



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

YÜKSEK LİSANS

**NİKEL (III) OKSİT NANOPARÇACIK İLAVESİ İLE BİYODİZEL
VE N-BUTANOL YAKITLARININ DİZEL MOTOR PERFORMAN-
SINA VE EMİSYONLARINA ETKİSİ**

Seda Fahriye YAVAŞOĞLU

**Ocak-2026
BATMAN**

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

YÜKSEK LİSANS

**NİKEL (III) OKSİT NANOPARÇACIK İLAVESİ İLE BİYODİZEL
VE N-BUTANOL YAKITLARININ DİZEL MOTOR PERFORMAN-
SINA VE EMİSYONLARINA ETKİSİ**

Seda Fahriye YAVAŞOĞLU

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Ali Serkan AVCI**

Diğer Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali KALLIOĞLU

Dr. Öğr. Üyesi Cihad FİDAN

**Ocak-2026
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Seda Fahriye YAVAŞOĞLU tarafından hazırlanan “Nikel (III) Oksit Nanoparçacık İlavesi ile Biyodizel ve n-Butanol Yakıtlarının Dizel Motor Performansına ve Emisyonlarına Etkisi” adlı tez çalışması 07/01/2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yenilenebilir Enerji Sistemleri Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali KALLIOĞLU

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ali Serkan AVCI

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Cihad FİDAN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

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

ETİK BEYANI

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 beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Seda Fahriye YAVAŞOĞLU

07/01/2026

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

NİKEL (III) OKSİT NANOPARÇACIK İLAVESİ İLE BİYODİZEL VE N-BUTANOL YAKITLARININ DİZEL MOTOR PERFORMANSINA VE EMİSYONLARINA ETKİSİ

Seda Fahriye YAVAŞOĞLU

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Yenilenebilir Enerji Sistemleri Ana Bilim

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ali Serkan AVCI

2026, 98 Sayfa

Temiz ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyaç, dizel motorlarda çevresel etkileri azaltacak ve verimi artıracak alternatif yakıt arayışını hızlandırmıştır. Bu kapsamda biyodizel ve alkol bazlı yakıtlar ile nanoteknoloji tabanlı katkı maddeleri, dizel motorlar için umut verici seçenekler olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışma, biyodizel (B20) ve biyodizel-n-bütanol (B20But10) yakıt karışımlarına farklı oranlarda (25, 50, 75 ve 100 ppm) Nikel (III) oksit (Ni_2O_3) nanoparçacıkları eklenerek motor performansı, yanma ve egzoz emisyonlarının ayrıntılı bir şekilde incelenmesini amaçlamaktadır. Deneyler tek silindirli, dört zamanlı, su soğutmalı ve direkt enjeksiyonlu bir dizel motor üzerinde dört farklı yükte (0,3; 1,0; 2,0 ve 3,0 bar BMEP) gerçekleştirilmiştir. Yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri incelendiğinde Ni_2O_3 ilavesinin yoğunluk, kinematik viskozite ve setan indeksinde artışa, alt ısı değer ve parlama noktasında ise azalmaya yol açtığı belirlenmiştir. Sonuçlar, Ni_2O_3 katkısının atomizasyonu iyileştirerek premiks yanma fazını güçlendirdiğini, bunun sonucunda silindir içi maksimum basıncın B20’de 53,03 bar’dan 55,86 bar’a, B20But10’da ise 52,21 bar’dan 55,45 bar’a yükseldiğini göstermiştir. Benzer şekilde, maksimum HRR değerleri B20’de 29,45 J/°CA, B20But10’da 30,02 J/°CA seviyesine ulaşmıştır. Motor performansı açısından fren termal verimi (FTV) her iki yakıtta da yük arttıkça yükselmiş; tam yükte B20 için %23,96’dan %24,89’a, B20But10 için %23,89’dan %24,94’e çıkmıştır. Fren özgül yakıt tüketimi (FÖYT) ise sırasıyla 0,331’den 0,309 kg/kWh’e ve 0,348’den 0,333 kg/kWh’e düşmüştür. Emisyon analizlerinde CO, HC, NO_x ve duman değerlerinde anlamlı azalmalar elde edilirken, daha tamamlanmış yanma nedeniyle CO_2 emisyonlarında sınırlı bir artış gözlenmiştir. Özellikle butanol içeren B20But10 karışımlarında oksijen içeriğinin katkısı ve Ni_2O_3 ’ün katalitik etkisi bir araya gelerek CO ve HC emisyonlarında B20’ye kıyasla daha fazla iyileşme sağlamıştır. Çalışmada ayrıca Yanıt Yüzey Metodolojisi (YYM) kullanılarak motor performansı ve emisyonlar için ikinci dereceden regresyon modelleri geliştirilmiştir. Modeller yüksek doğruluk göstermiş ($R^2 = \%90,9 - \%99,9$) ve hata oranları %2–6 arasında kalmıştır. Oluşturulan beş farklı optimizasyon modeli, farklı işletme önceliklerini yansıtacak şekilde tasarlanmıştır. Örneğin dengeli yaklaşımda (Model 1) optimum noktalar B20 için 63 ppm ve 1,3 bar BMEP, B20But10 için 58 ppm ve 1,3 bar BMEP olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Motor performansı, yanma, emisyon, optimizasyon, Ni_2O_3

ABSTRACT

MASTER THESIS

THE EFFECT OF NICKEL (III) OXIDE NANOPARTICLE ADDITION ON THE PERFORMANCE AND EMISSIONS OF BIODIESEL AND N-BUTANOL FUELS IN A DIESEL ENGINE

Seda Fahriye YAVAŞOĞLU

Batman University Graduate Education Institute

Renewable Energy Department of Science

Advisor: Asst. Prof. Ali Serkan Avcı

2026, 98 Pages

The global demand for clean and sustainable energy sources has accelerated the search for alternative fuels that can improve the efficiency of diesel engines while reducing their environmental impact. In this context, biodiesel, alcohol-based fuels, and nanotechnology-driven fuel additives have emerged as promising solutions for cleaner combustion and higher performance. This study investigates the effects of adding Nickel (III) oxide (Ni_2O_3) nanoparticles at different concentrations (25, 50, 75, and 100 ppm) to biodiesel (B20) and biodiesel–n-butanol (B20But10) blends, with a comprehensive evaluation of engine performance, combustion behavior, and exhaust emissions. Experiments were carried out on a single-cylinder, four-stroke, water-cooled, direct injection (DI) diesel engine at four distinct load conditions (0.3, 1.0, 2.0, and 3.0 bar BMEP). Fuel characterization revealed that Ni_2O_3 addition increased density, kinematic viscosity, and cetane index, while reducing lower heating value and flash point. Combustion analysis showed that Ni_2O_3 enhanced atomization and catalytic oxidation, strengthening the premixed combustion phase. Consequently, the maximum in-cylinder pressure (CP_{max}) rose from 53.03 to 55.86 bar for B20 and from 52.21 to 55.45 bar for B20But10, while the maximum heat release rate (HRR_{max}) increased to 29.45 J/°CA and 30.02 J/°CA, respectively. Regarding engine performance, brake thermal efficiency (BTE) improved with load; at full load it rose from 23.96% to 24.89% for B20 and from 23.89% to 24.94% for B20But10. Brake specific fuel consumption (BSFC) decreased from 0.331 to 0.309 kg/kWh for B20 and from 0.348 to 0.333 kg/kWh for B20But10. Emission analysis demonstrated meaningful reductions in CO, HC, NO_x , and smoke opacity, while CO_2 emissions increased slightly due to more complete combustion. The presence of n-butanol and Ni_2O_3 together enhanced oxidation, resulting in greater CO and HC reductions for B20But10 compared to B20. Additionally, Response Surface Methodology (RSM) was employed to build second-order regression models for predicting and optimizing engine performance and emissions. The models achieved high accuracy ($R^2 = 90.9\text{--}99.9$) with error margins between 2% and 6%. Five optimization strategies were proposed to reflect different operational priorities. For example, the balanced Model 1 yielded optimum conditions of approximately 63 ppm Ni_2O_3 and 1.3 bar BMEP for B20 and 58 ppm and 1.3 bar BMEP for B20But10.

Keywords: Engine performance, combustion, emission, optimization, Ni_2O_3

ÖN SÖZ

Çalışmam süresince bilgi, birikim ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, akademik desteğini ve sabrını hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Ali Serkan AVCI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, araştırma sürecinin her anında yanımda olan aileme ve destek olan dostlarıma sonsuz teşekkür ederim.

Bu tezin, enerji alanında yapılacak çalışmalara katkı sağlamasını ve benzer projelere ilham vermesini temenni ederim.

Seda Fahriye YAVAŞOĞLU

BATMAN-2026

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER/TABLolar LİSTESİ	x
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Biyoyakıtlar.....	2
1.1.1. Biyodizel.....	3
1.1.2. Biyobütanol.....	4
1.2. Nanopartiküller	5
1.2.1. Nikel (III) oksit nanopartikülü	6
1.3. Çalışmanın Amacı.....	7
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	8
3. DİZEL MOTORLAR	17
3.1. Dizel Motorlarında Yanma ve Yanma Safhaları.....	18
3.2. Dizel Yakıtların Fiziksel Özellikleri	20
3.2.1. Yoğunluk	20
3.2.2. Viskozite	21
3.2.3. Parlama noktası.....	21
3.3. Dizel Yakıtların Kimyasal Özellikleri	22
3.3.1. Isıl değer	22
3.3.2. Setan sayısı	22

4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	23
4.1. Test Yakıtları ve Özellikleri	23
4.1.1. Nikel (III) oksit nanopartikülünün özellikleri.....	23
4.1.2. Test yakıtlarının hazırlanması.....	27
4.1.3. Test yakıtının fiziksel ve kimyasal özellikleri	29
4.2. Deney Düzenegi ve Deneysel Yöntem	30
4.3. Hesaplama Yöntemi.....	33
4.4. Belirsizlik Analizi	35
4.5. Yüzey Yanıt Metodu.....	36
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	40
5.1. Yanma Analizi	40
5.1.1. Silindir basıncı	43
5.1.2. Net ısı salınımı	45
5.1.3. Kümülatif ısı salınımı	48
5.1.4. Basınç artış oranı	50
5.2. Performans Analizi	52
5.2.1. Fren termal verimi	52
5.2.2. Fren özgül yakıt tüketimi.....	54
5.3. Emisyon Analizi	56
5.3.1. Karbon monoksit emisyonları.....	57
5.3.2. Nitrojen oksit emisyonları	58
5.3.3. Hidrokarbon emisyonları	60
5.3.4. Duman emisyonları.....	61
5.3.5. Karbon dioksit emisyonları.....	62
5.4. Yanıt Yüzey Metodu Sonuçları	63

5.4.1. Fren termal verimi YYM analizi	64
5.4.2. Fren özgül yakıt tüketimi YYM analizi.....	65
5.4.3. CO YYM analizi	66
5.4.4. NOx YYM analizi.....	67
5.4.5. HC YYM analizi.....	68
5.4.6. Duman YYM analizi.....	69
5.4.7. CO ₂ YYM analizi.....	70
5.5. Modelleri Optimizasyonu	71
5.5.1. Model 1 sonuçları	71
5.5.2. Model 2 sonuçları	73
5.5.3. Model 3 sonuçları	74
5.5.4. Model 4 sonuçları	75
5.5.5. Model 5 sonuçları	76
5.6. YYM doğrulaması	77
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	81
6.1. Sonuçlar	81
6.2. Öneriler ve Kısıtlamalar.....	82
KAYNAKLAR	84

ÇİZELGELER/TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Literatürde metal oksit nanopartikül katkı maddelerinin dizel motor performansı ve emisyonları üzerindeki etkileri.....	15
Tablo 4.1. Ni ₂ O ₃ nanoparçacığının teknik özellikleri.....	23
Tablo 4.2. Biyodizel, n-bütanol ve nanoparçacık katkılı yakıt karışımlarının özellikleri.	29
Tablo 4.3. Motorun teknik özellikleri.....	31
Tablo 4.4. Ölçüm Sistemlerinin Doğruluk Özellikleri ve Belirsizlik Düzeyleri.....	36
Tablo 4.5. Her bir Model İçin Optimizasyon Kriterleri.....	39
Tablo 5.1. Test yakıtlarının farklı motor yükleri ve dozajlarında yanma performansı...	42
Tablo 5.2. Performans sonuçlarına ait tüm veriler.....	53
Tablo 5.3. Emisyon sonuçlarına ait tüm veriler.....	57
Tablo 5.4. Her bir yanıt için elde edilen p-değerleri.....	79
Tablo 5.5. Yanıtlar için ikinci dereceden polinom denklemleri.....	80
Tablo 5.6. Modeller için optimizasyon ve doğrulama sonuçları.....	81

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Dizel motorlarda kullanılan dört aşamalı çevrim.....	18
Şekil 3.2. Dizel yakıtlı motorlarda yanma aşamaları.....	18
Şekil 4.1. Ni_2O_3 katkı maddesi.....	24
Şekil 4.2. Ni_2O_3 nanoparçacığının SEM görüntüsü.....	25
Şekil 4.3. Ni_2O_3 nanoparçacığının XRD görüntüsü.....	25
Şekil 4.4. Ni_2O_3 nanoparçacığının FTIR görüntüsü.....	26
Şekil 4.5. Test yakıtlarının üretim aşamaları.....	28
Şekil 4.6. B20+ Ni_2O_3 yakıt numuneleri.....	28
Şekil 4.7. B20But10+ Ni_2O_3 yakıt numuneleri.....	28
Şekil 4.8. Deney düzeneğinin genel görüntüsü.....	31
Şekil 4.9. Emisyon analiz cihazı.....	32
Şekil 4.10. Minitab programının arayüzü.....	38
Şekil 5.1. Tam yükte B20+NP için Silindir Basınç Grafiği.....	44
Şekil 5.2. Tam yükte B20But10+NP için Silindir Basınç Grafiği.....	45
Şekil 5.3. Tam yükte B20+NP için Net Isı Salınım Oranı Grafiği.....	47
Şekil 5.4. Tam yükte B20But10+NP için Net Isı Salınım Oranı Grafiği.....	48
Şekil 5.5. Tam yükte B20+NP için Kümülatif Net Isı Salınım Oranı Grafiği.....	49
Şekil 5.6. Tam yükte B20But10+NP için Kümülatif Net Isı Salınım Oranı Grafiği.....	50
Şekil 5.7. Tam yükte B20+NP için Basınç Artış Oranı Grafiği.....	51
Şekil 5.8. Tam yükte B20But10+NP için Basınç Artış Oranı Grafiği.....	52
Şekil 5.9. FTV'nin NP ve BMEP ile değişimi.....	55
Şekil 5.10. FÖYT'ün NP ve BMEP ile değişimi.....	56
Şekil 5.11. CO emisyonunun NP ve BMEP ile değişimi.....	59
Şekil 5.12. NOx emisyonunun NP ve BMEP ile değişimi.....	60

Şekil 5.13. HC emisyonunun NP ve BMEP ile değişimi.....	62
Şekil 5.14. Duman emisyonunun NP ve BMEP ile değişimi.....	63
Şekil 5.15. Karbon Dioksit emisyonunun NP ve BMEP ile değişimi.....	65
Şekil 5.16. FTV'nin NP Konsantrasyonu ve BMEP'e Göre YYM Analizi a) Karşıtlığı grafiği b) Etkileşim Grafiği.....	66
Şekil 5.17. FÖYT'nin NP Konsantrasyonu ve BMEP'e Göre YYM Analizi.....	67
Şekil 5.18. CO'nun NP Konsantrasyonu ve BMEP'e Göre YYM Analizi a) Karşıtlığı grafiği b) Etkileşim Grafiği.....	68
Şekil 5.19. NOx'in NP Konsantrasyonu ve BMEP'e Göre YYM Analizi a) Karşıtlığı grafiği b) Etkileşim Grafiği.....	69
Şekil 5.20. HC'nin NP Konsantrasyonu ve BMEP'e Göre YYM Analizi a) Karşıtlığı grafiği b) Etkileşim Grafiği.....	70
Şekil 5.21. Duman'ın NP Konsantrasyonu ve BMEP'e Göre YYM Analizi a) Karşıtlığı grafiği b) Etkileşim Grafiği.....	72
Şekil 5.22. CO ₂ 'nin NP Konsantrasyonu ve BMEP'e Göre YYM Analizi: a) Karşıtlığı grafiği b) Etkileşim Grafiği.....	73
Şekil 5.23. Model 1 için Optimizasyon Grafiği a) B20+NP b) B20But10+NP.....	74
Şekil 5.24. Model 2 için Optimizasyon Grafiği a) B20+NP b) B20But10+NP.....	75
Şekil 5.25. Model 3 için Optimizasyon Grafiği a) B20+NP b) B20But10+NP.....	76
Şekil 5.26. Model 4 için Optimizasyon Grafiği a) B20+NP b) B20But10+NP.....	77
Şekil 5.27. Model 5 için Optimizasyon Grafiği a) B20+NP b) B20But10+NP.....	78

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

dU/dt	Sistem enerjisindeki değişim hızı	J/s
$\dot{Q}$	Net ısı ekleme hızı (yanma ısısı ve silindir duvarı ısı transferi)	W (J/s)
$\dot{W}$	Sistem tarafından yapılan işin hızı	W (J/s)
m	Silindir içindeki gaz kütlesi	kg
C_v	Sabit hacimde özgül ısı	J/(kg·K)
T	Silindir içi gaz sıcaklığı	K
P	Silindir içi basınç	bar
V	Silindir hacmi	m ³
R	Gaz sabiti	J/(kg·K)
k	Özgül ısı oranı (C_p/C_v)	-
h, θ	Krank açısı / Denklemden zaman yerine	°CA
τ	Fren torku	Nm
ω	Krank mili dönme hızı	dev/dak
$\dot{m}_f$	Yakıt kütleli debisi	kg/saat
$QLHV$	Yakıtın alt ısı değeri	kJ/kg
ξ	Bağımsız değişkenler (YYM modeli)	-
U_i	Her bir değişkenin belirsizliği	-
ΔU	Sistem performansı ve emisyon parametrelerine ait toplam belirsizlik	-
Y	Tahmin edilen yanıt değeri (YYM modeli)	-
ε	Rastgele hata (YYM modeli)	-
HRR	Heat Release Rate – Anlık ısı salım oranı	J/°CA
$AHRR_{max}$	Maksimum görünür ısı salım oranı açısı	°CA
$CHRR$	Kümülatif net ısı salım oranı	J
$ACHRR_{max}$	Maksimum kümülatif ısı salımı açısı	°CA
CP	Silindir içi basınç	bar
ACP_{max}	Maksimum basınç açısı	°CA
PRR_{max}	Maksimum basınç artış hızı	bar/°CA
AIP_{max}	Maksimum anlık güç açısı	°CA
SOC	Start of Combustion – Yanma başlangıcı	°CA

SOI	Start of Injection – Enjeksiyon başlangıcı	°CA
ID	Ignition Delay – Tutuşma gecikmesi	°CA
BMEP	Fren Ortalama Etkin Basınç	bar
Al	Alüminyum elementi	-
Al ₂ O ₃	Alümina	-
Fe ₃ O ₄	Manyetit	-
Mn	Manganez elementi	-
MnO ₂	Manganez dioksit	-
Ni	Nikel elementi	-
NiO	Nikel oksit	-
Ni ₂ O ₃	Nikel (III) oksit	-
NiFe ₂ O ₄	Nikel ferrit	-
ZnO	Çinko oksit	-
Zn _{0.5} Ni _{0.5} Fe ₂ O ₄	Nikel çinko demir oksit	-
C ₄ H ₉ OH	Biyobütanol	-
is	Duman	-
NO _x	Azot oksit emisyonları	ppm

Kısaltmalar

HRR	Isı salım oranı
CHRR	Kümülatif ısı salım oranı
SOC	Yanmanın Başlangıcı
SOI	Enjeksiyon Başlangıcı
ID	Tutuşma Gecikmesi
Pb	Fren Gücü
BMEP	Fren Ortalama Etkin Basınç
BSFC / FÖYT	Fren Özgül Yakıt Tüketimi
BTE / FTV	Fren Isıl Verimi
YYM	Yüzey Yanıt Metodu (Response Surface Method)
NP	Nanoparçacık konsantrasyonu
CCD	Merkezi Bileşik Deney Tasarımı
ANOVA	Varyans Analizi
CO	Karbon monoksit emisyonu
HC	Hidrokarbon emisyonu
NO _x	Azot oksitler emisyonu
CO ₂	Karbondioksit emisyonu
Smoke	Duman koyuluğu / yoğunluğu
COME	Castor Oil Methyl Ester – Hint yağı metil esteri
D100	Saf dizel
D90B10	Dizel %90 + biyodizel %10
D80B10Bu10	Dizel %80 + biyodizel %10 + n-bütanol %10
Diesterol	Yüzey aktif madde
POME	Palm yağı metil esteri
FAME	Yağ asidi metil esteri
NiFe ₂ O ₄	Nikel ferrit
Zn _{0.5} Ni _{0.5} Fe ₂ O ₄	Nikel çinko demir oksit
T3	Triiodotironin
cSt	Kinematik viskozite (centistokes)
ASTM	Standart organizasyonu
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
MAM	Marmara Araştırma Merkezi

TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
NI	Ulusal Enstrümantasyon şirketi
OSC	Oksijen Depolama Kapasiteleri
ODS	Oksidatif desülfürizasyon
TPR	Sıcaklık Programlı İndirgeme
TOPSIS	Çok kriterli karar verme yöntemi
UBHC	Yanmamış hidrokarbon
VSM	Manyetik özellik analizleri
XRD	X-ışını Kırınımı
FTIR	Kızılötesi Spektroskopi

1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji teknolojilerinde son yıllarda kayda değer ilerlemeler sağlanmasına ve enerji üretiminde karbon yoğunluğunu azaltma yönünde önemli adımlar atılmasına rağmen, küresel enerji sistemi hâlen büyük oranda fosil yakıtlara bağımlı bir şekilde işlemeye devam etmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve benzeri kuruluşların raporlarına göre, petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil kaynaklar günümüzde dünya birincil enerji arzının yaklaşık %81,5'ini karşılamaktadır (Renewable Energy Progress Tracker, 2025). Bu yüksek bağımlılık; enerji arz güvenliği, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik kırılganlık açısından ciddi riskler doğurmakta ve özellikle iklim değişikliğinin temel nedeni olan sera gazı emisyonlarının artmasına doğrudan katkı sağlamaktadır. Bu durumdan en fazla etkilenen sektörlerden biri ulaşımdır. Ulaşım sektörü, özellikle karayolu taşımacılığına dayalı yakıt tüketimi ve küresel ticaretin genişlemesi nedeniyle, insan kaynaklı toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %15'ini ve enerjiye bağlı küresel CO₂ emisyonlarının %23'ünü tek başına üretmektedir (Ritchie & Roser, 2020). Son on yılda ekonomik büyüme, nüfus artışı ve yaşam standartlarındaki yükselmeye bağlı olarak artan araç sahipliği ve motorlu taşıt sayısı, ulaştırma kaynaklı emisyon artışını daha da hızlandırmıştır. Bu nedenle ulaşım, emisyon artışının en hızlı gerçekleştiği nihai kullanım sektörü haline gelmiştir.

Avrupa Birliği tarafından benimsenen Avrupa Yeşil Mutabakatı, 2050 yılına kadar kıta genelinde iklim nötrlüğü hedefi koymakta ve sera gazı salınımlarında 2030 yılına kadar en az %71 oranında azaltım sağlamayı taahhüt etmektedir. Benzer şekilde, Birleşmiş Milletler tarafından kabul edilen Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA), özellikle SKA 7 “Herkes İçin Erişilebilir ve Temiz Enerji” ve SKA 13 “İklim Eylemi” başlıkları ile enerji dönüşümünün hızlandırılması ve fosil yakıt bağımlılığının azaltılmasına vurgu yapmaktadır (Bexell & Jönsson, 2017; Fetting, 2020). Bu küresel stratejiler; ulaşım, sanayi ve enerji üretimi gibi yüksek karbon salımı yapan sektörlerde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını zorunlu hale getirmekte, içten yanmalı motorlarda fosil yakıt yerine biyodizel, biyobütanol, biyoetanol ve diğer oksijenli yakıtların kullanımını teşvik etmektedir. Özellikle dizel motorlarda biyodizel ve alkol bazlı yakıtlar, daha temiz yanma özellikleri, sera gazı azaltım potansiyeli ve fosil kaynaklara kıyasla çevresel etkilerinin düşük olması nedeniyle düşük emisyonlu ulaşım uygulamaları açısından stratejik öneme

sahip çözümler olarak değerlendirilmektedir. Bu yakıtlar, aynı zamanda yerli ve yenilenebilir hammadde kaynaklarının kullanımını destekleyerek enerji arz güvenliğine katkı sağlamakta ve döviz bağımlılığını azaltmaktadır.

Güç-ağırlık oranlarının yüksek olması ve ani yük değişimlerine hızlı tepki verebilme yetenekleri sayesinde içten yanmalı motorlar, günümüzde hem ulaşım hem de endüstriyel uygulamalarda en yaygın kullanılan güç üretim sistemlerinden biri olmaya devam etmektedir. Özellikle dizel motorlar; sağlam yapıları, yakıt verimliliği, yüksek tork üretimi ve farklı çalışma koşullarına kolay uyum sağlayabilmeleri nedeniyle kara taşımacılığı, tarım makineleri, gemi ve jeneratör gibi çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ancak fosil yakıtlara dayalı bu motorlar, sera gazı emisyonlarının ve hava kirleticisi bileşenlerin önemli bir kaynağı olarak çevresel sürdürülebilirlik açısından ciddi sorunlar doğurmaktadır. Son yıllarda yapılan araştırmalar, bu motorların yanma performansını, termal verimini ve emisyon karakteristiklerini iyileştirmeye yönelik çeşitli stratejilerin geliştirilmesine odaklanmıştır. Bu stratejiler arasında özellikle yakıtların kimyasal özelliklerinin yeniden düzenlenmesi, enjeksiyon parametrelerinin optimize edilmesi, çok kademelili veya değişken zamanlamalı enjeksiyon sistemlerinin kullanımı ve gelişmiş yanma konseptlerinin uygulanması öne çıkmaktadır (Awad vd., 2018; Ridhuan vd., 2021). Bu yaklaşımlar sayesinde daha verimli enerji dönüşümü sağlanmakta, yakıt tüketimi azaltılmakta ve egzoz emisyonları düşürülmektedir. Küresel ölçekte temiz ve sürdürülebilir enerjiye geçiş eğilimi doğrultusunda, sıkıştırma ile ateşlemeli (CI) motorlarda kullanılabilecek alternatif yakıtlara olan ilgi de giderek artmıştır. Bu çalışmada tek silindirli, dört zamanlı, su soğutmalı ve direkt püskürtmeli (DI) bir dizel motor kullanılmıştır.

1.1. Biyoyakıtlar

Biyoyakıtlar, yenilenebilir organik kaynaklardan elde edilen ve fosil yakıtlara alternatif olarak kullanılan enerji taşıyıcılarıdır. Temel olarak bitkisel yağlar, atık yemeklik yağlar, tarımsal ve orman artıkları, hayvansal yağlar ve nişasta veya selüloz içeren biyokütlelerden üretilirler. Günümüzde en yaygın biyoyakıt türleri arasında biyoetanol, biyometanol, biyobütanol gibi alkoller ile biyodizel, biyogaz ve sentez gazı yer almaktadır. Fosil yakıtların çevresel etkileri ve sınırlı kaynakları nedeniyle, biyoyakıtlar enerji sektöründe önemli bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır (Carvalho vd., 2015). Bu durum, biyoyakıt üretiminin çevresel sürdürülebilirlik ve enerji güvenliği hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynamasına yol açmıştır (El-Araby, 2024). Bu bağlamda, biyoyakıtlar sera

gazı emisyonlarını azaltma, enerji arz güvenliğini artırma ve ekonomik büyümeyi destekleme potansiyelleriyle öne çıkmaktadır (Raman vd., 2025). Biyoyakıtlar, sürdürülebilir bir enerji geçişi ve yeşil ekonomi için önemli bir araç olarak kabul edilirken (Khan vd., 2021), enerji tüketiminin artması ve fosil yakıt kaynaklarının hızla tükenmesi, bu alternatif yakıtlara olan ihtiyacı daha da belirginleştirmektedir (Malik vd., 2024). Bu bağlamda, biyoyakıtlar özellikle ulaşım, endüstri ve elektrik üretimi gibi çeşitli sektörlerde geleneksel yakıtların yerini alabilecek veya onlarla karıştırılarak kullanılacak potansiyele sahiptir (Akhtar, 2023). Bu çalışmada biyoyakıt olarak biyodizel ve biyobütanol ele alınmıştır.

1.1.1. Biyodizel

Biyodizel, bitkisel yağlar veya hayvansal yağların transesterifikasyon adı verilen kimyasal bir süreçten geçirilmesiyle elde edilen, oksijen içeren yenilenebilir bir yakıttır ve petrodizele alternatif olarak en kapsamlı biçimde araştırılmış yakıtlardan biri olarak öne çıkmaktadır (Damanik vd., 2018). Mevcut dizel motorlarla yüksek uyumluluk göstermesi, yüksek setan sayısı sayesinde daha kolay tutuşabilmesi, iyi yağlama özellikleri ile motor parçalarının aşınmasını azaltması ve biyolojik olarak kolayca parçalanabilir olması, biyodizeli sürdürülebilir ulaşım için cazip bir seçenek hâline getirmektedir. Ayrıca biyodizelin kükürt içeriğinin çok düşük olması, partikül madde ve zararlı gaz salımlarının azaltılmasına katkıda bulunur. Literatürde, biyodizelin dizel yakıtla belirli oranlarda karıştırılmasının motor performansı ve emisyonlar üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu sıklıkla rapor edilmektedir. Özellikle fren özgül yakıt tüketiminin (FÖYT) azaldığı, bununla birlikte karbon monoksit (CO), hidrokarbon (HC) ve karbondioksit (CO₂) emisyonlarında belirgin düşüşler sağlandığı belirtilmektedir (Altaie vd., 2015; Suhel vd., 2021). Ancak biyodizelin enerji içeriğinin petrodizele göre daha düşük olması nedeniyle, fren termal verimi (FTV) üzerinde küçük dalgalanmalar ve bazı durumlarda hafif kayıplar gözlemlenmektedir (Cheikh vd., 2016; Javed vd., 2016). Bunun yanında, yanma süresi ve alev yayılma hızı biyodizelin üretiminde kullanılan yağın türüne bağlı olarak değişiklik gösterebilir.

Biyodizelin viskozitesinin ve yoğunluğunun dizel yakıtı göre daha yüksek olması, püskürtme sırasında yakıtın yeterince ince damlacıklar hâline gelememesine, buna bağlı olarak silindir içinde homojen karışımın zorlaşmasına ve yakıt tüketiminin artmasına yol

açabilir. Aynı zamanda düşük sıcaklık koşullarında motorun ilk çalıştırılmasını zorlaştıran soğukta akış özelliklerinin zayıf olması, yağ asitlerinin kristalleşmesine ve yakıtın donmasına neden olabilmektedir (Altarazi vd., 2022; Palani vd., 2022). Bu sınırlamalar, özellikle soğuk iklimlerde ve mevsimsel sıcaklık dalgalanmalarında motor performansını ve güvenilirliğini olumsuz etkileyebilir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, biyodizelin bu dezavantajlarının azaltılmasında kısa ve orta zincirli alkollerin (etanol, metanol, bütanol gibi) yakıtı ilavesinin etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koymuştur. Bu alkoller, daha yüksek oksijen içeriği ve düşük viskoziteleri sayesinde karışımın akışkanlığını iyileştirir, püskürtme ve atomizasyon kalitesini artırır, böylece yanma sürecini hızlandırarak motorun soğuk çalışma kabiliyetini geliştirir ve daha verimli bir enerji dönüşümü sağlar. Böylece biyodizel, uygun katkı stratejileriyle hem çevresel faydalarını koruyarak hem de operasyonel zorluklarını azaltarak dizel motorlarda güvenle kullanılabilir hâle gelmektedir.

1.1.2. Biyobütanol

Biyobütanol (C_4H_9OH), dört karbonlu doğrusal yapıya sahip, biyokütleden fermentasyon yoluyla üretilen ve hem sıkıştırma ile ateşlemeli hem de buji ile ateşlemeli motorlarda yakıt katkısı olarak kullanılabilen bir yüksek zincirli alkoldür (İbrahim, 2016). Etanol ve metanol gibi kısa zincirli alkollere kıyasla daha yüksek molekül ağırlığına sahip olması, n-bütanolün dizel yakıtla karışabilirliğini artırmakta, enerji içeriğini yükseltmekte ve daha kararlı yakıt karışımlarının elde edilmesini sağlamaktadır (Kumar vd., 2016). Bu özellikleri sayesinde n-bütanol dizel ile karıştırıldığında faz ayrımına neden olmamakta; ayrıca daha yüksek viskozite ve yoğunluğu, yakıt sisteminde yağlama özelliğini iyileştirmekte ve motor bileşenleri üzerinde daha az aşındırıcı etki oluşturmaktadır (Atmanlı & Yılmaz, 2018). n-bütanolün düşük buhar basıncı, yüksek setan sayısı ve kaynama noktasının yüksek olması, püskürtme sonrası buharlaşma hızını dengeleyerek silindir içerisinde daha homojen bir yakıt-hava karışımının oluşumunu desteklemektedir. Bu durum yanma sürecinin daha kontrollü ilerlemesini ve motor verimliliğinin artmasını kolaylaştırmaktadır (Giakoumis vd., 2013). Ayrıca yüksek parlama noktası, n-bütanolün depolama ve taşınma süreçlerinde güvenlik gereksinimlerini azaltmakta ve lojistik açıdan avantaj sağlamaktadır (Doğan, 2011). Fizikokimyasal özellikleri, oksijen içeriği ve karbon zincir uzunluğu dikkate alındığında, n-bütanol hem ön karışım hem de difüzyon yanma fazlarında yanma kalitesini iyileştirme potansiyeline sahiptir (Yesilyurt, 2020).

Literatürde, n-bütanol ilavesinin yanma verimini artırdığı, zararlı egzoz emisyonlarını azalttığı yönünde çok sayıda bulgu bulunmaktadır. Ancak, enerji yoğunluğunun dizel yakıtı göre daha düşük olması ve buharlaşma sürecinin yakıtın soğutma etkisini artırması nedeniyle bazı çalışmalarda özgül yakıt tüketiminde artışlar rapor edilmiştir (Killol vd., 2019; Singh vd., 2024; Yılmaz vd., 2014). Bununla birlikte, biyodizelle birlikte kullanıldığında n-bütanol, biyodizelin yüksek viskozitesinden kaynaklanan atomizasyon problemlerini azaltmakta, yakıt damlacıklarının daha iyi dağılmasını ve buharlaşmasını sağlayarak yanma kalitesini yükseltmektedir. Oksijen içeriği sayesinde daha verimli bir yanma süreci oluşmakta; bu da CO, HC ve duman emisyonlarının belirgin biçimde azalmasına katkıda bulunmaktadır (No, 2016). Son yıllarda yapılan araştırmalar, bu sinerjik etkinin daha da geliştirilmesi amacıyla özellikle nanoparçacık (NP) katkılarının biyodizel-n-bütanol karışımlarına eklenmesini yoğun biçimde incelemeye başlamıştır. Nanoparçacıkların yüksek yüzey alanı ve katalitik özellikleri, yanma sürecini iyileştirme, egzoz emisyonlarını düşürme ve motor verimliliğini artırma potansiyeli sunmaktadır. Bu nedenle, n-bütanol ve biyodizel karışımlarında nanoparçacık katkılarının rolü, alternatif yakıt geliştirme çalışmalarında önemli ve güncel bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır.

1.2. Nanopartiküller

Nanopartiküller, boyutları genellikle 1–100 nanometre aralığında olan, çok yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahip ve bu nedenle kimyasal, fiziksel ve katalitik özellikleri kütle hâlindeki malzemelerden farklılık gösteren son derece küçük parçacıklardır. Son yıllarda, nanopartiküller (NP'ler) alternatif yakıtların performans ve emisyon sınırlamalarını aşmak için umut vadeden katkı maddeleri olarak dikkat çekmektedir. Boyutlarının nanometre ölçeğinde olması ve yüzey alanı/hacim oranlarının çok yüksek bulunması, bu parçacıklara klasik katkı maddelerine kıyasla önemli avantajlar sağlamaktadır. Yüksek yüzey alanı sayesinde yakıtın atomizasyonu iyileşmekte, yani püskürtme sırasında oluşan yakıt damlacıkları daha küçük ve homojen hale gelmektedir. Bu durum, silindir içerisinde daha iyi hava-yakıt karışımı oluşmasını sağlayarak yanma sürecini hızlandırmakta ve enerji dönüşümünü daha verimli hâle getirmektedir (Gad vd., 2023; Soudagar vd., 2018). Genel olarak nanopartiküller, metalik nanopartiküller ve metal oksit nanopartiküller olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Bu gruplar içinde, metal oksit tabanlı nanopartiküller alternatif yakıt katkı maddesi olarak öne çıkmaktadır. Bunun

temel nedenleri arasında yüksek katalitik aktiviteye sahip olmaları, oksijen taşıma kapasiteleri ve termal iletkenliklerinin yüksek olması yer almaktadır. Metal oksit nanopartiküller, motor silindiri içerisinde tutuşma gecikmesini azaltmakta, yanma verimini artırmakta ve zararlı emisyonların oluşumunu sınırlandırmaktadır (Bidir vd., 2021; Mofijur vd., 2024). Literatürde yakıt katkısı olarak en çok kullanılan metal oksit nanopartiküller arasında alüminyum oksit, bakır oksit, demir oksit, çinko oksit, manganez oksit, seryum oksit ve nikel oksit öne çıkmaktadır. Bu nanopartiküller oksidasyon katalizörü gibi davranarak yakıtın daha tam ve temiz yanmasını destekler. Bununla birlikte, NP'lerin çevresel sürdürülebilirlik açısından uzun vadeli etkileri henüz tam olarak anlaşılmamıştır. Bu nedenle gelecek çalışmalarda NP'lerin ekosistem dengesi üzerindeki olası etkilerinin araştırılması, farklı NP türleri arasındaki etkileşimlerin incelenmesi ve gıda zinciri gibi dolaylı yollarla oluşabilecek çevresel risklerin değerlendirilmesi önerilmektedir (Nair vd., 2022). Bu çalışmada nanopartikül olarak Nikel (III) oksit ele alınmıştır.

1.2.1. Nikel (III) oksit nanopartikülü

Nikel tabanlı nanopartiküller, üstün katalitik ve termofiziksel özellikleri nedeniyle alternatif yakıt teknolojilerinde öne çıkan katkı maddeleri arasındadır (Campili vd., 2021). Literatürde Nikel (III) oksit (Ni_2O_3)'ün yüksek yüzey alanı, iyi ısı iletkenliği ve oksijen depolama/taşıma kapasitesi sayesinde yanma sürecinde oksidasyon reaksiyonlarını hızlandırabildiği rapor edilmiştir (Jaji vd., 2020; Sarno vd., 2020). Bu özellikler, silindir içerisinde daha homojen bir hava-yakıt karışımının oluşmasını sağlamakta, tutuşma gecikmesini azaltmakta, alev yayılma hızını artırmakta ve yanma sıcaklığının daha dengeli dağılmasına katkıda bulunmaktadır (Hassan vd., 2023; Srinidhi vd., 2019; Srinidhi & Madhusudhan, 2017). Çeşitli çalışmalar, Ni_2O_3 'ün katalitik oksidasyonu hızlandırarak daha düşük sıcaklıklarda dahi yakıtın tam yanmasını mümkün kıldığını, ayrıca yüksek termal iletkenliğinin ısı transferini iyileştirdiğini ve yakıt damlacıklarının ikincil atomizasyonunu kolaylaştırarak yanma verimini yükselttiğini göstermektedir (Imran Din & Rani, 2016; Vijaya Kumar vd., 2022). Bu mekanizma özellikle biyodizel gibi viskozitesi yüksek yakıtların atomizasyon problemlerini hafifletme potansiyeli taşımaktadır. Aynı zamanda düşük viskoziteli fakat yüksek buharlaşma ısısına sahip n-bütanol ile birlikte kullanıldığında sinerjik bir etki yaratarak yanma kalitesini daha da iyileştirebilmektedir. Literatürde nikel oksit nanopartiküllerinin dağılım davranışı hakkında veriler sınırlı olmakla birlikte, benzer metal oksit NP'lerin kutuplu yakıt ortamlarında kısa süreli kararlı

süspansiyonlar oluşturabildiği bildirilmiştir (Rashid vd., 2022; Vaizoğullar, 2021). Bu bulgu, Ni_2O_3 'ün de biyodizel–n-bütanol gibi oksijenli ve kutuplu yakıt karışımlarında homojen şekilde dağılabileceği varsayımını desteklemektedir. Ayrıca yüksek ısı iletkenliğinin silindir içindeki sıcaklık dağılımını dengeleyeceği, zengin karışım bölgelerinin oluşumunu sınırlayacağı ve katalitik etkinliğini motorun çalışma süresi boyunca sürdüreceği rapor edilmiştir (Ortiz-Quiñonez vd., 2018; Singh vd., 2020). Bu nedenlerle, çalışmada yakıt katkısı olarak Ni_2O_3 'ün seçilmesi; literatürde bildirilen katalitik ve termofiziksel avantajları, yakıt içinde dağılabilme potansiyeli ve yanma verimi ile egzoz emisyonları üzerindeki olumlu etkilerini gösteren teorik ve deneysel kanıtlara dayanarak bilimsel olarak tutarlı ve yerinde bir tercih olarak değerlendirilmiştir.

1.3. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, bir dizel motorun farklı motor yüklerindeki performans ve yanma özellikleri kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Bu kapsamda motor performans göstergeleri, egzoz emisyonları ve yanma karakteristikleri dikkate alınmıştır. Deneysel çalışmalar sırasında biyodizel ve biyodizel–n-bütanol yakıt karışımlarına farklı oranlarda Ni_2O_3 nanoparçacıkları ilave edilmiştir. Homojen bir şekilde hazırlanan bu yakıt karışımları sistematik bir deneysel prosedürle test edilerek motorun yanma davranışları ve emisyon karakteristikleri ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Çalışma sürecinde hem motor yükleri hem de Ni_2O_3 katkı oranları optimize edilerek motor performansını maksimuma çıkaran ve emisyonları minimuma indiren çalışma koşulları belirlenmiştir. Bu optimizasyon için Yanıt Yüzey Metodolojisi (YYM) kullanılmış ve en uygun parametreler istatistiksel olarak elde edilmiştir. Böylece bu çalışma, dizel motorlar için yenilenebilir ve nanoparçacık katkılı yakıtların teknik özellikleri ile uygulanabilirliğini bütüncül bir yaklaşımla ortaya koyarak literatüre özgün katkı sunmaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Anish vd. (2023) yaptıkları çalışmada, mikroalg kökenli biyodizel ve bütanolün çinko oksit (ZnO) nanoparçacıkları ile katkılandırılmasının dizel motor performansı ve emisyonlarına etkisini incelemişlerdir. Nanochloropsis türünden elde edilen biyodizel, dizel ve bütanol hacimsel olarak %20 biyodizel ve %30 bütanol (B20But30) oranında karıştırılmış; ardından 25, 50, 75 ve 100 ppm ZnO nanoparçacıkları ilave edilmiştir. Karışımlar yüksek hızlı mekanik karıştırma ve ultrasonikasyon yöntemleriyle homojen hale getirilmiştir. Deneyler, tek silindirli, dört zamanlı, su soğutmalı ve direkt püskürtmeli bir dizel motor üzerinde farklı yük koşullarında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, ZnO nanoparçacık katkısının özellikle tam yükte FTV'yi yaklaşık %13 oranında artırdığını, FÖYT azalttığını ve egzoz gazı sıcaklığını yükselttiğini göstermiştir. Emisyon açısından ise ZnO katkısı ile NO_x ve SO_x salımlarında azalma; CO ve HC emisyonlarında ise karışım oranına bağlı değişimler gözlenmiştir. Araştırmacılar, mikroalg bazlı biyodizel ve bütanol karışımlarının ZnO nanoparçacıklarıyla desteklenmesinin, dizel motorlarda hem performans hem de emisyon kontrolü bakımından önemli avantajlar sağladığını rapor etmişlerdir.

Sule vd. (2024), palm yağı metil esteri (B100) içerisine etanol-bütanol karışımı ve 100 ppm manyetit (Fe₃O₄) nanoparçacık ilavesinin dizel motor performansı ve emisyonlarına etkisini incelemişlerdir. Tek silindirli dört zamanlı Yanmar L70N motor kullanılarak yapılan deneylerde, yakıt karışımı %90 B100, %5 manyetitletli etanol ve %5 manyetitletli bütanolden oluşmuştur. Sonuçlar, saf B100'e kıyasla FÖYT %15,7'ye kadar azaldığını, FTV'nin ise %9,7'ye kadar arttığını göstermiştir. Ayrıca CO, HC ve duman emisyonlarında belirgin düşüşler sağlanırken NO_x emisyonlarında dizel yakıtı göre artış, ancak saf B100'e göre azalma tespit edilmiştir. Araştırma, alkollerin ve nanoparçacıkların birlikte kullanılmasının atomizasyonu iyileştirip yanma verimini artırarak biyodizelin dezavantajlarını azalttığını ortaya koymuştur.

Harish Venu vd. (2021) çalışmalarında, tek silindirli, dört zamanlı, direkt enjeksiyonlu dizel motorda dizel-biyodizel-etanol (70:20:10) üçlü yakıt karışımına farklı doz-

larda alümina (Al_2O_3) nanoparçacık eklenmesinin performans, yanma ve emisyon özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Yakıtlara 10, 20 ve 30 ppm Al_2O_3 ilavesi sonrası yakıtların viskozite, yoğunluk ve setan sayısı gibi temel fiziksel özellikleri ASTM standartlarına göre ölçülmüş ve TF20 (20 ppm Al_2O_3 ilaveli üçlü yakıt) optimum yakıt olarak belirlenmiştir. Motor testlerinde, TF20 karışımı saf üçlü yakıta (TF) göre fren ısı verimini %7,8 artırmış, özgül enerji tüketimini %4,93 düşürmüştür, HC, CO, NO_x ve duman emisyonlarını sırasıyla %5,69, %11,24, %9,39 ve %6,92 azaltmıştır. Yanma açısından TF20 karışımı, yüksek yüzey alanı/hacim oranı sayesinde 72,67 bar silindir basıncı ve 76,22 J/°CA ısı salım hızına ulaşarak dizel yakıta yakın değerlere yaklaşmıştır. Çalışmada, nanoparçacıkların katalitik aktivitesiyle daha iyi atomizasyon, kısalan tutuşma gecikmesi ve daha verimli hava-yakıt karışımı olduğu vurgulanmıştır. Araştırmacılar, nanoparçacık katkılı üçlü yakıtların dizel motorlarda performansı iyileştirdiğini ve emisyonları düşürdüğünü, ancak partikül filtrelerinde birikme, yakıt enjeksiyon sisteminde tıkanma ve motor bileşenlerinde aşınma gibi potansiyel risklerin ayrıca araştırılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Hassan vd. (2023), dizel–hintyağı biyodizeli–n-bütanol karışımlarına nikel (Ni) ve alüminyum (Al) nanoparçacıkları eklenmesinin motor performansı ve emisyonlar üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada ham hintyağı önce asit ön işlem ve ardından potasyum hidroksit katalizli transesterifikasyonla biyodizele dönüştürülmüş, elde edilen Castor Oil Methyl Ester (COME) dizel ve n-bütanol ile farklı oranlarda harmanlanmıştır. Test yakıtları; D100 (saf dizel), D90B10 (dizel %90 + biyodizel %10), D80B10Bu10 (dizel %80 + biyodizel %10 + n-bütanol %10) ve bunların her birine 100 ppm Ni veya Al nanoparçacık ilavesiyle oluşturulmuştur. Karışımlar ultrasonik yöntemle stabilize edilmiş, tek silindirli, dört zamanlı, hava soğutmalı, direkt enjeksiyonlu CI motorunda (Hatz 1B30-2) 1700–2700 dev/dak hız aralığında tam yükte denenmiştir. Sonuçlar, n-bütanol ilavesinin tek başına tork ve fren gücünü düşürdüğünü, FÖYT’ü artırdığını ve FTV’yi azalttığını; buna karşılık Ni ve Al nanoparçacık katkısının D90B10 yakıtında tork ve fren gücünü %2 civarında yükselttiğini, FÖYT’yi yaklaşık %9 (Ni) ve %6 (Al) düşürdüğünü, FTV’yi ise %9’a varan oranda artırdığını göstermiştir. D80B10Bu10 karışımına Ni ve Al eklenmesi tork ve fren gücünde %15’e, FTV’de ise %6,5’e varan iyileşmeler sağlamıştır. Emisyonlarda CO ve NO_x değerleri n-bütanol ve özellikle nanoparçacık katkısı ile belirgin şekilde azalmış; CO salımı Ni katkısıyla %12–16, Al katkısıyla %13–15 oranında düşerken NO_x emisyonlarında %4–11 arasında azalma sağlanmıştır. Buna karşın daha

etkin yanma nedeniyle CO₂ emisyonlarında artış gözlenmiştir. Çalışma, Ni ve Al nanoparçacık katkılı biyodizel–n-bütanol karışımlarının dizel motorlarda performansı iyileştirme ve zararlı emisyonları azaltma potansiyelini ortaya koymuştur.

Srinidhi ve Madhusudhan (2017), çalışmalarında, palmiye yağı metil esteri (POME) ve dizel yakıt karışımlarına nikel oksit (NiO) nanoparçacıkları eklenmesinin tek silindirli değişken sıkıştırma oranlı (VCR) dizel motorun performans ve yanma karakteristiklerine etkilerini incelemiştir. Deneylerde dizel ile %10, %20 ve %30 hacimsel oranlarda karıştırılmış biyodizel karışımları (B10, B20, B30) hazırlanmış ve her birine 20 ppm ve 40 ppm NiO nanoparçacıkları ilave edilmiştir. Karışımların stabilitesi için izopropil alkol ve yüzey aktif madde (Diesterol) kullanılmış, homojen dağılım ultrasonikasyon ile sağlanmıştır. Motor testleri 1500 dev/dak sabit hızda, farklı tork değerlerinde (5–25 N·m) ve su soğutmalı, eddy current tipi dinamometre ile yapılmıştır. Sonuçlar, NiO katkısının özellikle %20 POME içeren B20 yakıtında 40 ppm dozajda en belirgin iyileşmeyi sağladığını göstermiştir. Bu karışımda FTV ortalama %6,2 artarken, FÖYT %5,6 ve fren özgül enerji tüketimi (BSEC) %5,1 oranında azalmıştır. NiO katkısının oksijen taşıma kapasitesi sayesinde daha iyi atomizasyon ve daha verimli yanma sağlandığı; böylece biyodizelin geç tutuşma ve düşük yanma verimi gibi dezavantajlarının kısmen giderildiği rapor edilmiştir. Çalışma, POME ve dizel karışımlarına NiO nanoparçacığı ilavesinin özellikle B20 karışımında optimum sonuç verdiğini ve dizel motorlarda geleneksel yakıtlara alternatif olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Srinidhi vd. (2019), yaptıkları çalışmada, dizel–biyodizel karışımlarına nikel oksit (NiO) nanoparçacıkları ekleyerek farklı yakıt enjeksiyon zamanlamalarının (FIT) motor performansı ve emisyonlar üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deneylerde baz yakıt olarak %25 neem biyodizeli ve %75 dizel (NBE25) kullanılmış, bu karışıma 25, 50, 75 ve 100 ppm NiO nanoparçacıkları homojen ilave yöntemiyle katılmıştır. Nanoparçacıkların yapısal ve fiziksel özellikleri FTIR, XRD, FESEM ve EDS analizleri ile doğrulanmış; yakıt karışımları izopropil alkol ve yüzey aktif madde (Diesterol) ile stabilize edilip ultrasonikasyonla homojen hale getirilmiştir. Deneyler, değişken sıkıştırma oranına sahip, tek silindirli, dört zamanlı, direkt enjeksiyonlu ve su soğutmalı bir dizel motor üzerinde sabit 1500 dev/dak hızda ve üç farklı enjeksiyon avansı (19°, 23° ve 27° bTDC) altında yürütülmüştür. Sonuçlar, yakıt enjeksiyon avansının 27° bTDC'ye alınmasının ve

NiO nanoparçacık katkısının birlikte uygulanmasının FTV'yi ortalama %6,3 oranında artırdığını, FÖYT ise %5,29–7,86 aralığında azalttığını göstermiştir. Ayrıca CO ve UBHC (yanmamış hidrokarbon) emisyonlarında belirgin düşüşler sağlanırken, gelişmiş yanma nedeniyle CO₂ emisyonlarının arttığı gözlenmiştir. NO_x emisyonları ise ileri enjeksiyon avansında (27° bTDC) bir miktar yükselmiştir. Araştırmacılar, NiO nanoparçacıklarının katalitik özellikleri sayesinde atomizasyonu iyileştirdiğini, tutuşma gecikmesini kısalttığını ve yanma verimini artırdığını vurgulamışlardır. Çalışma, yakıt enjeksiyon zamanlamasının NiO katkılı biyodizel–dizel karışımlarında performans ve emisyon optimizasyonunda kritik bir parametre olduğunu ortaya koymuştur.

Keskin vd. (2007), kâğıt endüstrisinin bir yan ürünü olan ham tall oil'den (ham reçine yağı) biyodizel ve metal bazlı katkı maddeleri (Mn ve Ni türevli) sentezleyerek dizel motor yakıtı olarak kullanımını ve motor performansı ile emisyonlara etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada ham tall oil önce damıtılarak serbest yağ asitleri ve reçine asitleri ayrılmış; yağ asitleri metanol ve sülfürik asit katalizi ile metil estere (biodizel) dönüştürülmüş, reçine asitleri ise MnO₂ ve NiO ile reaksiyona sokularak mangan ve nikel abietat esaslı yakıt katkı maddeleri elde edilmiştir. Test yakıtı olarak %60 tall oil metil esteri–%40 dizel karışımı (TE60) hazırlanmış, ardından bu karışımlara 8 ve 12 µmol/L oranında Mn veya Ni katkıları eklenmiştir. Deneyler, tek silindirli, hava soğutmalı, direkt enjeksiyonlu Lombardini 6LD 400 dizel motorunda 1800–3200 dev/dak aralığında tam yükte gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, biyodizel karışımlarının dizel yakıta göre daha yüksek FÖYT'e sahip olduğunu, ancak Mn ve Ni katkılarının katalitik etkisiyle TE60 yakıtında FÖYT'yi %5,01'den sırasıyla Mn katkısında %4,35–4,51, Ni katkısında %4,36–4,76 aralığına düşürdüğünü göstermiştir. Egzoz emisyonlarında CO salımı TE60'a kıyasla Mn katkısı ile %64,28'e, Ni katkısı ile %24,36'ya varan oranlarda azalmıştır; ayrıca duman opasitesinde TE60'a göre %30,91'e ulaşan düşüş elde edilmiştir. NO_x emisyonları genel olarak biyodizel yakıtlarında düşmüş, Ni katkılı yakıtlarda Mn katkılılara göre daha düşük seviyeler kaydedilmiştir. Çalışma, tall oil kökenli biyodizelin ekonomik ve çevreci bir yakıt seçeneği olduğunu, ayrıca Mn ve Ni bazlı katkıların yanma verimini ve emisyon performansını iyileştirdiğini ortaya koymuştur.

Navinprasad vd. (2021), dizel motorlarda alternatif yakıt olarak n-pentan kullanımını ve nikel oksit (NiO₂) nanoparçacık katkısının motor performansı ile egzoz emisyonlarına etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, NiO₂ nanoparçacıkları çöktürme yöntemi ile

sentezlenmiş, XRD ile kristal yapı ve morfoloji doğrulanmış, 200 nm'nin altında partikül boyutu elde edilmiştir. Nanoparçacıklar, ultrasonikatör ve manyetik karıştırıcı kullanılarak n-pentan ile homojen olarak karıştırılmış ve hazırlanan yakıt karışımları tek silindirli, dört zamanlı, su soğutmalı, değişken sıkıştırma oranına sahip (VCR) Kirloskar dizel motorunda farklı yük koşullarında test edilmiştir. Sonuçlar, NiO₂ katkılı n-pentan/dizel karışımlarının FTV'yi saf dizele kıyasla yaklaşık %8'e varan oranda artırdığını ve FÖYT'ü %15'e kadar düşürdüğünü göstermiştir. Yanma verimindeki artış, NiO₂'nin oksijen taşıma kapasitesi ve katalitik etkisiyle daha iyi yakıt-hava karışımı ve tam yanma sağlanmasına bağlanmıştır. Emisyon sonuçlarına göre, HC emisyonlarında tam yükte %40'a, CO emisyonlarında ise düşük yüklerde %10'a varan azalma sağlanmıştır. NO_x emisyonlarında NiO₂ katkısının ısı kayıplarını azaltarak ve yanma sıcaklık dağılımını dengeleyerek saf dizele yakın veya daha düşük seviyeler elde edilmesini sağladığı bildirilmiştir. Egzoz gazı sıcaklıkları B15NiO₂ karışımında dizel ile benzer seviyede kalırken, opasite değerlerinin dizel yakıtı kıyasla daha düşük olduğu gözlenmiştir. Araştırmacılar, n-pentanın düşük viskozitesi ve yüksek buharlaşma ısısının NiO₂'nin katalitik özellikleriyle birleşerek yanma sürecini iyileştirdiğini ve özellikle HC ve CO emisyonlarının azaltılmasında etkili olduğunu vurgulamışlardır. Çalışma, n-pentan/NiO₂ katkılı dizel karışımlarının hem enerji verimliliği hem de emisyon kontrolü açısından gelecek araştırmalara güçlü bir temel sunduğunu ve geleneksel fosil dizel yakıtı kıyasla daha çevreci ve performans açısından avantajlı bir alternatif olabileceğini ortaya koymuştur.

Sarvestani vd. (2022), dizel motorlarda emisyonların azaltılması için katalitik özellikli yakıt katkılarını incelemişlerdir. Bu kapsamda NiFe₂O₄ (nikel ferrit) nanoparçacıkları üretilmiş ve %20 biyodizel-%80 dizel (B20) karışımına 90 ppm oranında ilave edilmiştir. Nanoparçacıklar üre-nitrat yakma yöntemiyle sentezlenmiş; XRD, Raman ve sıcaklık programlı indirgeme (TPR) analizleriyle yapısal ve oksijen depolama kapasiteleri (OSC: 13.580 µmol/g) belirlenmiştir. Deneyler, 1500 dev/dak sabit hızda ve %25, %50, %75 yük koşullarında tam donanımlı altı silindirli Cummins CI motorunda yürütülmüştür. Analizler, NiFe₂O₄ katkılı B20 yakıtının motor performansını (fren özgül yakıt tüketimi ve fren ısı verimi üzerinde anlamlı olumsuz etki olmaksızın) büyük ölçüde koruduğunu, ancak egzoz emisyonlarında belirgin iyileşmeler sağladığını göstermiştir. Özellikle HC emisyonu %44,3, CO %12, partikül sayısı (PN) %26 ve partikül kütlesi (PM₁) %30 oranında azalmıştır. CO₂ emisyonlarında %6,3'lük küçük bir artış gözlenmiş, NO_x emisyonlarında ise istatistiksel olarak anlamlı bir değişim tespit edilmemiştir. Çalışma, yakıt

içi katalizör olarak NiFe_2O_4 kullanımının partikül ve zararlı gaz emisyonlarını düşürmede umut vadettiğini, ancak NO_x azaltımı için mekanizmanın daha ayrıntılı araştırılması gerektiğini vurgulamıştır. Ayrıca çok kriterli karar verme yöntemi (TOPSIS) ile %50 yükte B20– NiFe_2O_4 karışımı optimum alternatif olarak belirlenmiştir.

Özgür (2021), tarafından yapılan bu çalışmada, dizel yakıtına eklenen nikel demir oksit (NiFe_2O_4) ve nikel çinko demir oksit ($\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$) nanoparçacıklarının altı silindiri, dört zamanlı, turboşarjlı dizel motorun egzoz emisyonlarına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada ticari olarak temin edilen, yaklaşık 30 nm boyutunda ve %99,5–99,9 saflıktaki nanoparçacıklar dizel yakıtta 15, 20 ve 25 ppm oranlarında ultrasonik karıştırma yöntemiyle homojen biçimde dağıtılmıştır. Deneyler, Cummins ISBE4+250B serisi, 6.7 L hacimli, su soğutmalı, elektronik kontrollü, turboşarjlı ve ara soğutuculu bir dizel motor üzerinde, tam yük koşullarında 1400–2200 dev/dak motor hızlarında gerçekleştirilmiştir. Egzoz gazlarındaki NO_x , CO ve HC emisyonları AVL SESAM FTIR çok bileşenli analizörüyle ölçülmüştür. Sonuçlar, nanoparçacık ilavesinin dizel yakıtının fiziksel özelliklerini (yoğunluk, viskozite, setan sayısı) sınırlı düzeyde değiştirdiğini; viskozite ve yoğunluğun hafifçe arttığını, setan sayısının azaldığını göstermiştir. Emisyonlar açısından bakıldığında, NiFe_2O_4 katkısı ile NO_x emisyonlarında %5,5–8,5, CO emisyonlarında %3,9–9,5 ve HC emisyonlarında %3,3–5,2 oranında azalma sağlanmıştır. $\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ katkısı ise NO_x emisyonlarını %2,3–4,7, CO emisyonlarını %3,3–7,8 ve HC emisyonlarını %2,8–5,4 arasında düşürmüştür. Genel olarak her iki nanoparçacık tipi de emisyonları azaltmış; özellikle NiFe_2O_4 katkısı NO_x ve CO emisyonlarında daha yüksek iyileşme sağlamıştır. Araştırmacılar, bu iyileşmenin yakıt-hava karışımının daha iyi atomizasyonu ve nanoparçacıkların katalitik oksidasyon etkisi ile yanmanın daha verimli hale gelmesinden kaynaklandığını belirtmiştir.

Mandizadeh vd. (2021), dizel motorlarda emisyonların düşürülmesi ve yakıt kalitesinin artırılması amacıyla nikel ferrit (NiFe_2O_4) nanoyapılarının biyotemplat kontrollü yeşil sentezini ve yakıt katkısı olarak uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada NiFe_2O_4 nanosheet yapılarının sentezinde triiodotironin (T3) hormonu biyotemplat olarak kullanılmış; kombine ultrasonikasyon ve yanma yöntemi ile yüksek kristalliniteye sahip, ince tabakalı nanoyapılar elde edilmiştir. Morfoloji ve yapı XRD, FESEM, TEM, HRTEM, EDS, FTIR, BET ve manyetik özellik analizleri (VSM) ile ayrıntılı şekilde ka-

rakterize edilmiştir. Nanosheet morfolojisinin yüksek yüzey alanı (24,2 m²/g) ve gözenekli yapısı sayesinde katalitik aktivite arttırılmış, özellikle oksidatif desülfürizasyon (ODS) performansı iyileştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda NiFe₂O₄ nanoparçacıkları %1 oranında isodiesel ve ağır dizel yakıtlara ultrasonikatör yardımıyla homojen olarak dağıtılmış ve tek silindirli, dört zamanlı, direkt enjeksiyonlu, su soğutmalı Kirloskar TAF1 dizel motorunda 1500 dev/dak sabit hızda, 0–12 N·m yük aralığında test edilmiştir. Sonuçlar, NiFe₂O₄ katkısının dizel motor performansını korurken emisyonlarda önemli iyileşmeler sağladığını göstermiştir. Özellikle NO_x emisyonu saf isodiesele kıyasla tam yükte 610 ppm'den 470 ppm'e (%23 azalma), HC emisyonu 32 ppm'den 27 ppm'e (%15 azalma), CO emisyonu yaklaşık %5 düşüş ve duman (smoke) emisyonunda %10'a varan azalma rapor edilmiştir. Ayrıca katkı eklenmesiyle yakıtın parlama noktasının 8 °C yükseldiği ve viskozitenin yaklaşık %10 arttığı belirlenmiştir; bu durumun yakıt güvenliği ve tutuşma özelliklerine olumlu etkiler sağladığı ifade edilmiştir.

Tablo 2.1'de yukarıda bahsedilen tüm bu literatüre ait çalışmaların özet bir tablosu sunulmaktadır.

Tablo 2.1. Literatürde metal oksit nanopartikül katkı maddelerinin dizel motor performansı ve emisyonları üzerindeki etkileri.

Yakıt Karışımı	Nano Katkı	Motor Tipi ve Test Koşulu	Yanma Performansı	Motor Performansı	Emisyon Özellikleri	Kaynak
B20But30 (Dizel-biyodizel-n-butanol)	ZnO	Tek silindirli, dört zamanlı, DI, Kirloskar TV1, 5.2 kW, 1500 rpm	↑Egzoz Gazı Sıcaklığı	↑FTV, ↓FÖYT	↓CO, ↑HC, ↓NOx, ↑CO ₂	(Anish vd., 2024)
B100E5B5 (Biyodizel-etanol-n-butanol)	Fe ₃ O ₄	Tek silindirli, dört zamanlı, hava soğutmalı	↓Tutuşma Gecikmesi	↑FTV, ↓FÖYT	↓CO, ↓HC, ↓Duman, ↓NOx	(Sule vd., 2024)
D70B20E10 (Dizel-etanol-n-butanol)	Al ₂ O ₃	Tek silindirli, dört zamanlı, DI dizel motor, 4.4 kW, 1500 rpm	↑Yanma Basıncı, ↑Isı Salım Hızı (HRR), ↑Kümülatif Isı Salım Hızı ↓Tutuşma Gecikmesi	↑FTV, ↓FÖYT	↓CO, ↓HC, ↓NOx, ↓Duman	(Venu vd., 2021)
D80B10Bu10 (Dizel-biyodizel-n-butanol)	Ni	Tek silindirli, dört zamanlı, hava soğutmalı, DI, 5.4 kW, 3600 rpm	-	↑FTV, ↓FÖYT	↓CO, ↓NOx, ↑CO ₂	(Hassan vd., 2023)
B20 (Mahua metil ester-dizel)	NiO	Tek silindirli, dört zamanlı, DI, su soğutmalı, VCR, 4.2 kW, 1500 rpm	-	↑FTV, ↓FÖYT	↓CO, ↓HC, ↓NOx	(Srinidhi & Madhusudhan, 2017)
NBE25 (Azadirachta indica-dizel)	NiO	Tek silindirli, DI-CI, su soğutmalı, VCR motor, 4.8 kW, 1500 rpm	-	↑FTV, ↓FÖYT	↓CO, ↓HC, ↑CO ₂ , ↑NOx	(Srinidhi vd., 2019)
TE60 (Tall oil metil ester-dizel)	NiO	Tek silindirli, dört zamanlı, hava soğutmalı, DI, 6.3 kW, 3600 rpm	-	↓FÖYT	↓CO, ↓Duman, ↓NOx	(Keskin vd., 2007)
B15 (n-pentandizel)	NiO ₂	Tek silindirli, dört zamanlı, su soğutmalı, DI, 3.5 kW, 1475 rpm	↑Egzoz Gazı Sıcaklığı	↑FTV, ↓FÖYT	↓CO, ↓HC, ↓NOx, ↓Duman, ↑CO ₂	(Navinprasad vd., 2021)
B20 (Hindistan cevizi yağı-dizel)	NiFe ₂ O ₄	Altı silindirli, turboşarjlı, CRDI dizel motor, 1500 rpm	-	↑FTV, ↓FÖYT	↓CO, ↓HC, ↑CO ₂ , ↓NOx	(Sarvestani vd., 2022)
Dizel	NiFe ₂ O ₄	Altı silindirli, dört zamanlı, turboşarjlı, ara soğutmalı, CRDI, 184 kW, 2500 rpm	-	-	↓CO, ↓HC, ↓NOx	(Özgür, 2021)

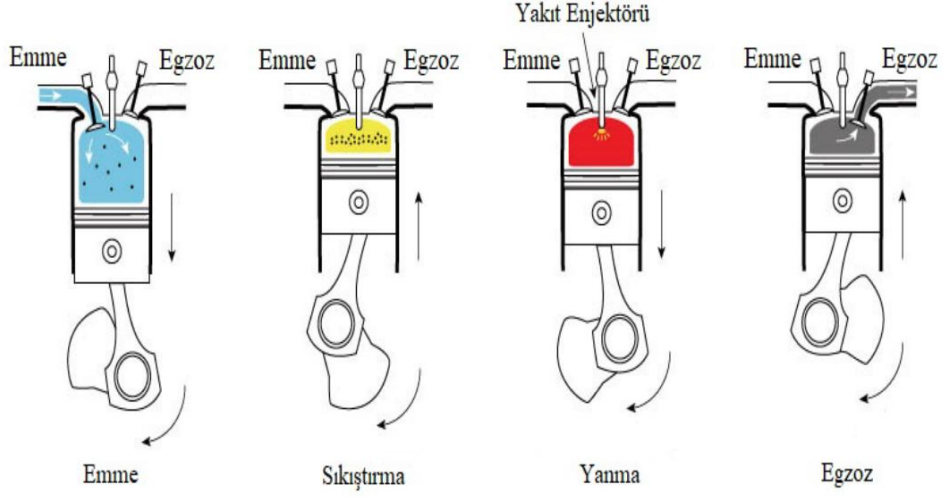
Tablo 2.1. Literatürde metal oksit nanopartikül katkı maddelerinin dizel motor performansı ve emisyonları üzerindeki etkileri. (Tablonun devamı)

Isodiesel (Dizel-biyodiesel)	NiFe ₂ O ₄	Tek silindirli, dört zamanlı, direkt enjeksiyonlu, 4.4 kW, 1500 rpm	-	-	↓CO, ↓HC, ↓NO _x , ↓Duman	(Mandizadeh vd., 2021)
------------------------------	----------------------------------	---	---	---	-------------------------------------	------------------------

3. DİZEL MOTORLAR

Dizel motorlar, içten yanmalı motorlar arasında sıkıştırma ateşlemeli prensiple çalışan ve özellikle ağır vasıtalar, jeneratörler, deniz taşıtları ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir motor tipidir. Bu motorlar, yüksek tork üretimi ve düşük yakıt tüketimi gibi avantajları sayesinde hafif ticari araçlardan ağır hizmet vasıtalarına kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir (Galbi & Ishak, 2016). Benzinli motorlara kıyasla daha yüksek mekanik verimliliğe sahip olmaları, dizel motorları ekonomik açıdan cazip kılmaktadır. Bu yüksek verimlilik, özellikle yakıtın silindir içine püskürtülüp sıkıştırma sonucunda oluşan yüksek sıcaklık ve basınçla kendiliğinden tutuşması prensibine dayanır (Karana & Sahoo, 2020). Bu tutuşma süreci, hava sıkıştırıldığında sıcaklığının artması prensibini kullanır (Saputra & Sunaryo, 2019). Bu prensip, Carnot termodinamik döngüsüne uygun olarak yanma gazlarının pistonları itmesiyle mekanik enerji üretir (Polleux vd., 2022).

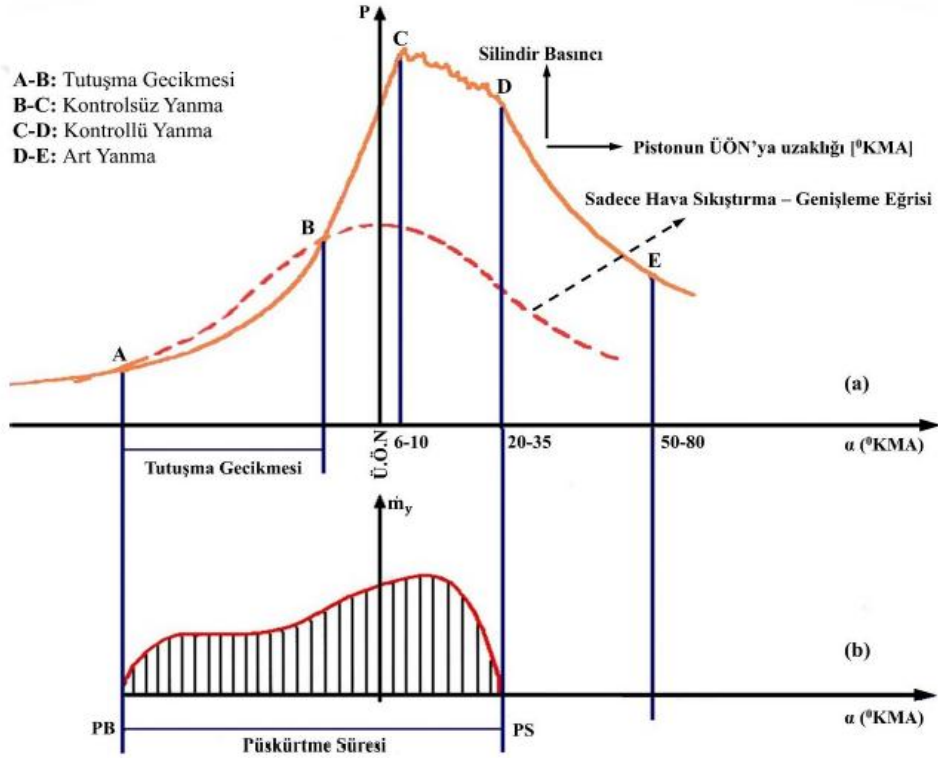
Dört zamanlı dizel motorlarda çevrim, emme, sıkıştırma, yanma ve egzoz olmak üzere dört aşamada gerçekleşir. İlk aşamada pistonun aşağı hareketiyle emme supabı açılır ve silindire sadece hava alınır. Ardından piston yukarı doğru çıkarak havayı yüksek basınç ve sıcaklığa sıkıştırır. Sıkıştırma sonunda enjektörden püskürtülen yakıt, sıcak ve basınçlı hava ile temas ederek kendiliğinden tutuşur ve yanma gerçekleşir. Yanma sonucu oluşan basınçlı gazlar pistonu aşağı iter ve motora güç üretir. Son aşamada ise piston tekrar yukarı çıkar, egzoz supabı açılır ve yanma sonucu oluşan gazlar silindirden dışarı atılır. Bu dört zaman tamamlandığında motor bir çevrimini bitirmiş olur. Dizel motorların çalışma süreci, Şekil 3.1’de görüldüğü üzere dört aşamalı çevrim esasına dayanmaktadır.



Şekil 3.1. Dizel motorlarda kullanılan dört aşamalı çevrim (Beerge & Devarmani, 2024).

3.1. Dizel Motorlarında Yanma ve Yanma Safhaları

Dizel motorlarda yanma süreci, Şekil 3.2’de gösterildiği gibi tutuşma gecikmesi, ani yanma, kontrollü yanma ve art yanma evrelerinden oluşmaktadır.



Şekil 3.2. Dizel yakıtlı motorlarda yanma aşamaları (Aktaş, 2021)

Şekil 3.2’de görüldüğü üzere dizel motorlarda yanma süreci, yakıtın silindir içine enjekte edilmesiyle başlayan karmaşık bir dizi fiziksel ve kimyasal olayı içerir. Bu süreç, tutuşma gecikmesi, ani yanma, kontrollü yanma ve art yanma olmak üzere dört temel evreye ayrılır ve her evre, motor performansı ile emisyonlar üzerinde kritik etkilere sahiptir. Bu evrelerin anlaşılması, dizel motor tasarımında ve işletim stratejilerinde verimlilik ve çevresel uyumluluk açısından büyük önem taşımaktadır. İlk aşama olan tutuşma gecikmesi (A-B), yakıt enjeksiyonunun başlangıcı ile yanmanın fiilen başlaması arasındaki zaman aralığını ifade eder. Bu gecikme süresi, yakıtın silindir içi sıcaklık, basınç ve türbülans gibi faktörlere bağlı olarak buharlaşması, hava ile karışması ve kendi kendine tutuşma sıcaklığına ulaşması için gereken fiziksel ve kimyasal süreçleri kapsar (Zare vd., 2021). Bu evre, yakıtın buharlaşması ve hava ile karışarak homojen veya yakın-homojen bir karışım oluşturmasını takiben, sıkıştırma sonucunda oluşan yüksek sıcaklık ve basınç altında kimyasal reaksiyonların başlamasıyla sonlanır (Zhang vd., 2018). Bu periyot boyunca, enjekte edilen yakıtın bir kısmı buharlaşarak hava ile karışır ve yanmanın başlamasıyla birlikte kontrolsüz yanma evresine geçiş yapılır (La Rocca vd., 2020). Kontrolsüz yanma (Ani yanma) evresi (B-C), tutuşma gecikmesi sırasında oluşan buharlaşmış yakıt-hava karışımının hızlı ve kontrolsüz bir şekilde yanmasıyla karakterize edilir ve bu durum, silindir içi basınç ve sıcaklıkta ani bir artışa yol açar (Prudente vd., 2023). Bu evrenin şiddeti, tutuşma gecikmesinin uzunluğuna ve bu süre zarfında silindirde biriken yakıt miktarına doğrudan bağlıdır (Al-Dawody vd., 2022). Uzun bir tutuşma gecikmesi, daha fazla yakıtın buharlaşmasına ve karışmasına olanak tanıyarak ani yanma sırasında daha yüksek bir ısı salım hızı ve dolayısıyla daha şiddetli bir basınç yükselişiyle sonuçlanabilir (Örs vd., 2021). Bu durum, motor gürültüsünü artırabilir ve mekanik gerilmelere neden olabilir (Temizer & Eskici, 2020). Daha kısa bir tutuşma gecikmesi ise, yanmanın daha homojen ve kontrollü bir şekilde başlamasına olanak tanıyarak daha düşük yanma gürültüsü ve daha az mekanik stres ile sonuçlanabilir. Ani yanma evresinin hemen ardından, dizel motorlarda yanma süreci kontrollü yanma (C-D) evresine geçer. Bu aşama, tutuşma gecikmesi sırasında oluşan homojen veya yakın-homojen karışımın hızla yanmasının ardından, yanma hızının büyük ölçüde yakıtın buharlaşma ve hava ile karışma hızı tarafından kontrol edildiği bir süreçtir. Yakıt, silindir içine enjekte edilmeye devam ederken, daha önce tutuşmamış yakıt damlacıkları buharlaşır ve çevrelerindeki hava ile karışarak yanar. Bu evre, ani yanma evresine kıyasla daha yavaş ve kontrol edilebilir bir ısı salım hızı ile karakterizedir (Zare vd., 2021). Kontrollü yanma evresinde, yanma odasındaki sıcaklık ve basınç yüksek seviyelerde korunur, bu da pistonu aşağı iten sürekli bir güç

retimi sağlar. Bu evre, motorun verimli çalışması ve tork üretimi için kritik öneme sahiptir. Yanma hızının kontrol altında tutulması, silindir içi basınçtaki aşırı artışları önler, bu da motor bileşenleri üzerindeki mekanik gerilmeleri azaltır ve motor ömrünü uzatır. Aynı zamanda, gürültü seviyelerinin düşürülmesine de yardımcı olur (Hansen vd., 2011). Bu evrenin optimize edilmesi, hem motor performansı hem de emisyonlar açısından önemlidir. Yakıt enjeksiyon stratejileri, yanma odası tasarımı ve hava hareketi (türbülans) gibi faktörler, kontrollü yanmanın etkinliğini doğrudan etkiler. Özellikle, yakıtın daha iyi atomizasyonu ve hava ile karışımı, yanma verimliliğini artırarak is ve karbon monoksit gibi emisyonların azalmasına katkıda bulunur (Yang vd., 1999). Kapalı döngü yanma kontrol sistemleri, motorun farklı çalışma koşullarında ideal yanma davranışını elde etmek için enjeksiyon zamanlaması ve diğer parametreleri ayarlayarak bu evrenin yönetiminde önemli rol oynar (Ikemura vd., 2016).

Kontrollü yanma evresinin ardından gerçekleşen art yanma evresi (D-E) ise, ana yanma sürecinden sonra yanma odasında kalan az miktardaki yakıtın ve kısmen yanmış ürünlerin yanmaya devam ettiği son aşamadır. Bu evre, genellikle silindirdeki sıcaklık ve basıncın düşmeye başlamasıyla karakterize edilir ve esasen difüzyon tipi yanmanın son fazını temsil eder (Mobasheri vd., 2018). Bu faz, düşük ısı salım hızları ile karakterize edilir ve genellikle ana yanma olayından sonra kalan büyük yakıt damlacıklarının veya is parçacıklarının oksidasyonunu içerir. Bu evre, özellikle motorun verimliliği ve emisyonları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir, zira yanmamış hidrokarbonlar ve karbon monoksit gibi zararlı emisyonların oluşumunu doğrudan etkileyebilir. Bu dört evrenin dinamik etkileşimleri, dizel motorların genel performansı, yakıt ekonomisi ve emisyon karakteristikleri üzerinde kapsamlı bir etkiye sahiptir. Her bir evrenin detaylı anlaşılması ve optimizasyonu, modern dizel motor teknolojilerinin geliştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır.

3.2. Dizel Yakıtların Fiziksel zellikleri

3.2.1. Yoğunluk

Dizel yakıtların yoğunluğu, yakıtın birim hacim başına kütlesini ifade eder ve motor performansını doğrudan etkileyen temel bir fiziksel özelliktir. Yoğunluk değeri, püskürtme karakteristiği, yanma verimi ve enerji içeriği üzerinde belirleyici rol oynar; bu nedenle yakıt seçimi ve motor kalibrasyonunda dikkate alınır (Alptekin & Canakci,

2008). Yakıt yoğunluğundaki değişimler, enjektör pompası tarafından kontrol edilen yanma odasına enjekte edilen yakıt akışını ve dolayısıyla püskürtme hacmini etkiler (Prudente vd., 2023). Optimum yoğunluk aralığı, dizel motorların verimli çalışması için kritik olup (Sánchez-Rodríguez vd., 2025), yakıtın setan sayısını ve ısı değerini de etkilemektedir. Özellikle, biyoyakıtların dizel yakıtla harmanlanması, biyoyakıtın ham maddesine bağlı olarak yoğunlukta önemli artışlara neden olabilir (Yusaf vd., 2022).

3.2.2. Viskozite

Viskozite, yakıtın akışkanlığa karşı gösterdiği direnci ifade eder ve yakıtın atomizasyonu ile enjeksiyon dinamiklerini doğrudan etkileyen bir başka önemli fiziksel özelliktir. Düşük viskozite, yakıt sistemlerinde aşınmaya ve sızıntılara yol açabilirken, yüksek viskozite enjektör pompası üzerindeki yükü artırarak püskürtme kalitesini ve motor performansını olumsuz etkileyebilir (Prudente vd., 2023). Yüksek viskoziteye sahip yakıtlar, enjektör memelerinde tıkanıklıklara ve atomizasyonun bozulmasına neden olarak daha büyük yakıt damlacıkları oluşturabilir, bu da yanma verimliliğini düşürür ve is oluşumunu artırır (Patel vd., 2017). Yüksek viskoziteli yakıtlar ayrıca filtreleri, yakıt besleme sistemlerini ve enjektör deliklerini tıkayabilir (Hossain vd., 2020). Yakıtların enjeksiyon basıncını artırması da daha uzun ateşleme gecikmelerine neden olabilir (Hossain vd., 2024).

3.2.3. Parlama noktası

Parlama noktası, yakıt buharlarının hava ile karışarak alev alabileceği en düşük sıcaklığı ifade eder ve yakıtın güvenli depolanması ve taşınması açısından büyük önem taşır (Al-Hwaiti vd., 2020). Bu özellik, yakıtın tutuşma potansiyelini gösterir ve raf ömrü boyunca yakıt kalitesini korumak için kritik bir güvenlik parametresidir. Dizel yakıtlar için standartlar genellikle yüksek parlama noktaları gerektirir; zira düşük parlama noktası, yakıtın depolama ve kullanım sırasındaki buharlaşma riskini artırarak patlama tehlikesine yol açabilir (Shaah vd., 2021). Biyodizel karışımlarının parlama noktaları, saf dizele göre genellikle daha yüksek olup, bu durum depolama ve taşıma güvenliğini artırabilir (Yusaf vd., 2022). Dizel yakıtının buharlaşma karakteristiği, püskürtme yapısını etkileyerek hava-yakıt karışımının oluşumunu doğrudan etkilerken (Piri vd., 2023), damıtma özellikleri yakıt püskürtme penetrasyonunu ve karışım oluşumunu önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle, parlama noktasının yüksek olması, yakıtın depolama ve taşıma sırasında

olası yangın ve patlama risklerini azaltarak genel güvenlik profilini güçlendirir (Hossain vd., 2024).

3.3. Dizel Yakıtların Kimyasal Özellikleri

3.3.1. Isıl değer

Dizel yakıtların ısı değeri, belirli bir miktar yakıtın tam yanması sonucu açığa çıkan ısı enerjisini ifade eder ve genellikle kilogram başına megajul (MJ/kg) cinsinden ölçülür (Al-Ghouti vd., 2010). Bu değer, dizel motorların performansı ve termal sistemlerin verimlilik modellemesi için temel bir parametredir (Karana & Sahoo, 2020). Yüksek ısı değeri, yakıtın daha fazla enerji yoğunluğuna sahip olduğunu gösterir ki bu da motorun aynı yakıt hacmiyle daha uzun süre çalışabilmesi veya daha fazla güç üretebilmesi anlamına gelir (Demirbaş, 1998). Genellikle iki şekilde tanımlanır: üst ısı değeri, yanma sonrası oluşan suyun yoğunlaşmasıyla açığa çıkan gizli buharlaşma ısını içerirken; alt ısı değeri, suyun buhar fazında kaldığı ve motorlarda daha yaygın kullanılan değeri ifade eder.

3.3.2. Setan sayısı

Setan sayısı, dizel yakıtların tutuşma kalitesini belirleyen kritik bir özelliktir ve yakıtın silindirdeki sıkıştırma sonunda ne kadar hızlı ve verimli bir şekilde tutuştuğunu gösterir. Yüksek setan sayısı, yakıtın daha kısa bir tutuşma gecikmesine sahip olduğunu ve bu durumun daha düzgün bir yanma ile motor performansını optimize ettiğini işaret eder (Petersen vd., 2014). Bu bağlamda, setan sayısının yakıtın kimyasal bileşimi, özellikle de doymuş yağ asitleri ve oksijen içeriği ile doğrudan ilişkili olduğu gözlemlenmiştir (Yusaf vd., 2022). Bu nedenle, yakıtın moleküler yapısı ve içerdiği fonksiyonel gruplar, setan sayısının belirlenmesinde anahtar rol oynamaktadır (Angelidaki & Karakashev, 2012). Örneğin, biyoyakıtlar gibi uzun zincirli hidrokarbon grupları ve yüksek oksijen içeriğine sahip yakıtlar, genellikle dizel yakıtlara kıyasla daha yüksek setan sayılarına sahiptir. Fiziksel olarak, setan sayısı, motorun tutuşma gecikmesiyle doğrudan ilişkilidir; setan endeksi ne kadar düşükse, tutuşma gecikmesi o kadar artar ve bu da yanma odasında yanmadan kalan yakıt miktarının yükselmesine yol açar (Prudente vd., 2023). Bu durum, motorun soğuk çalıştırma kabiliyetini olumsuz etkiler ve motorun daha uzun süre marş yapmasına neden olur.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Test Yakıtları ve Özellikleri

Deneyisel yakıt örnekleri, Batman Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü atölye imkânlarında özenle hazırlanmıştır. Çalışmada, egzoz emisyonları ile yanma ve performans karakteristiklerinin karşılaştırmalı olarak incelenebilmesi amacıyla, biyodizel (B20) ve biyodizel–n-bütanol (B20But10) karışımlarına Ni_2O_3 nanoparçacıkları farklı konsantrasyonlarda (0, 25, 50, 75 ve 100 ppm) ilave edilmiştir. Bu kapsamda kullanılan B20 yakıtı, hacimsel olarak %80 dizel ve %20 biyodizel karışımıyla elde edilen iki bileşenli bir yakıt iken; B20But10 yakıtı ise %70 dizel, %20 biyodizel ve %10 n-bütanolden oluşan üç bileşenli bir karışımdır.

4.1.1. Nikel (III) oksit nanopartikülünün özellikleri

Bu çalışmada, literatürde ilk kez yakıt katkı maddesi olarak kullanılacak Ni_2O_3 nanoparçacıkları Nanografi Co. (Ankara, Türkiye)’den temin edilmiştir. Malzemenin teknik özellikleri Tablo 2’de sunulmuştur. Ni_2O_3 nanoparçacıkları, yalnızca biyolojik uygulamalarda değil; aynı zamanda kompozit malzemelerin elektriksel iletkenliğini, manyetik özelliklerini ve optik davranışlarını geliştirmek amacıyla da yaygın olarak kullanılmaktadır (Nanopowder, 2025). Ni_2O_3 ’a katkı maddesine ait nanoparçacık ise Şekil 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Ni_2O_3 nanoparçacığının teknik özellikleri

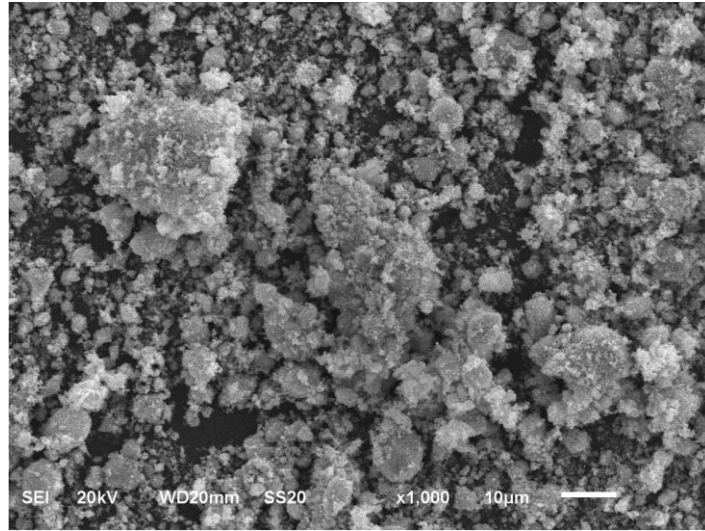
Özellik	Değer
Bileşik	Ni_2O_3
Üretici	Nanografi Nanoteknoloji
Ürün Numarası	NG01NM1802
Safılık (%)	99.95+
Renk	Siyah - koyu gri
Ortalama Parçacık Boyutu (nm)	40
Özgül Yüzey Alanı (m^2/g)	40-60
Yığın Yoğunluğu (g/cm^3)	0.38
Gerçek Yoğunluk (g/cm^3)	4.84
Elementel Analiz (ağırlıkça %)	Ni_2O_3 : 99.95, Co: <0.014, Pb: 0.01, Fe: 0.028, Cu: 0.01, Ca: 0.035



Şekil 4.1. Ni_2O_3 katkı maddesi

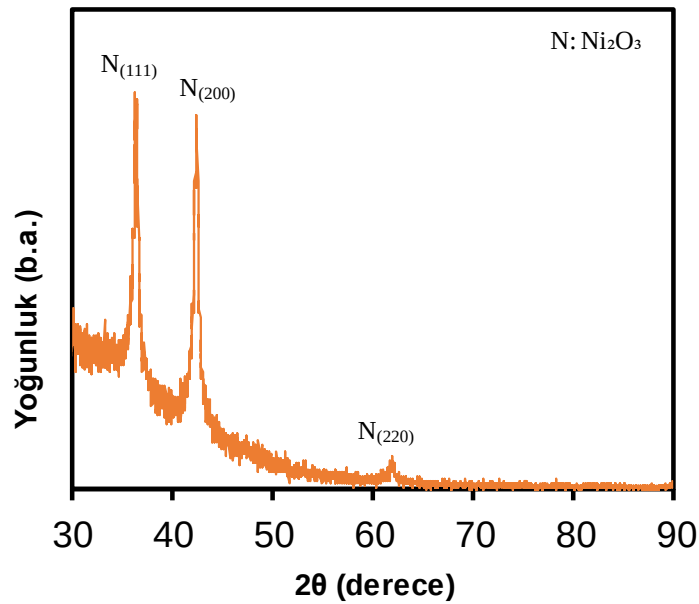
Ni_2O_3 'ün morfolojisi ile kristal örgü, faz yapısı ve parçacık boyutu gibi yapısal parametreler SEM, XRD ve FTIR analizleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

Şekil 4.2'de sentezlenen Ni_2O_3 'ün yüzey morfolojisi gösterilmektedir. Görüntüler, parçacıkların çoğunlukla küresel veya yarı küresel biçimde olduğunu ve yüksek yüzey enerjileri nedeniyle belirgin bir aglomerasyon eğilimi sergilediğini ortaya koymaktadır. Ortalama parçacık boyutları nano ölçek aralığında bulunmakla birlikte, bazı bölgelerde mikroküre benzeri kümelenmeler de gözlenmiştir. Bu düzensiz aglomerasyonların, malzemenin toplam yüzey alanını artırarak katalitik ve adsorptif uygulamalarda avantaj sağlayabileceği değerlendirilmektedir (Vaizoğullar, 2021). Ayrıca, pürüzlü yüzey morfolojisinin yakıt içerisindeki nanoparçacıkların daha etkin dağılmasına olanak sağlayabilecek daha fazla aktif yüzey alanı sunabileceği belirtilmektedir (Atmaca & Kallioğlu, 2026).



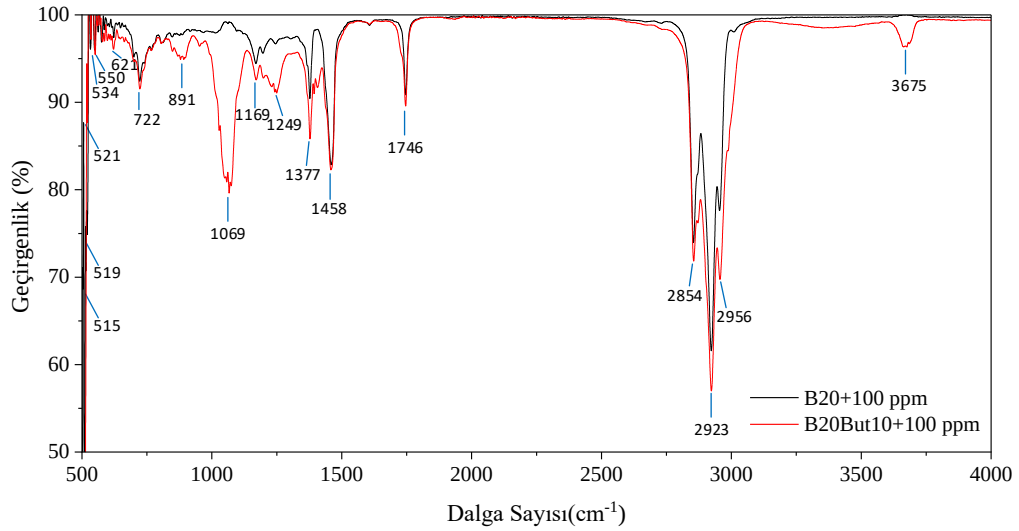
Şekil 4.2. Ni_2O_3 nanoparçacığının SEM görüntüsü

Şekil 4.3'te Ni_2O_3 'e ait X-ışını kırınımı (XRD) desenleri sunulmuştur. Analiz sonucunda karakteristik kırınım zirveleri belirlenmiş, ayrıca yaklaşık $62,9^\circ$ ve $75,4^\circ$ civarındaki daha zayıf pikler Ni_2O_3 'ün (220) kristal düzlemlerini doğrulamaktadır (Navinprasad vd., 2021; Vaizoğullar, 2021). Elde edilen kırınım desenleri, JCPDS kart numarası 47-1049 ile uyumlu bulunmuş ve sentezlenen parçacıkların kübik faz yapısına sahip olduğunu göstermiştir (Sarno vd., 2020). Piklerin keskinliği, malzemenin yüksek kristallinite derecesine işaret etmektedir.



Şekil 4.3. Ni_2O_3 nanoparçacığının XRD görüntüsü

Şekil 4.4'te, Ni_2O_3 ilave edilmiş B20 ve B20But10 yakıt karışımlarına ait FTIR spektrumları sunulmaktadır. Yaklaşık 3675 cm^{-1} civarındaki geniş O–H gerilme bandı, serbest n-bütanol varlığı nedeniyle özellikle B20But10 karışımında daha belirgin şekilde gözlenmiştir. $2854\text{--}2956 \text{ cm}^{-1}$ aralığındaki alifatik C–H gerilme bantları yakıtın hidrokarbon zincirlerini doğrulamaktadır. 1746 cm^{-1} 'deki güçlü ester karbonil (C=O) piki FAME yapısını teyit etmekte; bu bulgu 1458 cm^{-1} 'deki CH_2 bükülme ve 1377 cm^{-1} 'deki CH_3 simetrik deformasyon bantlarıyla desteklenmektedir. $1249\text{--}1169\text{--}1069 \text{ cm}^{-1}$ 'deki belirgin C–O gerilme bantları, metil esterler ve n-bütanolden kaynaklanan alkol/ester fonksiyonel gruplarını göstermektedir (Sarno vd., 2016). Daha düşük dalga sayılarında ($621\text{--}515 \text{ cm}^{-1}$) görülen bantlar ise metal–oksijen örgü titreşimlerine (Ni–O, Ni–O–Ni) karşılık gelmekte ve Ni(II/III) oksitleri için rapor edilen Ni–O gerilmesiyle uyumlu olup yakıt içinde Ni_2O_3 varlığını doğrulamaktadır (Rifaya vd., 2012). B20But10 spektrumunda bu bölgede görülen hafif pik şiddeti artışları ve tepe kaymaları, alkol (O–H/C–O) gruplarının Ni-oksit yüzeyleriyle hidrojen bağları veya Lewis asit–baz etkileşimleri yoluyla etkileşimine bağlanabilir. Genel olarak, FTIR analizleri hem yakıtların temel bileşenlerini hem de Ni_2O_3 'ün karışımlara başarıyla dahil edildiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.4. Ni_2O_3 nanoparçacığının FTIR görüntüsü

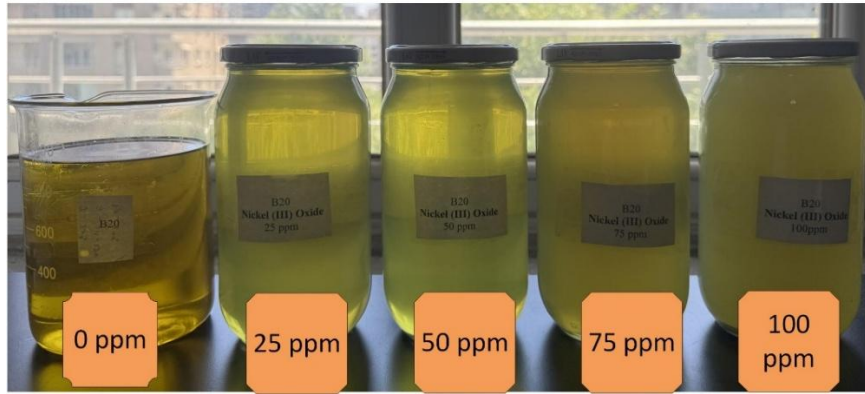
4.1.2. Test yakıtlarının hazırlanması

Test yakıtlarının hazırlanmasında, Ni_2O_3 içeren biyodizel–n-bütanol karışımları çok aşamalı bir dağıtma (dispersiyon) tekniği ile işlenmiştir. Belirlenen nanoparçacık miktarları önce Precisa XB220A analitik terazi kullanılarak tartılmış ve yakıtı ilave edilmiştir. Daha sonra karışımlar, ilk dispersiyonun sağlanabilmesi amacıyla DLAB MS-H-PRO manyetik karıştırıcıda 700 dev/dak hızda 60 dakika boyunca mekanik olarak karıştırılmıştır. Bunu takiben, partikül dağılımını geliştirmek ve süspansiyon homojenliğini artırmak için ISOLAB ultrasonik banyo cihazında 40 kHz frekansta 1 saat ultrasonik işlem uygulanmıştır. Deneysel gözlemler, nanoparçacık dozu 100 ppm'in üzerine çıktığında belirgin aglomerasyon oluştuğunu ve karışımların stabilitesinin bozulduğunu ortaya koymuştur. Bu kararsızlığın, yüksek partikül yoğunluğunda van der Waals kuvvetlerinin artarak kümelenmeyi teşvik etmesi ve süspansiyon homojenliğini azaltmasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Böyle bir durum, püskürtme sırasında yakıtın atomizasyonunu olumsuz etkileyerek yanma verimini düşürmekte ve hatta motor vuruntusuna sebep olabilmektedir (Kumar vd., 2019). Bu nedenle, nanoparçacık katkısının üst sınırı 100 ppm olarak belirlenmiştir. Önceki çalışmalarla da uyumlu şekilde, nanoparçacık miktarının 0–100 ppm aralığında tutulması motor güvenilirliği ve kararlı performans açısından kritik kabul edilmektedir (Kishore & Gugulothu, 2022; Kumar vd., 2020; Mehregan & Moghiman, 2018). Hazırlama işlemi tamamlandıktan sonra karışımlar şeffaf cam şişelere aktararak görsel kontrol yapılmış ve yalnızca tortu oluşumu veya kümelenme belirtisi göstermeyen yakıtlar teste alınmıştır. Bu yöntem, nanoparçacık dağılımının stabil kalmasını ve yanma, emisyon ile performans deneylerinin standart koşullarda yürütülmesini sağlamıştır. Yakıt hazırlama sürecine ait şematik gösterim Şekil 4.5'te, bu yakıtların son haline ait numuneler B20+NP için Şekil 4.6'da B20But10+NP için Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.5. Test yakıtlarının üretim aşamaları

B20+Ni (III) Oksit



Şekil 4.6. B20+ Ni₂O₃ yakıt numuneleri

B20But10+Ni (III) Oksit



Şekil 4.7. B20But10+ Ni₂O₃ yakıt numuneleri

4.1.3. Test yakıtının fiziksel ve kimyasal özellikleri

Hazırlanan yakıt karışımlarının fiziksel ve kimyasal karakterizasyonu, Türkiye’de TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM) laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Beş farklı yakıt karışımına ait analiz sonuçları Tablo 4.2’de sunulmaktadır. Ni_2O_3 ilavesiyle her iki yakıt tipinin de fiziksel ve kimyasal özelliklerinde belirgin değişiklikler meydana gelmiş ve bu değişiklikler ASTM standartlarına uygun şekilde değerlendirilmiştir. Analiz kapsamında yoğunluk (kg/m^3), alt ısı değeri (MJ/kg), kinematik viskozite (cSt), parlama noktası ($^{\circ}\text{C}$) ve setan sayısı gibi temel parametreler incelenmiş, elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Biyodizel, n-bütanol ve nanoparçacık katkılı yakıt karışımlarının özellikleri

		B20	B20But10	B20	B20But10	B20	B20But10	B20	B20But10	B20	B20But10
Özel- likler	Me- tot	0 ppm		25 ppm		50 ppm		75 ppm		100 ppm	
Yoğun- luk, kg/m^3	ASTM D5865	835.1	833.7	835.5	834.2	835.9	834.7	836.3	835.3	836.6	835.7
Isıl Değer, MJ/kg	ASTM D5865	41.24	39.41	40.29	38.42	39.81	38.15	39.37	37.56	38.82	37.18
Kine- matik Viskozite, cSt	ASTM D5865	3.12	3.17	3.13	3.19	3.14	3.2	3.19	3.29	3.28	3.41
Parlama Noktası, $^{\circ}\text{C}$	ASTM D5865	68	44	67	44	66	43	66	43	65	42
Setan Sayısı	ASTM D613	52.1	46.8	52.4	47.1	53.1	47.9	53.8	48.7	54.1	49.3

Tablo 4.2’de sunulan test yakıtlarının fiziko-kimyasal özellikleri incelendiğinde, Ni_2O_3 ’ün her iki yakıt karışımında da benzer etkiler gösterdiği görülmektedir. Nanoparçacık konsantrasyonu arttıkça yoğunluk ve kinematik viskozitede küçük fakat tutarlı artışlar kaydedilmiş, bu durum literatürde bildirilen eğilimlerle uyumlu şekilde püskürtme sonrası yakıt damlacıklarının homojenliğini ve atomizasyon kalitesini iyileştirmiştir (Channapattana vd., 2023). Ayrıca parlama noktası değerlerinde düşüş gözlenmiş; bu durum, yakıtın daha düşük sıcaklıklarda buharlaşabilmesini ve silindir içinde daha kolay tutuşmasını sağlamıştır. Bu bulgu, cetan indeksindeki artışlarla da desteklenmektedir. Setan sayısındaki iyileşme, Ni_2O_3 ’ün yüksek ısı iletkenliği ve katalitik özelliklerinin tutuşma gecikmesini azaltmasına ve daha kararlı bir yanma sürecine katkıda bulunmasına

bağlanmaktadır (Sarno vd., 2020). Bununla birlikte, nanoparçacıkların yanmayan inorganik yapısı nedeniyle her iki yakıt karışımında da alt ısı değerlerinde belirgin bir azalma kaydedilmiştir. Literatürde de benzer şekilde metal oksit katkılarının yakıtların alt ısı değerini düşürdüğü bildirilmiştir (Vellaiyan vd., 2020). Yakıt tipleri karşılaştırıldığında, B20 karışımı B20But10'a göre daha yüksek alt ısı değer ve Setan indeksine sahiptir; bu durum n-bütanolün düşük enerji yoğunluğuna bağlanmaktadır. Ayrıca biyobütanolün düşük Setan sayısı ve düşük alev sıcaklığı, daha uzun tutuşma gecikmesine ve silindir içi basıncın azalmasına yol açmaktadır (Santhosh & Kumar, 2020). Bununla birlikte, daha düşük parlama noktası ve daha yüksek uçuculuğa sahip B20But10 karışımı, belirli koşullar altında yanmanın başlamasını hızlandırarak tutuşabilirlik açısından avantaj sağlayabilmektedir.

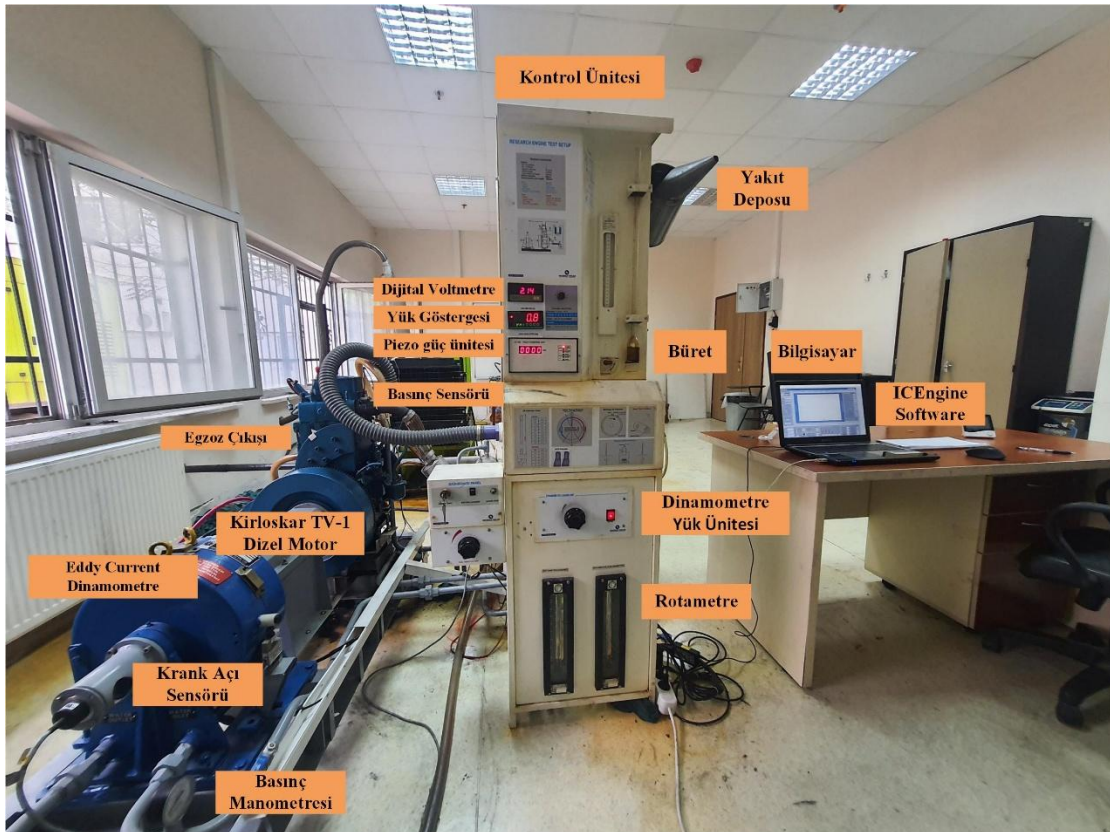
4.2. Deney Düzeneği ve Deneysel Yöntem

Deneysel çalışma, Batman Üniversitesi Motor Laboratuvarı'nda hazırlanmış yakıt karışımlarının kontrollü koşullar altında test edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Çalışma süresince motor devri sabit olarak 1500 dev/dak tutulmuş, uygulanan yükler ise su soğutmalı bir Eddy current tipi dinamometre yardımıyla kademeli olarak ayarlanmıştır. IC EngineSoft v9.0 yazılımı ile kontrol edilen bu sistem, motor yükünün hassas biçimde düzenlenmesine olanak sağlarken aynı zamanda performans ve emisyon parametrelerinin sürekli izlenmesi ve kaydedilmesini mümkün kılmıştır.

Test platformu olarak tek silindirli, dört zamanlı, direkt püskürtmeli ve sıkıştırma oranı ayarlanabilir bir dizel motor (Kirloskar Oil Engines Ltd., Hindistan) kullanılmıştır. Motorun ayrıntılı teknik özellikleri Tablo 4.3'te sunulmaktadır. Motora giren hava miktarı, kalibre edilmiş bir hava tankına bağlı orifis metre manometre düzeneği ile ölçülerek hava yakıt karışımının doğru şekilde kontrol edilmesi sağlanmıştır. Aynı anda emme ve egzoz gazı sıcaklıkları, yanma verimliliğinin yorumlanmasına katkı sağlayacak ısı verilerinin elde edilmesi amacıyla Radix K tipi termokupllar kullanılarak sürekli olarak takip edilmiştir. Test düzeneğine ait gösterim ve temel bileşenler Şekil 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4.3. Motorun teknik özellikleri

Açıklama	Teknik Özellik
Motor tedarikçisi	Apex Innovations Pvt. Ltd
Marka - Model	Kirloskar-TV1
Ateşleme tipi	Sıkıştırma ile ateşleme
Yakıt püskürtme sistemi	Direkt enjeksiyon
Silindir sayısı	1
Çevrim başına strok sayısı	4
Silindir çapı (mm) - Strok (mm)	87.5 - 110
Hacim (cc)	661.45
Sıkıştırma oranı	17.5:1
Maksimum güç (kW) - Devir (dev/dak)	5.2 @1500
Dinamometre	Eddy current tipi
Biyel kolu uzunluğu (mm)	185
Soğutma sistemi	Su soğutmalı
Emme sistemi	Doğal emişli
Yakıt püskürtme avansı (°KA)	bTDC'den önce 0-23°KA (nominal)
Enjektör açma basıncı (bar)	210
Enjektör delik sayısı	4
Enjeksiyon delik çapı (mm)	0.25
Yakıt türü	Dizel
Yakıt deposu kapasitesi (L)	15



Şekil 4.8. Deney düzeneğinin genel görüntüsü

Yakıt tüketimi, motorun hacimsel büret sisteminden 100 mL yakıtı tüketme süresinin ölçülmesiyle ayrı ayrı belirlenmiştir. Bu işlem farklı işletme koşullarında tekrarlanarak FÖYT değerlerinin güvenilir ve tekrarlanabilir biçimde hesaplanması sağlanmıştır. Silindir içi basınç verileri ve krank açısı bilgileri ise piezoelektrik basınç sensörü ve optik enkoder aracılığıyla elde edilmiş, bu sensörler National Instruments NI USB-6210 veri toplama ünitesine bağlanmıştır. Bu ölçümler tutuşma gecikmesi ve ısı salınımı davranışının belirlenmesinde temel veri kaynağını oluşturmuştur.

Emisyon analizleri CAPELEC CAP 3200 gaz analizörü ile gerçekleştirilmiş; NO_x, HC, CO, duman ve CO₂ miktarları nicel olarak ölçülmüştür. Egzoz gazları paslanmaz çelik bir boru üzerinden tahliye edilmiş ve sıcaklıkları sürekli izlenerek emisyon ölçümlerinin doğruluğu sağlanmıştır. Deneysel karşılaştırmalar için önce yalnızca biyodizel ve n-bütanol karışımlarıyla referans testler yapılmış, ardından nanoparçacık katkılı yakıtlarla deneyler tekrarlanarak her iki yakıt grubunun aynı koşullarda sistematik olarak değerlendirilmesi sağlanmıştır. Emisyon analiz cihazına ait görüntü Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9. Emisyon analiz cihazı

Bu çalışmada tüm testler sabit motor devrinde, değişen yük koşullarında yürütülmüştür. Deneylerden önce tüm sensörler, filtreler ve ölçüm cihazlarının kalibrasyon ve

doğrulama işlemleri uluslararası standartlara uygun şekilde yapılmıştır. Ölçüm güvenilirliğini sağlamak için her yeni yakıt karışımı denemesi öncesinde motorun ortam sıcaklığına dönmesi beklenmiş, bu esnada yakıt filtresi temizlenmiş ve egzoz gazı analizörünün filtreleri değiştirilmiştir. Motor yükü, hassas ayar imkânı sunan dinamometre aracılığıyla kontrol edilerek farklı yük koşullarında kararlı çalışmanın ve performans verilerinin düzenli şekilde toplanması sağlanmıştır. Silindir basıncı ve krank açısı sinyalleri her test noktasında on ardışık çevrim üzerinden ortalaması alınarak kaydedilmiş ve ICengine v9.0 yazılımı ile işlenerek ayrıntılı yanma karakteristikleri elde edilmiştir. Her test dizisi üç kez tekrarlanmış ve sonuçların ortalaması alınarak deneysel belirsizlik en aza indirilmiş ve elde edilen verilerin güvenilirliği artırılmıştır.

4.3. Hesaplama Yöntemi

Isı salım oranı (HRR), yanma süreci boyunca silindir içindeki gazlara termodinamiğin birinci yasasının uygulanmasıyla belirlenmektedir (Kishore & Gugulothu, 2022). Termodinamiğin birinci yasasına göre;

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (1)$$

$$mC_v \frac{dT}{dt} = \dot{Q} - P \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

Burada $\dot{Q}$, yanma sırasında açığa çıkan ısı ile silindir duvarlarından gerçekleşen ısı transferini kapsayan net ısı ekleme hızını ifade ederken; $\dot{W}$, sınır hacmindeki değişimler sonucu sistem tarafından yapılan işin hızını göstermektedir. Denklem (2)'nin sadeleştirilmesi amacıyla, çalışma akışkanının ideal gaz olarak davrandığı varsayılabilir.

$$PV = mRT \quad (3)$$

Silindir içerisindeki kütlenin sabit olduğu varsayıldığında, Denklem (3) şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{mR} \left[P \frac{dV}{dt} + V \frac{dP}{dt} \right] \quad (4)$$

Denklem (2) ile Denklem (3) birleştirildiğinde, ısı salım oranını ifade eden denklem şu şekilde yazılabilir:

$$\dot{Q} = \left[\frac{C_v}{R} + 1 \right] P \frac{dV}{dt} + \frac{C_v}{R} V \frac{dP}{dt} \quad (5)$$

Denklemden zaman (t) değişkeni krank açısı (h) ile ifade edildiğinde;

$$Q_t = \frac{k}{k-1} P \frac{\partial V}{\partial \theta} + \frac{1}{1-k} V \frac{\partial P}{\partial \theta} \quad (6)$$

Burada P, silindir içi basıncı (CP), V silindir hacmini, h krank açısını ve k ise özgül ısı oranını ifade etmektedir; dizel motorlarda ısı salım analizinde k değeri 1,35 olarak alınmıştır.

Test edilen yakıtlar için kümülatif ısı salım oranı (CHRR), tanımlanmış krank açısı aralığı boyunca ısı salım hızının integrali alınarak hesaplanmıştır.

$$Q_{cum} = \int P \frac{k}{k-1} \frac{\partial V}{\partial \theta} + \int V \frac{1}{1-k} \frac{\partial P}{\partial \theta} \quad (7)$$

Yanmanın başlangıcı (SOC – Start of Combustion), ısı salım oranı (HRR) eğrisinin negatif değerlerden pozitif değerlere geçtiği krank açısı olarak tanımlanmaktadır (Yesilyurt, 2020). Enjeksiyon başlangıcı (SOI – Start of Injection) ise enjektörün yakıt püskürtmeye başladığı krank açısı konumudur. Tutuşma gecikmesi (ID – Ignition Delay), SOI ile SOC arasındaki zaman aralığı olup krank açısı derecesi cinsinden ifade edilir.

Motor gücü, krank miline aktarılan ve motorun yararlı mekanik çıkışını temsil eden etkin kuvvet olarak tanımlanır. Bu tanımdan hareketle, temel motor performans parametreleri aşağıdaki şekilde formüle edilmiştir (Mohammadi vd., 2012; Yetter vd., 2009).

$$P_b = \frac{2\pi \cdot \omega \cdot \tau}{1000} \quad (8)$$

Burada τ , fren torkunu (Nm), ω krank mili dönme hızını (dev/dak) ve P_b ise fren gücünü (kW) ifade etmektedir. Motor performansının değerlendirilmesi amacıyla BMEP, FÖYT ve FTV hesaplanmıştır. Bu ifadelerin türetilmesinde Denklem (2) ve Denklem

(3)'ten yararlanılmıştır (Kallioğlu vd., 2025; Kishore & Gugulothu, 2022; Yetter vd., 2009) .

$$BMEP (Pa) = \frac{P_b \cdot n_r}{V_d \cdot \omega} 10^3 \quad (9)$$

$$BSFC \left(\frac{g}{kW} \cdot h \right) = \frac{\dot{m}_f}{P_b} 10^3 \quad (10)$$

$$BTE = \frac{P_b}{\dot{m}_f \cdot Q_{LHV}} 3600 \quad (11)$$

Burada n_r , bir çevrimin tamamlanması için krank milinin devir sayısını; V_d , silindirlerin süpürme hacmini; $\dot{m}_f$ (kg/saat), yakıtın kütleli debisini ve Q_{LHV} (kJ/kg), yakıtın alt ısı değeri ifade etmektedir.

4.4. Belirsizlik Analizi

Deney sonuçlarının güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla, Holman (Holman, 2021) tarafından önerilen yöntem kullanılarak bir belirsizlik analizi gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşımda, hedef değişken R bir dizi bağımsız değişken (x) tarafından etkilenmekte ve toplam belirsizlik hata yayılımı tekniği ile hesaplanmaktadır. Her bir parametreye ait belirsizlik değerinin belirlenmesine yönelik matematiksel ifade Denklem (12)'de sunulmuştur. Ölçüm cihazlarının doğruluk ve kalibrasyon hassasiyetleri ile çevresel koşullar, toplam belirsizliğe katkıda bulunan temel etkenler arasında yer almaktadır. Yapılan bu analiz, hem deneysel verilerin güven düzeyini nicel olarak ortaya koymakta hem de ölçüm güvenilirliği üzerinde en fazla etkisi olan değişkenleri belirlemektedir. Her bir ölçüm parametresine ait belirsizlik değerleri ayrıntılı olarak Tablo 4.4'te verilmiştir.

$$U_R = \left[\left(\frac{x_1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_1} U_1 \right)^2 + \left(\frac{x_2}{R} \frac{\partial R}{\partial x_2} U_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{x_n}{R} \frac{\partial R}{\partial x_n} U_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

Tablo 4.4. Ölçüm Sistemlerinin Doğruluk Özellikleri ve Belirsizlik Düzeyleri

Parametre	Ölçüm Aralığı	Doğruluk	Belirsizlik (%)
Fren Gücü	0-3.5 kW	±0.3 kW	±0.84
Motor Devri	0-1500 dev/dak	±0.1 dev/dak	±0.07
Motor Yüğü	0-12 kg	±0.1 kg	±0.83
Yakıt Tüketim Kütlesi	-	-	±1.55
Büret Sistemi	-	±0.1 cc	±1.0
Dijital Kronometre	-	±0.2 s	±0.3
FTV	-	-	±1.76
FÖYT	-	-	±1.76
CO	0-10 %	±0.01 %	±0.84
HC	0-20.000 ppm	±1.0 ppm	±0.83
NOx	0-5000 ppm	±1.0 ppm	±0.83
Duman	0-99.9 % hac.	±0.01 %	±0.83
CO ₂	0-10 %	±0.01 %	±0.84

Denklem (13) esas alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda, sistem performansı ve emisyon parametrelerine ait toplam (birleşik) belirsizlik ±3,11% olarak bulunmuştur.

$$\begin{aligned}
\Delta U_{\text{Overall}} &= \sqrt{(\Delta U_{BP})^2 + (\Delta U_{MFC})^2 + (\Delta U_{FTV})^2 + (\Delta U_{CO})^2 + (\Delta U_{HC})^2 + (\Delta U_{NOx})^2 + (\Delta U_{Duman})^2 + (\Delta U_{CO_2})^2} \\
&= \sqrt{(0.84)^2 + (1.55)^2 + (1.76)^2 + (0.84)^2 + (0.83)^2 + (0.83)^2 + (0.83)^2 + (0.84)^2} \\
&= 3.11 \%
\end{aligned} \tag{13}$$

4.5. Yüzey Yanıt Metodu

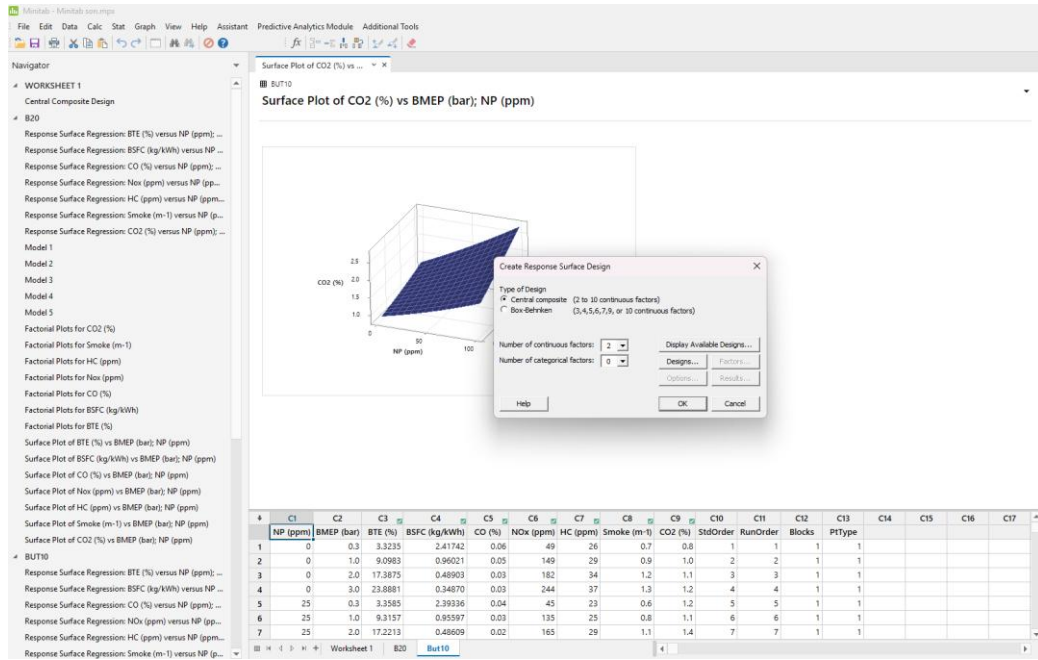
Yanıt Yüzey Yöntemi (YYM), birden fazla giriş değişkeni ile bir veya birden fazla çıktı yanıtı arasındaki ilişkileri incelemek ve bu ilişkiler üzerinden optimizasyon yapmak için kullanılan istatistiksel bir analiz aracıdır. Bu yöntem genel olarak deneysel tasarımın oluşturulması, matematiksel modelin kurulması, istatistiksel doğrulama ve optimizasyon aşamalarından oluşmaktadır. Bu çalışmada bağımsız değişkenler olarak nanoparçacık (NP) konsantrasyonu, fren ortalama efektif basıncı (BMEP) ve emisyon değerleri belirlenmiş; yanıt değişkenleri olarak ise FTV ve FÖYT seçilmiştir. Giriş değişkenlerinin farklı seviyelerini kapsayabilmek amacıyla iki faktörlü asimetrik tam faktöriyel deney tasarımı uygulanmış ve 4×5 matris düzeninde toplam 20 deney koşulu oluşturulmuştur. Her bir yanıt için ikinci dereceden regresyon modelleri Denklem (14) kullanılarak geliştirilmiş ve böylece değişkenlerin etkileri ayrıntılı biçimde değerlendirilerek sistemin optimizasyonu sağlanmıştır^{72,74}.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i>j}^n \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \tag{14}$$

Bu modelde Y , tahmin edilen yanıt değerini; n , bağımsız değişkenlerin toplam sayısını ve β_0 sabit terimi ifade etmektedir. β_i , β_{ii} ve β_{ij} katsayıları sırasıyla x_i ve x_j faktörlerinin doğrusal, karesel ve etkileşimli etkilerini göstermektedir. ϵ terimi ise yanıt değişkeniyle ilişkili rastgele hatayı temsil etmektedir.

Bu optimizasyon çalışmasında iki temel giriş faktörü dikkate alınmıştır: nanoparçacık (NP) konsantrasyonu ve motor yükü. Ni_2O_3 konsantrasyonu, düşük, orta ve yüksek katkı seviyelerini temsil edecek şekilde beş farklı düzeyde (0, 25, 50, 75 ve 100 ppm) değiştirilmiştir. Benzer şekilde motor yükü de fren ortalama efektif basınç (BMEP) cinsinden 0,3; 1,0; 2,0; 3,0 ve tam yük seviyelerinde incelenmiş ve böylece düşükten yüksek çalışma şiddetine kadar farklı işletme koşullarının etkisi araştırılmıştır. Bu seçilen aralıklar, yakıtların yanma, performans ve emisyon davranışlarının sistematik olarak değerlendirilmesini mümkün kılmıştır.

DeneySEL matrisin oluşturulması ve faktörler arası olası etkileşimlerin modellenmesi için MINITAB yazılımı ortamında Merkezi Bileşik Deney Tasarımı (CCD) yaklaşımı kullanılmıştır. Minitab programına ait ara yüz Şekil 4.10'da verilmiştir. Toplamda 20 farklı işletme koşulu belirlenmiştir. Daha sonra Yanıt Yüzey Yöntemi (YYM) uygulanarak, NP konsantrasyonu ile BMEP'in motorun temel yanıt değişkenleri üzerindeki birleşik etkileri değerlendirilmiştir. Bu yanıtlar arasında FTV, FÖYT, CO, HC, NO_x , duman koyuluğu ve CO_2 emisyonları yer almaktadır. Modelin güvenilirliğini artırmak amacıyla deneysel veriler Varyans Analizi (ANOVA) ile incelenmiş; böylece modelin tahmin edici yeteneği istatistiksel olarak doğrulanmış ve giriş faktörleri arasındaki hem doğrusal hem de doğrusal olmayan etkileşimlerin etkin biçimde temsil edildiği gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Minitab programının arayüzü

Tablo 4.5'te, farklı işletme hedeflerini ve önceliklerini yansıtmak amacıyla beş ayrı optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Her model, yanıt değişkenlerine farklı önem düzeyleri atayarak özgün bir optimizasyon stratejisini temsil etmektedir. Model 1, tüm yanıt değişkenlerine eşit ağırlık vererek dengeli bir yaklaşım sergilemektedir. Model 2, çevresel faktörlere odaklanmakta ve yalnızca emisyon parametrelerini ön plana çıkarmaktadır. Model 3, emisyon faktörlerini dikkate almadan yalnızca motor performans metriklerine yoğunlaşmakta ve operasyonel verimlilik ile güç çıkışı temel hedefler olarak tanımlamaktadır. Model 4, tüm yanıt değişkenlerini kapsamına almakla birlikte performans göstergelerine daha fazla ağırlık vermektedir. Model 5 ise tüm yanıt değişkenlerini dikkate almakla birlikte emisyon kriterlerine öncelik tanımaktadır.

Bu farklı modelleme yaklaşımları sayesinde, değişen çalışma koşulları ve tasarım gereksinimleri altında optimum nanoparçacık katkı miktarı (ppm) ve motor yükü (BMEP, bar) değerleri belirlenebilmiştir. Böylece hem kısa vadeli hem de uzun vadeli uygulamalar için esnek ve hedef odaklı optimizasyon stratejileri önerilmiştir. Tüm modellerde temel amaç, motor performansını en üst düzeye çıkarırken zararlı egzoz emisyonlarını en aza indirmektir.

Tablo 4.5. Her bir Model İçin Optimizasyon Kriterleri.

Girdiler		NP {0, 25,50,75,100} – BMEP {0.3, 1.0, 2.0, 3.0}									
Sabitler	Hedef	Model 1		Model 2		Model 3		Model 4		Model 5	
FTV (%)	Max.	✓	*	-	-	✓	*	✓	***	✓	*
FÖYT(kg/kWh)	Min.	✓	*	-	-	✓	*	✓	***	✓	*
CO (%)	Min.	✓	*	✓	*	-	-	✓	*	✓	***
NOx (ppm)	Min.	✓	*	✓	*	-	-	✓	*	✓	***
HC (ppm)	Min.	✓	*	✓	*	-	-	✓	*	✓	***
Duman (m ⁻¹)	Min.	✓	*	✓	*	-	-	✓	*	✓	***
CO ₂ (%)	Min.	✓	*	✓	*	-	-	✓	*	✓	***

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Ni_2O_3 'ün farklı konsantrasyonlarda (25, 50, 75 ve 100 ppm) ilave edilmesiyle hazırlanan B20 ve B20But10 yakıt karışımlarının egzoz emisyonları, yanma ve motor performansı; farklı motor yükleri (0,3; 1,0; 2,0 ve 3,0 bar BMEP) altında sistematik olarak incelenmiştir. Elde edilen deneysel veriler, katkı maddesi içermeyen saf B20 ve B20But10 karışımları ile karşılaştırılarak, nanoparçacık ilavesinin motor davranışına etkileri daha kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir.

5.1. Yanma Analizi

Test edilen yakıtların yanma karakteristikleri, silindir içerisinde gerçekleşen termodinamik ve kimyasal süreçleri daha iyi anlayabilmek amacıyla farklı motor yüklerinde değerlendirilmiştir. Silindir içi ölçümlerden elde edilen temel parametreler arasında enjeksiyon başlangıcı (SOI, °KA), yanma başlangıcı (SOC, °KA), tutuşma gecikmesi (ID, °KA), maksimum basınç açısı (ACP_{max} , °KA), maksimum silindir basıncı (CP_{max} , bar), maksimum görünür ısı salım oranı açısı (AHRR_{max} , °KA), maksimum görünür ısı salım oranı (HRR_{max} , J/°KA), kümülatif ısı salımı (CHRR_{max} , J), maksimum kümülatif ısı salımı açısı ($\text{ACHRR}_{\text{max}}$, °KA), maksimum basınç artış hızı (PRR_{max} , bar/°KA) ve maksimum anlık güç açısı (AIP_{max} , °KA) yer almaktadır. Bu parametreler, nanoparçacık katkılı yakıt karışımlarının motor yanma davranışına etkilerini yorumlamak amacıyla literatürdeki bulgularla karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. İlgili sayısal sonuçlar Tablo 5.1'de sunulmuştur.

Yanma sürecinin değerlendirilmesinde özellikle SOI, SOC ve ID kritik öneme sahiptir. ID, SOI ile SOC arasındaki süreyi ifade etmekte olup motorun tutuşma kalitesinin doğrudan bir göstergesidir. Deneysel bulgulara göre, katkısız yakıtlar için yaklaşık 14–15°KA olan ID değeri, her iki yakıt için de 100 ppm nanoparçacık ilavesiyle tam yükte yaklaşık 10°KA seviyesine düşmüştür. Ayrıca tüm yük koşullarında B20 yakıtı, B20But10'a kıyasla sürekli olarak daha kısa ID değerleri sergilemiştir. Örneğin düşük yük koşullarında B20'nin ID değeri 1–2°KA daha kısa olurken, 2,0 bar BMEP seviye-

sinde fark yaklaşık 1°KA olarak devam etmiştir. 3,0 bar BMEP’de her iki yakıt da minimum değerlere ulaşmış, ancak B20’nin tutuşma gecikmesi hâlâ daha kısa kalmıştır. Bu durum, B20’nin daha yüksek setan sayısına ve daha düşük buharlaşma gizli ısısına sahip olmasıyla açıklanabilir; bu özellikler yanma hazırlık safhasını hızlandırmaktadır. Buna karşın, özellikle n-bütanol içeren üç bileşenli karışımların, düşük setan sayısı ve yüksek buharlaşma gizli ısısı nedeniyle tutuşma gecikmesini uzattığı bilinmektedir (Atmanlı vd., 2013, 2014).

Ni₂O₃ ilavesi her iki yakıt için de özellikle yüksek yük koşullarında ID değerinin kısılmasına katkı sağlamış ve B20 ile B20But10 arasındaki farkı azaltmıştır. Nitekim önceki çalışmalar da nanoparçacık katkılarının buharlaşma süresini kısalttığını, ID’yi düşürdüğünü, yanma verimini iyileştirdiğini ve yakıt tüketimini azalttığını bildirmektedir (Hoang vd., 2022; Kumbhar vd., 2023). Ayrıca motor yükü arttıkça silindir içi sıcaklık ve basınç yükselmekte, bu da tutuşma gecikmesini daha da azaltmakta ve literatürde bildirilen bulgularla uyumlu sonuçlar ortaya koymaktadır (Qi vd., 2010). Yanma analizi için tüm yakıtlara ait sayısal sonuçlar Tablo 5.1’de sunulmuştur.

Tablo 5.1. Test yakıtlarının farklı motor yükleri ve dozajlarında yanma performansı.

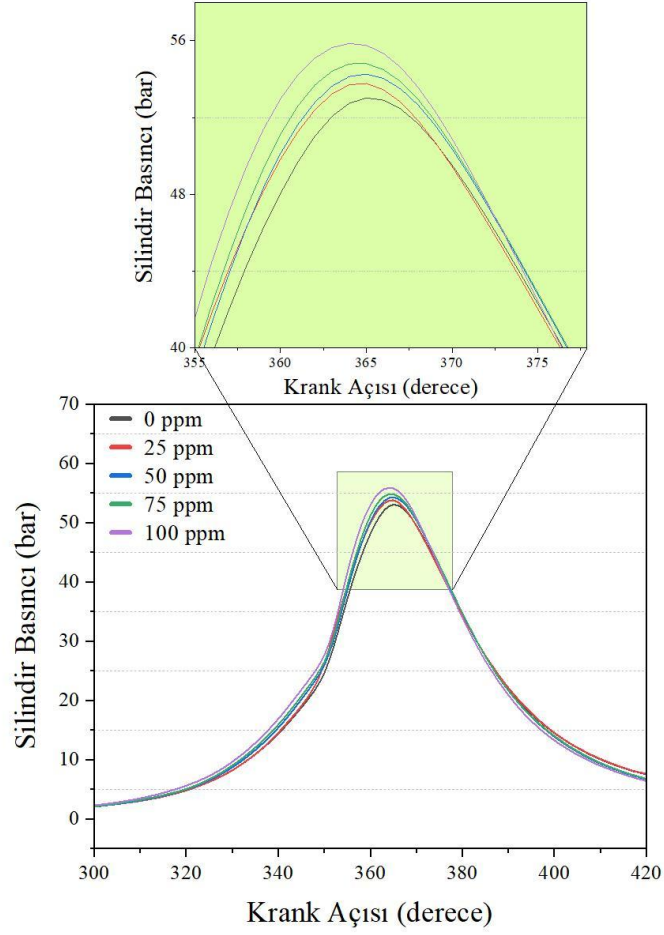
BMEP (bar)	Yakıt Tipi	SOI (deg)	SOC (deg)	ID (deg)	AC- P _{max} (deg)	CP _{ma} x (bar)	AHRR max (deg)	HRR max (J/deg)	ACHR R _{max} (deg)	CHRR max (J)	AIP max (deg)	PRR max (bar/ deg)
0.3	B20	334	348	14	367	43.78	359	14.79	496	932	359	1.82
	B20+25ppm	334	348	14	368	44.37	359	15.21	493	929	359	1.85
	B20+50ppm	334	347	13	368	45.19	360	15.97	494	930	359	1.91
	B20+75ppm	334	347	13	367	46.03	359	16.54	492	929	359	1.95
	B20+100ppm	334	347	13	367	46.62	360	16.95	492	930	360	1.98
	B20But10	334	349	15	367	43.51	358	14.82	497	931	358	1.7
	B20But10+25 ppm	334	348	14	368	44.13	359	15.33	495	929	358	1.74
	B20But10+50 ppm	334	347	13	367	45.07	358	16.07	495	930	359	1.72
	B20But10+75 ppm	334	348	14	367	45.95	358	16.51	494	930	358	1.81
	B20But10+10 0ppm	334	348	14	367	46.23	358	17.24	495	932	358	1.85
1	B20	334	347	13	366	47.49	358	18.14	490	945	358	2.02
	B20+25ppm	334	347	13	367	47.63	359	18.55	487	942	358	2.05
	B20+50ppm	335	347	12	367	48.52	360	19.01	487	944	359	2.13
	B20+75ppm	334	346	12	366	49.75	358	19.54	488	945	358	2.18
	B20+100ppm	334	346	12	366	49.88	358	20.43	487	944	358	2.23
	B20But10	334	348	14	365	46.88	358	18.57	491	949	357	2.02
	B20But10+25 ppm	334	347	13	366	47.21	357	18.92	490	948	357	2.09
	B20But10+50 ppm	334	348	14	365	47.15	357	19.35	491	949	357	2.14
	B20But10+75 ppm	335	348	13	365	48.68	358	20.18	492	951	357	2.13
	B20But10+10 0ppm	334	347	13	366	49.23	357	21.09	491	951	358	2.17
2	B20	335	348	13	366	49.98	357	22.19	486	959	358	2.47
	B20+25ppm	335	347	12	365	50.47	358	22.86	483	956	358	2.52
	B20+50ppm	334	346	12	365	51.09	357	23.42	484	959	357	2.55
	B20+75ppm	335	346	11	365	51.78	357	23.97	484	960	358	2.7
	B20+100ppm	335	346	11	365	52.67	358	24.81	483	959	358	2.79
	B20But10	335	348	13	365	49.44	357	22.18	488	965	357	2.46
	B20But10+25 ppm	335	348	13	366	50.12	357	23.01	486	964	356	2.49
	B20But10+50 ppm	334	347	13	366	50.95	357	23.92	486	964	357	2.54
	B20But10+75 ppm	335	347	12	365	51.63	356	24.78	487	967	357	2.57
	B20But10+10 0ppm	335	346	11	366	52.51	356	25.13	487	968	356	2.61
3	B20	336	347	11	365	53.03	357	26.54	483	979	357	3.22
	B20+25ppm	336	346	10	365	53.77	357	27.41	481	977	357	3.24
	B20+50ppm	335	346	11	365	54.26	357	27.96	479	975	356	3.25
	B20+75ppm	336	346	10	365	54.81	357	28.38	480	978	357	3.31
	B20+100ppm	336	346	10	364	55.86	357	29.45	479	976	356	3.34
	B20But10	335	347	12	366	52.21	354	27.7	484	981	354	3.05
	B20But10+25 ppm	335	347	12	366	53.07	354	28.11	483	980	354	3.11
	B20But10+50 ppm	335	346	11	366	53.5	355	28.8	484	982	355	3.14

B20But10+75 ppm	335	346	11	365	54.27	355	29.37	482	978	355	3.19
B20But10+10 0ppm	335	345	10	365	55.45	355	30.02	483	981	355	3.25

5.1.1. Silindir basıncı

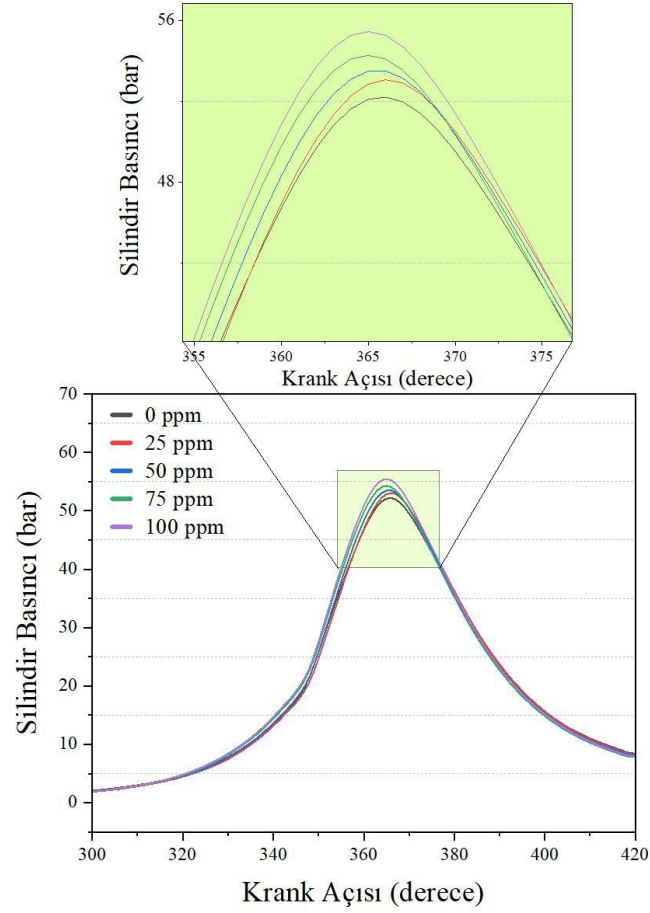
Silindir içi basınç (CP) analizi, yakıtların yanma evresindeki termodinamik süreçleri ve ısı salım karakteristiklerini anlamak açısından kritik bir göstergedir. Tablo 5.1’de sunulan sonuçlara göre, tüm yakıt türlerinde CP_{max} değerleri motor yüküyle birlikte belirgin şekilde artış göstermiştir. Bununla birlikte, B20 karışımları genel olarak B20But10 karışımlarına kıyasla her yük seviyesinde daha yüksek maksimum silindir basıncı üretmiştir. Bu durum, B20’nin daha yüksek setan sayısı ve alt ısı değerine bağlı olarak daha kısa tutuşma gecikmesine ve daha erken başlayan yanma fazına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Literatürde de benzer şekilde n-bütanol ilavesiyle tutuşma gecikmesinin uzadığı ve maksimum basıncın daha geç oluştuğu rapor edilmiştir (İbrahim, 2016; Ramesh vd., 2019). Bunun yanında bazı çalışmalar, n-bütanolün oksijen içeriği sayesinde yanma homojenliğini artırarak ve premiks yanma fazını güçlendirerek silindir basınçlarında artış sağlayabileceğini de bildirmiştir (Tse vd., 2015) (Lujaji vd., 2011).

Saf B20 yakıtı, düşük yükte (0.3 BMEP) yaklaşık 43.78 bar CP_{max} üretmiş ve yük arttıkça bu değer kademeli olarak yükselerek tam yükte (3.0 BMEP) 53.03 bar seviyesine ulaşmıştır. Ni_2O_3 katkısı, B20 yakıtının silindir basınç değerlerini tüm yük seviyelerinde iyileştirmiştir. Özellikle 50 ppm ve üzeri konsantrasyonlarda belirgin bir artış gözlenmiştir; 100 ppm Ni_2O_3 ilavesiyle tam yükte CP_{max} 55.86 bar’a çıkarak katkısız B20’ye kıyasla yaklaşık %5,3 oranında bir artış sağlamıştır. Bu artış, Ni_2O_3 nanoparçacıklarının katalitik oksidasyon etkisiyle tutuşma gecikmesini kısaltıp premiks yanma fazında daha yoğun enerji salımına neden olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca nanoparçacıkların yüksek ısıl iletkenliği, silindir içi sıcaklık dağılımını dengeleyerek daha kararlı bir yanma ortamı oluşturur (Hoang vd., 2022; Kumbhar vd., 2023). Şekil 5.1’de tam yükte B20+Np yakıtına ait silindir içi basınç grafiği verilmiştir.



Şekil 5.1. Tam yükte B20+NP için Silindir Basınç Grafiği

Saf B20But10 karışımı, 0.3 BMEP’de yaklaşık 43.51 bar $CP_{\max}$ değerine sahipken, yük artışıyla birlikte bu değer 3.0 BMEP’de 52.21 bar’a ulaşmıştır. Ancak B20’ye kıyasla n-bütanolün düşük setan sayısı ve yüksek buharlaşma gizli ısısı nedeniyle her yükte daha düşük maksimum basınç elde edilmiştir. Ni_2O_3 ilavesiyle bu dezavantaj büyük ölçüde telafi edilmiştir. Özellikle yüksek konsantrasyonlarda (75 ve 100 ppm) belirgin iyileşme sağlanmış, tam yükte 100 ppm Ni_2O_3 katkılı B20But10 yakıtı 55.45 bar $CP_{\max}$ ’a ulaşarak saf B20’ye oldukça yakın bir basınç değeri üretmiştir. Bu sonuç, Ni_2O_3 ’ün oksijen taşıma kapasitesi ve katalitik özellikleri sayesinde n-bütanolün yanma başlangıcını geciktirici etkisini azalttığını göstermektedir. Ayrıca nanoparçacıklar yakıtın atomizasyonunu ve karışım homojenliğini artırarak daha hızlı ve dengeli bir enerji salımına olanak tanımaktadır. Şekil 5.2’de tam yükte B20But10+Np yakıtına ait silindir içi basınç grafiği verilmiştir.



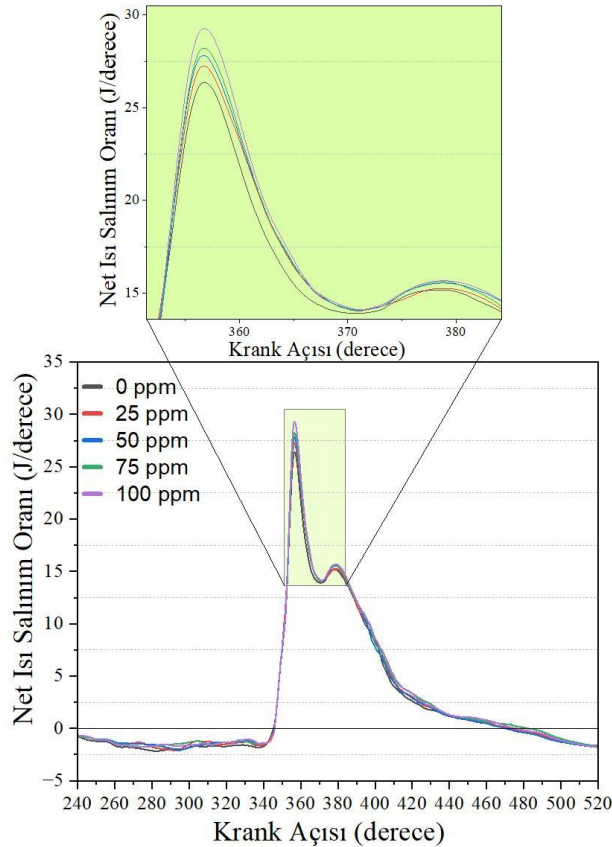
Şekil 5.2. Tam yükte B20But10+NP için Silindir Basıncı Grafiği

5.1.2. Net ısı salınımı

Net ısı salım oranı (HRR), yanma sürecinde silindir içinde açısal olarak yayılan enerji miktarını nicel olarak gösteren ve yanmanın farklı evrelerinin belirlenmesine olanak tanıyan temel bir parametredir. Çalışmada tüm deneyler, sabit 23° ÜÖN öncesi (BTDC) enjeksiyon avansında gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.1’de sunulan sonuçlara göre, tüm yakıt tiplerinde motor yükü arttıkça HRR_{max} değerleri düzenli bir yükselme göstermiştir. Motor yükü arttıkça silindir içi sıcaklık ve basınç yükselmekte, bu da daha hızlı yanma ve daha yüksek HRR oluşumuna katkı sağlamaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada gözlenen yük-HRR artışı literatür ile uyumludur (Singh vd., 2024). Bununla birlikte, B20But10 karışımları B20’ye kıyasla her yükte daha yüksek HRR_{max} üretmiştir. Örneğin tam yükte B20’nin HRR_{max} değeri katkısız yakıtta 26,54 J/°CA iken 100 ppm Ni_2O_3 ilavesiyle 29,45 J/°CA’ya yükselmiştir; benzer şekilde B20But10’da 27,70 J/°CA’dan 30,02 J/°CA’ya çıkmıştır. $AHRR_{max}$ konumları genel olarak 354–360°CA aralığında toplanmıştır; özellikle B20But10 karışımında artan yük ve nanoparçacık oranı ile pik noktalarının

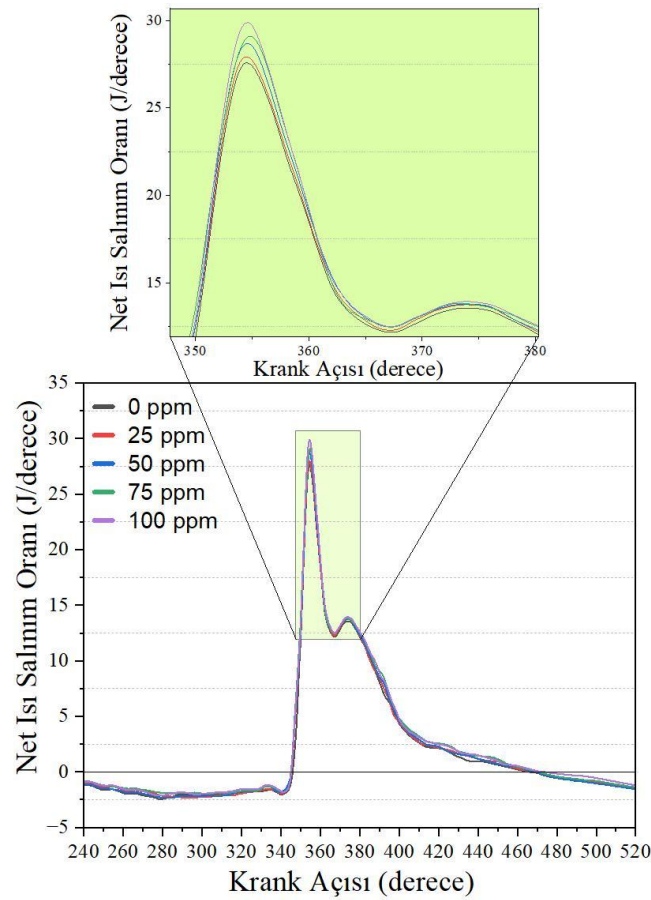
krank açısında bir miktar daha erken gerçekleştiği gözlenmiştir. Bu durum, Ni_2O_3 katkısının yakıt-hava karışımının homojenliğini artırarak premiks yanma fazını güçlendirdiğini ve erken enerji salımını desteklediğini göstermektedir ve literatürde bildirilen bulgularla uyumludur (Kumar vd., 2022).

Katkısız B20 yakıtı düşük yükte (0,3 BMEP) $14,79 \text{ J/}^\circ\text{CA}$ HRR_{max} üretmiş ve yük arttıkça bu değer tam yükte $26,54 \text{ J/}^\circ\text{CA}$ 'ya kadar yükselmiştir. Ni_2O_3 ilavesiyle HRR değerleri tüm yüklerde kademeli şekilde artmıştır. 25 ppm katkı ile düşük yükte $15,21 \text{ J/}^\circ\text{CA}$, tam yükte ise $27,41 \text{ J/}^\circ\text{CA}$ elde edilmiştir. 50 ppm katkı sonrası HRR_{max} daha da yükselerek tam yükte $27,96 \text{ J/}^\circ\text{CA}$ 'ya çıkmıştır. 75 ppm ve 100 ppm seviyelerinde ise bu artış daha belirginleşmiş; tam yükte sırasıyla $28,38$ ve $29,45 \text{ J/}^\circ\text{CA}$ değerlerine ulaşılmıştır. Bu eğilim, Ni_2O_3 nanoparçacıklarının oksijen taşıma kapasitesi ve katalitik yüzey etkisi sayesinde daha hızlı buharlaşma ve daha etkin premiks yanma sağladığını göstermektedir. Ayrıca nanoparçacıkların yüksek ısıl iletkenliği, sıcaklık dağılımını iyileştirerek yanmanın kararlılığını desteklemektedir. Literatürde de oksijenli bileşenlerin HRR eğrilerini dikleştirdiği ve düşük-orta yüklerde erken enerji salımını hızlandırdığı rapor edilmiştir (Ashok vd., 2019; Siwale vd., 2013). Şekil 5.3'te tam yükte B20+NP yakıtına ait net ısı salınım oranı grafiği verilmiştir.



Şekil 5.3. Tam yükte B20+NP için Net Isı Salınım Oranı Grafiği

Saf B20But10 karışımı, düşük yükte $14,82 \text{ J/}^\circ\text{CA}$ HRR_{max} ile B20'ye benzer bir başlangıç göstermiş; ancak motor yükü arttıkça B20But10'un HRR değerleri B20'den daha yüksek seyretmiştir. Tam yükte katkısız B20But10 $27,70 \text{ J/}^\circ\text{CA}$ ile B20'den daha fazla enerji salımı gerçekleştirmiştir. Ni_2O_3 eklenmesi bu farkı daha da belirginleştirmiştir; 25 ppm'de HRR_{max} tam yükte $28,11 \text{ J/}^\circ\text{CA}$, 50 ppm'de $28,80 \text{ J/}^\circ\text{CA}$, 75 ppm'de $29,37 \text{ J/}^\circ\text{CA}$ ve 100 ppm'de $30,02 \text{ J/}^\circ\text{CA}$ 'ya kadar çıkmıştır. Bu durum, n-bütanolün yüksek oksijen içeriğinin ve düşük kaynama noktasının buharlaşmayı hızlandırarak premiks fazda enerji birikimini artırdığına işaret etmektedir (Jayaraman vd., 2024). Ni_2O_3 katkısı ile bu etki güçlenmiş, tutuşma gecikmesi azalmış ve premiks yanma evresinde daha yüksek enerji açığa çıkmıştır. Burada NP katkısı ile gözlenen birikim ve tepe yoğunluğundaki daha da belirgin artış, önceki araştırmalarla paralellik göstermektedir (Sukjit vd., 2013). Böylece B20But10 karışımları özellikle yüksek NP dozajlarında B20'ye çok yakın hatta bazı koşullarda daha yüksek HRR değerlerine ulaşmıştır. Şekil 5.4'te tam yükte B20But10+NP yakıtına ait net ısı salınım oranı grafiği verilmiştir.



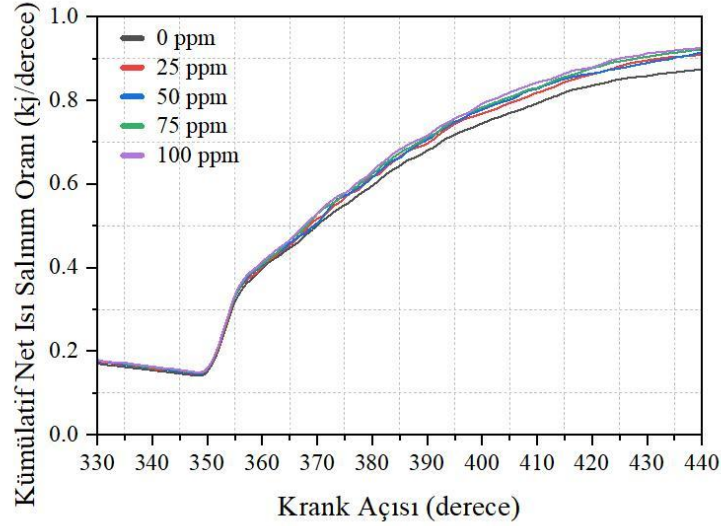
Şekil 5.4. Tam yükte B20But10+NP için Net Isı Salınım Oranı Grafiği

5.1.3. Kümülatif ısı salınımı

Kümülatif net ısı salım oranı (CHRR), krank açısı boyunca yanma süresince açığa çıkan toplam enerjiyi gösterir ve anlık ısı salım değerlerinin integrasyonu ile elde edilir. Bu çalışmada farklı motor yükleri ve nanoparçacık (NP) konsantrasyonları için elde edilen CHRR sonuçları Tablo 5.1’de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bulgular, B20 yakıtının genel olarak B20But10’a göre daha yüksek CHRR değerlerine sahip olduğunu, bunun ise B20’nin daha yüksek alt ısı değeri ve setan sayısı sayesinde daha etkin oksidasyon ve daha fazla toplam enerji salımına yol açmasından kaynaklandığını ortaya koymaktadır (Pan vd., 2021). Buna karşın B20But10 karışımları, özellikle düşük krank açıları ve düşük yük koşullarında daha düşük CHRR eğilimleri göstermektedir. Bu durum; n-bütanolün düşük enerji yoğunluğu, yüksek buharlaşma ısı ve oksijenli yapısı nedeniyle buharlaşma fazının uzaması ve etkin ısı salımının gecikmesiyle açıklanabilir (Ramesh vd., 2019). Ayrıca biyodizele özgül daha yüksek yoğunluk ve viskozite, yakıtın atomizasyonunu zorlaştırarak düşük ve orta yüklerde toplam enerji salımını kısıtlamaktadır.

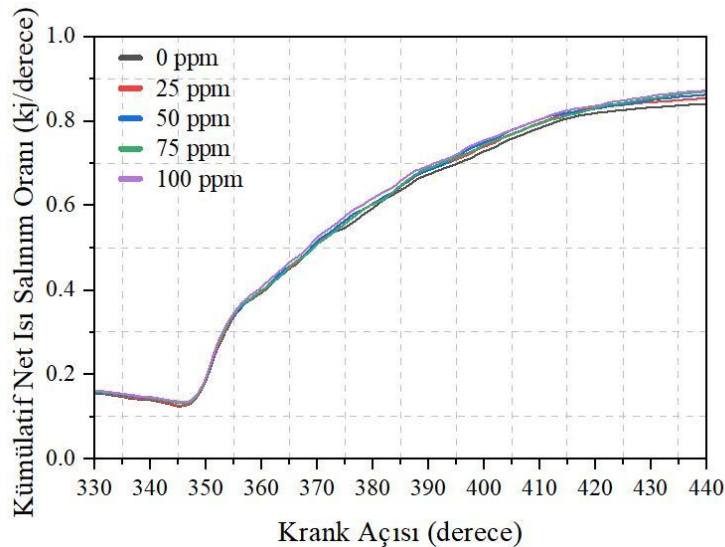
Bununla birlikte, yüksek motor yüklerinde silindir içi sıcaklık ve basıncın artmasıyla oksijenli bileşiklerin tepkime kabiliyeti güçlenmekte ve B20But10’un dezavantajı kısmen telafi edilmektedir (Ahmed vd., 2024). Ayrıca Ni_2O_3 katkısı, katalitik özellikleri sayesinde tutuşma enerjisini azaltarak oksidasyonu hızlandırmakta ve yanma tamamlanmasını iyileştirmektedir (Deviren vd., 2023; El-Adawy, 2023). Bu nedenle özellikle yüksek yüklerde NP katkısı, hem B20 hem de B20But10 için CHRR değerlerinde iyileşme sağlamaktadır.

B20 yakıtı, temel olarak daha yüksek alt ısı değeri sayesinde tüm yük aralıklarında güçlü bir enerji salımı göstermiştir. 0,3 BMEP’te yaklaşık 932 J olan CHRR değeri NP ilaveleriyle belirgin bir değişim göstermemekle birlikte, artan NP konsantrasyonu ile salımın daha kararlı hale geldiği görülmektedir. 1 ve 2 bar yüklerde NP katkıları, CHRR değerlerini büyük ölçüde koruyarak yanma sürecinde tutarlı enerji salımını desteklemiştir. Tam yükte (3 BMEP) 979 J olan saf B20 değeri, 100 ppm NP katkısıyla 976 J seviyesinde kalmıştır; bu da Ni_2O_3 ’ün B20 üzerinde ek bir enerji artışı sağlamasa da yanma kararlılığını ve oksidasyonu destekleyerek toplam salımı koruduğunu göstermektedir. Şekil 5.5’te tam yükte B20+NP yakıtına ait kümülatif net ısı salınım oranı grafiği verilmiştir.



Şekil 5.5. Tam yükte B20+NP için Kümülatif Net Isı Salınım Oranı Grafiği

B20But10 karışımları, düşük yüklerde B20'ye göre daha düşük CHRR sergilemekle birlikte, NP katkısı ile kısmi iyileşme göstermiştir. 0,3 BMEP'te saf B20But10'un 931 J olan CHRR değeri, 100 ppm Ni_2O_3 katkısı ile 932 J seviyesine çıkmıştır. 1 ve 2 bar yüklerde oksijenli bileşimin avantajı ortaya çıkmakta ve NP katkısıyla enerji salımı kademeli olarak artmaktadır; örneğin 2 BMEP'te saf B20But10'un 965 J olan değeri 100 ppm katkıda 968 J'a ulaşmıştır. Tam yükte ise B20But10, oksijenli yapısının ve NP katalitik etkisinin birleşimi sayesinde 981 J'a kadar çıkabilmiştir. Bu artış, özellikle premiks yanma fazının güçlenmesi ve Ni_2O_3 'ün bu fazda yakıt parçalanmasını kolaylaştırarak enerji salımını hızlandırmasıyla açıklanabilir. Şekil 5.6'da tam yükte B20But10+NP yakıtına ait kümülatif net ısı salınım oranı grafiği verilmiştir.



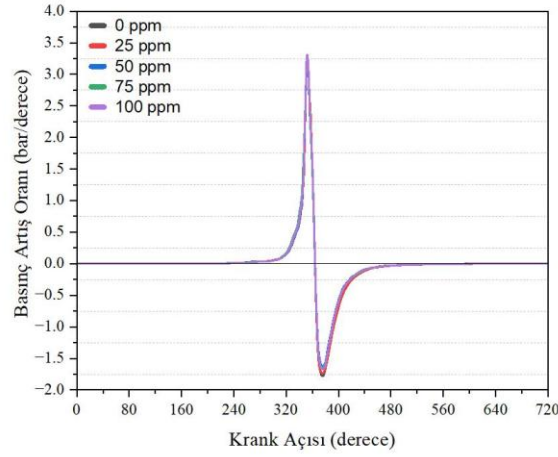
Şekil 5.6. Tam yükte B20But10+NP için Kümülatif Net Isı Salınım Oranı Grafiği

5.1.4. Basınç artış oranı

PRR, yanma odasında her krank açısı derecesinde meydana gelen basınç değişimini ifade eder ve motorun yanma kararlılığı, titreşim ve vuruntu eğilimi açısından kritik bir parametredir (Soudagar vd., 2018). Bu çalışmada farklı yüklerde ve çeşitli Ni_2O_3 nanoparçacık (NP) dozajlarında elde edilen PRR sonuçları Tablo 5.1’de sunulmuştur. Bulgular, motor yükünün PRR üzerinde baskın bir faktör olduğunu ortaya koymuştur. Örneğin B20 için PRR değeri 0.3 BMEP’de 1.82 bar/°CA iken, 3.0 BMEP’de 3.22 bar/°CA seviyesine yükselmiştir. Bu artış, literatürde de belirtildiği üzere yükün artmasıyla birlikte yanma odası sıcaklık ve basıncının yükselmesine ve premiks fazdaki enerjinin daha hızlı açığa çıkmasına bağlanabilir (Shrivastava vd., 2020).

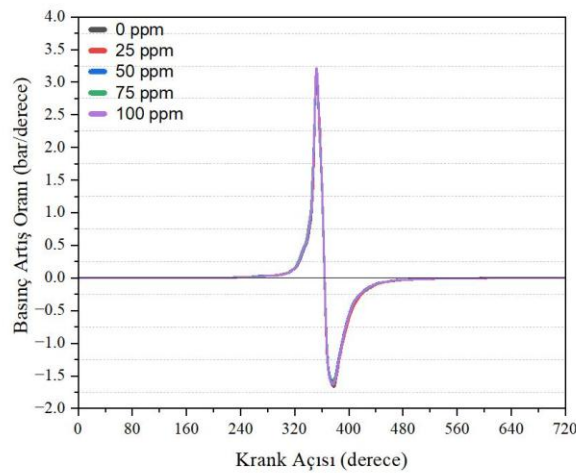
Yakıt kompozisyonu ise PRR üzerinde daha sınırlı değişikliklere yol açmıştır. Tam yük koşulunda en düşük PRR değeri B20But10 karışımında 3.05 bar/°CA olarak kaydedilirken, B20+100 ppm NP ile 3.34 bar/°CA’ya kadar ulaşmıştır. Bu durum, butanolün görece düşük setan sayısı ve yüksek buharlaşma ısısının yanma öncesi karışım oluşumunu uzatması ve basınç yükselme hızını bir miktar sınırlamasıyla açıklanabilir. Öte yandan, Ni_2O_3 ilavesi katalitik etkisiyle tutuşma gecikmesini kısaltmakta, premiks fazdaki yakıt birikimini artırmakta ve bu yolla basınç artış hızını hafifçe yükseltmektedir (Deviren vd., 2024). Ancak bu etkiler güvenli sınırlar içinde kalmış, vuruntu veya aşırı basınç dalgalanmaları gözlenmemiştir.

Saf B20 yakıtında PRR yük arttıkça belirgin şekilde yükselmiş; 0.3 BMEP’de 1.82 bar/°CA iken 3.0 BMEP’de 3.22 bar/°CA’ya ulaşmıştır. Bu artış, B20’nin yüksek setan sayısı ve kalorifik değeri sayesinde hızlı tutuşma ve etkin enerji açığa çıkışı ile uyumludur. Ni_2O_3 nanoparçacık ilavesiyle B20’nin basınç artış oranında kademeli bir yükselme gözlenmiştir. Düşük katkı seviyesinde (25 ppm) PRR 3.24 bar/°CA’ya yükselmiş ve bu artışın nanoparçacıkların ateşleme başlangıcını hafifçe öne çekmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. 50 ppm katkıda PRR 3.25 bar/°CA’ya ulaşarak kontrollü bir iyileşme göstermiş, 75 ppm seviyesinde ise PRR 3.31 bar/°CA’ya çıkarak katalitik etkinin daha netleştiğini ortaya koymuştur. En yüksek katkı olan 100 ppm’de PRR 3.34 bar/°CA’ya ulaşmış, bu durum yanma hızının en yüksek seviyeye eriştiğini ancak güvenli sınırların aşılmadığını göstermiştir. Şekil 5.7’de tam yükte B20+NP yakıtına ait basınç artış oranı grafiği verilmiştir.



Şekil 5.7. Tam yükte B20+NP için Basınç Artış Oranı Grafiği

Benzer şekilde B20But10 karışımı, butanolün düşük setan sayısı ve yüksek buharlaşma ısısı nedeniyle B20'ye kıyasla daha düşük PRR sergilemiş ve 3.0 BMEP'de 3.05 bar/°CA olarak kaydedilmiştir. Bu sonuç, butanol katkısının premiks fazı uzatarak basınç artış hızını hafifçe sınırladığını doğrulamaktadır. Ancak Ni_2O_3 ilavesiyle bu dezavantajın kısmen giderildiği görülmektedir. 25 ppm NP katkısında PRR 3.11 bar/°CA'ya çıkmış, 50 ppm seviyesinde 3.14 bar/°CA'ya ulaşarak katalitik etkinin belirginleştiği gözlenmiştir. 75 ppm'de PRR 3.19 bar/°CA'ya yükselerek temel yakıta göre anlamlı bir artış göstermiş, 100 ppm katkıda ise 3.25 bar/°CA'ya ulaşarak Ni_2O_3 'ün butanol kaynaklı gecikmeyi telafi ettiği ve yanma stabilitesini iyileştirdiği ortaya konmuştur. Şekil 5.8'de tam yükte B20But10+NP yakıtına ait basınç artış oranı grafiği verilmiştir.



Şekil 5.8. Tam yükte B20But10+NP için Basınç Artış Oranı Grafiği

5.2. Performans Analizi

Bu çalışmada motor performansı esas olarak FTV ve FÖYT üzerinden değerlendirilmiştir. Bu iki parametre, test edilen yakıt karışımlarının hem enerji dönüşüm etkinliğini hem de yakıt ekonomisini anlamak için temel göstergeler sunmaktadır. Farklı motor yükleri ve Ni_2O_3 nanoparçacık (NP) konsantrasyonları altındaki FTV ve FÖYT değişimleri, deneysel sonuçlar ve güncel literatür bulguları ile desteklenerek aşağıdaki alt başlıklarda ayrıntılı olarak sunulmuştur. Performans analizine ait tüm bulgular Tablo 5.2’de sunulmuştur.

Tablo 5.2. Performans sonuçlarına ait tüm veriler.

NP (ppm)	BMEP (bar)	FTV (%)		FÖYT (kg/kWh)	
		B20	B20But10	B20	B20But10
0	0.3	3.52	3.32	2.320	2.417
0	1	9.11	9.10	0.910	0.960
0	2	17.42	17.39	0.479	0.489
0	3	23.96	23.89	0.331	0.348
25	0.3	3.61	3.36	2.294	2.393
25	1	9.36	9.32	0.908	0.955
25	2	17.64	17.22	0.468	0.486
25	3	24.06	23.95	0.323	0.348
50	0.3	3.73	3.41	2.282	2.381
50	1	9.49	9.45	0.899	0.951
50	2	17.88	17.46	0.462	0.478
50	3	24.22	24.68	0.319	0.340
75	0.3	3.83	3.71	2.125	2.284
75	1	9.60	9.63	0.886	0.939
75	2	17.98	17.82	0.450	0.451
75	3	24.85	24.94	0.295	0.333
100	0.3	3.79	3.50	2.193	2.359
100	1	9.58	9.52	0.890	0.949
100	2	17.89	17.50	0.455	0.471
100	3	24.89	24.75	0.309	0.339

5.2.1. Fren termal verimi

FTV, yakıtın kimyasal enerjisinin motorda mekanik güce dönüşüm etkinliğini ifade eden temel bir performans göstergesidir. Şekil 5.9 ve Tablo 5.2 incelendiğinde, tüm

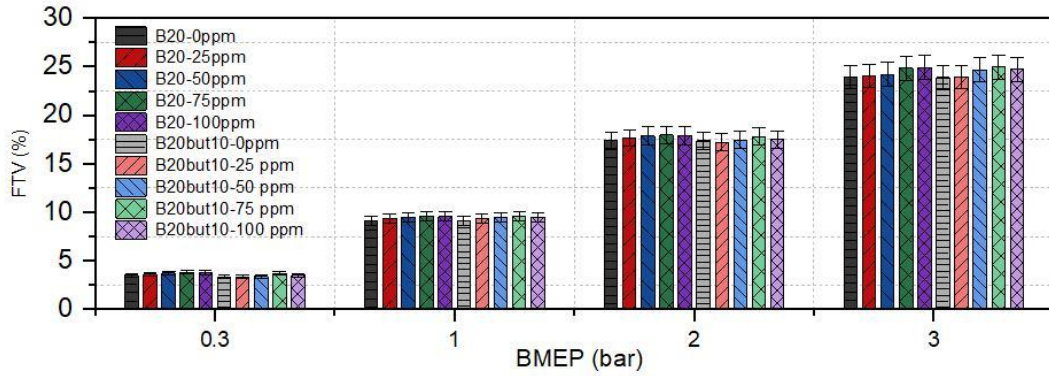
yakıtlar için motor yükü arttıkça FTV'nin yükseldiği görülmektedir. Bu durum, artan silindir içi sıcaklık ve basınç sayesinde yanmanın daha verimli gerçekleşmesine bağlanabilir. Saf yakıt karşılaştırmasında B20, tüm yük koşullarında B20But10'dan biraz daha yüksek verim sergilemiştir. Bunun temel nedeni B20'nin daha yüksek alt ısı değere ve setan sayısına sahip olması ve bu sayede daha hızlı tutuşma ve daha dengeli yanma sağlamasıdır (Hassan vd., 2023; Ibrahim, 2016). Buna karşılık B20But10'da yer alan n-bütanol, düşük setan sayısı ve yüksek buharlaşma gizli ısı nedeniyle silindir içi karışımı soğutarak ateşleme gecikmesini uzatmakta ve FTV'yi sınırlamaktadır. Literatürde de benzer şekilde dizel-biyodizel-alkol karışımlarında kalorifik değer düşüşü ve viskozite artışı nedeniyle FTV'nin saf dizel ve biyodizel karışımlarına göre daha düşük seyrettiği raporlanmıştır (Atmanlı vd., 2013).

Saf B20 yakıtında FTV değerleri 0.3 bar BMEP'te %3.52'den başlayarak 3.0 bar BMEP'te %23.96'ya kadar yükselmiştir. Ni_2O_3 eklenmesi ile düşük ve orta yüklerde verimlilik kademeli olarak artmıştır. Özellikle 75 ppm katkı seviyesinde 0.3 bar BMEP'te %3.83, 1 bar BMEP'te %9.60, 2 bar BMEP'te %17.98 ve 3 bar BMEP'te %24.85 değerlerine ulaşılmıştır. Bu artış, NPs'in katalitik özelliği sayesinde yakıtın tutuşma gecikmesini kısaltması ve yanma sürecini hızlandırması ile ilişkilidir (De Luca vd., 2005). Ancak 100 ppm seviyesinde hafif bir düşüş görülmesi, nanoparçacıkların aglomerasyonu ve fazla ısı emilimi nedeniyle yanma sürecinde oluşan homojenliği kısmen zayıflatmasına bağlanabilir (Yetter vd., 2009). Yine de B20+100 ppm'de dahi saf B20'ye göre verim artışı devam etmektedir.

Saf B20But10 yakıtında FTV değerleri 0.3 bar BMEP'te %3.32'den 3 bar BMEP'te %23.89'a yükselmiştir. Bu değerler B20'ye göre başlangıçta biraz daha düşük olsa da Ni_2O_3 katkısı ile özellikle yüksek yüklerde belirgin iyileşmeler sağlanmıştır. 75 ppm seviyesinde 0.3 bar BMEP'te %3.71, 1 bar BMEP'te %9.63, 2 bar BMEP'te %17.82 ve 3 bar BMEP'te %24.94 değerlerine ulaşılmıştır. Böylece yüksek yükte B20But10+75 ppm, saf B20'nin FTV seviyesine oldukça yaklaşmıştır. Bu durum, Ni_2O_3 'ün n-bütanolün düşük setan sayısından kaynaklanan ateşleme gecikmesini azaltarak ve oksijen içeriğinin etkisiyle daha dengeli yanma sağlayarak FTV'yi artırdığını göstermektedir. Ancak 100 ppm seviyesinde FTV'nin biraz düşmesi, tıpkı B20'de olduğu gibi, nanoparçacık kümelenmesi ve ısı transferindeki dengesizliklere bağlanabilir.

Literatürdeki çalışmalarda NP'lerin ateşleme gecikmesini kısalttığı, oksidasyonu hızlandırdığı ve daha kararlı yanmayı teşvik ettiği; mikro patlamalar ve buharlaşmayı destekleyerek fiziksel gecikmeyi azalttığı ve FTV'yi artırdığı bildirilmiştir (Raju vd.,

2018). Benzer şekilde, yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahip nikel oksit nanopartiküllerinin, atomizasyonu ve ısı/kütle transferini iyileştirerek FTV’de artış sağladığı literatürde rapor edilmiştir (Navinprasad vd., 2021; Srinidhi vd., 2019).



Şekil 5.9. FTV'nin NP ve BMEP ile değişimi

5.2.2. Fren özgül yakıt tüketimi

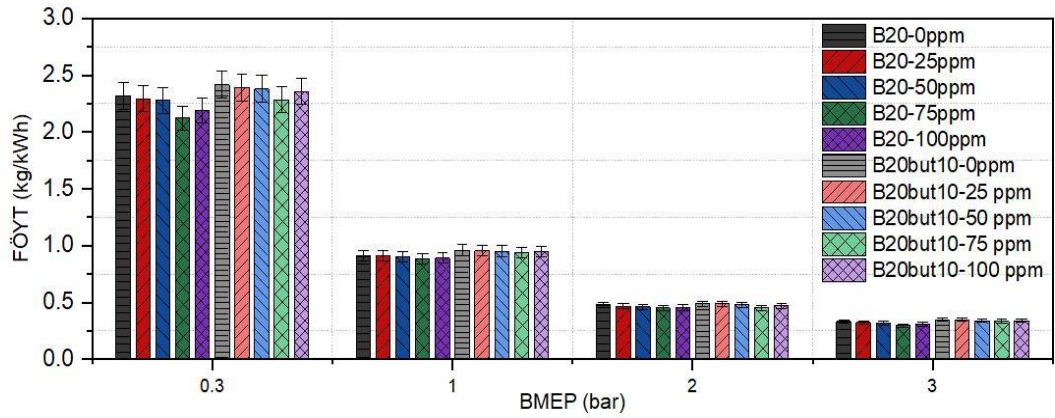
FÖYT, içten yanmalı motorların performansını değerlendirmede kullanılan temel parametrelerden biridir ve üretilen birim güç başına tüketilen yakıt miktarını ifade eder. Başka bir deyişle FÖYT’ün düşük olması, motorun kimyasal enerjiyi daha verimli bir şekilde mekanik güce dönüştürdüğünü gösterir. Bu çalışmada farklı yüklerde ve Ni_2O_3 nanoparçacık (NP) katkı oranlarında elde edilen FÖYT değerleri incelenmiştir. Genel eğilim olarak, motor yükü arttıkça her iki yakıt türünde de FÖYT’ün belirgin şekilde azaldığı görülmüştür. Bu durum, yüksek yüklerde silindir içi sıcaklık ve basıncın artmasıyla daha etkin yanma gerçekleşmesine bağlanmaktadır.

Saf B20 yakıtında FÖYT, 0.3 bar BMEP’de 2.320 kg/kWh iken, tam yükte 0.331 kg/kWh’ye düşmüştür. Bu değerler, B20’nin yüksek setan sayısı ve kalorifik değerine bağlı olarak daha verimli enerji dönüşümü sağladığını göstermektedir. NP katkısı ile birlikte FÖYT değerlerinde iyileşmeler gözlemlenmiştir. Özellikle 75 ppm NP katkısı, en düşük FÖYT değerini (0.295 kg/kWh) sağlamıştır. Bu iyileşme, metal oksit nanoparçacıklarının silindir içindeki oksijen dağılımını iyileştirmesi, yakıt-hava karışımının homojenliğini artırması ve karbon birikintilerinin oksidasyonunu kolaylaştırmasıyla açıklana-

bilir. Ancak 100 ppm katkıda, aglomerasyon eğilimi ve ısı absorpsiyonunun artması nedeniyle FÖYT değerinde hafif bir artış kaydedilmiştir. Bu durum, optimum katkı oranının 75 ppm civarında olduğunu göstermektedir.

B20But10 yakıtında FÖYT, saf durumda 0.3 bar BMEP’de 2.417 kg/kWh iken tam yükte 0.348 kg/kWh değerine düşmüştür. Tüm yük aralıklarında B20But10, B20’ye kıyasla daha yüksek FÖYT sergilemiştir. Bunun temel nedenleri arasında, butanolün düşük enerji yoğunluğu, daha yüksek buharlaşma gizli ısı ve düşük setan sayısı bulunmaktadır. Literatürde de benzer sonuçlar raporlanmış, alkol katkılı karışımların daha düşük ısı değere ve daha düşük setan sayısına bağlı olarak daha yüksek FÖYT sergilediği belirtilmiştir (Atmanlı vd., 2015; Cheng vd., 2016). Bu özellikler, ateşleme gecikmesini uzatarak premiks yanma fazında daha fazla yakıt tüketimine yol açmaktadır (Atmanlı vd., 2015). NP katkısı ile birlikte B20But10’un FÖYT değerlerinde de iyileşmeler gözlenmiştir. En düşük FÖYT değeri, 75 ppm katkıda 0.333 kg/kWh olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, oksijenli bileşenlerin (bütanol) sağladığı homojen yanmanın, nanoparçacıkların katalitik etkisiyle birleşerek daha etkin enerji dönüşümüne katkıda bulunduğunu göstermektedir. Ancak tıpkı B20’de olduğu gibi, 100 ppm katkıda aglomerasyon ve akışkanlık sorunları nedeniyle FÖYT değerinde küçük bir artış gözlenmiştir.

Sonuçlar, hem B20 hem de B20But10 için optimum NP katkı oranının 75 ppm civarında olduğunu ve bu seviyede FÖYT’ün minimum değerlere ulaştığını ortaya koymuştur. Bu iyileşme, metal oksit nanoparçacıklarının yakıt-hava karışımı içinde oksijen dağılımını homojenleştirmesi, silindir içinde karbon birikintilerinin oksidasyonunu kolaylaştırması ve yanmayı daha eksiksiz hale getirmesi ile ilişkilidir (Venu vd., 2021). B20, daha yüksek kalorifik değer ve setan sayısı sayesinde her koşulda daha düşük FÖYT sergilerken, B20But10’un dezavantajları Ni_2O_3 katkısı ile büyük ölçüde dengelenmiştir. Literatürdeki çalışmalar da metal oksit nanoparçacıklarının, özellikle nikel ve nikel oksit bazlı katkıların, atomizasyonu iyileştirerek, katalitik aktiviteyi artırarak ve ateşleme gecikmesini kısaltarak FÖYT’ü düşürdüğünü doğrulamaktadır (Keskin vd., 2007).



Şekil 5.10. FÖYT'ün NP ve BMEP ile değişimi

5.3. Emisyon Analizi

Emisyon performansının değerlendirilmesi, dizel motorlarda tipik olarak oluşan başlıca kirletici gazlara odaklanarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda CO, NO_x, HC, duman yoğunluğu ve CO₂ emisyonları izlenmiştir. Farklı motor çalışma koşullarında yapılan ölçümler, yakıt bileşiminin ve Ni₂O₃ nanoparçacık katkısının yanma tamlığı, karışımın reaktivitesi ve genel emisyon eğilimleri üzerindeki etkilerini anlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, hem temel yakıt özelliklerinin hem de nanoparçacık katkılarının egzoz emisyonlarını nasıl şekillendirdiği ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Emisyon verilerine ait tüm sonuçlar Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Emisyon sonuçlarına ait tüm veriler.

NP (ppm)	BMEP (bar)	CO (%)		NO _x (ppm)		HC (ppm)		Duman (m) ⁻¹		CO ₂ (%)	
		B20	B20But10	B20	B20But10	B20	B20But10	B20	B20But10	B20	B20But10
0	0.3	0.06	0.06	58	49	29	26	0.7	0.7	0.9	0.8
0	1	0.05	0.05	161	149	32	29	0.9	0.9	1.0	1.0
0	2	0.04	0.03	202	182	37	34	1.2	1.2	1.1	1.1
0	3	0.03	0.03	268	244	41	37	1.4	1.3	1.4	1.2
25	0.3	0.04	0.04	51	45	24	23	0.6	0.6	1.1	1.2
25	1	0.04	0.03	147	135	27	25	0.9	0.8	1.2	1.1
25	2	0.03	0.02	178	165	33	29	1.1	1.1	1.6	1.4
25	3	0.02	0.02	251	228	35	33	1.2	1.1	1.9	1.7
50	0.3	0.03	0.03	48	43	23	20	0.5	0.5	1.2	1.2
50	1	0.02	0.02	132	125	26	22	0.8	0.8	1.2	1.3
50	2	0.02	0.02	162	156	33	25	0.9	1	1.7	1.6
50	3	0.02	0.01	234	217	34	30	1.2	1	2	2
75	0.3	0.02	0.03	46	39	21	19	0.4	0.4	1.6	1.4
75	1	0.01	0.01	122	117	24	20	0.7	0.7	1.6	1.7
75	2	0.01	0.01	152	147	28	22	0.8	1	2	1.9

75	3	0.01	0.01	228	209	30	28	1	0.9	2.4	2.3
100	0.3	0.02	0.04	47	39	24	20	0.4	0.6	1.7	1.6
100	1	0.02	0.02	129	118	25	21	0.8	0.8	2.3	2.1
100	2	0.01	0.02	159	151	32	24	1	1.1	2.5	2.3
100	3	0.01	0.01	232	215	33	30	1.2	1.1	2.8	2.7

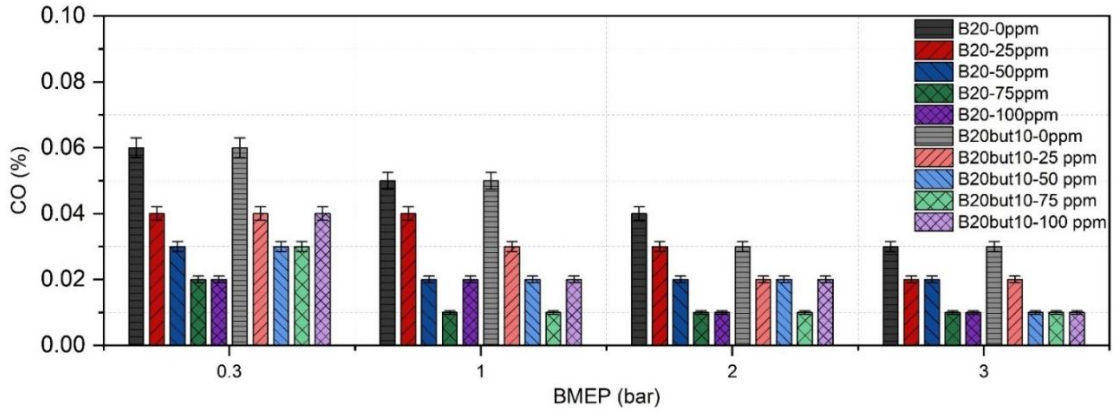
5.3.1. Karbon monoksit emisyonları

CO, dizel motorlarda eksik yanmanın önemli bir göstergesidir ve silindir içindeki oksijen mevcudiyeti ile alev sıcaklığına oldukça duyarlıdır. Şekil 5.11’de farklı motor yüklerinde elde edilen CO emisyonları gösterilmekte, ayrıntılı sayısal değerler ise Tablo 5.3’te sunulmaktadır. Genel olarak her iki yakıt tipi için de motor yükü arttıkça CO emisyonlarının düzenli şekilde azaldığı görülmektedir. Bu durum, yükte birlikte artan silindir içi sıcaklık ve basınçların daha etkin oksidasyon sağlayarak yanma verimini yükseltmesi ile açıklanmaktadır (Siwale vd., 2013). Bununla birlikte, B20But10 karışımları çoğu yükte B20’ye kıyasla benzer veya daha düşük CO değerleri göstermiştir. Bu eğilim, n-bütanolün yüksek oksijen içeriği ve düşük C/H oranı sayesinde CO’nun CO₂’ye dönüşümünü kolaylaştırması ve karışım homojenliğini iyileştirmesiyle uyumludur (Rakopoulos, Giakoumis, vd., 2010; Rakopoulos, Rakopoulos, Hountalas, vd., 2010).

Saf B20 yakıtında, düşük yükte (0,3 bar BMEP) CO seviyesi %0,06 iken yük arttıkça bu değer 3,0 bar BMEP’de %0,03’e kadar düşmüştür. NP katkısının devreye girmesiyle özellikle 25 ve 50 ppm seviyelerinde belirgin bir iyileşme gözlenmiştir. Örneğin, 50 ppm katkılı B20’de düşük yükte CO %0,03’e, tam yükte ise %0,02’ye kadar gerilemiştir. 75 ppm katkıda ise en düşük CO emisyon değerlerine ulaşılmış; düşük yükte %0,02, yüksek yükte ise %0,01 gibi oldukça düşük seviyeler elde edilmiştir. Bu durum Ni₂O₃’ün katalitik etkisiyle oksidasyonun hızlanmasından ve yakıt-hava karışımının homojenleşmesinden kaynaklanmaktadır (Hariram vd., 2017). Ancak 100 ppm seviyesinde bazı yüklerde (özellikle düşük yükte) CO değerlerinde hafif bir artış (%0,02) izlenmiştir. Bu artış, aşırı NP yoğunluğunun aglomerasyon ve lokal ısı yutma etkisi yaratarak alev sıcaklığını düşürmesinden kaynaklanabilir (Swamy vd., 2015).

Saf B20But10 karışımında düşük yükte CO %0,06 iken yüksek yükte %0,03 seviyesine düşmüştür. NP katkısı eklendiğinde özellikle 25 ve 50 ppm seviyelerinde CO emisyonları belirgin şekilde azalmıştır. Örneğin 50 ppm katkılı B20But10’da düşük yükte CO %0,03, tam yükte %0,01 olarak ölçülmüştür. 75 ppm katkı ile B20But10, en düşük CO emisyon değerlerine ulaşarak hem düşük hem yüksek yükte %0,01 seviyesine inmiştir. Bu sonuçlar, n-bütanolün oksijenli yapısına ek olarak Ni₂O₃ katkısının karışımın ok-

sijen dağılımını iyileştirmesi ve CO'nun CO₂'ye dönüşümünü katalitik olarak hızlandırması ile açıklanabilir. Ancak 100 ppm seviyesinde bazı düşük yük koşullarında CO değerlerinde tekrar yükselme eğilimi görülmüş (%0,04), bu durum B20'de olduğu gibi nanoparçacıkların aşırı doygunluk sonucu aglomerasyon oluşturup yanma bölgesindeki lokal sıcaklıkları düşürmesine bağlanabilir (Siwale vd., 2013).



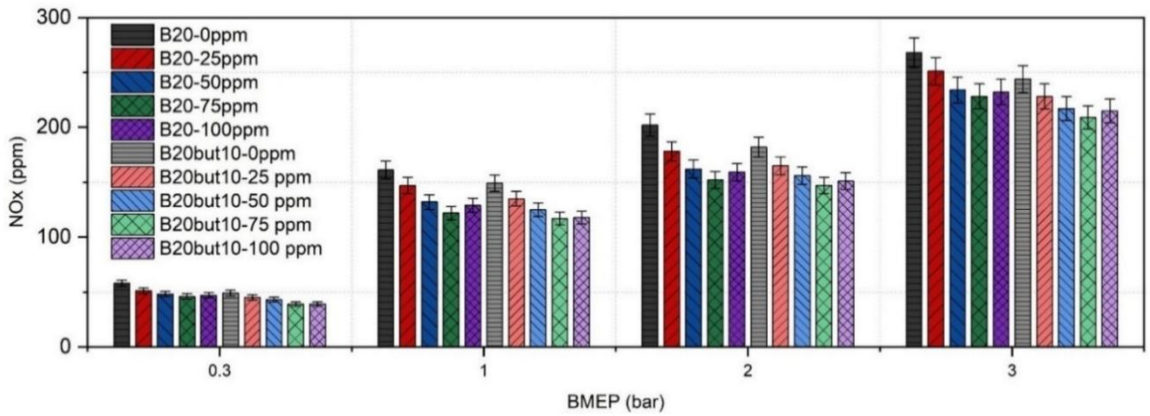
Şekil 5.11. CO emisyonunun NP ve BMEP ile değişimi

5.3.2. Nitrojen oksit emisyonları

Dizel motorlarda NO_x oluşumu esas olarak silindir içindeki yüksek sıcaklıklar, eşdeğerlik oranı ve bu sıcaklıklarda kalma süresi ile ilişkilidir ve klasik olarak Zeldovich mekanizmasıyla açıklanır (Zeldovich, 1946). Şekil 5.12'de görüldüğü üzere, motor yükü (BMEP) arttıkça hem B20 hem de B20But10 yakıtlarında NO_x emisyonu belirgin biçimde yükselmiştir. Ancak n-bütanol ve Ni₂O₃ ilavesi bu artışı önemli ölçüde sınırlamıştır. Örneğin, tam yükte B20'de 268 ppm olan NO_x, 100 ppm Ni₂O₃ ilavesiyle 232 ppm'e; B20But10'da 244 ppm'den 215 ppm'e düşmüştür. Düşük yüklerde bu azalma daha belirgindir; B20'de 58'den 47 ppm'e, B20But10'da ise 49'dan 39 ppm'e gerileme olmuştur. Bu düşüşler, n-bütanolün yüksek buharlaşma ısısı ve düşük alt ısı değeri sayesinde karışımın soğuması ve yanma tepe sıcaklıklarının düşmesiyle, Ni₂O₃'ün ise ısı ve kütle transferini iyileştirip yanma fazlarını daha dengeli hâle getirmesiyle açıklanabilir. Literatürde benzer şekilde, oksijenli yakıtlar (Choi vd., 2015; Doğan, 2011) ve metal oksit nanoparçacıklar (Soloiu vd., 2018) NO_x'i sıcaklık alanını ve tutuşma gecikmesini düzenleyerek azaltmaktadır.

Saf B20 yakıtında yük arttıkça NOx değerleri hızlı bir şekilde yükselmiştir (0.3 bar'da 58 ppm'den 3 bar'da 268 ppm'e doğru). Ni_2O_3 eklenmesiyle bu yükseliş tüm yüklerde belirgin şekilde yavaşlamıştır. 25 ppm'de düşük ve tam yükte NOx sırasıyla 51 ve 251 ppm'e, 50 ppm'de 48 ve 234 ppm'e düşmüştür. En etkili azalma 75 ppm seviyesinde elde edilmiştir; bu noktada düşük yükte 46 ppm, tam yükte 228 ppm NOx gözlenmiştir. 75 ppm'e kadar artan NP miktarı yanma kararlılığını ve homojenliğini geliştirmiş, lokal sıcaklık zirvelerini azaltmıştır. Ancak 100 ppm'de hafif bir geri artış (47 ve 232 ppm) görülmüş, bu durum yüksek NP yoğunluğunun aşırı ısı soğurma ve olası aglomerasyon ile alev yapısını bozabilmesiyle ilişkilendirilmektedir (Rakopoulos, Rakopoulos, Giakoumis, vd., 2010). Dolayısıyla B20 için optimum NP miktarı 75 ppm civarındadır.

B20But10 başlangıçta B20'ye göre daha düşük NOx değerleri sunmuştur (0.3 bar'da 49 ppm'den 3 bar'da 244 ppm'e). Butanolün yüksek buharlaşma ısısı ve oksijen içeriği yanmayı soğutarak başlangıç seviyesini düşürmüştür. Ni_2O_3 katkısı bu avantajı daha da güçlendirmiştir. 25 ppm'de düşük ve tam yükte NOx 45 ve 228 ppm'e, 50 ppm'de 43 ve 217 ppm'e düşmüştür. En düşük değerler yine 75 ppm'de elde edilmiştir; düşük yükte 39 ppm, tam yükte 209 ppm NOx ölçülmüştür. Ancak 100 ppm'de B20'de olduğu gibi hafif bir geri artış yaşanmış (39 ve 215 ppm), bu da aşırı katkı miktarının yanma alanını bozabileceğine işaret etmektedir. Buna rağmen B20But10'un NOx değerleri tüm seviyelerde B20'den düşük kalmıştır. Bu durum butanolün soğutucu ve oksijenlendirici etkisiyle Ni_2O_3 'ün yanmayı iyileştiren etkisinin sinerjik olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu sonuçlar, nikel ve nikel oksit esaslı nanoparçacıklar ile NOx düşüşünü bildiren çalışmalarla da örtüşmektedir (Hassan vd., 2023; Srinidhi & Madhusudhan, 2017).



Şekil 5.12. NOx emisyonunun NP ve BMEP ile değişimi

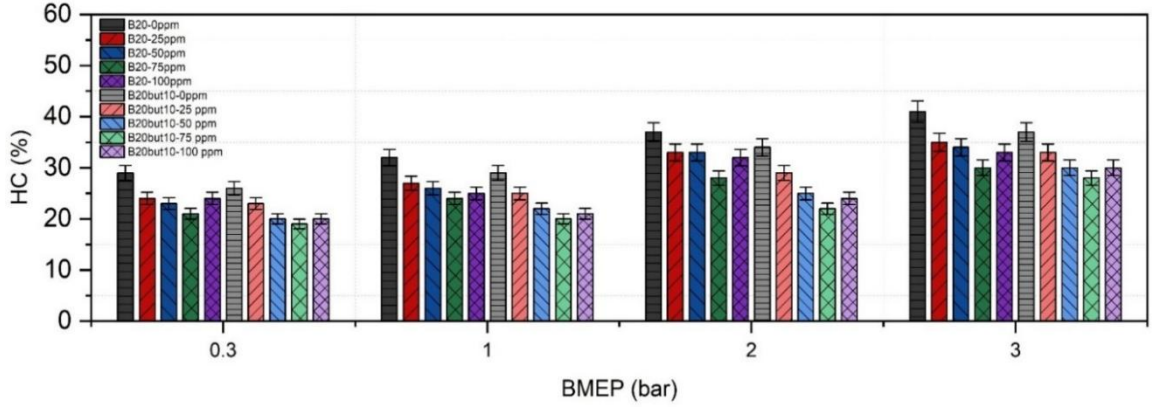
5.3.3. Hidrokarbon emisyonları

HC emisyonları, yanma sırasında yakıtın tam olarak oksitlenememesi sonucu oluşur ve silindir içi sıcaklık ile hava-yakıt karışım kalitesiyle doğrudan ilişkilidir. Şekil 5.13'te görüldüğü üzere hem B20 hem de B20But10 yakıtlarında motor yükü arttıkça HC emisyonları yükselmiştir. Tam yükte saf B20'de HC 41 ppm, B20But10'da 37 ppm iken; 75 ppm Ni_2O_3 ilavesi ile bu değerler sırasıyla 30 ve 28 ppm'e düşmüştür. Bu azalma, butanolün içerdiği oksijenin yanmayı destekleyerek CO ve HC'nin oksitlenmesini kolaylaştırmasıyla açıklanabilir (Shaisundaram vd., 2025; Tefera vd., 2025). Bununla birlikte, biyobütanolün düşük ısı değeri silindir içi sıcaklığı kısmen azaltabilse de, uygun sıkıştırma oranları yanma sıcaklığını artırarak bu olumsuz etkiyi sınırlandırabilir (Nanthago-pal vd., 2019).

Ni_2O_3 nanoparçacıkları ise açık biçimde HC emisyonlarını düşürmüştür. Bu iyileşme, Ni_2O_3 'ün katalitik özelliği sayesinde yanma sırasında oluşan kararsız ara türlerin oksidasyonunu hızlandırmasıyla ilişkilendirilmektedir (Opuz vd., 2023).

Saf B20'de yük arttıkça HC emisyonları 29 ppm'den (0,3 bar) 41 ppm'e (3 bar) çıkmıştır. Ni_2O_3 ilavesiyle tüm yüklerde belirgin düşüşler sağlanmıştır. 25 ppm katkıda HC 35 ppm'e, 50 ppm'de 34 ppm'e, 75 ppm'de ise 30 ppm'e kadar gerilemiştir. Düşük yükte de benzer eğilim görülmekte, 29 ppm'den 21 ppm'e kadar düşüş elde edilmektedir. Bu sonuçlar, nanoparçacıkların oksijen transferini kolaylaştırarak ve kararsız yanma ürünlerinin oksidasyonunu hızlandırarak yanmayı tamamladığını göstermektedir. Ancak 100 ppm'de HC değerleri yeniden hafifçe artmış (33 ppm), bu da aşırı katkı miktarının alev yapısını bozarak tam oksidasyonu kısmen sınırlayabileceğine işaret etmektedir. B20 için optimum katkı seviyesi 75 ppm civarında görünmektedir.

B20But10 yakıtı, başlangıçta B20'ye göre daha düşük HC emisyonu sergilemiştir (tam yükte 37 ppm). Butanolün oksijen içeriği ve buharlaşma soğutması sayesinde yanma daha temiz gerçekleşmiştir. Ni_2O_3 katkısı bu avantajı pekiştirmiştir; 25 ppm'de tam yükte HC 33 ppm'e, 50 ppm'de 30 ppm'e, 75 ppm'de ise 28 ppm'e kadar düşmüştür. Düşük yükte 26 ppm'den 19 ppm'e kadar belirgin bir azalma gözlenmiştir. Bu durum, butanolün oksijen desteği ve Ni_2O_3 'ün katalitik etkisinin sinerjik çalıştığını göstermektedir. 100 ppm katkıda ise tıpkı B20'de olduğu gibi hafif bir geri artış görülmüştür (30 ppm), bu da aşırı dozun yanma kararlılığı üzerinde sınırlayıcı etki yapabileceğini göstermektedir. Genel sonuçlar, nikel oksit katkılarının HC azaltmadaki etkinliğini doğrulayan önceki çalışmalarla da uyumludur (Navinprasad vd., 2021; Srinidhi & Madhusudhan, 2017).



Şekil 5.13. HC emisyonunun NP ve BMEP ile değişimi

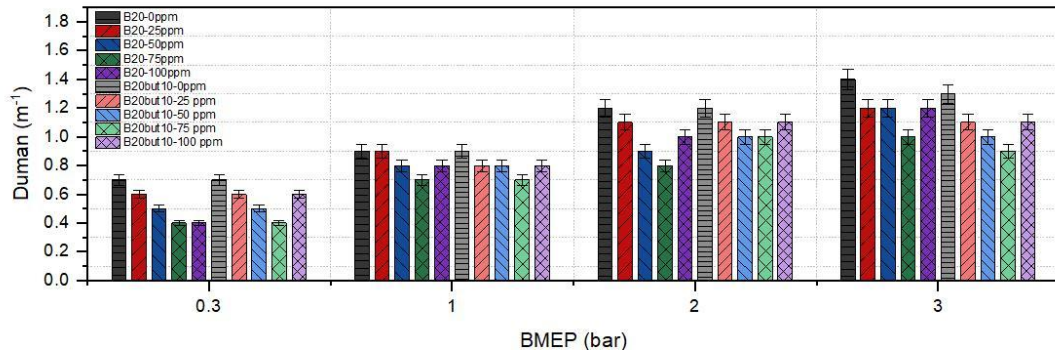
5.3.4. Duman emisyonları

Dizel motorlarda duman emisyonları, yanma sürecinde yakıtın tam olarak oksitlenmemesi sonucu oluşan karbon esaslı partiküllerle ilişkilidir ve hem motor performansı hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir parametredir. Şekil 5.14'te görüldüğü üzere, hem B20 hem de B20But10 karışımlarında motor yükü arttıkça duman yoğunluğu da artmıştır. Saf yakıtlarla tam yükte B20'de duman opasitesi $1,4 \text{ m}^{-1}$, B20But10'da ise $1,3 \text{ m}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Bu fark, butanolün daha düşük karbon içeriği ve oksijenli bağları sayesinde kurum öncüllerinin oluşumunu sınırlamasıyla açıklanabilir (Allasi vd., 2025; Siwale vd., 2013). Literatürde de butanolün piroliz bölgesine oksijen taşınmasını sağlayarak kurum ve partikül madde oluşumunu baskıladığı belirtilmektedir (Nanthagopal vd., 2020; Z.-H. Zhang & Balasubramanian, 2014).

Saf B20'de motor yükü arttıkça duman emisyonları $0,7 \text{ m}^{-1}$ 'den (0,3 bar) $1,4 \text{ m}^{-1}$ 'e (3 bar) kadar yükselmiştir. Ni_2O_3 katkısı ile tüm yüklerde duman yoğunluğu kademeli olarak azalmıştır. 25 ppm'de tam yükte opasite $1,2 \text{ m}^{-1}$ 'e, 50 ppm'de $1,2 \text{ m}^{-1}$ 'e ve 75 ppm'de $1,0 \text{ m}^{-1}$ 'e kadar düşmüştür. Düşük yükte de benzer şekilde $0,7 \text{ m}^{-1}$ 'den $0,4 \text{ m}^{-1}$ 'e kadar azalma elde edilmiştir. Bu iyileşme, nanoparçacıkların yanmayı stabilize etmesi, oksijen transferini kolaylaştırması ve kurum öncüllerinin oksidasyonunu artırmasıyla ilişkilidir. Ancak 100 ppm seviyesinde bazı yüklerde (örneğin 3 bar'da $1,2 \text{ m}^{-1}$) çok hafif bir geri artış görülmüştür; bu durum yüksek katkı miktarında nanoparçacıkların topaklanması ve yanma ortamında optimal dağılımın bozulması ile açıklanabilir⁸⁹. B20 için optimum katkı miktarı 75 ppm civarındadır.

B20But10, başlangıçta B20'ye göre daha düşük duman değerlerine sahiptir (tam yükte $1,3 \text{ m}^{-1}$). Butanolün oksijenli yapısı ve daha düşük karbon içeriği kurum oluşumunu

zaten sınırlandırmıştır. Ni_2O_3 ilavesiyle bu avantaj daha da güçlenmiştir. Tam yükte duman opasitesi 25 ppm'de $1,1 \text{ m}^{-1}$ 'e, 50 ppm'de $1,0 \text{ m}^{-1}$ 'e ve 75 ppm'de $0,9 \text{ m}^{-1}$ 'e kadar düşmüştür. Düşük yükte ise $0,7 \text{ m}^{-1}$ 'den $0,4 \text{ m}^{-1}$ 'e kadar azalma sağlanmıştır. Bu, butanolün oksijen desteği ve Ni_2O_3 'ün katalitik etkisinin birlikte çalışarak yanma verimini artırdığını ve kurum oluşumunu bastırdığını göstermektedir. Ancak 100 ppm'de bazı yük noktalarında hafif bir artış (örneğin düşük yükte $0,6 \text{ m}^{-1}$) gözlenmiştir; bu da fazla katkının optimal dağılımı bozabileceğini ve aşırı ısı emilimi ile lokal yanma koşullarını zayıflatabileceğini göstermektedir. Genel olarak, butanol ve nanoparçacıkların birlikte kurum oluşumunu baskılayıcı sinerjik bir etki yarattığı ve nikel oksit katkılarının partikül emisyonlarını azaltmada etkin olduğu önceki çalışmalarla uyumludur (Keskin vd., 2007; Mandizadeh vd., 2021).



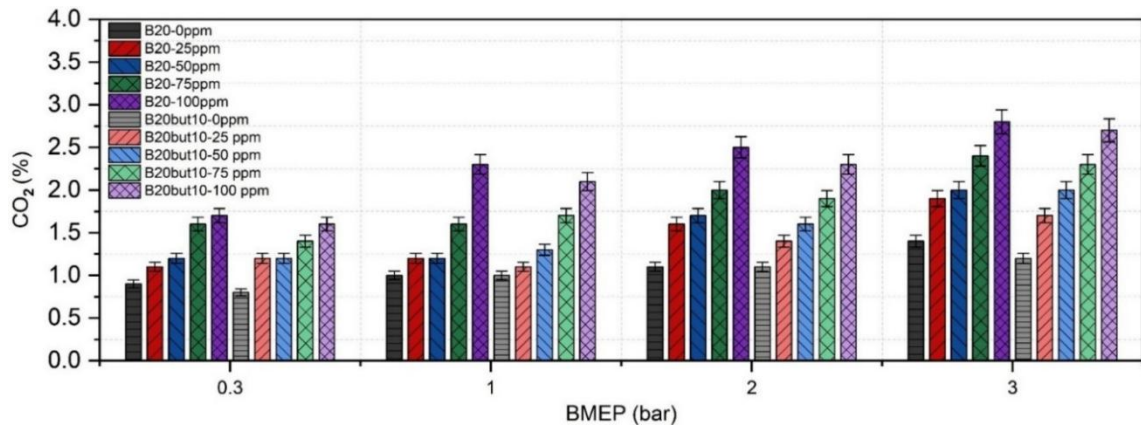
Şekil 5.14. Duman emisyonunun NP ve BMEP ile değişimi

5.3.5. Karbon dioksit emisyonları

İçten yanmalı motorlarda CO_2 emisyonları, yakıtın tam oksidasyonu sonucu ortaya çıkar ve hem yakıtın karbon içeriğini hem de yanma verimini doğrudan yansıtır. Şekil 5.15'te görüldüğü gibi, hem B20 hem de B20But10 karışımlarında motor yükü arttıkça CO_2 emisyonları düzenli şekilde yükselmiştir. Saf yakıtlarla tam yükte B20 için CO_2 %1,4, B20But10 için ise %1,2 olarak ölçülmüştür. Bu fark, butanolün daha düşük C/H oranı ve daha yüksek oksijen içeriği sayesinde CO_2 oluşumunu sınırlandırabilmesiyle açıklanabilir (Yesilyurt vd., 2018). Literatürde de benzer şekilde butanolün dizel ve biyodizele göre daha düşük karbon içeriğine sahip olduğu için CO_2 emisyonlarını düşürdüğü rapor edilmiştir (Akar, 2016; Alptekin vd., 2015). Tam yükte CO_2 , B20 için %2,8'e, B20But10 için %2,7'ye kadar çıkmıştır. Bu artış, nanoparçacıkların katalitik etkisi ile yanma sırasında oluşan CO'nun daha etkin bir şekilde CO_2 'ye okside edilmesinden kaynaklanmaktadır (D'Silva vd., 2015; I. Örs vd., 2018).

Saf B20 yakıtında CO₂ emisyonları yük arttıkça 0,9% (0,3 bar) seviyesinden 1,4% (3 bar) seviyesine yükselmiştir. Ni₂O₃ katkısı ile CO₂ değerleri belirgin biçimde artmıştır; 25 ppm'de tam yükte %1,9'a, 50 ppm'de %2,0'a, 75 ppm'de %2,4'e ve 100 ppm'de %2,8'e ulaşmıştır. Düşük yükte de benzer şekilde 0,9%'dan %1,7'ye kadar çıkış görülmektedir. Bu eğilim, nanoparçacıkların katalitik yüzey etkisi sayesinde CO'nun oksidasyonunu artırması ve yanmayı daha tamamlanmış hâle getirmesiyle açıklanabilir. Ancak CO₂ artışı aynı zamanda yanma verimliliğinin yükseldiğini ve karbonun daha fazla CO₂'ye dönüştüğünü göstermektedir; bu durum, genel olarak istenen bir sonuç olsa da sera gazı salınımı açısından değerlendirilmelidir.

B20But10, başlangıçta B20'ye göre daha düşük CO₂ emisyonuna sahiptir (tam yükte %1,2). Bu durum, butanolün daha düşük karbon oranına ve oksijenli yapısına bağlıdır. Ni₂O₃ katkısıyla birlikte CO₂ seviyeleri yükselmiş; tam yükte 25 ppm'de %1,7'ye, 50 ppm'de %2,0'a, 75 ppm'de %2,3'e ve 100 ppm'de %2,7'ye kadar çıkmıştır. Düşük yükte de benzer bir artış izlenmiş, başlangıçta %0,8 olan değer 100 ppm'de %1,6'ya yükselmiştir. Bu artış, butanolün başlangıçtaki düşük CO₂ avantajına rağmen nanoparçacıkların katalitik etkisiyle CO oksidasyonunun güçlenmesiyle açıklanabilir. Yine de B20But10 yakıtı, tüm katkı seviyelerinde B20'ye kıyasla hafifçe daha düşük CO₂ değerlerini korumuştur; bu da butanolün karbon içeriğini azaltıcı etkisinin devam ettiğini göstermektedir. Benzer şekilde literatürde de nikel oksit nanoparçacıklarının CO₂ seviyelerini artırdığı bildirilmiştir (Hassan vd., 2023; Srinidhi vd., 2019).



Şekil 5.15. Karbon Dioksit emisyonunun NP ve BMEP ile değişimi

5.4. Yanıt Yüzey Metodu Sonuçları

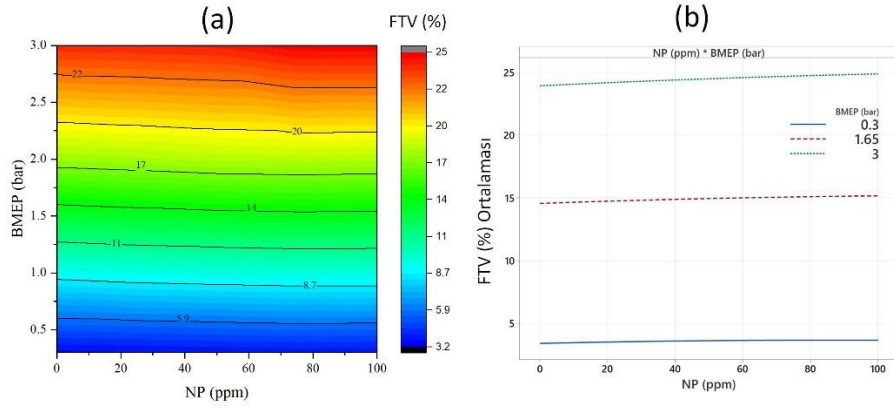
Bu çalışmada, Ni₂O₃ nanopartikül konsantrasyonunun (ppm) ve motor yükünün (bar) B20 ve B20But10 yakıt karışımlarının yanma, performans ve emisyon özellikleri

üzerindeki etkisi, YYM kullanılarak analiz edilmiştir. Her tepki değişkeni için regresyon modelleri oluşturulmuş ve istatistiksel anlamlılıkları varyans analizi (ANOVA) ile doğrulanmıştır.

5.4.1. Fren termal verimi YYM analizi

Şekil 5.16'da sunulan yanıt yüzey grafikleri, BMEP ile NP konsantrasyonunun FTV üzerindeki etkileşimini göstermektedir. Karşıtlık grafiği (a)'da yer alan renk haritası, düşük yük ve düşük NP seviyelerinde verimin oldukça sınırlı olduğunu, ancak motor yükü arttıkça ve NP konsantrasyonu 75 ppm'e kadar yükseltildikçe FTV'nin belirgin şekilde iyileştiğini ortaya koymaktadır. Özellikle 2,0–3,0 bar BMEP aralığında renklerin sarı ve kırmızı tonlarına kayması, yüklerle birlikte silindir içi basınç ve sıcaklığın yükselmesi sonucu yanma etkinliğinin artmasıyla enerji dönüşümünün güçlendiğini ifade etmektedir. Bu alanlarda NP katkısının pozitif etkisi de belirgindir; 0–75 ppm aralığında FTV izoçizgilerinin yukarı yönlü hareket ettiği görülmektedir. Ancak 75 ppm'den 100 ppm'e geçildiğinde eğimlerin yataylaştığı ve iyileşme hızının azaldığı dikkat çekmektedir. Bu durum yüksek NP miktarlarında aglomerasyon ve ısı emilimi artışı nedeniyle yanma etkinliğinin sınırlanması ile açıklanabilir.

Etkileşim grafiği (b)'de ise her bir yük seviyesi için NP konsantrasyonuna bağlı ortalama FTV değişimi karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Düşük yük (0,3 bar BMEP) çizgisinin yatay seyri, hafif yükte NP katkısının verime sınırlı katkı sağladığını göstermektedir. Orta yük (1,65 bar BMEP) seviyesinde ise FTV'nin NP miktarıyla belirgin bir artış eğilimi gösterdiği, özellikle 75 ppm'e kadar yükselişin belirginleştiği görülmektedir. En yüksek yük olan 3,0 bar BMEP'de başlangıçta yüksek FTV değerleri elde edilmekte ve NP katkısıyla küçük fakat istikrarlı bir iyileşme sağlanmaktadır; bu durum yüksek yükte zaten etkin yanmanın gerçekleştiği, NPs'in ise ek olarak karışım homojenliğini ve oksidasyon hızını artırarak verime katkıda bulunduğunu göstermektedir.

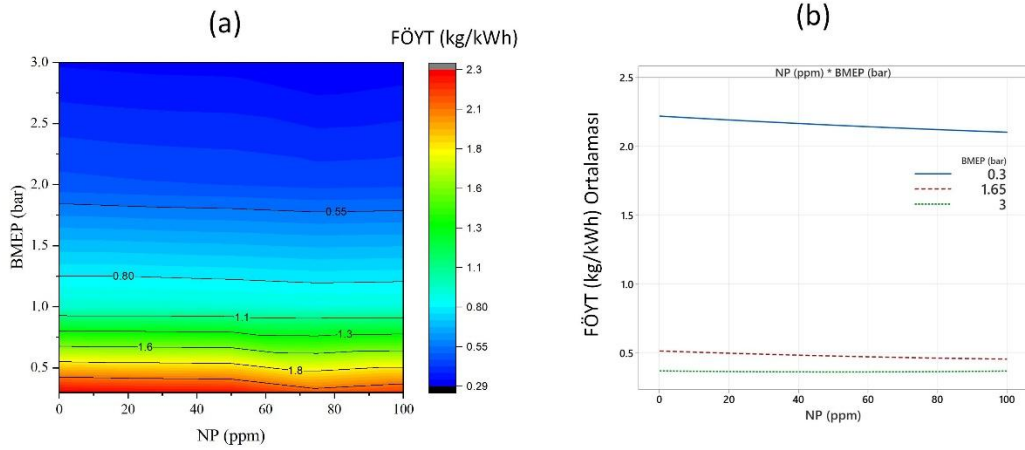


Şekil 5.16. FTV'nin NP Konsantrasyonu ve BMEP'e Göre YYM Analizi a) Karşıtlığı grafiği
b) Etkileşim Grafiği

5.4.2. Fren özgül yakıt tüketimi YYM analizi

Şekil 5.17'de verilen yanıt yüzey grafikleri, BMEP ve NP konsantrasyonunun FÖYT üzerindeki birleşik etkisini göstermektedir. Karşıtlık grafiği (a)'daki kontur haritası incelendiğinde, düşük motor yüklerinde (özellikle 0,3–1,0 bar BMEP aralığında) FÖYT değerlerinin yüksek olduğu ve artan NP konsantrasyonu ile belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bu durum, düşük yüklerde silindir içi sıcaklık ve basıncın sınırlı olması nedeniyle yanma veriminin düşük kaldığını; ancak NPs'in oksijen dağılımını iyileştirerek ve katalitik etkileriyle karbon artıklarının oksidasyonunu hızlandırarak yanma sürecini daha verimli hale getirdiğini göstermektedir. Kontur çizgilerinin özellikle 50–75 ppm aralığında sıklaşması ve değerlerin kademeli olarak düşmesi, optimum katkı seviyesine işaret etmektedir. Ancak 75 ppm'den sonra iyileşme eğrisi yataylaşmakta ve 100 ppm'e doğru azalma hızı belirgin şekilde düşmektedir; bu durum aşırı NP miktarının aglomerasyona ve ısı soğurulmasına yol açarak yakıtın atomizasyon ve karışma özelliklerini kısmen olumsuz etkileyebileceğini düşündürmektedir.

Etkileşim grafiği (b)'de ise sabit BMEP değerleri için NP konsantrasyonu arttıkça FÖYT'nin değişimi gösterilmiştir. En düşük yükte (0,3 bar BMEP) FÖYT başlangıçta oldukça yüksek olmakla birlikte NP ilavesiyle kararlı ve anlamlı bir düşüş sergilemektedir. Orta yükte (1,65 bar BMEP) FÖYT zaten daha düşük seviyededir ve NP katkısı bu değerleri daha da azaltmaktadır; özellikle 50–75 ppm aralığında eğrinin daha belirgin bir şekilde aşağı yönelmesi dikkat çekicidir. En yüksek yükte (3,0 bar BMEP) ise başlangıçtaki FÖYT değerleri çok düşük olup NP katkısının etkisi sınırlı fakat istikrarlıdır; yüksek yükte zaten yüksek sıcaklık ve basınç koşullarının sağladığı tam yanmaya ek olarak NP'lerin katkısı sınırlı düzeyde kalmaktadır.

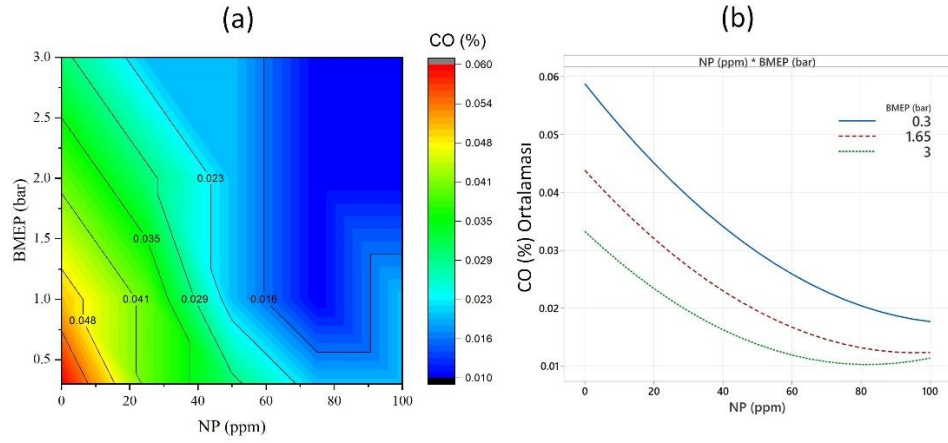


Şekil 5.17. FÖYT'nin NP Konsantrasyonu ve BMEP'e Göre YYM Analizi

5.4.3. CO YYM analizi

Şekil 5.18'deki YYM analizine göre CO emisyonlarının NP konsantrasyonu ve BMEP ile değişimi oldukça belirgin bir eğilim sergilemektedir. Karşıtlık grafiği (a) incelendiğinde CO değerlerinin hem NP konsantrasyonu arttıkça hem de motor yükü yükseldikçe belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. Düşük yüklerde (0,3 bar BMEP) başlangıç CO değerleri yaklaşık %0,06 seviyelerinde iken NP dozajı 75–100 ppm aralığına kadar artırıldığında %0,02 seviyelerine kadar gerilemektedir. Bu düşüş, metal oksit nanoparçacıklarının oksidasyon reaksiyonlarını katalize ederek karbon monoksitin karbondioksit dönüşümünü kolaylaştırması ve yanma homojenliğini iyileştirmesi ile açıklanabilir. Aynı zamanda artan yüklerle birlikte yanma odası sıcaklığı ve basıncı yükseldiğinden oksijenin yanma sürecine daha etkin katılması sağlanmakta ve CO oluşumu baskılanmaktadır.

Etkileşim grafiği (b)'de bu eğilimi doğrular niteliktedir. Grafiklerde tüm yük seviyelerinde (0,3–3,0 bar BMEP) NP miktarı arttıkça CO emisyonlarının eğimli bir şekilde azaldığı görülmektedir. Ancak eğim düşük yüklerde daha keskin, yüksek yüklerde ise daha yataydır; bu durum düşük yüklerde NP katkısının CO üzerinde daha belirgin iyileştirici bir etkisi olduğunu göstermektedir. Yük arttıkça zaten yüksek sıcaklık ve iyi karışma nedeniyle CO doğal olarak azalmakta, dolayısıyla NP katkısının ilave etkisi sınırlı hale gelmektedir.

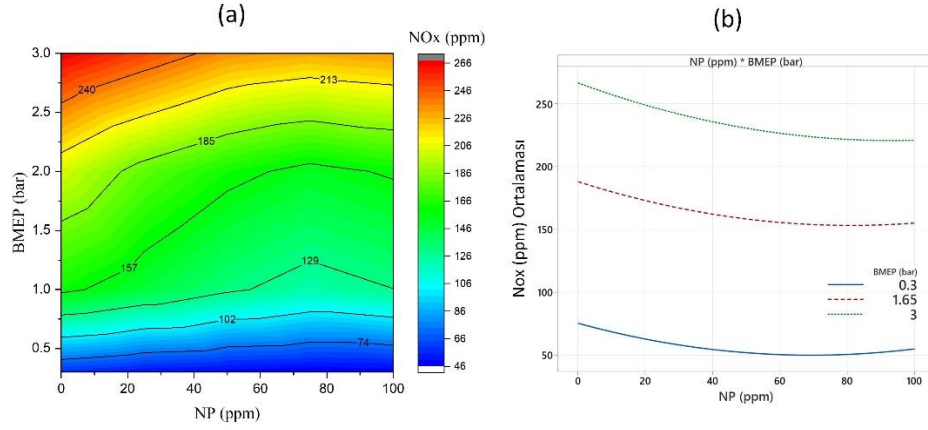


Şekil 5.18. CO'nun NP Konsantrasyonu ve BMEP'e Göre YYM Analizi a) Karşıtlığı grafiği
b) Etkileşim Grafiği

5.4.4. NOx YYM analizi

Şekil 5.19'da verilen YYM analizine göre NOx emisyonlarının NP konsantrasyonu ve BMEP ile değişimi net bir biçimde ortaya konmaktadır. Karşıtlık grafiği (a) incelendiğinde NOx emisyonlarının özellikle BMEP yükseldikçe belirgin şekilde arttığı, buna karşın NP katkısının artmasıyla tüm yük seviyelerinde anlamlı bir azalma eğilimi gösterdiği görülmektedir. Düşük yükte (0,3 bar) başlangıç NOx değerleri yaklaşık 58 ppm civarındayken NP ilavesiyle 75–100 ppm aralığında bu değerler 46–47 ppm seviyelerine kadar gerilemektedir. Orta ve yüksek yüklerde (1–3 bar) NOx başlangıçta 160–268 ppm aralığında iken NP takviyesi ile özellikle 75 ppm'e kadar düşüş eğilimi belirginleşmektedir. Bu durum, Ni_2O_3 'ün katalitik etkisi sayesinde ateşleme gecikmesinin kısılması, premiks yanmanın kontrol altına alınarak aşırı ısı salınımının dengelenmesi ve dolayısıyla tepe yanma sıcaklıklarının düşürülmesi ile açıklanabilir.

Etkileşim grafiği (b) ise bu eğilimi doğrulamakta ve yük artışı ile NP etkisini birlikte göstermektedir. Grafiklerde her üç yük seviyesinde de NP miktarı arttıkça NOx emisyonları belirgin şekilde azalmakta; ancak düşüş eğimi özellikle düşük ve orta yüklerde daha dik, yüksek yükte ise görece daha yatayıdır. Bu durum düşük yüklerde NP katkısının NOx düşürücü etkisinin daha etkin olduğunu, yüksek yüklerde ise zaten artan sıcaklık ve oksijen reaktivitesi nedeniyle NOx oluşumunun daha karmaşık hale geldiğini ve katkının ilave etkisinin sınırlanabildiğini göstermektedir.

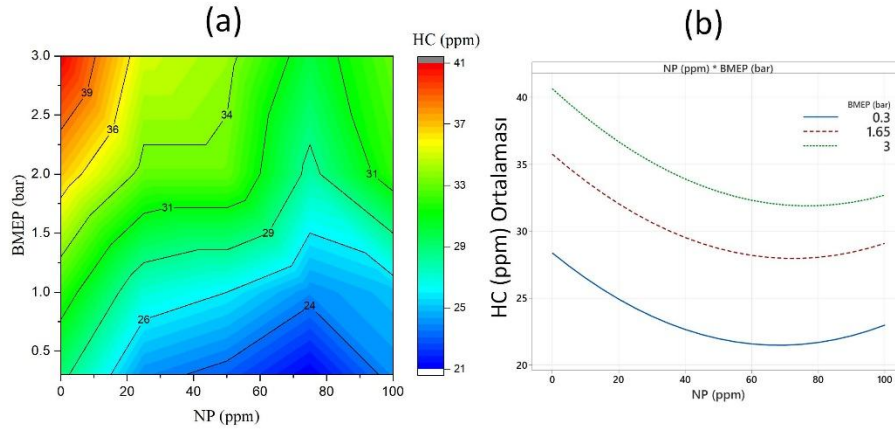


Şekil 5.19. NOx'in NP Konsantrasyonu ve BMEP'e Göre YYM Analizi a) Karşıtlığı grafiği
b) Etkileşim Grafiği

5.4.5. HC YYM analizi

Şekil 5.20'de verilen YYM analizi, HC emisyonlarının Ni_2O_3 NP konsantrasyonu ve BMEP ile nasıl değiştiğini açık biçimde göstermektedir. Karşıtlık grafiği (a) incelendiğinde, HC emisyonlarının düşük NP dozlarında ve düşük yük koşullarında yüksek seviyelerde olduğu, ancak NP miktarı 50–75 ppm'e ulaştığında belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. Düşük yükte (0,3 bar) başlangıçta 37–40 ppm seviyesinde olan HC değerlerinin 75 ppm civarında yaklaşık 28–30 ppm'e kadar düştüğü anlaşılmaktadır. Bu azalma, Ni_2O_3 'ün katalitik etkisiyle yakıt damlacıklarının daha iyi atomize olması, oksijenin karışım içerisinde homojen dağılması ve bu sayede yanmamış hidrokarbon miktarının azalması ile açıklanabilir. Ayrıca NP katkısının ısı transferini ve mikro-patlama etkisini artırarak buharlaşma ve karışma süreçlerini hızlandırdığı bilinmektedir. Orta ve yüksek yüklerde (1,65–3 bar) HC emisyonlarının genel olarak daha düşük seviyelerde olduğu ve NP katkısı ile düşüşün daha kararlı bir şekilde devam ettiği görülmektedir. Yük artışıyla birlikte silindir içi sıcaklık ve basınç yükseldiğinden, yanma daha tamamlanmış hale gelir ve HC değerleri doğal olarak azalır. Buna ek olarak, yüksek yük koşullarında 75 ppm'e kadar NP takviyesi, oksidasyonu destekleyerek HC'yi 21–25 ppm aralığına kadar çekmektedir. Ancak 100 ppm seviyesine ulaşıldığında özellikle düşük ve orta yükte hafif bir artış eğilimi gözlenmektedir. Bu durum yüksek NP konsantrasyonunda oluşan aglomerasyonun oksijen dağılımını olumsuz etkilemesi ve lokal sıcaklık bölgelerini soğutarak oksidasyonu zayıflatmasıyla ilişkilendirilebilir.

Etkileşim grafiği (b) ise bu eğilimi desteklemektedir. Grafiklerde tüm yük seviyelerinde NP artışı ile HC'nin düştüğü, özellikle 50–75 ppm aralığında en güçlü azalma eğiminin yakalandığı açıkça görülmektedir. Düşük yükte eğri daha keskin bir şekilde aşağı yönlüken, yüksek yükte düşüş daha ılımlıdır; bu da yük arttıkça zaten iyileşmiş olan yanma koşullarında NP katkısının ek etkisinin nispeten azaldığını gösterir.



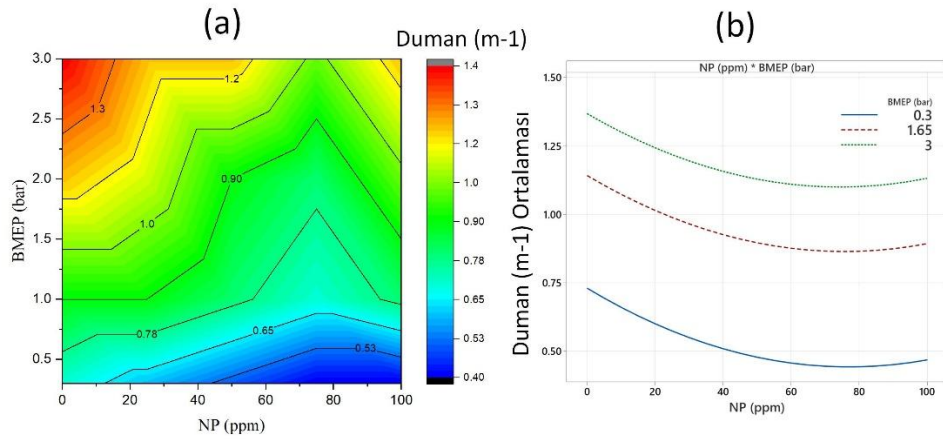
Şekil 5.20. HC'nin NP Konsantrasyonu ve BMEP'e Göre YYM Analizi a) Karşıtlığı grafiği
b) Etkileşim Grafiği

5.4.6. Duman YYM analizi

Şekil 5.21'de sunulan YYM analizi, duman (is, opasite) emisyonlarının NP konsantrasyonu ve BMEP ile nasıl değiştiğini ayrıntılı olarak göstermektedir. Karşıtlık grafiği (a) incelendiğinde, duman emisyonlarının düşük NP seviyelerinde ve özellikle düşük motor yüklerinde (0,3–1 bar BMEP) daha yüksek olduğu, NP miktarı arttıkça ise kademeli bir şekilde azaldığı açıkça görülmektedir. Özellikle 50–75 ppm aralığına kadar NP eklenmesi, duman oluşumunda belirgin bir azalmaya yol açmıştır. Bu durum Ni_2O_3 'ün katalitik etkisiyle yakıtın daha iyi atomize olması, oksijenin karışım içinde daha homojen dağılması ve yanmamış karbon partiküllerinin oksitlenmesinin kolaylaşmasıyla ilişkilendirilebilir. Aynı zamanda nanoparçacıkların yüksek yüzey alanı ve ısı iletkenliği, mikro patlama ve buharlaşma süreçlerini destekleyerek yanmayı tamamlar ve is oluşumunu sınırlar. Orta ve yüksek yük koşullarında (1,65–3 bar BMEP) duman emisyonlarının doğal olarak daha düşük seviyelere indiği, bunun da yüksek sıcaklık ve basıncın yanma verimini artırarak kurum oluşumunu baskılamasıyla açıklanabileceği görülmektedir. Bu yüklerde de NP takviyesi özellikle 75 ppm'e kadar belirgin iyileşme sağlamaktadır. Ancak bazı

bölgelerde 100 ppm seviyesine çıktığında hafif bir artış eğilimi gözlenmektedir. Bu artış, yüksek NP konsantrasyonunda aglomerasyon ve aşırı ısı soğurulması nedeniyle lokal alev sıcaklıklarının düşmesi ve karbon oksidasyonunun kısmen yavaşlaması ile açıklanabilir.

Etkileşim grafiği (b) incelendiğinde, tüm yük seviyelerinde NP miktarının artışıyla duman değerlerinde aşağı yönlü bir eğilim olduğu net biçimde görülmektedir. Düşük yükte eğri daha belirgin bir şekilde düşerken, yüksek yüklerde eğim daha yumuşak bir seyir izlemektedir; bu da yüksek yükte zaten gelişmiş olan yanma koşullarında NP katkısının ek etkisinin sınırlı kaldığını göstermektedir.



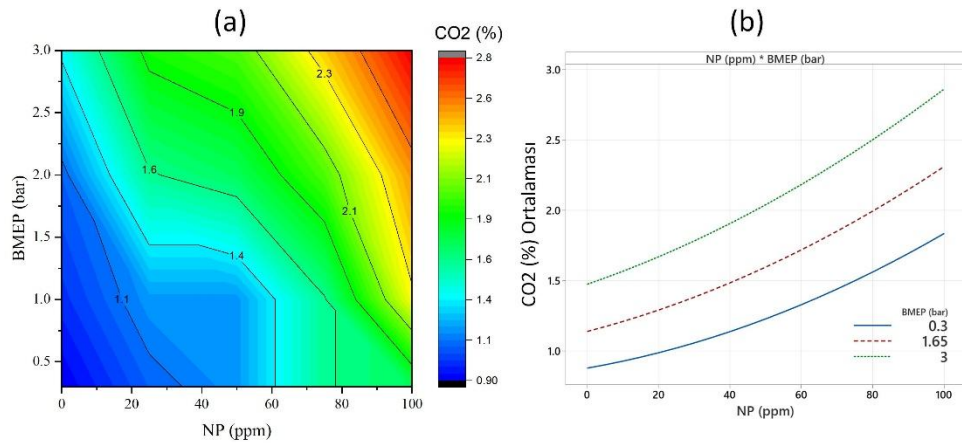
Şekil 5.21. Duman'ın NP Konsantrasyonu ve BMEP'e Göre YYM Analizi a) Karşıtlığı grafiği b) Etkileşim Grafiği

5.4.7. CO₂ YYM analizi

Şekil 5.22'de sunulan YYM analizi, CO₂ emisyonlarının NP konsantrasyonu ve BMEP ile nasıl değiştiğini göstermektedir. Karşıtlık grafiği (a) incelendiğinde, CO₂ emisyonlarının hem motor yükü hem de NP miktarındaki artışla birlikte düzenli olarak yükseldiği görülmektedir. Bu durum, yakıtın yanma veriminin artmasıyla doğrudan ilişkilidir. NP katkısı, yakıtın atomizasyonunu ve oksijenle karışımını geliştirerek daha tam bir yanma sağlamakta; bu da yanmamış karbonlu bileşiklerin CO yerine CO₂'ye dönüşümünü desteklemektedir. Özellikle düşük yüklerde (0,3–1 bar BMEP) CO₂ seviyeleri başlangıçta düşükken NP eklenmesiyle belirgin şekilde yükselmiştir; bu, düşük sıcaklık ve zayıf karışım koşullarında NP'lerin yanmayı iyileştirdiğinin bir göstergesidir. Orta ve yüksek yüklerde (2–3 bar BMEP) zaten yüksek sıcaklık ve basınç sayesinde yanma ve-

rimi artmakta, NP katkısı ise bu süreci daha da güçlendirerek CO₂ emisyonlarını artırmaktadır. Ayrıca, düşük NP dozlarında (0–25 ppm) CO₂'deki artış sınırlıyken 50–75 ppm'e kadar belirgin bir yükseliş gözlenmektedir. Bu durum, NP'lerin yüzey katalitik etkisinin optimum seviyede olduğu aralık olarak değerlendirilebilir. Ancak 75 ppm'den sonra eğrilerin yataylaşması, daha yüksek NP miktarında artış hızının yavaşladığını ve yanma verimindeki kazanımın doygunluğa ulaştığını göstermektedir.

Etkileşim grafiği (b) incelendiğinde, tüm yük seviyelerinde NP miktarı arttıkça CO₂ değerlerinin yükseldiği net olarak görülmektedir. Düşük yükte eğri daha dik bir artış göstermekte, bu da NP katkısının özellikle düşük sıcaklıklı koşullarda yanmayı geliştirme potansiyelinin yüksek olduğunu işaret etmektedir. Yük arttıkça eğrilerin eğimi azalmakta, çünkü yüksek yükte zaten güçlü yanma koşulları mevcut olduğu için NP katkısının ilave etkisi sınırlı kalmaktadır.



Şekil 5.22. CO₂ 'nin NP Konsantrasyonu ve BMEP'e Göre YYM Analizi: a) Karşıtlığı grafiği
b) Etkileşim Grafiği

5.5. Modelleri Optimizasyonu

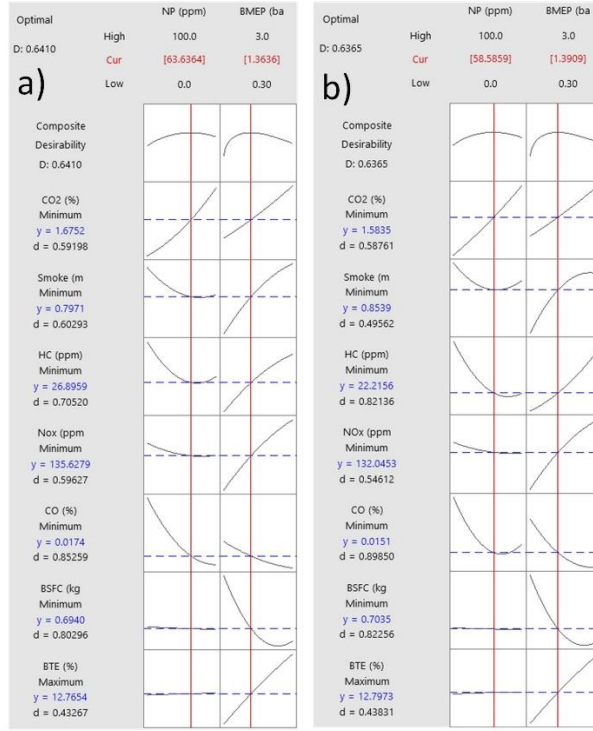
Materyal-Metod bölümünde sunulan Tablo 4.6'ya göre motor performansı ve emisyonlarının optimizasyonu için beş farklı model geliştirilmiştir. Her modelin öngörü kabiliyeti deneysel verilerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir

5.5.1. Model 1 sonuçları

Şekil 5.23'te Model 1 için optimizasyon sonuçları, B20+NP (a) ve B20But10+NP (b) karışımları için dengeli ağırlıklandırma yaklaşımını göstermektedir. Bu modelde tüm

performans ve emisyon parametrelerine eşit önem verilmiş ve böylece motorun genel çalışma dengesini sağlayan optimum koşullar belirlenmiştir. Grafikte kırmızı çizgiler seçilen motor değişkenlerinin (NP dozu ve BMEP) optimum değerlerini, mavi çizgiler ise bu seçimden elde edilen tepkilerin yanıt seviyelerini göstermektedir. B20+NP için yapılan analizde en uygun Ni_2O_3 katkı seviyesi 63,63 ppm ve motor yükü 1,36 bar BMEP olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, B20 bazlı yakıtın tüm yanıt değişkenlerine eşit önem atandığında yaklaşık 63 ppm Ni_2O_3 katkısı ve orta seviyede motor yükü ile optimum performans ve emisyon dengesi sağladığını göstermektedir. Bu koşullarda FTV yüksek, FÖYT düşük seviyede gerçekleşirken CO, NOx ve duman emisyonlarında da anlamlı azalmalar elde edilmektedir.

Benzer şekilde, B20But10+NP için optimum koşullar 58,58 ppm Ni_2O_3 katkısı ve 1,30 bar BMEP olarak belirlenmiştir. Bu yakıtta butanolün oksijen katkısı ve soğutma etkisi, Ni_2O_3 'ün katalitik yanma iyileştirici özellikleriyle birleşerek daha düşük NP seviyesiyle benzer performans-emisyon dengesine ulaşılmasını sağlamıştır. Bu durum, özellikle çevresel etkiyi de göz önüne alarak butanol içerikli karışımların daha düşük nanoparçacık dozajında bile etkili sonuç verebileceğini göstermektedir. Bu analiz, Model 1'in dengeli yaklaşımı sayesinde hem performans hem de emisyon hedeflerini birlikte optimize etmeye uygun olduğunu ve Ni_2O_3 katkılı dizel-biyodizel karışımlarında optimum noktanın orta motor yükleri ve 60–65 ppm civarında nanoparçacık dozajı ile elde edildiğini ortaya koymaktadır. Böylece kısa ve uzun vadeli uygulamalarda güvenli ve dengeli bir çalışma stratejisi önerilmektedir.

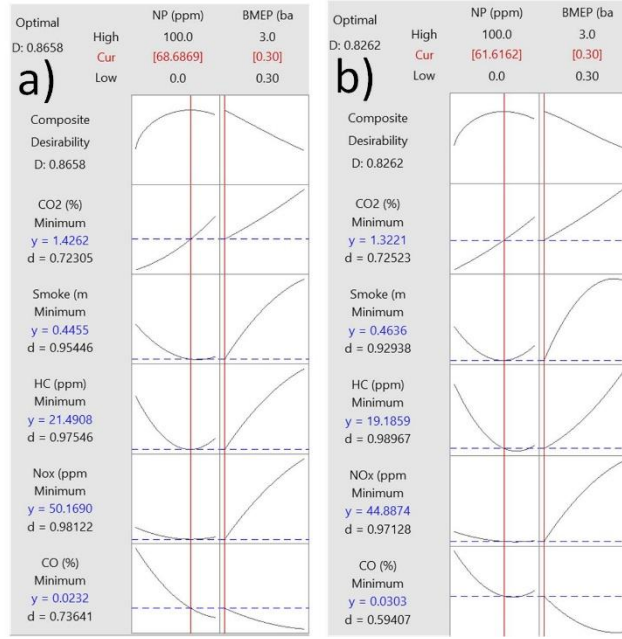


Şekil 5.23. Model 1 için Optimizasyon Grafiği a) B20+NP b) B20But10+NP

5.5.2. Model 2 sonuçları

Şekil 5.24'te Model 2 için elde edilen optimizasyon sonuçları, emisyon odaklı bir yaklaşımı temsil etmektedir. Bu modelde performans parametreleri kaldırılarak sadece CO, NO_x, HC, duman ve CO₂ gibi çevresel etkiler öncelikli hale getirilmiştir. B20+NP için yapılan analiz sonucunda optimum Ni₂O₃ seviyesi 68,68 ppm ve motor yükü 0,69 bar BMEP olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, emisyonların minimize edilmesi hedeflendiğinde düşük-orta yük aralığında ve orta seviyede nanoparçacık katkısıyla en uygun çalışma koşullarına ulaşıldığını ortaya koymaktadır.

Benzer şekilde, B20But10+NP için optimum değerler 61,61 ppm Ni₂O₃ katkısı ve 0,30 bar BMEP olarak hesaplanmıştır. Bu yakıtta butanolün oksijen içeriği ve yanma odasında sıcaklığı düşürücü etkisi, daha düşük yük ve nispeten düşük nanoparçacık miktarıyla emisyonların azaltılmasına imkân tanımaktadır. Böylece B20But10+NP karışımı, performanstan bir miktar ödün verilse de düşük yüklerde çevresel açıdan daha temiz bir yanma karakteristiği sergilemektedir. Model 2'nin sonuçları, emisyon odaklı strateji uygulandığında B20 yakıtında orta yüklerde ve 65–70 ppm aralığında, B20But10 yakıtında ise daha düşük yük ve yaklaşık 60 ppm katkı seviyelerinde optimum çevresel performans elde edilebileceğini göstermektedir.

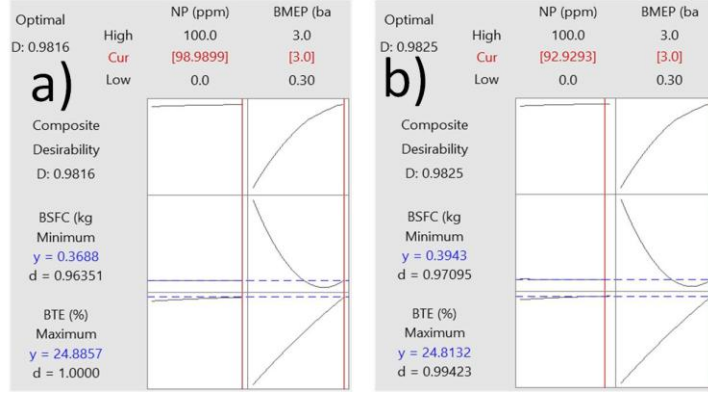


Şekil 5.24. Model 2 için Optimizasyon Grafiği a) B20+NP b) B20But10+NP

5.5.3. Model 3 sonuçları

Şekil 5.25'te Model 3 için elde edilen optimizasyon sonuçları, yalnızca motor performansına odaklanan bir yaklaşımı göstermektedir. Bu modelde emisyon parametreleri dikkate alınmamış, hedef tamamen yakıt tüketimi ve verimlilik üzerine yoğunlaşmıştır. B20+NP için yapılan analizde en uygun Ni₂O₃ katkı seviyesi 98,98 ppm ve motor yükü 3,0 bar BMEP olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, performansın en üst düzeye çıkarılması istendiğinde yüksek motor yükü ve yüksek nanoparçacık dozajının etkili olduğunu göstermektedir. Bu koşullarda fren özgül yakıt tüketimi minimuma (0,3688 kg/kWh) inerken fren termal verimi maksimuma (%24,88) ulaşmaktadır.

Benzer şekilde B20But10+NP için optimum koşullar 92,92 ppm Ni₂O₃ katkısı ve 3,0 bar BMEP olarak hesaplanmıştır. Ternary yakıtta butanolün oksijen içeriği ve buharlaşma özellikleri sayesinde, B20'ye göre biraz daha düşük nanoparçacık miktarıyla benzer performans değerlerine erişilmiştir. Bu durum, butanolün yanma iyileştirici etkisiyle birlikte Ni₂O₃'ün katalitik ve ısı transferi özelliklerinin birleşerek yüksek yük koşullarında güçlü bir sinerji oluşturduğunu göstermektedir. Model 3'ün sonuçları, maksimum güç ve yakıt ekonomisi hedeflendiğinde her iki yakıt için de yaklaşık 90–100 ppm Ni₂O₃ katkısı ve tam yük koşullarının en uygun performans parametrelerini sağladığını ortaya koymaktadır.

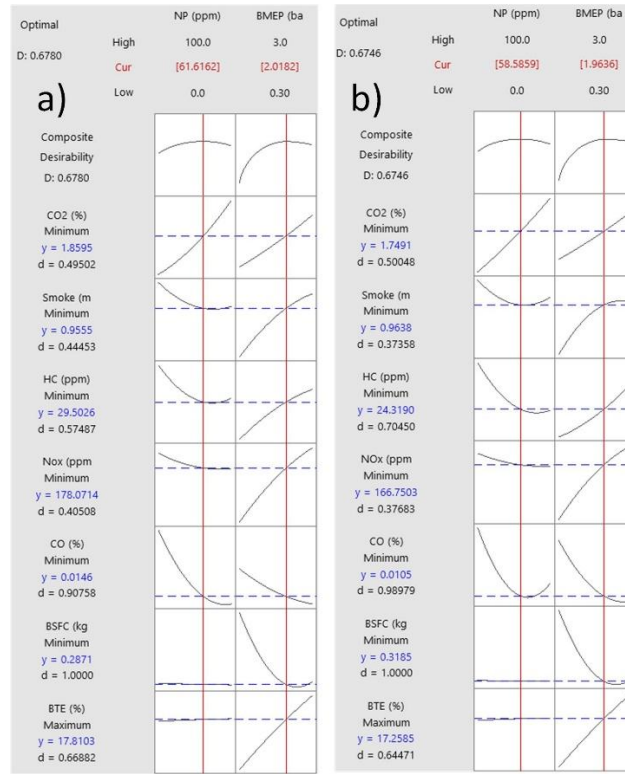


Şekil 5.25. Model 3 için Optimizasyon Grafiği a) B20+NP b) B20But10+NP

5.5.4. Model 4 sonuçları

Şekil 5.26’da Model 4 için elde edilen optimizasyon sonuçları, tüm yanıt değişkenlerini dikkate almakla birlikte performans göstergelerine daha fazla ağırlık veren bir yaklaşımı göstermektedir. Bu modelde hem emisyonlar hem de motor verimliliği birlikte değerlendirilmiş, ancak FTV ve FÖYT gibi performans parametrelerine daha yüksek önem derecesi atanmıştır. B20+NP için yapılan analizde optimum Ni_2O_3 seviyesi 61,46 ppm ve motor yükü 2,01 bar BMEP olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, performans odaklı ancak emisyonları da göz ardı etmeyen bir yaklaşımda orta-yük aralığında ve yaklaşık 60 ppm katkı miktarında dengeli bir optimizasyon sağlanabildiğini göstermektedir.

Benzer şekilde B20But10+NP için optimum koşullar 58,56 ppm Ni_2O_3 katkısı ve 1,95 bar BMEP olarak hesaplanmıştır. Butanolün oksijen içeriği ve yanma sürecini soğutma etkisi sayesinde, B20’ye kıyasla biraz daha düşük yük ve nanoparçacık miktarı ile benzer performans-emisyon dengesine ulaşılmıştır. Bu durum, özellikle butanol içeren karışımların orta yüklerde ve yaklaşık 55–60 ppm Ni_2O_3 seviyesiyle hem yakıt ekonomisi hem de emisyon açısından dengeli sonuçlar sağlayabildiğini ortaya koymaktadır. Model 4’ün sonuçları, performansın öncelikli olduğu fakat çevresel etkilerin de dikkate alındığı uygulamalar için yaklaşık 60 ppm Ni_2O_3 katkısının ve orta motor yüklerinin uygun bir çalışma aralığı sunduğunu göstermektedir.



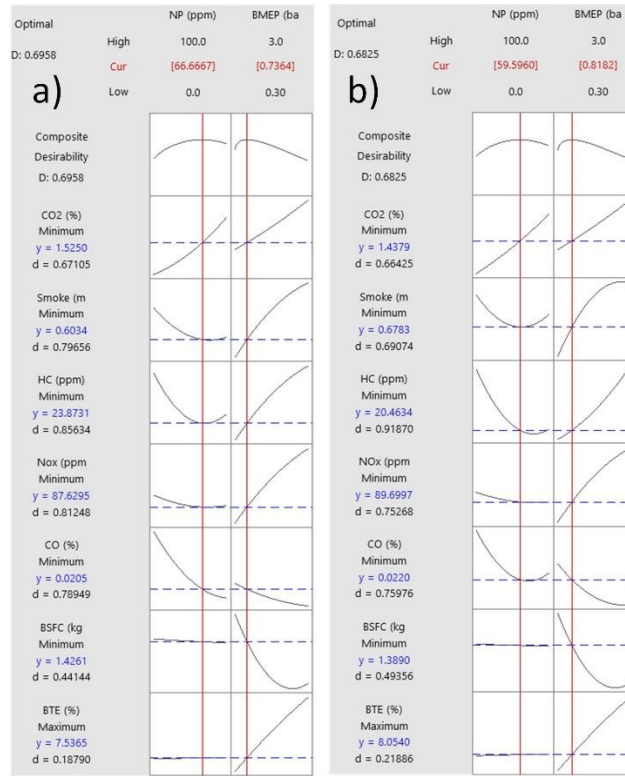
Şekil 5.26. Model 4 için Optimizasyon Grafiği a) B20+NP b) B20But10+NP

5.5.5. Model 5 sonuçları

Şekil 5.27’de Model 5 için elde edilen optimizasyon sonuçları, tüm yanıt değişkenlerini kapsamakla birlikte emisyon kriterlerine daha yüksek öncelik veren bir yaklaşımı temsil etmektedir. Bu modelde motor performansı göz ardı edilmemekle birlikte, CO, NO_x, HC, duman ve CO₂ gibi çevresel etkiler en önemli hedefler olarak belirlenmiştir. B20+NP için yapılan analizde optimum Ni₂O₃ seviyesi 66,66 ppm ve motor yükü 0,75 bar BMEP olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, emisyonların baskın olduğu senaryolarda düşük-orta yük aralığında ve yaklaşık 65–70 ppm nanoparçacık katkısı ile optimum yanma sağlanabileceğini göstermektedir.

Benzer şekilde, B20But10+NP için optimum koşullar 59,96 ppm Ni₂O₃ katkısı ve 0,81 bar BMEP olarak belirlenmiştir. Ternary yakıt karışımında butanolün oksijen içeriği ve yanma soğutucu etkisi, daha düşük nanoparçacık dozu ve düşük-orta motor yüklerinde emisyonları minimuma indirmeye olanak sağlamaktadır. Bu durum, çevresel önceliği yüksek uygulamalarda butanol içeren yakıtların daha düşük katkı miktarıyla etkili sonuç verebileceğini göstermektedir. Model 5’in sonuçları, özellikle uzun vadeli sürdürülebilirlik ve çevresel regülasyonlara uyumun ön planda olduğu senaryolarda yaklaşık 60–70

ppm Ni_2O_3 seviyesinin ve düşük-orta yüklerin en uygun çalışma aralığını sunduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 5.27. Model 5 için Optimizasyon Grafiği a) B20+NP b) B20But10+NP

5.6. YYM doğrulaması

ANOVA analizi, Ni_2O_3 katkı miktarı ve motor yükünün (BMEP) performans ve emisyon parametrelerinin büyük çoğunluğu üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir ($p < 0,05$; Tablo 5.4.). Özellikle FTV ve CO₂ emisyonlarının BMEP'e güçlü şekilde bağlı olduğu ($p = 0,000$), CO, HC ve duman emisyonları üzerinde ise NP katkı dozunun belirleyici bir faktör olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, nanoparçacık ilavesinin yanma kinetiğini iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Tüm çıktılar için elde edilen yüksek R^2 değerleri (0,95'in üzerinde), geliştirilen ikinci dereceden polinomsal regresyon modellerinin (Tablo 5.5.) deneysel değişkenliği güvenilir biçimde temsil ettiğini doğrulamaktadır. Elde edilen denklemler, yalnızca NP konsantrasyonu ve BMEP'in doğrusal etkilerini değil, aynı zamanda etkileşim terimlerini de içermekte; bu da motor yükü ile katkı dozu arasındaki sinerjik etkilerin göz ardı edilmemesi gerektiğini göstermektedir. Örneğin, CO regresyon modelinde NP konsantrasyonunun negatif katsa-

yısı, NP miktarının artmasının eksik yanma ürünlerini azalttığını doğrularken; NO_x denklemindeki NP'ye ait pozitif ikinci dereceden terim, belirli bir eşik değerinden sonra artan katalitik etkinliğin ısı reaktiviteyi artırabileceğini işaret etmektedir.

Tablo 5.4. Her bir yanıt için elde edilen p-değerleri

Faktör- ler	ANOVA										Belirleme Katsayısı %					
	NP		BMEP		NP*NP		BMEP*BMEP		NP*BMEP		R ²		R ² adjusted		R ² predicted	
	B20	B20	B20	B20	B20	B20	B20	B20	B20	B20	B20	B20	B20	B20	B20	B20
	But	But	But	But	But	But	But	But	But	But	But	But	But	But	But	But
	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
FTV	0.00	0.00	0.00	0.0	0.49	0.1	0.0	0.00	0.10	0.0	99.9	99.	99.9	99.	99.8	99.
	1	0	0	00	3	72	00	0	0	49	4	96	2	95	9	92
FÖYT	0.58	0.74	0.00	0.0	0.93	0.8	0.0	0.00	0.68	0.8	96.7	97.	95.5	95.	93.7	94.
	2	4	0	00	5	91	00	0	2	31	0	01	2	95	9	43
CO	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.0	0.2	0.01	0.01	0.4	94.5	91.	92.6	88.	89.5	80.
	0	0	0	00	1	00	99	4	1	13	7	52	3	49	4	54
NO _x	0.01	0.01	0.00	0.0	0.17	0.3	0.0	0.02	0.40	0.5	95.7	95.	94.2	94.	91.5	91.
	0	9	0	00	7	03	81	5	0	39	4	90	3	44	5	73
HC	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.0	0.1	0.02	0.28	0.2	94.9	97.	93.0	97.	90.3	94.
	0	0	0	00	0	00	09	6	8	94	1	98	9	26	6	39
Duman	0.00	0.00	0.00	0.0	0.01	0.0	0.0	0.00	0.84	0.4	94.4	96.	92.4	94.	88.4	92.
	0	0	0	00	1	00	39	0	9	15	4	22	5	87	7	09
CO ₂	0.00	0.00	0.00	0.0	0.08	0.3	0.5	0.56	0.06	0.0	95.8	97.	94.3	96.	91.2	94.
	0	0	0	00	4	21	80	1	7	01	3	62	4	77	7	69

Önem Katsayısı: $0.000 < p \leq 0.05$

Tablo 5.5. Yanıtlar için ikinci dereceden polinom denklemleri.

B20	
FTV (%)	$0.696 + 0.00534 \text{ NP} + 9.206 \text{ BMEP} - 0.000035 \text{ NP}^2 - 0.4855 \text{ BMEP}^2 + 0.00255 \text{ NP*BMEP}$
FÖYT (kg/kWh)	$2.811 - 0.00159 \text{ NP} - 2.098 \text{ BMEP} + 0.000003 \text{ NP}^2 + 0.4281 \text{ BMEP}^2 + 0.00043 \text{ NP*BMEP}$
CO (%)	$0.06267 - 0.000775 \text{ NP} - 0.01340 \text{ BMEP} + 0.000003 \text{ NP}^2 + 0.00120 \text{ BMEP}^2 + 0.000071 \text{ NP*BMEP}$
NO _x (ppm)	$45.9 - 0.704 \text{ NP} + 101.7 \text{ BMEP} + 0.00529 \text{ NP}^2 - 9.35 \text{ BMEP}^2 - 0.093 \text{ NP*BMEP}$
HC (ppm)	$26.41 - 0.1995 \text{ NP} + 6.80 \text{ BMEP} + 0.001486 \text{ NP}^2 - 0.683 \text{ BMEP}^2 - 0.00955 \text{ NP*BMEP}$
Duman (m ¹)	$0.6133 - 0.00750 \text{ NP} + 0.4041 \text{ BMEP} + 0.000049 \text{ NP}^2 - 0.0508 \text{ BMEP}^2 + 0.000094 \text{ NP*BMEP}$
CO ₂ (%)	$0.832 + 0.00395 \text{ NP} + 0.151 \text{ BMEP} + 0.000051 \text{ NP}^2 + 0.0209 \text{ BMEP}^2 + 0.001593 \text{ NP*BMEP}$
B20But10	
FTV (%)	$0.554 + 0.00723 \text{ NP} + 9.097 \text{ BMEP} - 0.000058 \text{ NP}^2 - 0.4338 \text{ BMEP}^2 + 0.00252 \text{ NP*BMEP}$
FÖYT (kg/kWh)	$2.946 - 0.00121 \text{ NP} - 2.225 \text{ BMEP} + 0.000005 \text{ NP}^2 + 0.4589 \text{ BMEP}^2 + 0.00022 \text{ NP*BMEP}$
CO (%)	$0.06434 - 0.000792 \text{ NP} - 0.02222 \text{ BMEP} + 0.000005 \text{ NP}^2 + 0.00382 \text{ BMEP}^2 + 0.000025 \text{ NP*BMEP}$
NO _x (ppm)	$35.1 - 0.528 \text{ NP} + 102.5 \text{ BMEP} + 0.00363 \text{ NP}^2 - 11.42 \text{ BMEP}^2 - 0.0620 \text{ NP*BMEP}$
HC (ppm)	$26.514 - 0.2138 \text{ NP} + 1.944 \text{ BMEP} + 0.001400 \text{ NP}^2 + 0.617 \text{ BMEP}^2 - 0.00583 \text{ NP*BMEP}$
Duman (m ¹)	$0.5341 - 0.00743 \text{ NP} + 0.5437 \text{ BMEP} + 0.000063 \text{ NP}^2 - 0.0999 \text{ BMEP}^2 - 0.000288 \text{ NP*BMEP}$

$$\text{CO}_2 (\%) = 0.8396 + 0.00539 \text{ NP} + 0.0989 \text{ BMEP} + 0.000020 \text{ NP}^2 + 0.0155 \text{ BMEP}^2 + 0.002359 \text{ NP} \cdot \text{BMEP}$$

Tablo 5.6’da her iki yakıt için genel ortalama hata yüzdeleri incelendiğinde; Model 1 için %6,10, Model 2 için %5,51, Model 3 için %3,48, Model 4 için %5,84 ve Model 5 için %3,29 olarak hesaplanmıştır. Bu hata değerlerinin tamamı, literatürde yaygın olarak kabul gören %7 hata eşiğinin altında kalmaktadır (Mostafa vd., 2023). Dolayısıyla geliştirilen modellerin yüksek güvenilirliğe sahip olduğu söylenebilir. Ancak en yüksek ortalama hata CO emisyonlarında görülmüştür. Bunun temel nedeni, kullanılan ölçüm cihazının $\pm 0,01$ hassasiyet sınırı ve CO değerlerinin oldukça düşük seviyelerde olmasıdır; bu durum, göreceli hata yüzdesinin olduğundan daha yüksek görünmesine yol açmaktadır.

Tablo 5.6. Modeller için optimizasyon ve doğrulama sonuçları

Mo del	NP ppm	BMEP bar	Bileşik Uygun-luk	Du-rum	FTV %	FÖYT kg/kWh	CO %	NOx ppm	HC ppm	Du-man m ⁻¹	CO ₂ %	
B20+NP												
1	63.63 6	1.363	0.640	O	12.76	0.69	0.017	135.62	26.89	0.79	1.67	
				E	12.25	0.71	0.02	138.00	28.0	0.80	1.71	
				Er %	-3.9	2.8	17.6	1.7	4.1	1.2	2.39	
2	68.68 6	0.3	0.865	O	n/a	n/a	0.023	50.16	21.49	0.44	1.42	
				E	n/a	n/a	0.02	51.0	23.0	0.41	1.37	
				Er %	n/a	n/a	-13	1.6	7	-6.8	-3.5	
3	98.98 9	3	0.981	O	24.88	0.36	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
				E	24.21	0.38	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
				Er %	-2.6	5.5	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
4	61.61 6	2.018	0.677	O	17.81	0.28	0.014	178.07	29.5	0.95	1.85	
				E	18.15	0.27	0.02	182.0	28.0	0.91	1.82	
				Er %	1.9	-3.5	42.8	2.2	-5	-4.2	-1.6	
5	66.66	0.736	0.695	O	7.53	1.42	0.020	87.62	23.87	0.60	1.52	
				E	7.89	1.51	0.02	89.1	24.0	0.57	1.48	
				Er %	4.7	6.3	0.0	1.6	0.5	-5	-2.6	
B20But10+NP												
1	58.58 59	1.390	0.636	O	12.79	0.70	0.015	132.04	22.21	0.85	1.58	
				E	12.91	0.67	0.02	134.0	23.0	0.81	1.64	
				Er %	0.9	-4.2	33.3	1.4	3.5	-4.7	3.8	

2	61.61 62	0.3	0.826	O	n/a	n/a	0.0302	44.887	19.185	0.46	1.32	
				E	n/a	n/a	0.03	42.0	19.0	0.42	1.24	
				Er %	n/a	n/a	-0.6	-6.4	-0.9	-8.7	-6.6	
3	92.92 9	3	0.982	O	24.81	0.39	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
				E	24.27	0.38	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
				Er %	-2.1	-3	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
4	58.58 59	1.963	0.674	O	17.25	0.31	0.010	166.75	24.31	0.96	1.74	
				E	17.48	0.33	0.01	168.0	25.0	1.01	1.81	
				Er %	1.3	6.4	0.0	0.7	2.8	5.2	4	
5	59.59 6	0.818	0.682	O	8.05	1.38	0.022	89.69	20.46	0.67	1.43	
				E	8.11	1.29	0.02	88.97	21.0	0.64	1.45	
				Er %	0.7	-6.5	-9	-0.8	2.6	-4.4	1.4	
O: Optimum değer, E: Deneysel değer, Er: Hata %												

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, B20 ve B20But10 yakıt karışımlarına farklı konsantrasyonlarda (25, 50, 75 ve 100 ppm) Ni_2O_3 nanoparçacıkları eklenmiş ve tek silindirli, dört zamanlı, su soğutmalı, direkt enjeksiyonlu (DI) bir dizel motor üzerinde dört farklı yükte (0,3; 1,0; 2,0 ve 3,0 bar BMEP) motor performansı, yanma ve emisyon davranışları kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Ayrıca istatistiksel ve ekonomik analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen temel sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

1. Ni_2O_3 katkılı B20 ve B20But10 karışımlarında yoğunluk, kinematik viskozite ve setan indeksi artarken; alt ısı değer ve parlama noktası azalmıştır. Örneğin, B20 yakıtında 0–100 ppm aralığında yoğunluk %0,18, viskozite %5,13 ve setan indeksi %3,8 artarken; alt ısı değer ve parlama noktası sırasıyla %5,9 ve %4,4 azalmıştır. B20But10 için ise yoğunluk %0,24, viskozite %6,4 ve setan indeksi %5,3 artmış; alt ısı değer ve parlama noktası sırasıyla %5,7 ve %10,7 azalmıştır.
2. Yanma analizleri, Ni_2O_3 'ün püskürtme kalitesini ve katalitik oksidasyonu iyileştirdiğini göstermiştir. Tam yük koşulunda silindir basıncı (CP) B20 için 53,03 bardan 55,86 bara, B20But10 için ise 52,21 bardan 55,45 bara yükselmiştir. Maksimum ısı salım hızı (HRR) de sırasıyla 29,45 J/°CA ve 30,02 J/°CA değerlerine ulaşmıştır. Bu sonuçlar, nanoparçacık katkısının ön karışım yanmasını güçlendirdiğini göstermektedir.
3. Motor performansı açısından, tam yükte FTV, B20 için %23,96'dan %24,89'a, B20But10 için %23,89'dan %24,94'e yükselirken; FÖYT B20'de 0,331'den 0,309 kg/kWh'e, B20But10'da ise 0,348'den 0,333 kg/kWh'e düşmüştür.
4. Emisyonlarda genel olarak olumlu sonuçlar elde edilmiştir. CO emisyonu 100 ppm katkı seviyesinde her iki yakıtta da %0,03'ten %0,01'e düşmüştür. HC emisyonlarında %13–28, duman opasitesinde %8–43 ve NO_x emisyonlarında %12–21 oranında azalma kaydedilmiştir. Buna karşın, daha etkin oksidasyon nedeniyle CO_2 emisyonlarında yaklaşık %2–9 artış gözlenmiştir. Düşük yük ve yüksek katkı

koşullarında küçük dalgalanmalar oluşsa da genel eğilim, Ni_2O_3 'ün oksijen taşı-
nımını ve katalitik aktiviteyi artırarak yanma verimini yükselttiğini göstermekte-
dir. Ayrıca, butanol içeren karışımların ek oksijen desteği sayesinde B20'ye kı-
yasla CO, HC ve dumanı daha etkili şekilde azalttığı, buna karşılık CO_2 artışının
daha sınırlı kaldığı belirlenmiştir.

5. Yanıt Yüzey Metodu (RSM) kullanılarak geliştirilen ikinci dereceden regresyon
modelleri yüksek doğruluk göstermiştir ($R^2 = \%90,9\text{--}99,9$). Ortalama hata analiz-
leri $\%2\text{--}6$ aralığında kalmış ve bileşik isteklilik değerleri $0,63\text{--}0,98$ arasında bu-
lunmuştur. Geliştirilen beş farklı model, motorun öncelikli hedeflerine göre (per-
formans veya emisyon) esnek optimizasyon yapılabileceğini göstermiştir. Örne-
ğin dengeli yaklaşım sergileyen Model 1'de optimum Ni_2O_3 seviyesi B20 için
 $63,3\text{ ppm}$ ve $1,3\text{ bar BMEP}$, B20But10 için ise $58,5\text{ ppm}$ ve $1,3\text{ bar BMEP}$ olarak
belirlenmiştir. Emisyon odaklı Model 2'de daha düşük yük ve katkı seviyeleri,
performans odaklı Model 3'te ise yüksek yük ve yüksek katkı miktarları öneril-
miştir.

Sonuç olarak, Ni_2O_3 katkısı biyodizel ve biyodizel–n–bütanol karışımlarının reaktivitesini
ve yanma homojenliğini artırarak motor performansını geliştirmiş, zararlı emisyonları
azaltmış ve yakıt tüketimini düşürerek ekonomik fayda sağlamıştır. Bu çalışma, Ni_2O_3 'ün
temiz dizel teknolojileri için umut verici bir katkı maddesi olduğunu ve sürdürülebilir
enerji ile emisyon azaltma hedeflerine katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

6.2. Öneriler ve Kısıtlamalar

100 ppm ve üzerindeki katkı seviyelerinde Ni_2O_3 'ün bir araya toplanma (aglome-
rasyon) eğilimi ve uzun süreli depolama kararlılığı sorunları gözlenmiştir. Artan katkı
miktarı, yoğunluk ve viskoziteyi yükselterek püskürtme kalitesini olumsuz etkileyebilir;
bu nedenle güvenli ve etkili katkı aralıklarının belirlenmesi önemlidir. NO_x emisyonla-
rında bazı noktalarda görülen sınırlı iyileşmeler ve yer yer artışlar, silindir içi sıcaklık
kontrolünün iyileştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Ayrıca motorun uzun vadeli daya-
nımı, enjektör tortuları, egzoz sonrası arıtma sistemleri ile uyum ve nanoparçacıkların
atmosfere salınım riskleri üzerine ek değerlendirmeler yapılmalıdır. Gelecek çalışmalar,
nanoparçacıkların kararlılığını artırmaya yönelik yeni dağıtım yöntemlerine, optimum

katkı seviyelerinin daha hassas belirlenmesine ve motor ömrü ile çevresel etkilerin uzun vadeli izlenmesine odaklanmalıdır.

KAYNAKLAR

- Ahmed, M. M., Pali, H. S., & Khan, M. M. (2024). Allometry of nanoparticles in diesel-biodiesel blends for CI engine performance, combustion and emissions. *Archives of Thermodynamics*, 45(1). <https://doi.org/10.24425/ather.2024.150442>
- Akar, M. A. (2016). Performance and emission characteristics of compression ignition engine operating with false flax biodiesel and butanol blends. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(2), 1687814016632677. <https://doi.org/10.1177/1687814016632677>
- Akhtar, E. T. (2023). Biofuels: A renewable solution for energy security and climate change mitigation. *Available at SSRN 4475528*. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4475528
- Aktaş, F. (2021). Bir dizel motorda çift yakıt olarak propan-dizel kullanımının yanma rejimine, motor performansına ve emisyon değerlerine olan etkilerinin sayısal olarak incelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Al-Dawody, M. F., Al-Farhany, K. A., Hamza, N. H., & Hamzah, D. A. (2022). Numerical study for the spray characteristics of diesel engine powered by biodiesel fuels under different injection pressures. *Journal of Engineering Research*, 10(1), 264–289.
- Al-Ghouti, M., Al-Degs, Y., & Mustafa, F. (2010). Determination of hydrogen content, gross heat of combustion, and net heat of combustion of diesel fuel using FTIR spectroscopy and multivariate calibration. *Fuel*, 89(1), 193–201.
- Al-Hwaiti, M. S., Alsbou, E. M., Al Haddad, R. M., Osman, A. I., Jrai, A. A., Al-Muhtaseb, A. H., Hasan, A. O., Morgan, K., El-Sayed, E.-S. M., & Al-Fatesh, A. S. (2020). Spatio-temporal analyses of extracted citrullus colocynthis seeds (Handal seed oil) as biofuel in internal combustion engine. *Renewable Energy*, 166, 234–244.
- Allasi, H. L., Murugan, S., Ananda, H. K., & Vairavel, D. (2025). Enhancing diesel engine performance and emissions with N-Butanol enhanced biodiesel derived from *Scenedesmus obliquus* algae. *Scientific Reports*, 15(1), 12924. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92369-y>
- Alptekin, E., & Canakci, M. (2008). Determination of the density and the viscosities of biodiesel–diesel fuel blends. *Renewable Energy*, 33(12), 2623–2630.

- Alptekin, E., Canakci, M., Ozsezen, A. N., Turkcan, A., & Sanli, H. (2015). Using waste animal fat based biodiesels–bioethanol–diesel fuel blends in a DI diesel engine. *Fuel*, 157, 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.067>
- Altaie, M. A. H., Janius, R. B., Rashid, U., Taufiq-Yap, Y. H., Yunus, R., Zakaria, R., & Adam, N. M. (2015). Performance and exhaust emission characteristics of direct-injection diesel engine fueled with enriched biodiesel. *Energy Conversion and Management*, 106, 365–372. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.09.050>
- Altarazi, Y. S., Yu, J., Gires, E., Ghafir, M. F. A., Lucas, J., & Yusaf, T. (2022). Effects of biofuel on engines performance and emission characteristics: A review. *Energy*, 238, 121910. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121910>
- Angelidaki, I., & Karakashev, D. (2012). Alternative energy carriers for the transportation sector. *DTUEnvironment*. https://www.academia.edu/download/111790764/Report_Biofuels-for-transport-fina_l_23_01_12.pdf
- Anish, M., Badi, N., Jayaprabakar, J., Joy, N., Deepak, J. R., Sangeetha, M., Jayaprakash, V., Kumar, J. A., Samrot, V. A., & Patil, V. S. (2024). Nano chloropsis microalgae biofuel with butyl alcohol and ZnO inhibited diesel engine combustion efficiency and pollution characteristics. *Case Studies in Thermal Engineering*, 61, 105147. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105147>
- Ashok, B., Nanthagopal, K., Darla, S., Chyuan, O. H., Ramesh, A., Jacob, A., Sahil, G., Thiagarajan, S., & Geo, V. E. (2019). Comparative assessment of hexanol and decanol as oxygenated additives with calophyllum inophyllum biodiesel. *Energy*, 173, 494–510. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.077>
- Atmaca, A., & Kallioğlu, M. A. (2026). Titanium dioxide (TiO₂) nanoparticle effects on diesel engine efficiency and emission control: A comprehensive study with RSM modelling. *Fuel*, 404, 136228. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.136228>
- Atmanli, A., Ileri, E., Yuksel, B., & Yilmaz, N. (2015). Extensive analyses of diesel–vegetable oil–n-butanol ternary blends in a diesel engine. *Applied Energy*, 145, 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.071>
- Atmanli, A., & Yilmaz, N. (2018). A comparative analysis of n-butanol/diesel and 1-pentanol/diesel blends in a compression ignition engine. *Fuel*, 234, 161–169. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.015>
- Atmanlı, A., Ileri, E., & Yüksel, B. (2014). Experimental investigation of engine performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with diesel–n-butanol–vegetable oil blends. *Energy Conversion and Management*, 81, 312–321. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.02.049>

- Atmanlı, A., Ileri, E., & Yüksel, B. (2015). Effects of higher ratios of n-butanol addition to diesel–vegetable oil blends on performance and exhaust emissions of a diesel engine. *Journal of the Energy Institute*, 88(3), 209–220. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.09.008>
- Atmanlı, A., Yüksel, B., & Ileri, E. (2013). Experimental investigation of the effect of diesel–cotton oil–n-butanol ternary blends on phase stability, engine performance and exhaust emission parameters in a diesel engine. *Fuel*, 109, 503–511. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.012>
- Awad, O. I., Mamat, R., Noor, M. M., Ibrahim, T. K., Yusri, I. M., & Yusop, A. F. (2018). The impacts of compression ratio on the performance and emissions of ice powered by oxygenated fuels: A review. *Journal of the Energy Institute*, 91(1), 19–32. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.09.003>
- Beerge, R., & Devarmani, S. (2024). Diesel-Powered Engine and Agriculture. In *Diesel Engines-Current Challenges and Future Perspectives*. IntechOpen. <https://www.intechopen.com/chapters/1160899>
- Bexell, M., & Jönsson, K. (2017). Responsibility and the United Nations’ Sustainable Development Goals. *Forum for Development Studies*, 44(1), 13–29. <https://doi.org/10.1080/08039410.2016.1252424>
- Bidir, M. G., Millerjothi, N. K., Adaramola, M. S., & Hagos, F. Y. (2021). The role of nanoparticles on biofuel production and as an additive in ternary blend fuelled diesel engine: A review. *Energy Reports*, 7, 3614–3627. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.05.084>
- Camplic, S., Acharya, M., Channapattana, S. V., Pawar, A. A., Gawali, S. V., & Hole, J. (2021). The effect of nickel oxide nano-additives in azadirachta indica biodiesel–diesel blend on engine performance and emission characteristics by varying compression ratio. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 40(2), e13514. <https://doi.org/10.1002/ep.13514>
- Carvalho, M. M. D., Lopes, A. P. V. B. V., & Marzagao, D. S. L. (2015). Biofuels from a strategic standpoint: An overview of the literature. *Latin American J. of Management for Sustainable Development*, 2(1), 64. <https://doi.org/10.1504/LAJ-MSD.2015.067472>
- Channapattana, S. V., Camplic, S., Madhusudhan, A., Notla, S., Arkerimath, R., & Tripathi, M. K. (2023). Energy analysis of DI-CI engine with nickel oxide nanoparticle added azadirachta indica biofuel at different static injection timing based on exergy. *Energy*, 267, 126622. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126622>
- Cheikh, K., Sary, A., Khaled, L., Abdelkrim, L., & Mohand, T. (2016). Experimental assessment of performance and emissions maps for biodiesel fueled compression

ignition engine. *Applied Energy*, 161, 320–329. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.042>

- Cheng, X., Li, S., Yang, J., & Liu, B. (2016). Investigation into partially premixed combustion fueled with N-butanol-diesel blends. *Renewable Energy*, 86, 723–732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.067>
- Choi, B., Jiang, X., Kim, Y. K., Jung, G., Lee, C., Choi, I., & Song, C. S. (2015). Effect of diesel fuel blend with n-butanol on the emission of a turbocharged common rail direct injection diesel engine. *Applied Energy*, 146, 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.061>
- Damanik, N., Ong, H. C., Tong, C. W., Mahlia, T. M. I., & Silitonga, A. S. (2018). A review on the engine performance and exhaust emission characteristics of diesel engines fueled with biodiesel blends. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(16), 15307–15325. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2098-8>
- De Luca, L. T., Galfetti, L., Severini, F., Meda, L., Marra, G., Vorozhtsov, A. B., Sedoi, V. S., & Babuk, V. A. (2005). Burning of Nano-Aluminized Composite Rocket Propellants. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 41(6), 680–692. <https://doi.org/10.1007/s10573-005-0080-5>
- Demirbaş, A. (1998). Combustion Properties and Calculation Higher Heating Values of Diesel Fuels. *Petroleum Science and Technology*, 16(7–8), 785–795. <https://doi.org/10.1080/10916469808949811>
- Deviren, H., Çılgin, E., & Aydın, S. (2023). Study on using nano magnesium oxide (MNMgO) nanoparticles as fuel additives in terebinth oil biodiesel blends in a research diesel engine. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(4), 12181–12200. <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2270559>
- Deviren, H., Çılgin, E., & Bayındır, H. (2024). Role of analytical methods in verifying biodiesel upgrades: Emphasis on nanoparticle and acetone integration for enhanced performance, combustion, and emissions. *Heat Transfer*, 53(7), 3730–3766. <https://doi.org/10.1002/htj.23110>
- Doğan, O. (2011). The influence of n-butanol/diesel fuel blends utilization on a small diesel engine performance and emissions. *Fuel*, 90(7), 2467–2472. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.02.033>
- D'Silva, R., Binu, K. G., & Bhat, T. (2015). Performance and emission characteristics of a CI engine fuelled with diesel and TiO₂ nanoparticles as fuel additive. *Materials Today: Proceedings*, 2(4–5), 3728–3735. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.162>

- El-Adawy, M. (2023). Effects of diesel-biodiesel fuel blends doped with zinc oxide nanoparticles on performance and combustion attributes of a diesel engine. *Alexandria Engineering Journal*, 80, 269–281. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.08.060>
- El-Araby, R. (2024). Biofuel production: Exploring renewable energy solutions for a greener future. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 17(1), 129. <https://doi.org/10.1186/s13068-024-02571-9>
- Fetting, C. (2020). The European green deal. *ESDN Report, December*, 2(9), 53.
- Gad, M. S., Ağbulut, Ü., Afzal, A., Panchal, H., Jayaraj, S., Qasem, N. A., & El-Shafay, A. S. (2023). A comprehensive review on the usage of the nano-sized particles along with diesel/biofuel blends and their impacts on engine behaviors. *Fuel*, 339, 127364. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127364>
- Galbi, M., & Ishak, A. (2016). Prediksi penggantian minyak pelumas motor diesel generator set berdasarkan laju perubahan viskositas dan total base number dengan pendekatan linieritas. *Bina Teknika*, 12(1), 111–120.
- Giakoumis, E. G., Rakopoulos, C. D., Dimaratos, A. M., & Rakopoulos, D. C. (2013). Exhaust emissions with ethanol or n-butanol diesel fuel blends during transient operation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17, 170–190. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.017>
- Hansen, B. B., Jensen, A. D., & Jensen, P. A. (2011). *REBECa WP IV-Formation and transformation of particles and other pollutants from engines using biofuel: WP IV final report (DTU project no. 50502)*. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/rebeca-wp-iv-formation-and-transformation-of-particles-and-other->
- Hariram, V., Seralathan, S., Rajasekaran, M., Kumar, M. D., & Padmanabhan, S. (2017). Effect of metallic nano-additives on combustion performance and emissions of DI CI engine fuelled with palmkernel methyl ester. *International Journal of Vehicle Structures & Systems*, 9(2), 103. <https://doi.org/10.4273/ijvss.9.2.08>
- Hassan, T., Rahman, M. M., Adib, A. R., Meraz, R. M., Rahman, M. A., & Tushar, M. S. H. K. (2023). Effect of Ni and Al nanoadditives on the performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with diesel-castor oil biodiesel-n-butanol blends. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8, 100531. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100531>
- Hoang, A. T., Le, M. X., Nižetić, S., Huang, Z., Ağbulut, Ü., Veza, I., Said, Z., Le, A. T., Tran, V. D., & Nguyen, X. P. (2022). Understanding behaviors of compression ignition engine running on metal nanoparticle additives-included fuels: A control comparison between biodiesel and diesel fuel. *Fuel*, 326, 124981. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124981>

- Holman, J. P. (2021). *Experimental methods for engineers. McGraw-Hill Companies*, 8th ed.
- Hossain, A. K., Refahtalab, P., Omran, A., Smith, D. I., & Davies, P. A. (2020). An experimental study on performance and emission characteristics of an IDI diesel engine operating with neat oil-diesel blend emulsion. *Renewable Energy*, 146, 1041–1050.
- Hossain, A. K., Sharma, V., Serrano, C., Krishnasamy, A., & Ganesh, D. (2024). Production of biofuel from AD digestate waste and their combustion characteristics in a low-speed diesel engine. *Renewable Energy*, 222, 119884.
- Ibrahim, A. (2016). Performance and combustion characteristics of a diesel engine fuelled by butanol–biodiesel–diesel blends. *Applied Thermal Engineering*, 103, 651–659. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.144>
- Ikemura, R., Yamasaki, Y., & Kaneko, S. (2016). Study on model based combustion control of diesel engine with multi fuel injection. *Journal of Physics: Conference Series*, 744(1), 012103. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/744/1/012103/meta>
- Imran Din, M., & Rani, A. (2016). Recent Advances in the Synthesis and Stabilization of Nickel and Nickel Oxide Nanoparticles: A Green Adeptness. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2016, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2016/3512145>
- Jaji, N.-D., Lee, H. L., Hussin, M. H., Akil, H. M., Zakaria, M. R., & Othman, M. B. H. (2020). Advanced nickel nanoparticles technology: From synthesis to applications. *Nanotechnology Reviews*, 9(1), 1456–1480. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0109>
- Javed, S., Murthy, Y. S., Satyanarayana, M. R. S., Reddy, R. R., & Rajagopal, K. (2016). Effect of a zinc oxide nanoparticle fuel additive on the emission reduction of a hydrogen dual-fuelled engine with jatropha methyl ester biodiesel blends. *Journal of Cleaner Production*, 137, 490–506.
- Jayaraman, K., Anbuechezhiyan, G., Mubarak, N. M., Bandegharai, A. H., & Abnisa, F. (2024). Exploring the combustion, emission and performance of n-Butanol with Deccan hemp oil methyl ester on dual fuel diesel engine. *Scientific Reports*, 14(1), 28015.
- Kallioğlu, M. A., Ercan, U., & Avcı, A. S. (2025). Effects of eurodiesel fuels with multi-element oxide nanoparticles ($\text{Zn}_{0.5} \text{Mn}_{0.5} \text{Fe}_2 \text{O}_4$) on diesel engines investigated through RSM. *Biofuels*, 1–16. <https://doi.org/10.1080/17597269.2025.2480501>
- Karana, D. R., & Sahoo, R. R. (2020). Thermal, environmental and economic analysis of a new thermoelectric cogeneration system coupled with a diesel electricity generator. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 40, 100742.

- Keskin, A., Gürü, M., & Altıparmak, D. (2007). Biodiesel production from tall oil with synthesized Mn and Ni based additives: Effects of the additives on fuel consumption and emissions. *Fuel*, 86(7–8), 1139–1143. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.10.021>
- Khan, N., Sudhakar, K., & Mamat, R. (2021). Role of biofuels in energy transition, green economy and carbon neutrality. *Sustainability*, 13(22), 12374.
- Killol, A., Reddy, N., Paruvada, S., & Murugan, S. (2019). Experimental studies of a diesel engine run on biodiesel n-butanol blends. *Renewable Energy*, 135, 687–700. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.011>
- Kishore, N. P., & Gugulothu, S. K. (2022). Effect of iron oxide nanoparticles blended concentration on performance, combustion and emission characteristics of crdi diesel engine running on mahua methyl ester biodiesel. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 103(2), 167–180. <https://doi.org/10.1007/s40032-021-00750-3>
- Kumar, B. R., Saravanan, S., Rana, D., & Nagendran, A. (2016). A comparative analysis on combustion and emissions of some next generation higher-alcohol/diesel blends in a direct-injection diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 119, 246–256. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.053>
- Kumar, S., Dinesha, P., & Bran, I. (2019). Experimental investigation of the effects of nanoparticles as an additive in diesel and biodiesel fuelled engines: A review. *Bi-fuels*, 10(5), 615–622. <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1332294>
- Kumar, T. D., Hussain, S. S., & Ramesha, D. K. (2020). Effect of a zinc oxide nanoparticle fuel additive on the performance and emission characteristics of a CI engine fuelled with cotton seed biodiesel blends. *Materials Today: Proceedings*, 26, 2374–2378. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.509>
- Kumar, T. S., Ashok, B., Senthilkumar, M., Saiteja, P., Vignesh, R., Karthick, C., Nithin, P. S., Durairaj, K., Saju, N., & Agarwal, C. (2022). Enhancement of engine characteristics through zirconium nano particle addition and split injection parameter optimization for the adaptability of eucalyptus biofuel in diesel engine. *Fuel*, 323, 124425. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124425>
- Kumbhar, V., Pandey, A., Sonawane, C. R., Panchal, H., & Ağbulut, Ü. (2023). Numerical and experimental investigation of the influence of various metal-oxide-based nanoparticles on performance, combustion, and emissions of CI engine fuelled with tamarind seed oil methyl ester. *Energy*, 265, 126258. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126258>

- La Rocca, A., Ferrante, A., Haffner-Staton, E., Cairns, A., Weilhard, A., Sans, V., Carlucci, A. P., & Laforgia, D. (2020). Investigating the impact of copper leaching on combustion characteristics and particulate emissions in HPCR diesel engines. *Fuel*, 263, 116719.
- Lujaji, F., Kristóf, L., Bereczky, A., & Mbarawa, M. (2011). Experimental investigation of fuel properties, engine performance, combustion and emissions of blends containing croton oil, butanol, and diesel on a CI engine. *Fuel*, 90(2), 505–510. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.10.004>
- Malik, K., Capareda, S. C., Kamboj, B. R., Malik, S., Singh, K., Arya, S., & Bishnoi, D. K. (2024). Biofuels production: A review on sustainable alternatives to traditional fuels and energy sources. *Fuels*, 5(2), 157–175.
- Mandizadeh, S., Amiri, O., & Salavati-Niasari, M. (2021). Effects of the NiFe 2 O 4 nanoadditive on the performance and emission characteristics of diesel engines: Ultrasonic green synthesis by T3 hormone. *RSC Advances*, 11(44), 27701–27713. <https://doi.org/10.1039/D1RA04581D>
- Mehregan, M., & Moghiman, M. (2018). Effects of nano-additives on pollutants emission and engine performance in a urea-SCR equipped diesel engine fueled with blended-biodiesel. *Fuel*, 222, 402–406. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.172>
- Mobasheri, R., Seddiq, M., & Peng, Z. (2018). Separate and combined effects of hydrogen and nitrogen additions on diesel engine combustion. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(3), 1875–1893.
- Mofijur, M., Ahmed, S. F., Ahmed, B., Mehnaz, T., Mehejabin, F., Shome, S., Almomani, F., Chowdhury, A. A., Kalam, M. A., & Badruddin, I. A. (2024). Impact of nanoparticle-based fuel additives on biodiesel combustion: An analysis of fuel properties, engine performance, emissions, and combustion characteristics. *Energy Conversion and Management*: X, 21, 100515. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100515>
- Mohammadi, P., Nikbakht, A. M., Tabatabaei, M., & Farhadi, K. (2012). A novel diesel fuel additive to improve fuel properties and to reduce emissions. *Int. J. Automot. Eng.*, 2, 156–162.
- Mostafa, A., Mourad, M., Mustafa, A., & Youssef, I. (2023). Influence of aluminum oxide nanoparticles addition with diesel fuel on emissions and performance of engine generator set using response surface methodology. *Energy Conversion and Management*: X, 19, 100389. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100389>
- Nair, G. M., Sajini, T., & Mathew, B. (2022). Advanced green approaches for metal and metal oxide nanoparticles synthesis and their environmental applications. *Talanta Open*, 5, 100080. <https://doi.org/10.1016/j.talo.2021.100080>

- Nanthagopal, K., Ashok, B., Saravanan, B., Pathy, M. R., Sahil, G., Ramesh, A., Nabi, M. N., & Rasul, M. G. (2019). Study on decanol and Calophyllum Inophyllum biodiesel as ternary blends in CI engine. *Fuel*, 239, 862–873. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.037>
- Nanthagopal, K., Kishna, R. S., Atabani, A. E., Al-Muhtaseb, A. H., Kumar, G., & Ashok, B. (2020). A compressive review on the effects of alcohols and nanoparticles as an oxygenated enhancer in compression ignition engine. *Energy Conversion and Management*, 203, 112244. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112244>
- Navinprasad, A. T., Prakash, R., Yoganandh, J., Meenakshipriya, B., & Ramakrishnan, K. (2021). Experimental investigation of nickel oxide nanomaterials with n-pentane diesel blends in compression ignition engine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1070(1), 012126. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1070/1/012126>
- Nickel (III) Oxide (Ni₂O₃) Nanopowder/Nanoparticles, Purity: 99.95+ %, Size: 40 nm. (2025). Nanografi Advanced Materials. Retrieved 24 September 2025, from <https://shop.nanografi.com/nanoparticles/nickel-iii-oxide-ni2o3-nanopowder-nanoparticles-purity-99-95-size-40-nm/>
- No, S.-Y. (2016). Application of biobutanol in advanced CI engines—A review. *Fuel*, 183, 641–658. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.06.121>
- Opuz, M., Uyumaz, A., Babagiray, M., Solmaz, H., Calam, A., & Aksoy, F. (2023). The effects of metallic fuel addition into canola oil biodiesel on combustion, engine performance and exhaust emissions. *Journal of the Energy Institute*, 111, 101390. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101390>
- Örs, İ., Ciniviz, M., Kul, B. S., & Kahraman, A. (2021). The experimental investigation of diesel fuel-biofuel blends at different injection pressures in a DI diesel engine. *Journal of Engg. Research Vol*, 9(4A), 39–58.
- Örs, I., Sarıkoç, S., Atabani, A. E., Ünal, S., & Akansu, S. O. (2018). The effects on performance, combustion and emission characteristics of DIC engine fuelled with TiO₂ nanoparticles addition in diesel/biodiesel/n-butanol blends. *Fuel*, 234, 177–188. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.024>
- Ortiz-Quinonez, J.-L., Pal, U., & Villanueva, M. S. (2018). Structural, Magnetic, and Catalytic Evaluation of Spinel Co, Ni, and Co–Ni Ferrite Nanoparticles Fabricated by Low-Temperature Solution Combustion Process. *ACS Omega*, 3(11), 14986–15001. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02229>

- Özgür, C. (2021). Influence of NiFe₂O₄ and ZnO. 5NiO. 5Fe₂O₄ nanoparticles on exhaust emissions of 4 stroke-6 cylinders turbocharged diesel engine. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 10(1), 42–49. <https://doi.org/10.18245/ijaet.781493>
- Palani, Y., Devarajan, C., Manickam, D., & Thanikodi, S. (2022). Performance and emission characteristics of biodiesel-blend in diesel engine: A review. *Environmental Engineering Research*, 27(1). <https://doi.org/10.4491/eer.2020.338>
- Pan, S., Wei, J., Tao, C., Lv, G., Qian, Y., Liu, Q., & Han, W. (2021). Discussion on the combustion, performance and emissions of a dual fuel diesel engine fuelled with methanol-based CeO₂ nanofluids. *Fuel*, 302, 121096. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121096>
- Patel, A., Pruthi, V., & Pruthi, P. A. (2017). Synchronized nutrient stress conditions trigger the diversion of CDP-DG pathway of phospholipids synthesis towards de novo TAG synthesis in oleaginous yeast escalating biodiesel production. *Energy*, 139, 962–974.
- Petersen, J., Seivwright, D., Caton, P., & Millsaps, K. (2014). Combustion Characterization and Ignition Delay Modeling of Low- and High-Cetane Alternative Diesel Fuels in a Marine Diesel Engine. *Energy & Fuels*, 28(8), 5463–5471. <https://doi.org/10.1021/ef500565t>
- Piri, H., Renzi, M., & Bietresato, M. (2023). Technical implications of the use of biofuels in agricultural and industrial compression-ignition engines with a special focus on the interactions with (bio) lubricants. *Energies*, 17(1), 129.
- Polleux, L., Guerassimoff, G., Marmorat, J.-P., Sandoval-Moreno, J., & Schuhler, T. (2022). An overview of the challenges of solar power integration in isolated industrial microgrids with reliability constraints. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, 111955.
- Prudente, L. R., Leal, E. M., & Santana, C. M. (2023). *Optimizing Performance and Sustainability: A Comprehensive Analysis of an Internal Combustion Engine Powered by Tire and Biomass Pyrolysis Oil*. <https://www.researchsquare.com/article/rs-3665424/latest>
- Qi, D. H., Chen, H., Geng, L. M., & Bian, Y. Z. (2010). Experimental studies on the combustion characteristics and performance of a direct injection engine fueled with biodiesel/diesel blends. *Energy Conversion and Management*, 51(12), 2985–2992.
- Raju, V. D., Kishore, P. S., Nanthagopal, K., & Ashok, B. (2018). An experimental study on the effect of nanoparticles with novel tamarind seed methyl ester for diesel

- engine applications. *Energy Conversion and Management*, 164, 655–666. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.032>
- Rakopoulos, D. C., Rakopoulos, C. D., Giakoumis, E. G., Dimaratos, A. M., & Kyritsis, D. C. (2010). Effects of butanol–diesel fuel blends on the performance and emissions of a high-speed DI diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 51(10), 1989–1997. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.02.032>
- Rakopoulos, D. C., Rakopoulos, C. D., Hountalas, D. T., Kakaras, E. C., Giakoumis, E. G., & Papagiannakis, R. G. (2010). Investigation of the performance and emissions of bus engine operating on butanol/diesel fuel blends. *Fuel*, 89(10), 2781–2790. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.03.047>
- Raman, R., Sreenivasan, A., Kulkarni, N. V., Suresh, M., & Nedungadi, P. (2025). Analyzing the contributions of biofuels, biomass, and bioenergy to sustainable development goals. *iScience*, 28(4). [https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042\(25\)00418-3](https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042(25)00418-3)
- Ramesh, A., Ashok, B., Nanthagopal, K., Pathy, M. R., Tambare, A., Mali, P., Phuke, P., Patil, S., & Subbarao, R. (2019). Influence of hexanol as additive with Calophyllum Inophyllum biodiesel for CI engine applications. *Fuel*, 249, 472–485. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.072>
- Rashid, A., Mohammed, S. A., Abbas, H. F., AlSaadi, M. A., Ali, N., Khalid, N., Yousif, E., Alyaqoobi, S., & Al Riami, K. (2022). *Study NiO Nanoparticles with Different Surface Morphologies on PET Pyrolysis Kinetic Parameters*. <https://biointerface-research.com/wp-content/uploads/2022/06/BRIAC133.216.pdf>
- Renewable Energy Progress Tracker (2025). IEA. Retrieved 23 September 2025, from <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/renewable-energy-progress-tracker>
- Ridhuan, A., Osman, S. A., Fawzi, M., Alimin, A. J., & Osman, S. A. (2021). A review of comparative study on the effect of hydroxyl gas in internal combustion engine (ICE) on engine performance and exhaust emission. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 87(2), 1–16. <https://doi.org/10.37934/arfmts.87.2.116>
- Rifaya, M. N., Theivasanthi, T., & Alagar, M. (2012). Chemical Capping Synthesis of Nickel Oxide Nanoparticles and their Characterizations Studies. *Nanoscience and Nanotechnology*, 2(5), 134–138. <https://doi.org/10.5923/j.nn.20120205.01>
- Ritchie, H., & Roser, M. (2020). CO₂ emissions. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/co2-emissions>

- Sánchez-Rodríguez, G., Domenzaín-González, J., Verónico-Sánchez, F. J., Pérez-López, H. I., Zúñiga-Moreno, A., & Elizalde-Solis, O. (2025). Density and Viscosity in Biodiesel+ Diesel Mixtures from Recycled Feedstocks. *Applied Sciences*, 15(7), 3812.
- Santhosh, K., & Kumar, G. N. (2020). Impact of 1-Hexanol/diesel blends on combustion, performance and emission characteristics of CRDI CI mini truck engine under the influence of EGR. *Energy Conversion and Management*, 217, 113003.
- Saputra, R., & Sunaryo, M. F. (2019). Analisis kinerja mesin penggerak traktor pertanian model HST KHS 18 JTDB hasil perakitan lokal di PT X. *Bina Teknika*, 15(2), 127–135.
- Sarno, M., Ponticorvo, E., Cirillo, C., & Ciambelli, P. (2016). Magnetic nanoparticles for PAHs solid phase extraction. *Chemical Engineering Transactions*, 47, 313–318. <https://doi.org/10.3303/CET1647053>
- Sarno, M., Ponticorvo, E., & Scarpa, D. (2020). Novel Pt-Ni/NiO/Ni₂O₃ based electrodes for electrocatalytic biodiesel production from waste palm oil. *Materials Today: Proceedings*, 20, 69–73. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.012>
- Sarvestani, N. S., Fard, M. H. A., Tabasizadeh, M., Nayebzadeh, H., Arora, P., Verma, P., Van, T. C., Jafari, M., Bodisco, T. A., & Ristovski, Z. (2022). Synthesis and evaluation of catalytic activity of NiFe₂O₄ nanoparticles in a diesel engine: An experimental investigation and Multi-Criteria Decision Making approach. *Journal of Cleaner Production*, 365, 132818. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132818>
- Shaah, M. A. H., Hossain, M. S., Allafi, F. A. S., Alsaedi, A., Ismail, N., Ab Kadir, M. O., & Ahmad, M. I. (2021). A review on non-edible oil as a potential feedstock for biodiesel: Physicochemical properties and production technologies. *RSC Advances*, 11(40), 25018–25037.
- Shaisundaram, V. S., Elumalai, P. V., Padmanabhan, S., Ramachandran, U. N., Tripathi, A. K., Yaping, C., Goud, B. N., & Prabhakar, S. (2025). Impact of metal oxides on thermal response of zirconia coated diesel engines fueled by Momordica biodiesel machine learning insights. *Scientific Reports*, 15(1), 26457. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-04033-0>
- Shrivastava, P., Salam, S., Verma, T. N., & Samuel, O. D. (2020). Experimental and empirical analysis of an IC engine operating with ternary blends of diesel, karanja and roselle biodiesel. *Fuel*, 262, 116608. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116608>
- Singh, A. K., Pali, H. S., & Khan, M. M. (2024). Response surface optimization approach to enhance the performance of diesel engine using ternary blends of biobutanol

and biodiesel doped with ZnO nanoparticles. *Energy Conversion and Management*, 300, 117899. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117899>

- Singh, R. P., Sharma, K., & Mausam, K. (2020). Dispersion and stability of metal oxide nanoparticles in aqueous suspension: A review. *Materials Today: Proceedings*, 26, 2021–2025. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.439>
- Siwale, L., Kristóf, L., Adam, T., Bereczky, A., Mbarawa, M., Penninger, A., & Kolesnikov, A. (2013). Combustion and emission characteristics of n-butanol/diesel fuel blend in a turbo-charged compression ignition engine. *Fuel*, 107, 409–418.
- Soloiu, V., Moncada, J. D., Gaubert, R., Muiños, M., Harp, S., Ilie, M., Zdanowicz, A., & Molina, G. (2018). LTC (low-temperature combustion) analysis of PCCI (pre-mixed charge compression ignition) with n-butanol and cotton seed biodiesel versus combustion and emissions characteristics of their binary mixtures. *Renewable Energy*, 123, 323–333. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.061>
- Soudagar, M. E. M., Nik-Ghazali, N.-N., Kalam, M. A., Badruddin, I. A., Banapurmath, N. R., & Akram, N. (2018). The effect of nano-additives in diesel-biodiesel fuel blends: A comprehensive review on stability, engine performance and emission characteristics. *Energy Conversion and Management*, 178, 146–177. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.019>
- Srinidhi, C., & Madhusudhan, A. (2017). A diesel engine performance investigation fuelled with nickel oxide nano fuel-methyl ester. *International Journal of Renewable Energy Research*, 7(2), 676–681.
- Srinidhi, C., Madhusudhan, A., & Channapattana, S. V. (2019). Effect of NiO nanoparticles on performance and emission characteristics at various injection timings using biodiesel-diesel blends. *Fuel*, 235, 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.067>
- Suhel, A., Abdul Rahim, N., Abdul Rahman, M. R., Bin Ahmad, K. A., Teoh, Y. H., & Zainal Abidin, N. (2021). An experimental investigation on the effect of ferrous ferric oxide nano-additive and chicken fat methyl ester on performance and emission characteristics of compression ignition engine. *Symmetry*, 13(2), 265. <https://doi.org/10.3390/sym13020265>
- Sukjit, E., Herreros, J. M., Dearn, K. D., Tsolakis, A., & Theinnoi, K. (2013). Effect of hydrogen on butanol–biodiesel blends in compression ignition engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(3), 1624–1635. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.11.061>
- Sule, A., Latiff, Z. A., Abas, M. A., Perang, M. R. M., Veza, I., & Anthony, O. C. (2024). Effects of a Hybrid Additive of Ethanol-Butanol and Magnetite Nanoparticles on Emissions and Performance of Diesel Engines Fueled with Diesel-Biodiesel

- Blends. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 21(2), 11350–11360. <https://doi.org/10.15282/ijame.21.2.2024.13.0876>
- Swamy, R. L., Chandrashekar, T. K., Banapurmath, N. R., & Khandal, S. V. (2015). Impact of diesel-butanol blends on performance and emission of diesel engine. *Oil Gas Res*, 1(1), 1–7. <https://doi.org/10.4172/2472-0518.1000101>
- Tefera, N. T., Nallamotheu, R. B., & Alemayehu, G. (2025). Analysis of RCCI engine characteristics with n-butanol/gasoline as low reactive fuel and biodiesel blend as high reactive fuel. *Scientific Reports*, 15(1), 26023. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97620-0>
- Temizer, I., & Eskici, B. (2020). Tek Silindirli Dizel Bir Motorun Performans ve Emisyonları Üzerinde Biodizel Karışımli Yakıtların Etkisinin Deneyisel ve Sayısal İncelenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 733–746.
- Tse, H., Leung, C. W., & Cheung, C. S. (2015). Investigation on the combustion characteristics and particulate emissions from a diesel engine fueled with diesel-biodiesel-ethanol blends. *Energy*, 83, 343–350. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.030>
- Vaizoğullar, A. İ. (2021). Facile preparation and characterization of NiO/Ni₂O₃-decorated nanoballs and mixed phase CdS nano rods (CdS&NiO/Ni₂O₃) for effective photocatalytic decomposition of Congo red under visible light irradiation. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 42(9), 1408–1418. <https://doi.org/10.1080/01932691.2020.1814804>
- Vellaiyan, S., Subbiah, A., & Chockalingam, P. (2020). Effect of titanium dioxide nanoparticle as an additive on the exhaust characteristics of diesel-water emulsion fuel blends. *Petroleum Science and Technology*, 38(3), 194–202. <https://doi.org/10.1080/10916466.2019.1702677>
- Venu, H., Raju, V. D., Lingesan, S., & Soudagar, M. E. M. (2021). Influence of Al₂O₃ nano additives in ternary fuel (diesel-biodiesel-ethanol) blends operated in a single cylinder diesel engine: Performance, combustion and emission characteristics. *Energy*, 215, 119091. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119091>
- VijayaKumar, S. D., Zakaria, J., & Ridzuan, N. (2022). The role of Gemini surfactant and SiO₂/SnO/Ni₂O₃ nanoparticles as flow improver of Malaysian crude oil. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 34(7), 384–390. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.03.009>
- Yang, C., Miwa, K., & Kidoguchi, Y. (1999). Effect of rich and high turbulence combustion on emissions and flame behavior in a direct-injection diesel engine; Chokusei funshashiki diesel kikan ni okeru haki tokusei to kaen kyodo ni oyobosu

kano koranryu nensho no eikyo. *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu. B Hen (Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. Part B)*, 65. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20074268>

- Yesilyurt, M. K. (2020). A detailed investigation on the performance, combustion, and exhaust emission characteristics of a diesel engine running on the blend of diesel fuel, biodiesel and 1-heptanol (C7 alcohol) as a next-generation higher alcohol. *Fuel*, 275, 117893. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117893>
- Yesilyurt, M. K., Eryilmaz, T., & Arslan, M. (2018). A comparative analysis of the engine performance, exhaust emissions and combustion behaviors of a compression ignition engine fuelled with biodiesel/diesel/1-butanol (C4 alcohol) and biodiesel/diesel/n-pentanol (C5 alcohol) fuel blends. *Energy*, 165, 1332–1351. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.100>
- Yetter, R. A., Risha, G. A., & Son, S. F. (2009). Metal particle combustion and nanotechnology. *Proceedings of the Combustion Institute*, 32(2), 1819–1838. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.08.013>
- Yilmaz, N., Vigil, F. M., Benalil, K., Davis, S. M., & Calva, A. (2014). Effect of biodiesel–butanol fuel blends on emissions and performance characteristics of a diesel engine. *Fuel*, 135, 46–50. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.022>
- Yusaf, T., Kamarulzaman, M. K., Adam, A., Hisham, S., Ramasamy, D., Kadirgama, K., Samykano, M., & Subramaniam, S. (2022). Physical-chemical properties modification of *Hermetia illucens* larvae oil and diesel fuel for the internal combustion engines application. *Energies*, 15(21), 8073.
- Zare, A., Stevanovic, S., Jafari, M., Verma, P., Babaie, M., Yang, L., Rahman, M. M., Ristovski, Z. D., Brown, R. J., & Bodisco, T. A. (2021). Analysis of cold-start NO₂ and NO_x emissions, and the NO₂/NO_x ratio in a diesel engine powered with different diesel-biodiesel blends. *Environmental Pollution*, 290, 118052.
- Zeldvich, Y. B. (1946). The oxidation of nitrogen in combustion and explosions. *J. Acta Physicochimica*, 21, 577.
- Zhang, Z., Guo, C., Song, Y., Feng, H., Zuo, Z., Jia, B., & Roskilly, A. P. (2018). Research on the engine combustion characteristics of a free-piston diesel engine linear generator. *Energy Conversion and Management*, 168, 629–638.
- Zhang, Z.-H., & Balasubramanian, R. (2014). Influence of butanol–diesel blends on particulate emissions of a non-road diesel engine. *Fuel*, 118, 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.10.059>