut oksijen miktarı ve yanma süresinin uzunluğu ile ilişkilidir (Heywood, 2018). Katkılı ve katkısız yakıt koşulları karşılaştırılarak her yükte ölçülen NO_x değerleri değerlendirilmiştir.

Şekil 5.18'de, saf dizel yakıt ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren yakıtlar için farklı ortalama efektif basınç (OEB) koşullarında NO_x emisyonu değerleri sunulmaktadır. Tüm yakıtlar için yük artışına bağlı olarak NO_x emisyonlarının arttığı görülmektedir. Saf dizel yakıt için en yüksek NO_x emisyonu 3 OEB koşulunda elde edilmiştir. Grafen nano katkısının ilavesiyle birlikte NO_x emisyonlarında katkı oranına bağlı değişimler gözlenmiştir. Düşük ve orta katkı oranlarında (25 ve 50 ppm) NO_x emisyonlarının saf dizel yakıtla kıyasla genel olarak arttığı, özellikle 0,3–2 OEB aralığında bu artışın daha belirgin olduğu görülmektedir. 75 ppm grafen katkı oranında NO_x emisyonlarının tüm yük koşullarında artış gösterdiği, 100 ppm katkı oranında ise NO_x emisyonlarının saf dizel yakıtla yakın seviyelerde gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, grafen nano katkısının yanma sürecini hızlandırarak silindir içi sıcaklık dağılımını etkilemesi ve oksidasyon koşullarını değiştirmesiyle NO_x oluşumuna katkı oranına bağlı olarak artırabildiğini göstermektedir.



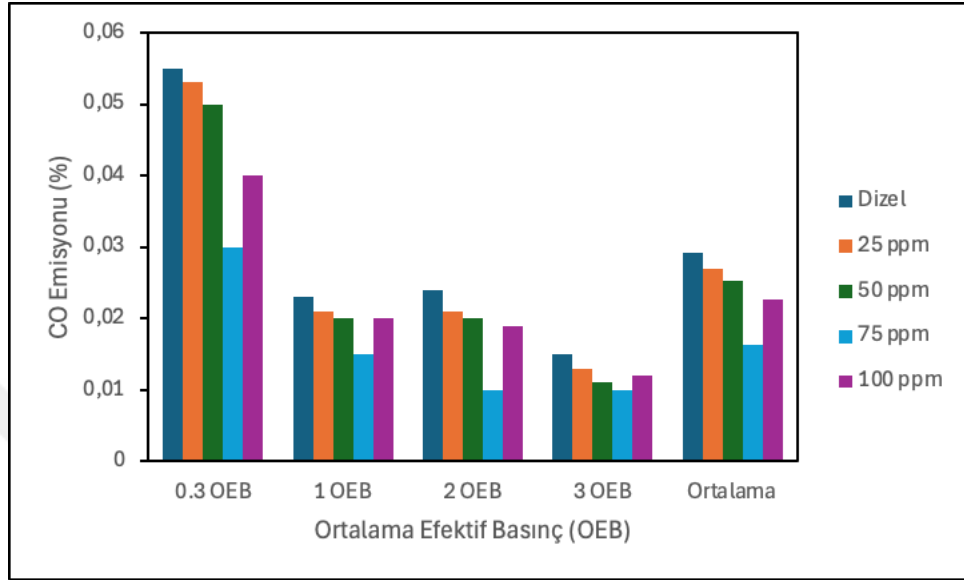
Şekil 5. 18: NOx emisyon analizi

5.2.2. Karbonmonoksit (CO) (%)

CO emisyonları, egzoz gazı analizörü ile ölçülmüş ve % hacimsel konsantrasyon olarak kaydedilmiş, Şekil 24'te de grafiksel olarak verilmiştir. CO oluşumu, yanmanın eksik gerçekleşmesi sonucu yakıtın tam olarak oksitlenememesinden kaynaklanır. Dolayısıyla, CO emisyonları esas olarak yanma sıcaklığı, oksijen mevcudiyeti ve yanma süresinin yeterliliği ile ilişkilidir (Heywood, 2018).

Şekil 5.19'da, saf dizel yakıt ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren yakıtlar için farklı ortalama efektif basınç (OEB) koşullarında CO emisyonu değerleri sunulmaktadır. Tüm yakıtlar için yük artışına bağlı olarak CO emisyonlarının genel olarak azaldığı görülmektedir. Saf dizel yakıt için en yüksek CO emisyonu 0,3 OEB koşulunda ölçülürken, en düşük değerler 3 OEB koşulunda elde edilmiştir. Grafen nano katkısının ilavesiyle birlikte CO emisyonlarında belirgin azalmalar gözlenmiştir. Özellikle 0,3 OEB koşulunda saf dizel yakıt için CO emisyonu yaklaşık %0,055 seviyesinde iken, 75 ppm grafen katkısı ile bu değer yaklaşık %0,030 seviyesine düşmüştür. Benzer şekilde 3 OEB koşulunda, saf dizel yakıt için CO emisyonu yaklaşık %0,015 olarak ölçülürken, 75 ppm grafen katkısı ile bu değer yaklaşık %0,010 seviyesine gerilemiştir. Ortalama CO emisyonu açısından değerlendirildiğinde, en düşük değerlerin 75 ppm grafen katkı oranında elde edildiği, 100 ppm katkı oranında ise

CO emisyonlarındaki azalmanın sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar, grafen nano katkısının yanma sürecini iyileştirerek eksik yanmayı azalttığını, ancak yüksek katkı oranlarında oksidasyon etkinliğinin doygunluğa ulaştığını göstermektedir.



Şekil 5. 19: CO emisyon analiz grafiği

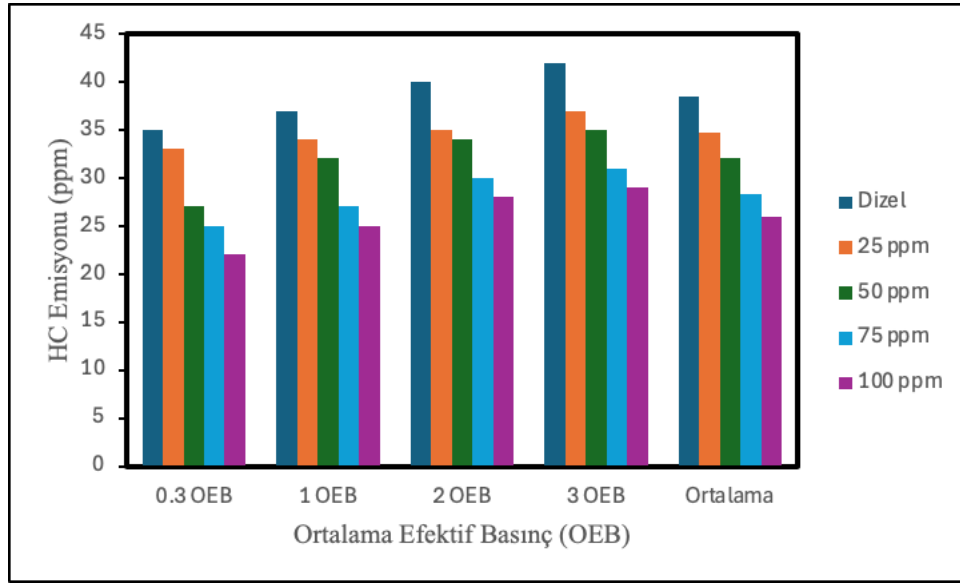
Karbonmonoksit (CO) emisyonları, yanma verimliliğinin en önemli göstergelerinden biridir. CO oluşumu, yetersiz oksijen veya düşük yanma sıcaklığı nedeniyle karbonun tamamen oksitlenerek CO₂'ye dönüşmemesi durumunda gerçekleşir.

Elde edilen deneysel verileri 4 farklı yük koşulu (0.3, 1, 2, 3 OEB) için analiz ettiğimizde şu sonuçlar ortaya çıkmaktadır:

Tez literatüründe oksijenli ve karbon-bazlı nano katkıların CO'yu %20–%35 aralığında azaltabildiği bildirilmiş olup (Norhafana ve ark.; Kallioğlu ve ark.; Hoseini ve ark.), elde edilen 0.3 ve 2 bar sonuçları bu çalışmalara nicel olarak uyumludur (ör. 100 ppm'de –%40; 2 bar-50 ppm'de –%50). Öte yandan 75 ppm'de gözlenen CO artışı, literatürde de bildirilen doz-bağımlı ters etki mekanizmaları (agglomerasyon, enjeksiyon/atomizasyon bozulması, yanmanın geç faza kayması) ile tutarlı şekilde yorumlanabilir; bu nedenle optimum katkı aralığı (25–50 ppm) önerilmektedir.

5.2.3. Hidrokarbon (HC) (ppm)

Hidrokarbon (HC) emisyonları, yakıtın silindir içinde tam olarak yanmaması (eksik yanma) sonucunda egzozdan atılan yanmamış yakıt bileşenleridir. HC emisyonlarının azalması, yanma verimliliğinin arttığını ve yakıtın daha iyi oksitlendiğini gösterir. Şekil 5.20’de, saf dizel yakıt ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren yakıtlar için farklı ortalama efektif basınç (OEB) koşullarında HC emisyonu değerleri sunulmaktadır. Tüm yakıtlar için yük artışına bağlı olarak HC emisyonlarının genel olarak arttığı görülmektedir. Saf dizel yakıt için en yüksek HC emisyonu 3 OEB koşulunda ölçülürken, daha düşük değerler düşük yük koşullarında elde edilmiştir. Grafen nano katkısının ilavesiyle birlikte HC emisyonlarında belirgin azalmalar gözlenmiştir. Özellikle 0,3 OEB koşulunda saf dizel yakıt için HC emisyonu yaklaşık 35 ppm seviyesinde iken, 75 ppm grafen katkısı ile bu değer yaklaşık 25 ppm seviyesine düşmüştür. Benzer şekilde 3 OEB koşulunda, saf dizel yakıt için HC emisyonu yaklaşık 42 ppm olarak ölçülürken, 75 ppm grafen katkısı ile bu değer yaklaşık 31 ppm seviyesine gerilemiştir. Ortalama HC emisyonu açısından değerlendirildiğinde, en düşük değerlerin 100 ppm grafen katkı oranında elde edildiği, ancak 75 ppm katkı oranının tüm yük koşullarında daha dengeli bir azalma sağladığı görülmüştür. Bu sonuçlar, grafen nano katkısının yanma sürecini iyileştirerek yanmamış hidrokarbon oluşumunu azalttığını göstermektedir.

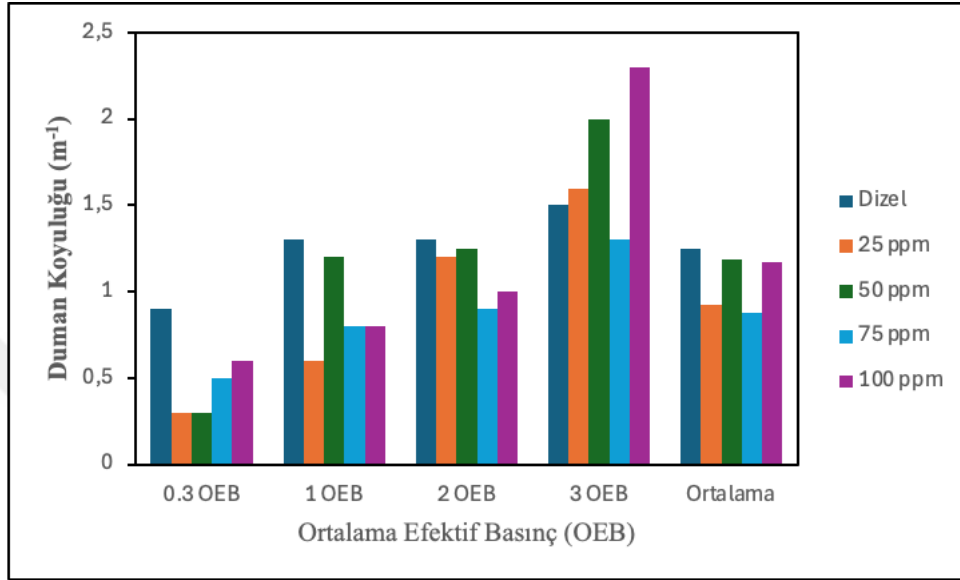


Şekil 5. 20: HC emisyon analizi grafiği

5.2.4. Duman koyuluğu (%)

Duman Koyuluğu (Smoke Opacity), dizel motorlarda egzoz gazının ne kadar "kirli" veya partikül madde yüklü olduğunu göstermektedir. Düşük değerler daha temiz yanma ve daha az kurum oluşumu anlamına gelmektedir. Şekil 5.21'de, saf dizel yakıt ve farklı oranlarda grafen nano katkısı içeren yakıtlar için farklı ortalama efektif basınç (OEB) koşullarında duman koyuluğu değerleri sunulmaktadır. Tüm yakıtlar için yük artışına bağlı olarak duman koyuluğunun genel olarak arttığı görülmektedir. Saf dizel yakıt için en yüksek duman koyuluğu değeri 3 OEB koşulunda ölçülmüştür. Grafen nano katkısının ilavesiyle birlikte duman koyuluğu değerlerinde katkı oranına bağlı belirgin değişimler gözlenmiştir. Özellikle 0,3 OEB koşulunda saf dizel yakıt için duman koyuluğu yaklaşık $0,9 \text{ m}^{-1}$ seviyesinde iken, 25 ve 50 ppm grafen katkısı ile bu değer yaklaşık $0,3 \text{ m}^{-1}$ seviyelerine düşmüştür. Düşük ve orta yük koşullarında (0,3–2 OEB), 25 ve 50 ppm grafen katkı oranlarının duman koyuluğunu azalttığı görülmektedir. Buna karşılık, yüksek yük koşulunda (3 OEB) ve yüksek katkı oranlarında (75 ve 100 ppm), duman koyuluğunun arttığı belirlenmiştir. Örneğin, 3 OEB koşulunda 75 ppm grafen katkısı için duman koyuluğu yaklaşık $2,0 \text{ m}^{-1}$ seviyesinde ölçülürken, 100 ppm katkı oranında bu değer yaklaşık $2,3 \text{ m}^{-1}$ seviyesine ulaşmıştır. Ortalama değerler dikkate alındığında, en düşük duman koyuluğunun 25–50 ppm grafen katkı oranlarında elde edildiği görülmüştür. Bu sonuçlar, grafen nano

katkısının düşük ve orta katkı oranlarında kurum oluşumunu azalttığını, ancak yüksek katkı oranlarında ve yüksek yük koşullarında yakıt–hava karışımının olumsuz etkilenmesiyle kurum oluşumunun artabildiğini göstermektedir.



Şekil 5. 21: Duman koyuluğu

Emisyon analizleri, grafen nano katkısının dizel motor emisyon karakteristikleri üzerinde belirgin ve katkı oranına bağlı etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Grafen katkısı ile özgül yakıt tüketimi, CO ve HC emisyonlarında genel olarak azalma eğilimi gözlenmiş; bu azalmanın özellikle 50 ve 75 ppm katkı oranlarında tüm yük koşullarında daha belirgin olduğu belirlenmiştir. NO_x emisyonları yüklerle birlikte artış göstermesine rağmen, düşük ve orta katkı oranlarında saf dizel yakıtla kıyasla sınırlı seviyelerde gerçekleşmiş; yüksek katkı oranlarında ise katkı–yük etkileşimine bağlı değişimler ortaya çıkmıştır. Duman koyuluğu sonuçları, düşük ve orta yük koşullarında grafen katkısının kurum oluşumunu azalttığını, yüksek yük ve yüksek katkı oranlarında ise bu etkinin tersine dönebileceğini göstermiştir. Tüm emisyon parametreleri birlikte değerlendirildiğinde, 75 ppm grafen katkı oranının, özgül yakıt tüketiminde sağladığı iyileşme ile birlikte CO ve HC emisyonlarını belirgin şekilde azaltması, NO_x emisyonlarını kabul edilebilir seviyelerde tutması ve düşük–orta yük koşullarında duman koyuluğunu sınırlandırması nedeniyle en dengeli ve optimum katkı oranı olduğu

sonucuna varılmıştır. Daha yüksek katkı oranlarında ise emisyon iyileşmelerinin sınırlı kaldığı ve bazı parametrelerde olumsuz eğilimlerin ortaya çıktığı belirlenmiştir.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada dizel motor yakıtına farklı oranlarda (0, 25, 50, 75 ve 100 ppm) grafen katkısı uygulanmış ve motor performansı ile egzoz emisyonları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel bulgular şu şekilde özetlenebilir:

Motor Performansı:

Tüm yük koşulları altında elde edilen silindir basıncı, net ısı salınımı, basınç artış oranı ve kümülatif ısı salınımı sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, GO katkı oranının yanma karakteristikleri üzerinde belirgin bir etkisi olduğu görülmüştür.

25 ppm ve 50 ppm GO katkıları yanma sürecini iyileştirirken, 75 ppm katkı oranı maksimum yanma değerleri açısından en uygun seviye olarak belirlenmiştir. Bu katkı oranında, net ısı salınımı ve basınç artış oranı maksimum değerlere ulaşmış, yanma daha hızlı ve etkin bir şekilde gerçekleşmiştir.

Buna karşılık, 100 ppm katkı oranında yanma parametrelerinde belirgin bir artış sağlanamamış; bazı durumlarda yanma şiddetinin azaldığı gözlenmiştir. Bu durum, yüksek nano katkı oranlarında ortaya çıkan GO nano maddesinin iç yapısı ile ilişkilendirilebilir.

0,3 bar OEB koşulunda yapılan değerlendirmelerde, grafen nano katkısının yanma karakteristiklerini olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir. Bu yük koşulunda, özellikle 50 ve 75 ppm grafen katkı oranlarında silindir içi basınç, net ve kümülatif ısı salınımı değerlerinde artış gözlenmiş; buna paralel olarak özgül yakıt tüketimi, CO, HC ve duman koyuluğu emisyonlarında belirgin azalmalar elde edilmiştir. Düşük yük koşulunda grafen katkısının premiks yanma fazını güçlendirdiği ve yanma verimini artırdığı sonucuna varılmıştır.

1 bar OEB koşulunda, grafen nano katkısının yanma süreci üzerindeki etkilerinin daha belirgin hâle geldiği görülmüştür. Bu yük seviyesinde 75 ppm grafen katkı oranı, maksimum silindir basıncı ve basınç artış oranı açısından en yüksek iyileşmeleri sağlamış; özgül yakıt tüketimi ve CO ile HC emisyonlarında en düşük değerler bu katkı oranında elde edilmiştir. NO_x emisyonları açısından ise grafen katkısının saf dizel yakıtla kıyasla kabul edilebilir artış seviyesinde kaldığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, orta

yük koşulunda grafen katkısının motor performansı ve emisyonlar arasında dengeli bir iyileşme sağladığını göstermektedir.

2 bar OEB koşulunda, artan yük ile birlikte yanma parametrelerinde genel bir artış eğilimi gözlenmiştir; grafen nano katkısının bu artışı destekleyici yönde etkilediği belirlenmiştir. Özellikle 75 ppm grafen katkı oranında silindir içi basınç, net ve kümülatif ısı salınımı ile basınç artış oranı değerlerinde belirgin iyileşmeler elde edilmiştir. Aynı katkı oranında özgül yakıt tüketimi ile CO ve HC emisyonları en düşük seviyelerde gerçekleşmiştir. Duman koyuluğu açısından ise düşük ve orta katkı oranlarının daha avantajlı olduğu, yüksek katkı oranlarında kurum oluşumunun artabildiği görülmüştür.

3 bar OEB koşulunda, yüksek yük etkisiyle birlikte yanma şiddetinin arttığı ve grafen nano katkısının etkilerinin daha hassas hâle geldiği belirlenmiştir. Bu koşulda 75 ppm grafen katkı oranı, performans ve özgül yakıt tüketimi açısından avantaj sağlamaya devam etmiş; ancak NO_x ve duman koyuluğu emisyonlarında yüksek katkı oranlarında artış eğilimleri gözlenmiştir. Bu durum, yüksek yük ve yüksek katkı oranlarında yanma sıcaklığının artması ve yakıt-hava karışımının olumsuz etkilenmesi ile ilişkilendirilmiştir. Buna rağmen, tüm parametreler birlikte değerlendirildiğinde 75 ppm katkı oranının yüksek yük koşulunda dahi dengeli bir performans-emisyon karakteristiği sunduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, tüm yük koşulları birlikte değerlendirildiğinde 75 ppm grafen nano katkı oranının performans, yanma ve emisyon parametreleri açısından en uygun ve optimum katkı oranı olduğu belirlenmiştir.

6.2. Öneriler

Motor performansı ve emisyon parametreleri birlikte değerlendirildiğinde, grafen katkısının optimum seviyesinin 75 ppm aralığında olduğu görülmektedir. Duman koyuluğu sonuçları, katkının motor yüküne bağlı olarak farklı etkiler gösterebileceğini ortaya koymuştur. Bu nedenle katkının farklı motor yükleri ve çalışma koşullarındaki davranışı daha ayrıntılı incelenmesi önerilmektedir. Katkının yanma süresini uzattığı gözlemlenmiştir. Gelecekteki çalışmalarda katkı miktarının yanı sıra enjeksiyon avansı ve püskürtme parametrelerinin de optimize edilmesi önerilmektedir. Katkının uzun süreli kullanımının motor bileşenleri (enjeksiyon sistemi, piston, segmanlar) üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmalıdır.

7. KAYNAKLAR

- Abraham, B. C., & Kuriakose, S. (2020). *Biodiesel mixtures with additives as alternative fuels for direct injection diesel engine*. AIP Conference Proceedings, 2263(1).
- Alcantara, R., Amores, J., Canoira, L., Fidalgo, E., Franco, M. J., & Navarro, A. (2000). Catalytic production of biodiesel from soybean oil, used frying oil, and tallow. *Biomass and Bioenergy*, 18, 515–527.
- Arul Mozhi Selvan, V., Anand, R. B., & Udayakumar, M. (2014). Effect of cerium oxide nanoparticles and carbon nanotubes as fuel-borne additives. *Fuel*, 130, 160–167.
- Avcı, A. S., Ercan, U., & Kallioğlu, M. A. (2025). Multi-metal oxide (ZnO. 5MnO. 5Fe₂O₄) nanoparticle additives in biodiesel–n-butanol blends: impact on diesel engine performance and emissions. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-28.
- Beggs, R. E. (2001). *Renewable oil fuels and diesel engines as components of sustainable system design (Master's thesis)*. University of Waterloo.
- Behçet, R., Oktay, H., Çakmak, A., & Aydın, H. (2015). Comparison of exhaust emissions of biodiesel-diesel fuel blends produced from animal fats. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46, 157–165.
- Bhagwat, V. A., Pawar, C., & Banapurmath, N. R. (2015). Graphene nanoparticle-biodiesel blended diesel engine. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 4(2).
- Bhattacharyya, S. (2000). Optimizing an irreversible Diesel cycle—fine tuning of compression ratio and cut-off ratio. *Energy Conversion and Management*, 41(8), 847–854.
- Balandin, A. A., Ghosh, S., Bao, W., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Miao, F., & Lau, C. N. (2008). Extremely high thermal conductivity of graphene: *Experimental study*. *Nano Letters*, 8(3), 902.
- Ballesteros, E., Arnal, J. M., Gomez, J., & Lopez, F. J. → (Dorado et al., 2003 entry duplicates listed separately)
- Çakmak, A. (2022). Improvement of exhaust emissions in a diesel engine with the addition of an oxygenated additive to diesel-biodiesel blends. *Energetika*, 68, 79–90.
- Chapra, Steven C., ve Raymond P. Canale. 2010. *Numerical methods for engineers*. Boston: McGraw-Hill Higher Education.

- Çanakcı, M., & Gerpen, J. H. V. (2001). *Comparison of engine performance and emissions for petroleum diesel fuel, yellow grease biodiesel, and soybean oil biodiesel*. ASAE Meeting.
- Canakci, M., & Hosoz, M. (2006). Energy and exergy analyses of a diesel engine fuelled with various biodiesels. *Energy Sources, Part B*, 1(4), 379–394.
- Chauvin, J., Albrecht, A., Corde, G., & Petit, N. (2007). *Modeling and control of a Diesel HCCI engine*. IFAC Proceedings.
- Chen, H., Su, X., He, J., & Xie, B. (2019). Investigation on combustion and emission characteristics of diesel/npentanol/methanol blends. *Energy*, 167, 297–311.
- Chen, L., Wei, H., Pan, J., Liu, C., & Shu, G. (2020). Autoignition and knock correlation via optical engines. *Fuel*, 261, 116405.
- Cheng, S. X. (2008). *Modeling injection and ignition in direct injection natural gas engines (Doctoral dissertation)*.
- Cheng, Y., Zhou, S., Hu, P., Zhao, G., Li, Y., Zhang, X., & Han, W. (2017). Enhanced mechanical, thermal, and electric properties of graphene aerogels via supercritical ethanol drying and high-temperature thermal reduction. *Scientific reports*, 7(1), 1439.
- Choi, C. Y., & Reitz, R. D. (1999). Effects of oxygenated fuel blends and injection strategies. *Fuel*, 78, 1303–1313.
- Çılğın, E. (2015). Algal third-gen biofuels in diesel engines. *Iğdır Univ. J. Sci.*, 5, 33–41.
- Çılğın, E. (2021). Essential oils as biodiesel source. *Gümüşhane Univ. J. Sci.*, 11(2), 573–585.
- Çılğın, E., & Deviren, H. (2024). Spectroscopic verification of biodiesel synthesis from turpentine oil. *Energy Sources A*, 46(1), 35–53.
- Crabbe, E., Nolasco-Hipolito, C., Kobayashi, G., Sonomoto, K., & Ishizki, A. (2001). Biodiesel from crude palm oil. *Process Biochemistry*, 37, 65–71.
- Curran, H. J., Fisher, E. M., Glaude, P. A., Marinov, N. M., Pitz, W. J., & Westbrook, C. K. (2001). *Chemical kinetic modelling of diesel combustion with oxygenated fuels*. SAE Paper 2001-01-0653.
- Datta, A., & Mandal, B. K. (2016). *Effect of compression ratio on diesel engine using palm biodiesel*. AIP Conf. Proc., 1754, 050005.
- Das Akkur Neele Gowda, M., et al. (2024). Graphene nanoparticles + Moringa methyl ester. *Journal of Engineering and Applied Science*, 71(1), 166.

- Decker, E. A., Alamed, J., & Castro, I. A. (2010). Polar components & oxidative stability. *JAOCS*, 87, 771–780.
- Demir, U., Çelebi, S., & Özer, S. (2024). Graphene + HHO + fuel oil additives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 52, 1434–1446.
- Devaraj, A., Nagappan, M., & Yogaraj, D. (2021). Higher alcohol–biodiesel blends emission pattern. *Materials Today: Proceedings*, 37, 1876–1879.
- Devarajan, Yuvarajan, Beemkumar Nagappan, ve Ganesan Subbiah. 2019. “A comprehensive study on emission and performance characteristics of a diesel engine fueled with nanoparticle-blended biodiesel”. *Environmental Science and Pollution Research* 26:10662-72.
- Dorado, M. P., Ballesteros, E., Arnal, J. M., Gomez, J., & Lopez, F. J. (2003). Emissions from waste olive oil biodiesel. *Fuel*, 82, 1311–1315.
- Dörtoğul, C. (2018). *Synthesis of graphene oxide (Master’s thesis)*. Selçuk University.
- El-Seesy, A. I., & Hassan, H. (2019). n-butanol–Jatropha–graphene oxide additives. *Renewable Energy*, 132, 558–574.
- El-Seesy, A. I., Hassan, H., & Ookawara, S. (2018). Jatropha methyl ester + GO additives. *Energy Conversion and Management*, 166, 674–686.
- Elwardany, A. E., et al. (2020). Ferrocene nanoparticles for diesel-biodiesel blend. *Fuel*, 270, 117574.
- Fenimore, C. P. (1975). NO₂/NO ratio in lean flames. *Combustion and Flame*, 25, 85–90.
- Fidan, M. S., & Alkan, E. (2014). Plant-based biodiesel as energy source. *Gümüşhane Univ. J. Sci.*, 4(2), 144–160.
- Firat, M., Okcu, M., & Varol, Y. (2017). Hydrogen in diesel engines. *Firat Univ. Eng. Sci. J.*, 29(1), 101–107.
- Ferrari, A. C. (2006). *Raman spectrum of graphene*. *PRL*, 97, 187401.
- Fukuda, H., Kondo, A., & Noda, H. (2001). Review—Biodiesel via transesterification. *JBB*, 92(5), 405–416.
- Gharehghani, A., et al. (2019). Water + nanoparticles for CO/NO_x reduction. *Journal of Cleaner Production*, 210, 1164–1170.
- Gregory, D., et al. (2016). *Air pollution solutions in the UK*. London Forum for Science and Policy.
- Haşimoğlu, C., Civiniz, M., & Gürol, U. (2006). Hydrogen use in IC engines. *Selçuk Technical Journal*, 1(1).

- Hartavi, A. E., Göl, M., & Akyüz, B. (2014). *Electric bus driving range parameters*. ICAT'14.
- Hazar, H., Uyar, M., Aydın, H., & Şap, E. (2016). Apricot seed oil biodiesel additives. *IJAET*, 5, 102–114.
- Heywood, J. B. (1988 / 2018). *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill.
- Heeb, N. V., Zennegg, M., Haag, R., Seiler, R., Schmid, P., Wichser, A., ... & Mayer, A. (2011, June). Parameters affecting the dioxin formation in diesel particle filters. In *Proceeding of 15th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles, Zurich*.
- Holman, Jack Philip. 2021. “*Experimental Methods for Engineers, Eighth Edition*”.
- Hoseini, S. S., Najafi, G., Ghobadian, B., Mamat, R., Ebadi, M. T., & Yusaf, T. (2018). Novel environmentally friendly fuel: The effects of nanographene oxide additives on the performance and emission characteristics of diesel engines fuelled with *Ailanthus altissima* biodiesel. *Renewable energy*, 125, 283-294.
- Hoseini, S. S., Najafi, G., Ghobadian, B., Ebadi, M. T., Mamat, R., & Yusaf, T. J. R. E. (2020). Performance and emission characteristics of a CI engine using graphene oxide (GO) nano-particles additives in biodiesel-diesel blends. *Renewable Energy*, 145, 458-465.
- Hoseini, S. S., Najafi, G., Ghobadian, B., Ebadi, M. T., Mamat, R., & Yusaf, T. J. R. E. (2020). Biodiesels from three feedstock: The effect of graphene oxide (GO) nanoparticles diesel engine parameters fuelled with biodiesel. *Renewable energy*, 145, 190-201.
- Hwang, E. H., Adam, S., & Das Sarma, S. (2007). *Carrier transport in graphene*. PRL, 98, 186806.
- Imdadul, H. K., et al. (2016). Ignition improver in ternary blends. *Energy Conversion and Management*, 123, 252–264.
- Jamali, Q. B., Bhatti, M. T., Qazi, Q. A., Kaurejo, B. H., Qazi, I. A., Solangi, S. H., & Jamali, A. S. (2019). Analysis of CO₂, CO, NO, NO₂, and PM particulates of a diesel engine exhaust. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 9(6), 4912-4916.
- Javad, F., Dennis, A., & Gordon, G. W. (2016). *Post-spinning effects on graphene fibers*. RSC Advances, 6.
- Kallioğlu, M. A., Ercan, U., & Avcı, A. S. (2025). Effects of eurodiesel fuels with multi-element oxide nanoparticles (Zn_{0.5}Mn_{0.5}Fe₂O₄) on diesel engines investigated through RSM. *Biofuels*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1080/17597269.2025.2480501>

- Karabulut, K., Buyruk, E., & Kılınç, F. (2018). GO nanofluid heat transfer. *Mühendis ve Makina*, 59(690), 45–67.
- Karagöz, Y., Sandalcı, T., Yüksek, L., Dalkılıç, A. S., & Wongwises, S. (2016). Effect of hydrogen–diesel dual-fuel usage on performance, emissions and diesel combustion in diesel engines. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(8), 1687814016664458.
- Katsnelson, M. I., & Novoselov, K. S. (2007). Graphene & QED. *Solid State Communications*, 143, 3–13.
- Lipsch, B. A. M., Besselink, I. J. M., van Oorschot, P. F., & Nijmeijer, H. (2012). A comparison of the battery electric TU/e Lupo EL and VW Lupo 3L diesel. In *EEVC European Electric Vehicle Congress, November 19-22, 2012, Brussels, Belgium* (pp. 1-12).
- Lloyd's Register of Shipping. (2002). *Emissions of NOx from marine diesel engines*.
- Luo, Y., Xu, X., Zou, J. J., & Zhang, X. (2016). Combustion with nano-Al additives. *JPP*, 32, 1167–1177.
- McDonald, D. (2012). *EV drive simulation with MATLAB/Simulink*.
- de Menezes, L. C., de Sousa, E. R., da Silva, G. S., Marques, A. L. B., Viegas, H. D. C., & Dos Santos, M. J. C. (2022). Investigations on storage and oxidative stability of biodiesel from different feedstocks using the Rancimat method, infrared spectroscopy, and chemometry. *ACS omega*, 7(35), 30746-30755.
- Mishra, V. K., & Goswami, R. (2018). Biodiesel review. *Biofuels*, 9, 273–289.
- Murugesan, E., Dhairiyasamy, R., Dixit, S., & Singh, S. (2025). The impact of nanoparticle-diesel blends on fuel properties, combustion efficiency, and emissions. *Case Studies in Thermal Engineering*, 69, 106070.
- Norhafana, M., Noor, M. M., Hairuddin, A. A., Harikrishnan, S., Kadirgama, K., & Ramasamy, D. (2020). The effects of nano-additives on exhaust emissions and toxicity on mankind. *Materials Today: Proceedings*, 22, 1181-1185.
- Noorollahi, Y., Asli-Ardeh, E. A., Jahanbakhshi, A., Khodayari, A., & Gorjian, S. (2025). Evaluation of emissions and performance of a diesel engine running on graphene nanopowder and diesel–biodiesel-ethanol blends. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(3), 1466-1479.
- Ozgur, T., Tuccar, G., Uludamar, E., Yilmaz, A. C., Güngör, C., Ozcanli, M., ... & Aydin, K. (2015). Effect of nanoparticle additives on NOx emissions of diesel fuelled compression ignition engine. *International Journal of Global Warming*, 7(4), 487-498.
- Parash, S. M., Kalam, M. A., & Masjuki, H. H. (2013). Biodiesel combustion & NOx. *RSER*, 23, 473–490.

- Pielecha, I., Wisłocki, K., Cieřlik, W., Bueschke, W., Skowron, M., & Fiedkiewicz, Ł. (2018). Application of IMEP and MBF50 indexes for controlling combustion in dual-fuel reciprocating engine. *Applied Thermal Engineering*, 132, 188-195.
- Pietronero, L., Strässler, S., Zeller, H. R., & Rice, M. J. (1980). Electrical conductivity of a graphite layer. *Physical Review B*, 22(2), 904.
- Pulkrabek, W. W. (2004). *Engineering fundamentals of the internal combustion engine* (2nd ed.).
- Rakopoulos, C. D., Hountalas, D. T., Zannis, T. C., & Levendis, Y. A. (2004). Operational and environmental evaluation of diesel engines burning oxygen-enriched intake air or oxygen-enriched fuels: a review. *SAE transactions*, 1723-1743.
- Rice, W. J. (1978). *Indicated mean-effective pressure instrument*. NASA.
- Rusev, D. P., Kazakov, P. P., Iliev, A. L., & Dimitrov, M. S. (2021). *Use of bio additives in diesel engine fuels*. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1031, No. 1, p. 012014). IOP Publishing.
- Samli, E., & Lucena, D. (2011). *EV & HEV technology survey*.
- Sambandam, P., Punitha, N., Vijetha, K., Baskar, S., Shamprasshaath, S. V., Seikh, A. H., ... & Sharma, A. (2024). Effect of graphite nanoadditives on the behavior of a diesel engine fueled with pyrolysis fuel recovered from used plastics. *ACS omega*, 9(38), 39584-39595.
- Seykens, X. (2010). *Phenomenological diesel combustion model* (PhD thesis).
- Sharma, V., Kalam, A., Ahmed, A., & Rezk, A. (2022). Study on using graphene and graphite nanoparticles as fuel additives in waste cooking oil biodiesel. *Fuel*, 328 (June), 125270.
- Sipahier, A. N. (1990). *Used frying oil as diesel fuel* (Master's thesis).
- Sivalakshmi, S., & Balusamy, T. (2013). Biodiesel + diethyl ether blends. *Fuel*, 106, 106–110.
- Stone, R. (1999). *Introduction to internal combustion engines* (3rd ed.). SAE.
- Tyson, K. S. (2001). *Biodiesel Handling and Use Guidelines*. NREL.
- Ulukardeşler, A. (2012). *Alg biofuel potential in Turkey*.
- Uslu, Samet, Suleyman Simsek, ve Hatice Simsek. 2023. "RSM modeling of different amounts of nano-TiO₂ supplementation to a diesel engine running with hemp seed oil biodiesel/diesel fuel blends". *Energy* 266:126439.

- Way, P., Viswanathan, K., & Preethi, P. (2009). *SCR performance optimization*. SAE.
- Yadav, M., Karimi, M. N., & Yadav, A. K. (2023). GO nanoparticles in biodiesel. *Journal of Process Mechanical Engineering*.
- Tiyek, İ., Ersoy, M. S., Alma, M. H., Dönmez, U., Yıldırım, B., Salan, T., ... & Yıldız, K. (2016). Modifiye hummers yöntemiyle grafen oksit (GO) sentezi ve karakterizasyonu. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 4(2), 41-48.
- Zhang, F., Li, J., Yang, S., & Bi, Y. (2021). Inhibitory effect of antioxidants on biodiesel crystallization: Revealing the role of antioxidants. *Fuel*, 297, 120782.

