



**DİZEL MOTORLARDA TiO_2 NANOPARTİKÜLLERİNİN MOTOR
PERFORMANSINA VE EMİSYON DEĞERLERİNE ETKİSİNİN
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Sefa KOCA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2024

ETİK BEYAN

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

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Sefa KOCA

19/07/2024

DİZEL MOTORLARDA TiO_2 NANOPARTİKÜLLERİNİN MOTOR PERFORMANSINA VE EMİSYON DEĞERLERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Sefa KOCA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2024

ÖZET

Bu çalışma, saf dizel yakıt ile farklı konsantrasyonlarda TiO_2 nanopartiküllerinin eklenmesiyle oluşturulan yakıtlar kullanılarak dört zamanlı ve üç silindirli bir dizel motorda performans ve emisyon değerlerinde meydana gelen değişikliklerin incelenmesini amaçlamıştır. Saf dizel yakıtta TiO_2 nanopartiküllerinin eklenmesiyle dizel motorun yanma özelliklerinin iyileştirilmesi ve egzoz emisyonlarının zararlı etkilerinin azaltılması amaçlanmıştır. Saf dizel ve TiO_2 nanopartikül katkılı yakıt numuneleri 25 ppm, 50 ppm ve 75 ppm olmak üzere üç ayrı miktarda D100, D100+25 TiO_2 , D100+50 TiO_2 ve D100+75 TiO_2 olmak üzere manyetik ve ultrasonik karıştırıcılarda hazırlandı. Araştırmada kullanılan tüm yakıt numuneleri, tam yükte farklı devirler ve 1800 dev/dk sabit devir farklı yük değerleri olmak üzere iki farklı deneysel çalışmada kullanılmıştır. Tam yükte ve farklı motor hızlarında TiO_2 eklentisi ile fren gücü ve tork değerlerinde saf dizele kıyasla sırasıyla %2,9 ve %5'lik artış sağlanmıştır. Fren ısı verimi, düşük TiO_2 katkısında saf dizele göre ortalama %4,5 artış göstermiştir. Fren özgül yakıt tüketiminde ise düşük nanopartikül katkısında ortalama %4,5 oranında azalma sağlanmıştır. Tam yükte, motor devri ve nanopartikül konsantrasyonu arttıkça egzoz gaz sıcaklığında artış görülmüştür. CO_2 ve NO_x emisyonlarında ise en yüksek konsantrasyondaki nanopartikül eklentisinde saf dizele göre sırasıyla ortalama %4,7 ve %14,7 artış tespit edilmiştir. Sabit 1800 dev/dk ve %25, %50, %75 ve %100 olmak üzere dört farklı yük seçeneklerinde ise TiO_2 katkılı yakıtlar saf dizel ile karşılaştırıldığında, maksimum fren termal verimliliğinde %15,12 artış, maksimum fren özgül yakıt tüketiminde ise %13,36 düşüş görülmüştür. Saf dizele göre en yüksek TiO_2 katkılı yakıtta ve maksimum yükte egzoz emisyonlarındaki CO_2 miktarı %5 arttı. TiO_2 ilaveli tüm yükler için NO_x emisyonlarında ortalama %11,44 oranında artış meydana geldi. Sonuçlar, TiO_2 nanopartiküllerinin eklenmesiyle oluşturulan yakıt karışımının dizel motorlarda belirli oranlarda kullanılabileceğini ve TiO_2 katkısının yanma özelliklerini ve motor performansını olumlu yönde iyileştirdiğini göstermektedir.

Bilim Kodu : 91413

Anahtar Kelimeler : Dizel motor, emisyon, nanopartikül, TiO_2 , yanma

Sayfa Adedi : 57

Danışman : Doç. Dr. Fatih AKTAŞ

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF TiO₂ NANOPARTICLES
ON ENGINE PERFORMANCE AND EMISSION VALUES IN DIESEL ENGINES

(M. Sc. Thesis)

Sefa KOCA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2024

ABSTRACT

This study aimed to examine the changes in performance and emission values in a four-stroke and three-cylinder diesel engine by using pure diesel fuel and fuels created by adding TiO₂ nanoparticles. Adding TiO₂ nanoparticles to the fuel aimed to improve the combustion characteristics of the diesel engine and reduce the harmful effects of exhaust emissions. Pure diesel and TiO₂ nanoparticle added fuel samples in three distinct amounts, 25 ppm, 50 ppm, and 75 ppm, were prepared in magnetic and ultrasonic mixers as D100, D100+25TiO₂, D100+50TiO₂ and D100+75TiO₂. All fuel samples used in the research were used in two different experimental studies that are different speeds at full load and 1800 rpm constant speed at different load values. With TiO₂ addition at full load at different engine speeds, an increase of 2.9% and 5%, respectively, was achieved in brake power and torque values compared to pure diesel. Brake thermal efficiency increased by an average of 4.5% in low TiO₂ additive compared to pure diesel. An average of 4.5% reduction in brake specific fuel consumption was achieved with the low nanoparticle contribution. At full load, an increase in exhaust gas temperature was observed as engine speed and nanoparticle concentration increased. In CO₂ and NO_x emissions, an average increase of 4.7% and 14.7%, respectively, was detected in the nanoparticle addition with the highest contraction compared to pure diesel. When TiO₂ added fuels are compared with pure diesel at 1800 rpm and four different load options that are 25%, 50%, 75% and 100%, it is seen that 15.12% increase in brake thermal efficiency and a 13.36% decrease in brake specification fuel consumption. When TiO₂ added fuels were compared to pure diesel, there was a 15.12% raise in brake thermal efficiency and a 13.36% drop in brake specification fuel consumption. The amount of CO₂ in exhaust emissions increased by 5% at maximum load in the fuel with the highest TiO₂ additive according to neat diesel. There was an average increase of 11.44% in NO_x emissions for all loads with TiO₂ addition. The results show that the fuel mixture created by adding TiO₂ nanoparticles can be used in certain proportions in diesel engines and that the TiO₂ addition positively improves the combustion properties and engine performance.

Science Code : 91413

Key Words : Diesel motor, emission, nanoparticle, TiO₂, combustion

Page Number : 57

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Fatih AKTAŞ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezim süresince her daim yardımını ve desteğini hissettiğim, zaman ve mekân mefhumu olmadan değerli vaktini ayıran, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak motivasyonumu sürekli diri tutan ve bu çalışmanın nihayete ermesini sağlayan çok değerli hocam Doç. Dr. Fatih AKTAŞ' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel altyapının kurulmasında ve malzemelerin hazırlanmasında emeği bulunan değerli çalışma arkadaşlarım Oktay ZİNCİRCİ ve Hasan Ali KIRKPINAR' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Eğitimimiz ve yaşamımız boyunca bize yol gösteren, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bu günlere gelmemizde sayısız fedakarlıklar yapan babam Ali KOCA ve annem Hatice KOCA' ya; lisansüstü eğitimimde teşvik ve yönlendirmeleriyle desteklerini esirgemeyen ağabeyim Bedrettin KOCA ve kardeşim Muhammed KOCA' ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak sabrı, hoşgörüsü, sevgisi ve anlayışını hiçbir zaman eksik etmeyen, çalışma azmimi artıran değerli eşim Emine KOCA' ya ve TiO₂'leri düzelterek bana yardım eden oğlum Ali KOCA' ya içten ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. TEMEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Dizel Motorların Çalışma Prensipleri.....	3
2.1.1. Emme zamanı	3
2.1.2. Sıkıştırma zamanı	4
2.1.3. Yanma zamanı.....	4
2.1.4. Egzoz zamanı	4
2.2. Dizel Motorlarda Yanma	4
2.2.1. Tutuşma gecikmesi.....	5
2.2.2. Kontrolsüz yanma	6
2.2.3. Kontrollü yanma.....	6
2.2.4. Art yanma.....	7
2.3. Dizel Motorlarda Yanma Sonucu Oluşan Emisyonlar	7
2.3.1. NOx emisyonları	7
2.3.2. HC emisyonu.....	8

	Sayfa
2.3.3. CO emisyonu.....	9
2.3.4. CO ₂ emisyonu	10
2.3.5. Partikül madde emisyonu.....	10
2.4. Dizel Motorlarda Kullanılan Nanopartiküller.....	11
2.4.1. Metal oksitler	11
2.4.2. Metal nanopartiküller	12
2.4.3. Karbon nanotüpler (CNT).....	13
2.4.4. Grafen nano hücreleri (GNP).....	14
2.4.5. Hibrit nanopartiküller.....	16
2.5. Nanopartiküllerin Motor Verimliliğine ve Emisyonlara Etkisi.....	16
2.6. Literatür Taraması.....	19
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	23
3.1. Nanopartikül Yakıt Karışımının Hazırlanması	23
3.2. Deney Düzenegi.....	25
3.3. Belirsizlik Analizi	27
3.4. Denklemler ve Hesaplamalar.....	28
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	31
4.1. Tam Yükte ve Farklı Motor Hızlarında Verilerin Analizi.....	31
4.1.1. Fren torku ve fren gücü.....	31
4.1.2. Fren ısı verim (BTE)	33
4.1.3. Fren özgül yakıt tüketimi (BSFC).....	34
4.1.4. Egzoz gaz sıcaklığı (EGS)	35
4.1.5. Karbondioksit (CO ₂) emisyonları	36
4.1.6. Nitrojen oksit (NO _x) emisyonları	37

	Sayfa
4.2. 1800 dev/dk ve Farklı Y¼klerde Performans ve Emisyon Verilerin Analizi	38
4.2.1. Fren ısı verim (BTE)	38
4.2.2. Fren özgül yakıt tüketimi (BSFC).....	39
4.2.3. Egzoz gaz sıcaklığı (EGS)	40
4.2.4. Karbondioksit (CO ₂) emisyonları	41
4.2.5. Nitrojen oksit (NO _x) emisyonları	42
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	45
KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ	57

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. TiO ₂ nano partiküllerinin özellikleri.....	23
Çizelge 3.2. Test yakıtlarının özellikleri	24
Çizelge 3.3. Dizel motorun özellikleri	26
Çizelge 3.4. Capelec Cap 3200 emisyon analiz cihazının özellikleri	27
Çizelge 3.5. Farklı parametrelere ait belirsizlik değerleri	28



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Dört zamanlı bir dizel motor çevrimi	3
Şekil 2.2. Dizel motorlarda yanma ve püskürtme periyotları	5
Şekil 2.3. Organik ve inorganik nanopartiküllerin sınıflandırması.....	11
Şekil 2.4. Nanotüplerin yapısal görünümü SWCNT (a), DWCNT (b), MWCNT (c)....	13
Şekil 2.5. Grafenin yapısal görünümü	15
Şekil 2.6. Nano akışkan içindeki nanopartiküllerin mikro patlama etkisi	17
Şekil 3.1. Saf dizel ile TiO ₂ nanopartikül karışımının hazırlanması.....	25
Şekil 3.2. Motor deney düzeneği	26
Şekil 4.1. Tam yükte yakıt numunelerinin değişken hızlardaki tork değerleri.....	32
Şekil 4.2. Tam yükte yakıt numunelerinin değişken hızlardaki fren gücü değerleri	33
Şekil 4.3. Tam yükte yakıt numunelerinin değişken hızlardaki fren ısı verim değerleri	34
Şekil 4.4. Tam yükte yakıt numunelerinin değişken hızlardaki fren özgül yakıt tüketimi değerleri	35
Şekil 4.5. Tam yükte yakıt numunelerinin değişken hızlardaki egzoz gaz sıcaklığı değerleri.....	36
Şekil 4.6. Tam yükte yakıt numunelerinin değişken hızlardaki CO ₂ emisyona değerleri.....	37
Şekil 4.7. Tam yükte yakıt numunelerinin değişken hızlardaki NO _x emisyona değerleri.....	38
Şekil 4.8. Yakıt numunelerinin 1800 dev/dk sabit hızda ve farklı yüklerdeki fren ısı verim değerleri.....	39
Şekil 4.9. Yakıt numunelerinin 1800 dev/dk sabit hızda ve farklı yüklerdeki fren özgül yakıt tüketim değerleri.....	40
Şekil 4.10. Yakıt numunelerinin 1800 dev/dk sabit hızda ve farklı yüklerdeki egzoz gaz sıcaklık değerleri.....	41

Şekil	Sayfa
Şekil 4.11. Yakıt numunelerinin 1800 dev/dk sabit hızda ve farklı yüklerdeki CO ₂ değerleri	42
Şekil 4.12. Yakıt numunelerinin 1800 dev/dk sabit hızda ve farklı yüklerdeki NO _x değerleri	43



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. TiO ₂ nano partiküllerinin SEM görüntüsü.....	24



SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
%	Yüzde
°C	Derece santigrat
°KA	Derece krank açısı
Ag	Gümüş
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
Au	Altın
C	Karbon
CeO ₂	Seryum oksit
CO	Karbon monoksit
CO ₂	Karbon dioksit
Cu	Bakır
CuO	Bakır oksit
FeO	Demir oksit
g	Gram
h	Saat
HC	Hidrokarbon
kg	Kilogram
kj	Kilo joule
kW	Kilowatt
m _f	Yakıt tüketimi
MgO	Magnezyum oksit
N ₂	Azot (Nitrojen)
N ₂ O	Diazot oksit

Simgeler	Açıklamalar
N_2O_3	Diazot trioksit
N_2O_5	Diazot pentaoksit
Nm	Newton metre
NO	Azot monoksit
NO₂	Azot dioksit
NO_x	Azot oksit
s	Saniye
O₂	Oksijen
pH	Asitlik ve baziklik derecesi
Pt	Platin
SDS	Sodyum dodesil sülfat
TiO₂	Titanyum oksit
ZnO	Çinko oksit
ZrO₂	Zirkonyum dioksit

Kısaltmalar	Açıklamalar
2D	İki boyut
µm	Mikrometre
AÖN	Alt ölü nokta
BP	Fren gücü (Brake power)
BSFC	Fren özgül yakıt tüketimi
BTE	Fren ısı verimi (Brake termal efficiency)
CNT	Karbon nanotüp
CV	Düşük kalorifik değer
DWCNT	Çift duvarlı karbon nanotüp
EGS	Egzoz gaz sıcaklığı
GNP	Grafen nano hücre

Kısaltmalar**Açıklamalar****IEA**

Uluslararası Enerji Ajansı

KMA

Krank mil açısı

MWCNT

Çok duvarlı karbon nanotüp

N

Devir

NP

Nanopartikül

P

Silindir basıncı

ppm

Milyonda bir parça

SEM

Taramalı elektron mikroskobu

SDG

Sürdürülebilir kalkınma hedefleri

SWCNT

Tek duvarlı karbon nanotüp

T

Tork

UHC

Yanmamış hidrokarbon

ÜÖN

Üst ölü nokta

1. GİRİŞ

Fosil yakıtlar, dünya genelinde öneminin daha da arttığı ve aynı zamanda çokça tartışıldığı bir dönemden geçmektedir. Sanayileşmenin, kentleşmenin ve fosil yakıt kullanan araç sayısının hızla arttığı bu dönemlerde dünyanın enerji tüketimi de önemli ölçüde arttı. Fosil yakıtlar dünyada kullanılan enerjinin %80'ini karşılamaktadır [1]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının artmasına rağmen dünya enerji tüketiminin önemli bir kısmını karşılayan fosil yakıtlar yeşil enerjiye geçişi zorlaştırmaktadır [2]. Tüketimdeki bu bağımlılık ciddi olumsuzlukları da beraberinde getiriyor. Özellikle insan sağlığının bozulmasının, çevresel olumsuzlukların, ülke ekonomilerindeki sıkıntıların temel nedenlerinden biri olması nedeniyle daha da fazla gündeme gelmektedir [3].

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), gelişmekte olan ülkelerin enerji tüketiminin 2040 yılına kadar %25 oranında artacağını, bunun da daha fazla sera gazı oluşumunu ve iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini tetikleyeceğini belirtmektedir [2]. Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SDG) gibi küresel programlar da sürdürülebilir enerji kaynaklarına geçişin aciliyetini vurgulamaktadır [4]. Fosil yakıt kaynaklarının tükenmesi ve olumsuz etkileri nedeniyle, bu kaynakların daha verimli kullanılması ve olumsuz etkilerinin azaltılması için alternatif yöntem arayışlarını da artırmıştır. Özellikle ulaşım ve sanayide kullanılan dizel motorlarda bu anlamda çalışmalar artmıştır [5, 6].

Biyodizel yakıtların kullanımı, motor modifikasyonları, yakıt katkılarının eklenmesi gibi çalışmalar yukarıda bahsedilen olumsuz etkilerin azaltılması ve kaynakların daha verimli kullanılması amacıyla yapılan çalışmalara örnektir [7]. Biyodizel yakıt ve nanopartiküllerin kullanıldığı örnek çalışmalarda motor performansının önemli ölçüde artırılacağı ve zararlı emisyonların azaltılabileceği gösterilmiştir [8, 9, 10].

Yapılan çalışmalarda Al_2O_3 , CeO_2 , ZnO , CuO , SiO_2 , MgO , TiO_2 , FeO vb. gibi nanopartiküllerin motor performansını, yanma özelliklerini ve emisyon davranışını anlamak amacıyla birçok deneyde kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmalarda TiO_2 nanopartiküllerinin ZnO , CuO , MgO , CeO_2 , FeO nano katkı maddelerine göre daha yüksek termal iletkenliğe, gelişmiş yanıcılık özelliğine ve daha yüksek yüzey-hacim oranına sahip olduğu bilinmektedir [11]. Bunun dışında TiO_2 nanopartiküllerinin yüksek ısı

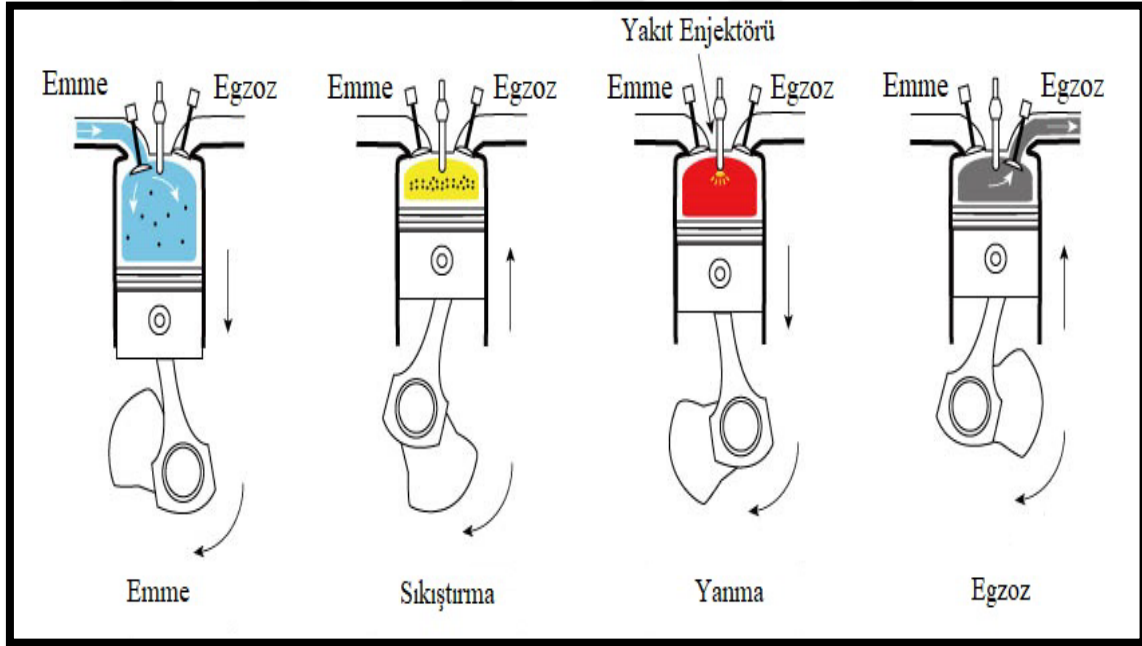
iletkenliklerinden dolayı katalitik etki göstererek yanma özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir [1, 12]. Ayrıca TiO_2 nanopartikülleri, içten yanmalı motorlardan kaynaklanan NO_x , CO ve HC emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunan yüksek fotokatalitik aktivite ile karakterize edilir. Ek olarak, TiO_2 nanopartiküllerinin dizel yakıtların yanma verimliliğini arttırdığı, bunun sonucunda yakıt ekonomisinin iyileşmesine ve emisyonların azalmasına neden olduğu bulunmuştur [2].



2. TEMEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Dizel Motorların Çalışma Prensibi

Dizel motorlar, yakıtın motorun içinde yakılması suretiyle kimyasal enerjinin ısı enerjisine ve ısı enerjisininse mekanik işe dönüştürülmesi prensibine dayanmaktadır. Hava-yakıt karışımını ateşlemek için buji kullanan benzinli motorların aksine, dizel motorlar, havanın yüksek sıcaklık ve basınca sıkıştırılarak yakıtın kendiliğinden tutuşmasına neden olduğu sıkıştırılmalı ateşleme prensibiyle çalışır. Dizel motorlarda çalışma prensibi Şekil 2.1’de görüldüğü üzere 4 zamanda gerçekleşmektedir [13].



Şekil 2.1. Dört zamanlı bir dizel motor çevrimi [13]

2.1.1. Emme zamanı

Dizel motorun çevrimi emme zamanı ile başlar. Piston silindirden aşağı doğru alt ölü noktaya (AÖN) hareket ettiği sırada emme valfi açılır ve yanma odasına temiz hava çekilir. Benzinli motorlardan farklı olarak dizel motorlar bu aşamada yakıt gelen havaya karışmaz.

2.1.2. Sıkıştırma zamanı

Dizel motorlarda emme zamanı sırasında hava yanma odasına çekilir. Sıkıştırma zamanı sırasında hava, pistonun üst ölü noktaya doğru (ÜÖN) hareketi ile yüksek basınç ve sıcaklıkta sıkıştırılır. Bu sıkıştırma, havanın sıcaklığının, yanma odasına enjekte edildiğinde dizel yakıtı ateşleyecek kadar yüksek bir noktaya ulaşmasına neden olur. Dizel motorlarda karbüratör veya buji kullanılmaz. Bunun yerine, kesin olarak ölçülen miktardaki dizel yakıtı doğrudan yanma odasındaki sıcak ve yüksek oranda sıkıştırılmış havaya enjekte eden bir yakıt enjeksiyon sistemine sahiptirler. Yakıt sıcak hava ile temas ettiğinde sıkıştırma ısısından dolayı kendiliğinden tutuşur [13].

2.1.3. Yanma zamanı

Dizel yakıtın yanması, gazların hızlı bir şekilde genişmesine neden olur ve yanma odasında yüksek basınç oluşur. Bu basınç, pistonu silindirin altına (AÖN) iterek yanan yakıtın ısı enerjisini mekanik işe dönüştürür. Pistonun bu aşağıya doğru hareketi, güç stroku olarak bilinir ve motorun güç çıkışının ana kaynağıdır.

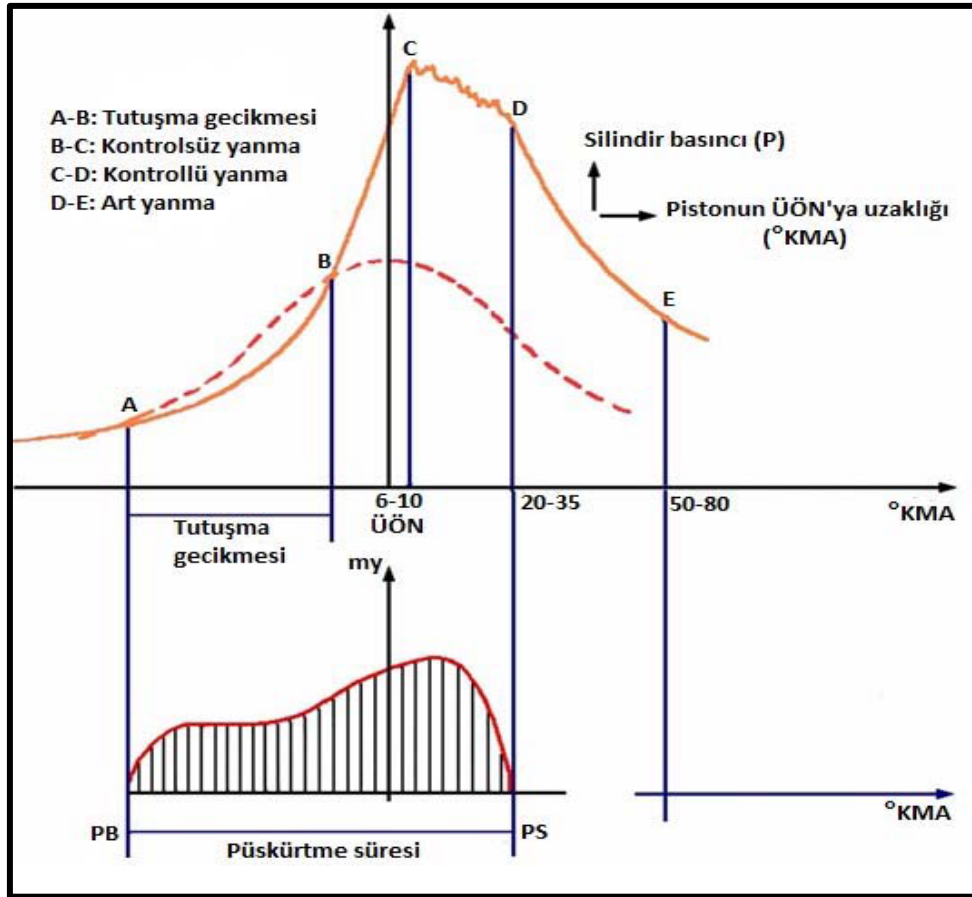
2.1.4. Egzoz zamanı

Yanma zamanından sonra egzoz valfleri açılır ve egzoz zamanı sırasında yanmış gazlar yanma odasından dışarı atılır. Bu, bir sonraki sıkıştırma zamanı için temiz hava çekerek motoru yeni bir çevrime hazırlar.

Bu dört zamanlı döngü, motor çalışırken sürekli olarak tekrarlanır; bu nedenle buna dört zamanlı çevrim de denir. Bunlar, arabalar, kamyonlar, otobüsler, endüstriyel makineler ve güç jeneratörleri dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanılan en yaygın içten yanmalı motor türleridir. Pistonun dört vuruşunda bir tam güç çevrimini tamamlar [14].

2.2. Dizel Motorlarda Yanma

Dizel motorlarda yanma safhaları Şekil 2.2’de görüldüğü üzere tutuşma gecikmesi, kontrollü yanma, kontrolsüz yanma ve art yanmadan oluşur [15].



Şekil 2.2. Dizel motorlarda yanma ve püskürtme periyotları [15]

2.2.1. Tutuşma gecikmesi

Dizel yakıtın püskürtülmeye başlandığı A noktasından silindir içi yanmanın başladığı B noktasına kadar geçen süre tutuşma gecikme zamanıdır. Bu süre boyunca yanma odası içindeki sıkışmış havanın üzerine yakıt püskürtülür. Sıvı formdaki yakıt buharlaşma süresine kadar doğrudan tutuşmayacağından yakıt damlacıklarının buharlaşması biraz zaman alacak ve yanma ilk önce buhar tabakası etrafında gerçekleşecektir [15, 16]. Tutuşma gecikmesi süresinde, püskürtülen yakıt yanma odasındaki hava ile karışarak neredeyse homojen bir karışım oluşturarak yanmaya hazır hale gelir. Tutuşma gecikmesi hem fiziksel hem de kimyasal aşamalardan oluşur. Fiziksel gecikme, yakıt enjeksiyonu ile kimyasal reaksiyonun oluşması arasındaki süreyi temsil eder. Bu aşamada yakıt atomize olur, buharlaşır ve karışımın sıcaklığı artar. Kimyasal gecikme ise reaksiyon koşullarının oluşmasından tutuşmanın başlamasına kadar geçen süreyi ifade eder. Bu aşamada reaksiyon yavaş başlar ve tutuşma gerçekleşene kadar hızlanır [17, 18]. Ateşleme gecikme süresi son derece önemlidir. Gecikme arttıkça enjeksiyon sonucu silindirlerde daha fazla yakıt birikecektir.

Fazla yakıt ani patlamalara yol açarak yüksek basınç ve sıcaklıklara neden olabilir. Yüksek basınç, gürültü emisyonlarında artışa ve motor yapısında mekanik strese neden olabilir. Yüksek sıcaklıklar NO_x emisyonlarının artmasına ve motor malzemelerinde termal aşınmaya neden olabilir. Tutuşma gecikmesi ve basınç yükselme hızı uygun değerlerde olmalıdır. Aksi takdirde vuruntu eğilimlerinin artmasına neden olabilir [19, 20]. Ateşleme gecikmesi, hava-yakıt oranı, emme havası sıcaklığı ve basıncı, yakıtın fiziksel ve kimyasal özellikleri (buharlaştırma ısısı, setan sayısı, yüzey gerilimi vb.) gibi faktörlerden etkilenir. Bu faktörler ateşleme gecikmesini değiştirebilir ve motor performansı ve emisyonlar bu değişikliklere duyarlıdır [15, 21].

2.2.2. Kontrolsüz yanma

Ön karışimli yanma periyodu olarak da tanımlanır ve şekilde B-C arasında gerçekleşmektedir. Burada silindir hacminin tamamında homojen bir karışım olduğu söylenemez [20]. Tutuşma gecikmesi süresinde karışım tutuşmaya hazır iken yanma odasına enjekte edilmeye devam edilen yakıtın bir kısmı da yanmaya hazır karışımın tutuşmasıyla birlikte tutuşacaktır. Bu safhada aynı anda yakıt partikülleri birincil ve ikincil atomizasyonu gerçekleştirerek hava ile daha iyi karışım oluşturmaktadır. Oksijenin daha küçük yakıt damlacıkları ile temas etmesiyle daha hızlı yanma gerçekleşir. Hızlı yanma nedeniyle silindir içi basınç artışı da ani olmakta ve dizel vuruntusu denilen hadise gerçekleşmektedir. Bu safhada yanma süresinin kısa olmasından yakıtın çoğunun tutuşma gecikmesi süresinde püskürtülmesi tercih edilir [15]. Ön karışimli yanma aşamasının süresi, ateşleme gecikmesi süresi, yakıtın yanma odasında püskürtülmesi, ateşleme gecikmesi aşamasında enjekte edilen yakıt miktarı, ön karışimli yanma aşamasında enjekte edilen yakıt miktarı gibi faktörlere bağlıdır [17, 18].

2.2.3. Kontrollü yanma

Bu aşama aynı zamanda difüzyon kontrollü yanma aşaması olarak da bilinir ve şekilde C ve D aralığında gerçekleşir. Ön karışım aşamasından sonra, enjeksiyon devam ettikçe, ön karışım aşamasında yanmanın ürettiği ısı nedeniyle yakıt buharlaşmaya ve havaya karışmaya devam eder. Bu aşamada silindir içi basınç ve sıcaklığın yüksek olması nedeni ile kimyasal reaksiyonlar son derece hızlıdır ve yanma işlemi karışım oranıyla kontrol edilir [15]. Piston üst ölü noktadan (ÜÖN) alt ölü noktaya (AÖN) doğru hareket ettikçe, yanmış karışımın gaz

basıncı nedeniyle yanma odasının kenarlarında girdaplar oluşur. Belirli koşullar altında bu girdaplar türbülans yaratır ve yakıt ile hava arasında homojen bir karışım elde edilmesine yardımcı olur. Ana yanma aşamasının sonu, yanma odasında maksimum sıcaklığa ulaşıldığı anı işaret eder. Kontrollü yanma safhası yakıt damlacık boyutu, hava hareketi, hava-yakıt oranı ve türbülans derecesi gibi çeşitli faktörlere bağlıdır [17, 18].

2.2.4. Art yanma

Bu yanma ise kontrollü yanma sonrası şekilde görüldüğü üzere D ve E arasındaki periyotta gerçekleşmektedir. Yanma ilerledikçe alevin önündeki basınç ve sıcaklık azalır ve aynı zamanda kimyasal reaksiyonlar da yavaşlar. Ana yanma aşamasında oksijen eksikliğinden dolayı oluşan ara ürünler, yanma sonrası aşamada oksitlendiğinden, proses sonuna doğru yanmamış yakıtın dönüşümü önemli ölçüde azalır. Bu nedenle yanma sonrası aşama, önceden var olan karbon bileşiklerinin oksidasyonu için özellikle önemlidir [22]. Bu aşamadaki yanma süresinin uzun olması silindir kapağı, piston ve gömlek yüzeylerinde aşırı sıcaklık artışı ve segman bölgelerinde kurumlara neden olur [15, 17].

2.3. Dizel Motorlarda Yanma Sonucu Oluşan Emisyonlar

Fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan çeşitli madde ve gazlar hava kirliliğinin oluşmasındaki başlıca faktörlerdir. Bu maddeler ve gazlar arasında NO_x, partikül madde, HC, CO ve CO₂ bulunur. Bunlardan özellikle CO, NO_x ve partikül maddeler hava kirliliği açısından ciddi önem taşımaktadır. Bu gazlar ve parçacıklar çevreye salındığında sağlık sorunlarına, asit yağmurlarına, sera etkisine ve genel olarak hava kalitesinin bozulmasına yol açmaktadır. Bu nedenle fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan emisyonların kontrol altına alınması ve azaltılması, hava kirliliğinin ve çevresel etkilerinin azaltılması açısından kritik öneme sahiptir. Dizel motorlarda fakir yakıt-hava karışımı sonrası yanmada NO_x ve partikül miktarı yüksek oranda, HC ve CO emisyonları ise daha az miktarda ortaya çıkmaktadır.

2.3.1. NO_x emisyonları

Yanma sırasında yüksek sıcaklıkların elde edilmesi, hava içerisinde 79% oranında bulunan atmosferik nitrojenin oksijenle birleşmesi sonucu nitrojen oksitlerin oluşmasına yol açar.

Yanma sonucunda NO, NO₂, N₂O, N₂O₃, N₂O₅ azot oksit bileşikleri oluşur. Bunlardan NO ve NO₂ fazla oranda ortaya çıkar ve NO_x emisyonları şeklinde ifade edilirler.

Yanma sırasında NO'nun yetersiz zaman nedeniyle oksijen ile reaksiyona girememesinden dolayı NO₂ oluşumu daha az oluşmakta ve NO_x emisyonlarında NO miktarı daha fazla olmaktadır [15]. Burada yanma odası sıcaklığı ve hava-yakıt oranını NO_x oluşumunda önemli parametrelerdir. Kimyasal denge reaksiyonlarından hesaplanan miktar, motorda meydana gelen yanma sonucu oluşan miktardan farklıdır. Bu fark, motor koşullarında yanma ürünlerinin kimyasal dengeye ulaşması için yeterli zamanın olmamasından kaynaklanmaktadır. Reaksiyon hızları sıcaklığa bağlı olduğundan en yüksek sıcaklığa ulaşıldığında yanmış gazların sıcaklıkları kimyasal dengeye ulaşmadan düşmeye başlar. Yanan gazların soğutulması sırasında kimyasal denge durumundan da farklılıklar gözlenir. Sıcaklık düştükçe NO_x bileşenlerinin N₂ ve O₂ gazlarına ayrışması beklenmektedir. Ancak düşük sıcaklıklarda reaksiyon hızlarının çok yavaş olması nedeniyle bu ayrışma reaksiyonları yavaşlar. Dolayısıyla yüksek sıcaklıklarda elde edilen NO_x miktarları, düşük sıcaklıklarda donmuş gibi sabit hale gelir. Başlangıçta reaksiyon hızları denge koşullarına ulaşmak için yetersiz olduğundan (reaksiyon hızlarının sınırlı olması nedeniyle) NO_x bileşenlerinin miktarı düşüktür. Ancak belirli bir süre sonra sıcaklıklar düştükçe reaksiyonlar durur ve egzoz gazlarındaki NO_x miktarı, daha önce ulaşılan maksimum sıcaklık düzeyiyle orantılı olarak sabit hale gelir. Bu durum nitrojen oksit oluşumunun reaksiyon hızlarına ve reaksiyonların tamamlanması için gereken süreye bağlı olduğunu göstermektedir [17].

NO_x oluşumu aynı zamanda oksijen içeriğine de bağlıdır. Bu nedenle çok zengin karışımlarda tam yanmadan dolayı NO_x seviyeleri azalır. Hava-yakıt karışımının hava içeriği önemli ölçüde arttığında yanma sıcaklıkları düşecek ve NO_x seviyeleri de düşecektir. Dolayısıyla NO_x emisyonlarını etkileyen bir diğer parametre de hava-yakıt oranıdır. Enjekte edilen yakıt miktarına bağlı olarak hava-yakıt oranının sıcaklık ve basıncı etkilediği bir değer aralığı vardır. Hava-yakıt oranının bu aralıkta kontrol edilmesi, NO_x emisyonlarının yönetilmesinde önemli bir faktördür [17, 23].

2.3.2. HC emisyonu

Doymuş ve doymamış tüm hidrokarbonların yanı sıra aromatik bileşiklerin yakıt olarak kullanılması HC (hidrokarbon) emisyonlarının oluşmasına neden olur. Egzoz gazlarında HC

maddelerinin varlığı, CO (karbon monoksit) ve NO_x (nitrojen oksitler) emisyonlarının aksine yüksek sıcaklıklardan kaynaklanmaz. HC emisyonlarının oluşmasına katkıda bulunan birincil faktör, sıcaklıklar düşük olduğunda veya oksijen yetersiz olduğunda meydana gelen eksik yanmadır. Çok fakir veya çok zengin yerel karışım oranına sahip olmak, oksidasyon reaksiyonlarını yavaşlatabilir ve ısı kaybından dolayı alevin sönmesine neden olabilir. Yanma odasının farklı bölgelerinde karışımın yüzey/hacim oranının yüksek olması, bu bölgelerdeki karışımın tutuşmasını engelleyen önemli ısı kayıplarına neden olabilir. Yanma odasının soğuk duvarlarına doğru olan ısı kayıpları, bu bölgeye ulaşan alevin anında sönmesine neden olabilir. Yüksek oktan sayısına sahip yakıt kontrolsüz yanma bölgesinde tutuşma gecikmesini arttırdığından HC oluşumlarını daha da artırmaktadır. Fakir karışımlarda da yanma bölgesel şekilde meydana gelerek alevin oluşmadan ve yayılmadan sona ermekte, bu durumda HC emisyonlarının yüksek olmasına neden olmaktadır [15]. Hava-yakıt eşdeğerlik oranı yüksek olduğunda yanma odası sıcaklığı düşerek tam yanmayı engeller, bu da HC emisyonlarının artmasına neden olur. Zengin karışım durumunda tam yanma için yeterli oksijen mevcut olmadığından hidrokarbon emisyonlarının artmasına neden olur [17].

2.3.3. CO emisyonu

CO emisyonları genellikle yanma odasında oksijen eksikliği olduğunda, yakıt ve hava homojen olarak karışmadığında veya yanma odasının belirli bölgelerinde lokal oksijen eksikliği olduğunda ortaya çıkar. Bu durum, yakıtın tamamının yanmamasından dolayı, yanma reaksiyon veriminin de azalmasına neden olmaktadır [20].

CO oluşumu öncelikle hava-yakıt eşdeğerlik oranına bağlıdır. Bu nedenle yanma koşullarının düzeltilmesi ve yeterli oksijenin sağlanması CO emisyonlarının azaltılması açısından önemlidir. Dizel motorlar genellikle fakir karışım oranlarıyla çalışır, bu da yanma odasındaki genel karışımın fakir olduğu anlamına gelir. Bu durum, CO emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunur çünkü bu koşullar altında yeterli oksijen vardır ve CO'nun büyük bir kısmının yanmasına izin verir. Bu nedenle, dizel motorlardan kaynaklanan CO emisyonları genellikle düşüktür [17, 23]. Ancak, yanma için hava miktarı yeterli olsa da kimyasal reaksiyonlardan ve yakıtın cinsinden kaynaklı iyi olmayan püskürtme nedeniyle iyi düzeyde atomizasyonun olmaması, az da olsa CO oluşumuna sebep olmaktadır [20].

2.3.4. CO₂ emisyonu

Hidrokarbon yakıtların yanması su ve CO₂ gazının oluşmasına neden olur. Atmosferde biriken CO₂ gazları güneş ışığının uzaya geri yansımalarını engeller. Atmosferdeki CO₂ tarafından emilen yoğun ultraviyole radyasyon, dünya yüzeyinin ısınmasına neden olur. Bu aşırı ısınma olayına sera etkisi adı veriliyor [22]. Sera etkisi nedeniyle CO₂ emisyonları, küresel ısınmanın ve iklim değişikliğinin temel nedenlerinden olup endüstriyel sanayinin dönüşümünün ilk zamanlarından günümüze dek yaklaşık %40 oranında yükselme göstermiştir. Fosil yakıt kullanan araç sayısındaki artışın CO₂ emisyonlarının artışında payı büyüktür. CO₂ emisyonu, güneşten gelen ısıyı emerek, dünya sıcaklık ortalamasını yükselmesine neden olmakta ve bu durumun ilerleyen zamanlarda etkisinin daha fazla olacağı tahmin edilmektedir [24].

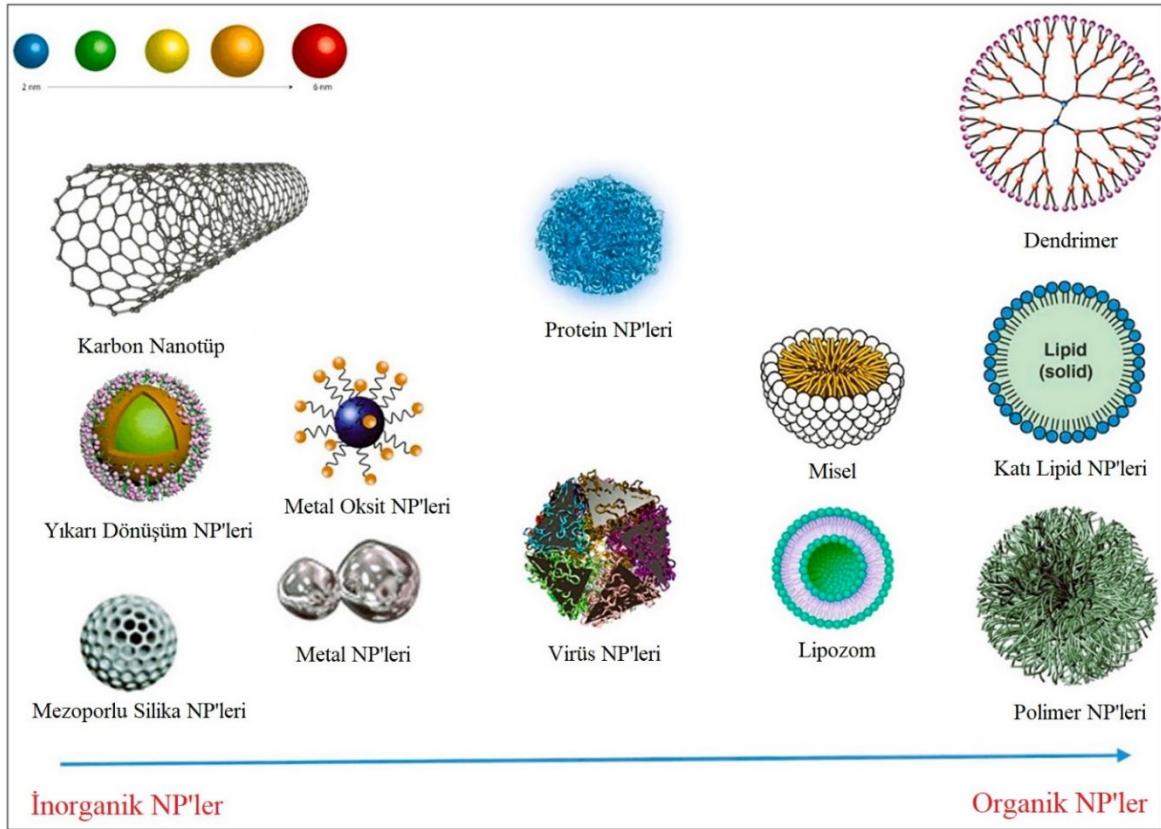
CO₂ emisyonlarının azaltılması daha çok karbon içermeyen alternatif yakıtların kullanımı ile mümkün olacaktır. Aksi takdirde küresel ısınmanın etkileri artarak geri dönüşü olmayan bir probleme neden olacaktır. Performans açısından bakıldığında, egzoz gazlarındaki yüksek CO₂ içeriği verimli yanmanın göstergesidir. Ayrıca, CO₂ emisyonlarının artışı CO emisyonlarının azalması anlamına gelmektedir [25]. Ancak çevresel etkileri dikkate alındığında karbonsuz alternatif yakıtlara geçişin gerekliliği artıyor.

2.3.5. Partikül madde emisyonu

Dizel motorlarda oluşan kurum zaman koşulları ve özellikle yeterli oksijenin olmadığı durumlarda oluşur. Kurum, bu koşullar altında oluşan katı karbon parçacıklarından oluşur. Oluşan kurum miktarı, motorun yük durumuna bağlı olarak değişen hava-yakıt oranına göre değişir. Kurum oluşumu dizel yanma sürecinin bir parçasıdır. Bu nedenle başlangıçta oluşan karbonun önemli bir kısmı yeniden yanacaktır. Ancak gücü artırmak için yanma odasına büyük miktarda yakıt enjekte edildiğinde yetersiz oksijen mevcut olacak ve bu da egzoz gazlarında bir miktar kurum oluşmasına neden olacaktır. Kurum emisyonu oluşumu, silindir içindeki oksijen konsantrasyonunun yüksek olduğu yüksek sıcaklık bölgelerinde yanmamış yakıt buharlarının oksidasyonu olarak tanımlanabilir. Kurum emisyonları özellikle yakıt spreyinin iç çekirdek bölgesinin zengin yakıt içeriğinde gözlenmektedir. Kurum oluşumu silindir yüzeylerinde aşınma ve piston segmanlarının faturalarının tıkanmasına yol açarak motora zarar verme potansiyeline sahiptir [15,17,22].

2.4. Dizel Motorlarda Kullanılan Nanopartiküller

Nanomalzemeler bir mikrometreden daha küçük parçacıklardır. İçerdiği malzeme yapısına göre inorganik ve organik nanopartiküller olarak sınıflandırılırlar. Şekil 2.3, organik ve inorganik nanopartiküllerin sınıflandırmasını gösteren net bir örnek sunmaktadır [26]. Nanopartiküllerin kullanımı, ısı transferini arttırmada, yanma verimliliğini optimize etmede ve çeşitli motor bileşenlerinde sürtünme ve aşınmayı azaltmada büyük önem taşımaktadır [27]. İçten yanmalı motorlar için tasarlanan nanoakışkanlardaki potansiyel uygulamaları açısından çeşitli nanopartikül türleri incelenmiştir.



Şekil 2.3. Organik ve inorganik nanopartiküllerin sınıflandırması [26]

2.4.1. Metal oksitler

Metal oksit nanopartikülleri, içten yanmalı motorlarda en sık kullanılan türlerdendir [28]. CeO_2 , Al_2O_3 , MgO , CuO , TiO_2 , ZnO , ZrO_2 ve diğerleri gibi nano ölçekli metal oksitler, tam yanmayı teşvik etmek amacıyla yakıtta katkı maddeleri şeklinde eklenir [29, 30]. Metal oksitten yapılmış nanopartiküller, termal kararlılıklarından dolayı tercih edilmektedir. İçten

yanmalı motorlarda nanopartiküller stabiliteyi korumalı ve performansı olumlu anlamda etkilemeli aynı zamanda herhangi bir kimyasal veya fiziksel değişikliğe neden olmamalıdır [31]. Metal oksitler stabildir ve motorun çalışması için uygundur. Metal oksit nanopartiküller yüksek termal iletkenliğe sahip olduğundan nanoakışkanların ısı taşınımını arttırmada önemli görev üstlenir ve termal transfer yoluyla nanoakışkanlar motor performansının artmasını sağlayabilir [32]. Nanopartikül içeren yakıtlar, motor ısısını emme, iletme ve dağıtma gibi işlemleri geliştirerek soğutma verimliliğini artırır ve motorun aşırı ısınma riskini düşürür [33]. Metal oksit nanopartiküllerinin katalitik etkisi avantaj sağlayan bir diğer özelliktir. Nanopartiküller motor silindirindeki yanma sürecini hızlandırabilir [34]. Bir motorun performansını ve emisyonlarını belirleyen en kritik unsurlardan biri, motorun yakıtı yakma verimliliğidir. Metal oksit nanopartikülleri, karmaşık hidrokarbonların ayrışmasını, CO ve HC'nin oksidasyonunu hızlandırarak, daha az kirliliğin oluşmasına katkıda bulunur [35].

2.4.2. Metal nanopartiküller

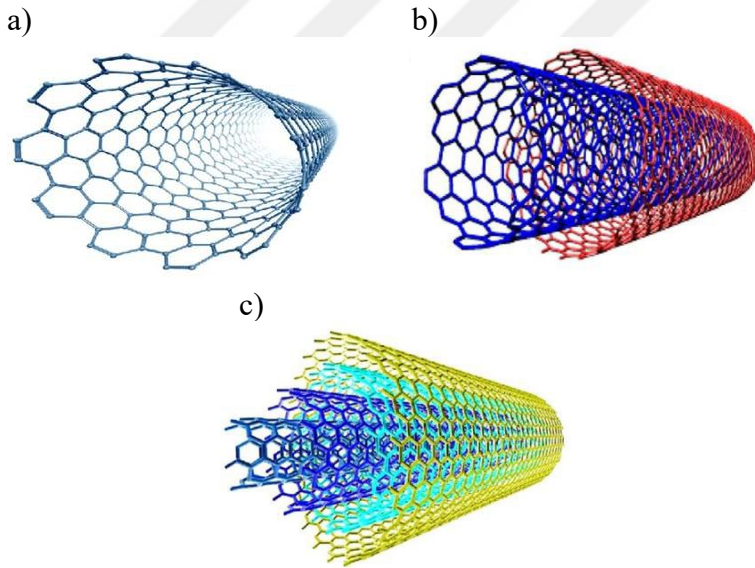
Altın (Au), gümüş (Ag) ve bakır (Cu) gibi soy metal nanoparçacıkları, içten yanmalı motorlarda kullanılan ve nanoakışkanların geliştirilmesi için umut verici gelişmeler sağlayan bir diğer nanopartiküllerdir [36]. Nanopartiküller, motor içindeki yanma süreci üzerinde olumlu bir etki yapma potansiyeline sahip olan olağanüstü termal iletkenlikleri ve benzersiz yüzey özellikleri nedeniyle önemli ilgi görmektedir [37, 38]. Nanopartiküller yanma sürecinde katalizör görevi gören farklı yüzey özellikleri sergilerler [39]. Soy metal nanopartikülleri ile yanma verimliliğinin artırılması, öncelikle yakıt oksidasyonunun iyileştirilmesi yoluyla gerçekleşir. Yakıt moleküllerinin oksidasyonu, yakıt ve hava karışımının yanma işlemi sırasında soy metal nanopartikülleri tarafından hızlandırılır [40]. Bu olay, yanma verimliliğinin artmasına yol açar; bu sayede yakıtın daha büyük bir kısmı, reaksiyona girmemiş hidrokarbonlar olarak dağılmak yerine, motorun daha fazla güç üretmesini ve gücün işe dönüştürülmesini sağlar [41].

Saraee ve diğerleri bir dizel motorda yakıt içine gümüş nanopartiküller eklemişler ve bu gümüş nanopartiküller yakıtın ısı iletimini arttırmış ve tutuşma gecikmesini azaltmıştır [42]. Aynı zamanda yanma özellikleri iyileştirilmiş ve emisyonlar önemli ölçüde azaltılmıştır. Hava kirliliğinin ve iklim değişikliğinin artan aciliyeti göz önüne alındığında, soy metal nanopartikülleri içeren nanoakışkanların kullanımı, içten yanmalı motorlarının çevresel

etkisini azaltmak ve daha çevre dostu ulaşım alternatiflerinin benimsenmesini teşvik etmek için uygulanabilir bir yaklaşım sunmaktadır [43]. Bununla birlikte, soy metal nanopartiküllerinin içten yanmalı motorlar için nanoakışkanlara dahil edilmesi birçok zorluğu beraberinde getirmektedir. En önemli hususlardan biri, bu nanopartiküllerin akışkan ortam içerisinde homojen bir dağılımın elde edilmesidir. Nanopartiküllerin toplanması veya çökmesi, bunların katalitik aktivitelerini ve genel performansını etkileme potansiyeline sahiptir [44].

2.4.3. Karbon nanotüpler (CNT)

Karbon nanotüpler (CNT), boru şeklinde bir konfigürasyonda düzenlenmiş karbon atomlarından oluşan, kendine özgü silindirik yapıları ile karakterize edilen dikkat çekici bir nanomalzeme kategorisidir [45]. CNT'ler benzersiz şekil ve kimyasal özelliklere sahip tek boyutlu karbon malzemelerdir [46]. Şekil 2.4'te çeşitli nanotüplerin yapısal görünümü verilmiştir [20].



Şekil 2.4. Nanotüplerin yapısal görünümü SWCNT (a), DWCNT (b), MWCNT (c) [20]

Silindirik karbon yapıları olan tek duvarlı karbon nanotüpler (SWCNT) ve çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT), özelliklerini ve kullanımlarını etkileyen farklı konfigürasyonlara sahiptir. Yakıt katkı maddeleri olarak CNT'lerin çeşitli faydaları vardır [47]. MWCNT nanotüpleri yüksek termal yapıya sahip olmaları, içinde buldukları sıvının da termal yapısını değiştirmektedir. Yüksek yüzey alanı ve yüksek difüzyonlu termal

iletkenliği sayesinde içinde buldukları sıvının termal iletkenliğini de artırmaktadır. Bu durum, ikincil atomizasyonu oluşturarak buharlaşmayı artırarak, tutuşma gecikmesini kısaltarak yanmayı daha da iyileştirmektedir [20]. Bir başka özellik ise bu malzemeler ısıyı bakır ve elmadan daha iyi aktarır. CNT'lerin yakıtın moleküller arası boşluklarını doldurarak kaymayı kolaylaştırdığı ve viskoziteyi azalttığı iddia edilmiştir. Bu viskozite azalması ise yakıtın atomizasyonunu iyileştirmektedir. Ayrıca serbest radikalleri yakalamak, CNT'leri vuruntu önleyici bir katkı maddesi haline getirmektedir. CNT'ler çok iyi termal iletkenliğe ve mekanik dayanıklılığa sahiptir. Bu, ısı transferinde olası iyileştirmeleri gerçekleştirir ve içten yanmalı motorlarda gürültü seviyelerini düşürür [48,49].

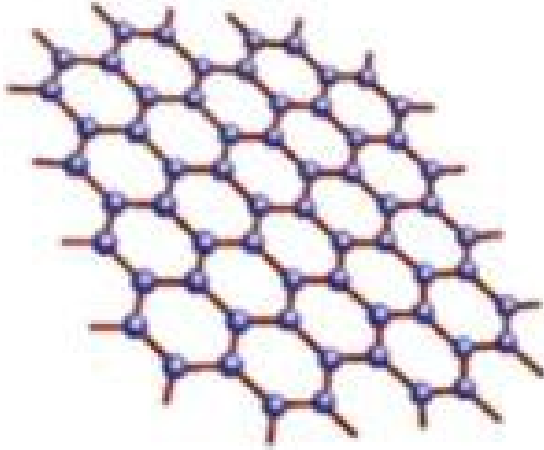
CNT'ler çok yüksek gerilme mukavemetine sahiptir, bu da kırılmadan veya deforme olmadan çok fazla mekanik strese dayanabilecekleri anlamına gelir [50]. Bu özellik motor sürtünmesini ve aşınmasını azaltır. Zor çalışma koşullarında bile, CNT'lerin sıcaklıklarını yanı sıra yüksek düzeyde mekanik strese dayanma yeteneği sayesinde tutarlı bir yağlama performansı sağlayabilmektedir [51].

Karbon nanotüpler, ısı iletkenliğini ve mekanik özelliklerini iyileştirerek içten yanmalı motorlarının verimliliğini ve performansını artırabilir. Bu da daha verimli ve sürdürülebilir ulaşım çözümlerinin geliştirilmesine yol açabilir. Bununla birlikte, karbon nanotüplerin baz akışkan içindeki kararlı dağılımı ve bunların üretimini artırma yeteneği ile ilgili hâlâ çözülmemiş sorunlar vardır. Karbon nanotüplerin nanoakışkan içinde homojen bir şekilde dağılmasının sağlanması, onların avantajlı özelliklerinden etkin bir şekilde yararlanmak için son derece önemlidir [52].

2.4.5. Grafen nano hücreleri (GNP)

Grafen nano hücreleri (GNP), çağdaş zamanlarda önemli ilgi toplayan büyüleyici bir nanomalzeme kategorisi olarak ortaya çıkmıştır. Bu düzenlemedeki karbon atomları altıgen bir kafes oluşturarak iki boyutlu tabakaların oluşmasına neden olur [53]. Grafen, İki boyutlu (2D) bir bal peteği örgüsünde sıkı bir şekilde paketlenmiş, sp^2 'ye bağlı karbon atomlarından oluşan tek bir atomik katmandan oluşmaktadır. Yeni bir nano materyal olarak grafen benzersiz elektronik, optik, termal ve mekanik özelliklere sahiptir. Yetter ve diğerleri, metal nano partiküllerin yanması hakkındaki raporları eleştirel bir şekilde gözden geçirmiş ve nano boyutlu metalik tozların yüksek spesifik yüzey alanına ve enerji depolama potansiyeline

sahip olduğunu ve bunun da yüksek reaktiviteye yol açtığını ortaya çıkarmıştır [54]. Tek bir atomik grafen tabakası, karbonun en ince sp^2 allotropudur. Bu nedenle bilim adamlarının ve teknoloji uzmanlarının ilgisini çeken çeşitli benzersiz elektriksel ve optik özelliklere sahiptir [16, 55]. Şekil 2.5'te grafene ait yapısal görünüm verilmiştir [20].



Şekil 2.5. Grafenin yapısal görünümü [20]

Grafen nanopartikülleri mekanik dayanımlarından dolayı içten yanmalı motorlarda tercih edilen önemli yakıt katkılarındandır. Motor bileşenlerinin hareket etmesi ve birbirleriyle temas etmesi sonucu oluşan sürtünme ve aşınma nedeniyle zamanla bozular ve enerji kaybına sebep olur. Ancak yakıtta grafen nanopartiküllerinin eklenmesi bu yan etkilerin azaltılmasına yardımcı olabilir.

Yakıtta eklenmiş grafen nanopartikülleri, motorun hareketli parçalarını izole eden ve koruyan koruyucu bir sınır tabakası oluşturur. Bir sınır tabakasının varlığı, bileşenler arasındaki doğrudan teması ve sürtünmeyi etkili bir şekilde azaltır, bu da daha düşük aşınma oranlarına ve sürtünme nedeniyle daha az enerji israfına neden olur [26, 56]. Bu nedenle, grafen nanopartiküllerinin kullanımı, mekanik verimliliği artırma, motorların operasyonel ömrünü uzatma ve bileşenlerin sık bakım ve değiştirme ihtiyacını azaltma potansiyeline sahiptir.

Sonuç olarak, grafen nano hücrelerinin entegrasyonu, artırılmış termal iletkenlikleri ve mekanik sağlamlıkları nedeniyle motor tasarımında ve çalışmasında ek avantajlar sunabilir [57]. Geliştirilmiş ısı transferi ve azaltılmış sürtünme, motor tasarımcılarına motorun boyutlarını, kütesini ve genel verimliliğini optimize etmek için daha fazla hareket alanı sağlayabilir [58].

2.4.6. Hibrit nanopartiküller

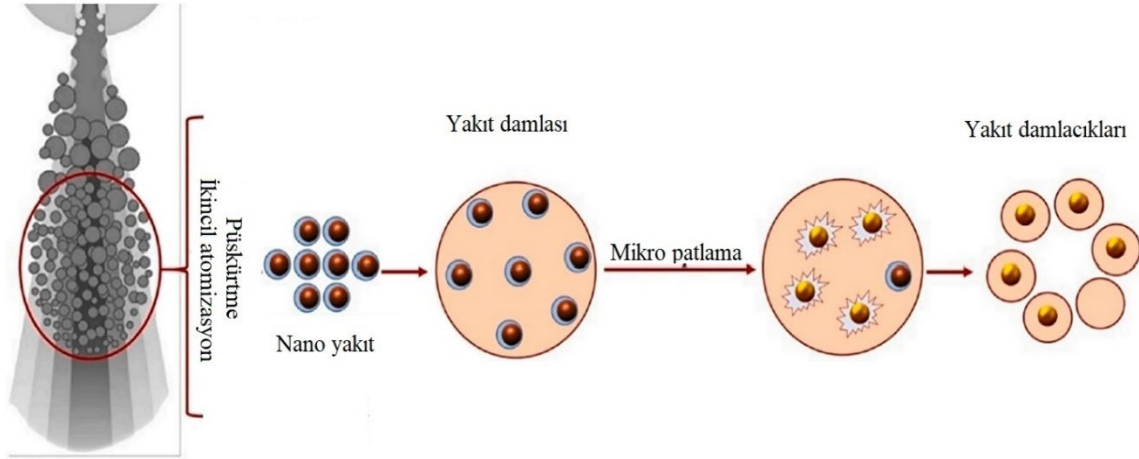
Hibrit nanopartiküller, her bir bileşenin avantajlı niteliklerini en üst düzeye çıkararak nano ölçekli bir mimari oluşturmak amacıyla, tipik olarak benzersiz özelliklere sahip olan çeşitli malzemelerin birleştirilmesi yoluyla sentezlenir [59]. Hibrit nanopartiküllerin örnek bir gösterimi, metal oksitten oluşan bir çekirdeğin metalden yapılmış bir kabuk ile birleşmesini içerir. Çekirdek-kabuk mimarisi, her iki malzemenin doğasında bulunan özelliklerin sinerjik olarak kullanılmasını kolaylaştırmaktadır. Metaller, özellikle de altın (Au), gümüş (Ag) ve platin (Pt) gibi soy metaller, olağanüstü katalitik özellikleriyle geniş çapta tanınmaktadır. Bu metallerle yapılan kaplama, yanma işlemi sırasında bir katalizör görevi görür ve yakıtın oksidasyonu ile ilişkili kimyasal reaksiyonları etkili bir şekilde kolaylaştırır ve hızlandırır [60]. Motorun yanma odasındaki yanma süreci, katalitik metal kabuk tarafından güçlendirilir, bu da yakıtın daha kapsamlı yanmasını teşvik ederek yanma verimliliğinin artmasına neden olur. Gelişmiş bir yanma süreci, yanmamış hidrokarbonların ve diğer zararlı kirleticilerin üretiminde bir azalmaya yol açar, böylece emisyonların azalmasına ve daha temiz egzoz gazlarının oluşmasına neden olur [61]. Ek olarak, metal kabuğun varlığı, nanoakışkan içindeki hibrit nanopartikülün genel stabilitesini ve dayanıklılığını arttırmaya yardımcı olur [62]. Metal bir kabuğun varlığı, metal oksit çekirdeğini olası topaklanma veya bozulmaya karşı koruma sağlar, böylece uzun süreli motor çalışması durumunda nanoakışkanın özelliklerinin korunması sağlanır. Her iki malzemenin de sahip olduğu doğal avantajların stratejik kullanımı yoluyla, hibrit nanopartiküller, aynı anda emisyonları azaltırken motor verimliliğini artırmaya yönelik avantajlar sağlar [63].

2.5. Nanopartiküllerin Motor Verimliliğine ve Emisyonlara Etkisi

Nanoakışkanların gösterdiği en önemli özelliklerden biri, geleneksel akışkanlarla karşılaştırıldığında ısı transferini ciddi ölçüde artırmalarıdır. Bu özelliğin temel nedeni, oldukça yüksek bir yüzey alanı/hacim oranına sahip nanopartiküllerden kaynaklanmaktadır.

Yakıt içerisinde bulunan nanopartiküllerin yüksek termal iletkenlikleri sayesinde, silindir içerisine püskürtülen yakıt damlacıklarında mikro patlamalar oluşturularak ikincil bir atomizasyona neden olabilir [33, 34]. Şekil 2.6'da nano yakıt içindeki nanopartiküllerin ikincil atomizasyonun görseli mevcuttur [26]. Burada mikro patlamaya heterojen çekirdeklenme neden olur ve çekirdeklenme çoğunlukla damlacık yüzeyinde meydana gelir.

Nanopartiküller alttaki sıvıyla etkileşime girer, böylece termal iletkenliğini ve konvektif ısı transfer özelliklerini değiştirir [64]. Yakıt damlacıkları mikro patlama nedeniyle daha da mikroskobik su damlacıklarına ayrılarak hızlı buharlaşır ve daha iyi hava yakıt karışımı sağlayarak yanmayı hızlandırmaktadır [20].



Şekil 2.6. Nano akışkan içindeki nanopartiküllerin mikro patlama etkisi [20]

Nanopartiküller aynı zamanda motor soğutma sistemlerinde kullanılmakta olup nanoakışkanların ısıyı emmesine ve dağıtmasına izin vererek ideal motor çalışma sıcaklıklarının korunmasını sağlamaktadır [65]. Çünkü motorların yüksek sıcaklıklarda çalışması verimliliğin azalmasına ve aşınmanın artmasına neden olur, bu da daha yüksek emisyonlara ve motor ömrünün daha kısa olmasına neden olur [66].

Nanoparçacıkların morfolojisi ve yapısal özellikleri, yağlama uygulama alanlarında dikkat çeken durumlardan biridir. Küresel yapıda olan nanoparçacıklar yüksek yüzey enerjisine sahiptir ve bu durum yüzey enerjisinin homojen olarak dağıtılabildiğini sağlamaktadır. Bu durum yüzeyler arasında bir bilye şeklinde yuvarlanarak sürtünmeyi önleyerek iyi bir yağlama sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, küresel yapıdaki nanoparçacıkların yüksek basınca gösterdiği direnç ve yük taşıma kapasitelerinin fazla olması nedeniyle endüstride tribolojik uygulamalarda tercih sebebi olmaktadır. Katmanlı yapıda olan nanoparçacıklar, yük altında bulunan iki yüzey arasında yağ film tabakasının oluşumuna destek olarak sürtünmenin azalmasını sağlamaktadır [67]. İçten yanmalı motorlarda mekanik sürtünme enerjisi dağıtır. Bu durumu azaltmak ve motor bileşenleri arasında güvenli bir film tabakası oluşturmak için yağlayıcı olarak nanopartiküller kullanılmaktadır. Sürtünmenin azaltılması mekanik verimliliği ve motor stabilitesini artırır. Ayrıca daha az temas olduğu için motor parçalarında

daha az aşınma ve yıpranma olur [68]. Böylece, motor ömrünün uzamasına ve bakım maliyetlerinin azalmasına katkı sağlar. Nanoakışkanların yanma verimliliğini artırma kapasitesi, nanopartiküllerin motorlara dahil edilmesinin başka bir tercih sebebidir. Motorun içindeki yanma işlemi sırasında yakıt ile hava arasındaki reaksiyonun hızlı ve kontrollü bir şekilde gerçekleşmesi gerekmektedir [69]. Yakıttaki veya emme havasındaki nanopartiküller, nanoakışkanın katalitik yeteneklerini artırarak yakıt-hava karışımının yanmasını iyileştirebilir. Yanma süreçlerinin optimize edilmesi yakıt ekonomisini artırır, yanmamış hidrokarbonları ve diğer tehlikeli emisyonları azaltır [70]. Bir başka deyişle nanopartiküller, çeşitli kimyasal reaksiyonlara yardımcı olan ve zararlı emisyonların azaltılmasını sağlayan katalizörler olarak görev yapmaktadır [71].

Nanopartiküllerin ölçüleri, çeşidi ve konsantrasyonları yanma odasındaki atomizasyonun kalitesini etkileyerek yakıtın buharlaşma özelliklerine olumlu etki etmektedir [20, 72]. Agbulut, nanoparçacık boyutunun yakıt enjeksiyonlu içten yanmalı motorun performansı üzerindeki etkisini araştırmaktadır [73]. Kanola yağı metil ester-dizel karışımlarına üç farklı boyuttaki titanyum oksit nanopartikülleri eklenerek viskozite, ısı değer ve setan sayısının daha düşük olması sağlanmıştır. Nanopartiküllerin kullanımı birim ve spesifik ekserji maliyetlerini artırırken enerji ve ekserji verimliliğini de arttırmıştır. Çalışmaya göre nanopartikül katkılı yakıtlar, daha iyi ekserji, enerji, sürdürülebilirlik ve termo ekonomik sonuçlar sağlıyor.

Nanopartiküllerin yakıt içerisinde homojen dağılımı, atomizasyon özelliklerini etkileyen önemli bir değişkendir. Homojen dağılımı sağlamak için fiziksel ve kimyasal birkaç uygulama yapılmaktadır. Bu uygulamalara ultrasonik veya manyetik karıştırma teknikleri fiziksel örnek olarak gösterilebilir. Ultrasonik uygulama, bir banyo veya daldırma çubuğu kullanarak yapılmaktadır. Ultrasonik karıştırma belli bir süre ve frekans değerlerinde yapılmaktadır [34]. Kimyasal uygulama ise yakıtın sörfektant (surfactant) kullanarak asitlik ve baziklik (pH) oranının değiştirilmesi ile nanopartiküllerin homojen dağılımı sağlanmaktadır. Oleik asit ve sodyum dodesil sülfat (SDS), bu sörfektantlara örnek olarak gösterilebilir. Buna ek olarak sörfektant uygulamalarının atomizasyonu olumsuz olarak etkilemediği bildirilmiştir [20, 34].

Nanoakışkanlar, karbon monoksit ve hidrokarbonları potansiyel olarak oksitleyerek içten yanmalı motorlarının çevresel kirliliğe olan etkisini azaltmak için umut verici gelişmeler

sunmaktadır [74]. Nanoakışkanların motor tasarımına entegre edilmesi, motor performansını artırırken emisyonları azaltma konusunda önemli gelişmeler göstermektedir. Ek olarak nanoakışkanlar, soğutma sistemlerinin boyutunun küçültülmesi için de fırsatlar sunmaktadır [75]. Üstün ısı transfer özellikleri, motordan verimli ısı dağılımı sağlayarak daha kompakt ve hafif soğutma sistemlerinin geliştirilmesini kolaylaştırır. Küçültme, yalnızca motor verimliliğinin artmasına katkıda bulunmakla kalmaz, aynı zamanda üreticilere motor tasarımında daha fazla esneklik sunarak araç aerodinamiklerinin ve genel yakıt verimliliğinin iyileşmesine yol açar [33].

Bu sayısız potansiyel faydaya rağmen, otomotiv sektöründe nanoakışkanların yaygın olarak benimsenmesi için çeşitli engellerin çözülmesi gerekiyor. Temel zorluklardan biri, nanopartiküllerin baz sıvısı içinde uzun vadeli stabilitesi ve dağılımında yatmaktadır [76]. Nanoparçacık toplanması zamanla nanoakışkanların genel etkinliğini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, kararlı ve kalıcı nanoakışkan formülasyonları üzerine kapsamlı araştırmalar, motor çalışması sırasında avantajlı özelliklerini korumak için çok önemlidir [77]. Ayrıca nanoakışkan üretiminin maliyet etkinliği ve ölçeklenebilirliği dikkatle değerlendirilmelidir [78]. Yüksek maliyetleri nedeniyle nanoakışkanların seri üretilen araçlara entegre edilmesi için endüstriyel ölçekte üretim yapılması gerekmektedir.

2.6. Literatür Taraması

Yakıtle birlikte kullanılan titanyum oksit (TiO_2) nanopartiküllerinin dizel motor performansı ve emisyon özelliklerine etkisi Silva ve diğerleri tarafından araştırılmıştır. Saf yakıtle karşılaştırıldığında TiO_2 nanopartikülleri içeren yakıt örneğinin kalorifik değeri %0,59 daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca, dizel yakıtta TiO_2 nanopartiküllerinin eklenmesinin maksimum yükte fren ısı verimini (BTE) %0,9 oranında arttırdığı gözlemlenmiştir. TiO_2 nanopartikül ilavesi, tam yükte fren özgül yakıt tüketiminin (BSFC) %21,28'lik bir düşüşüne neden olmuştur. Ek olarak, tam yükte TiO_2 nanopartiküllerinin kullanılması nitrojen oksit (NO_x) emisyonlarında %32'lik bir artışa neden olmuştur. Bununla birlikte, TiO_2 nanopartiküllerinin kullanılması, tam yükte karbon monoksit (CO) emisyonlarında %25, yanmamış hidrokarbon emisyonlarında ise %18,36 azalmayla sonuçlanmıştır [8].

El Seesy ve diğerleri dizel-biyodizel-N-bütanol karışımlarında nanopartikül kullanımının dizel motor performansına etkilerini araştırmışlardır. Hacimce %50 Jojoba biyodizel, %40

dizel ve %10 n-butanol (J50D10Bu) karışımına TiO₂ nanopartikülleri eklendiğinde Saf J50D10Bu dizel karımışına kıyasla fren ısı verim 17% artmış ve fren özgül yakıt tüketimi %15 azalmıştır. J50D10Bu ile karşılaştırıldığında TiO₂ ilavesi, CO ve yanmamış hidrokarbon (UHC) emisyonlarında sırasıyla % 30 ve %50 oranında önemli bir azalmayla sonuçlanmıştır. Ancak TiO₂ nanopartikülleri kullanıldığında silindir basıncı arttığından NO_x emisyonunda artış olmuştur [79].

Örs ve diğerleri, dizel-biyodizel-n-butanol ve TiO₂ nanopartikülleri ile hazırlanan yakıt örneklerinin farklı oranları ile motor üzerinde deneyler yapmıştır [1]. Hazırlanan tüm yakıtlar için maksimum fren torku ve fren gücü değerleri sırasıyla yaklaşık 1400 dev/dk ve 2800 dev/dk'da kaydedilmiştir. %20 biyodizel ve % 80 euro dizel (B20) karışımına TiO₂ nanopartikülü eklendiğinde motor fren gücü ve torku B20 karışımına göre yaklaşık %10,20 oranında artış göstermiştir. Ayrıca, %20 biyodizel, %70 euro dizel, %10 bütanol (hacimsel) ve %0,01 TiO₂ (kütlesel) (B20But10+ TiO₂) karışımının motor freni gücü ve torku, B20But10 yakıtına kıyasla yaklaşık %9,74 daha fazladır. Yakıt numunesine TiO₂ eklenmesinin bir sonucu olarak motor performansının arttığı sonucuna vardılar. Ayrıca TiO₂ nanopartiküllerinin kullanımı, TiO₂ katkı maddesi içermeyen yakıt karışımlarına göre daha iyi yanma prosesi sonucunda karbon monoksit, hidrokarbon ve duman opaklığı emisyon düzeylerini azaltırken karbondioksit (CO₂) ve NO emisyonlarını artırmıştır.

Dizel motorun yanma ve emisyon performansını iyileştirmek amacıyla Simhadri ve diğerleri, mahua biyodizelinin TiO₂ nanopartikülleri ile birleştirilmiş etkisi üzerine çeşitli enjeksiyon basınçlarında deneysel bir çalışma yürüttüler. TiO₂ nanopartikülleri daha yüksek bir enjeksiyon basıncında eklenerek motor performans özellikleri geliştirildi. 240 bar yakıt enjeksiyon basıncında, %20 biyodizel, %80 dizel ve 25 ppm TiO₂ (B20T25) karışımı ile fren ısı verimi B20 ve dizele göre sırasıyla %3,7 ve %1,7 artmıştır [80].

Bello ve diğerleri, dizel yakıtta TiO₂ nanopartiküllerinin eklenmesinin fren özgül yakıt tüketimini azalttığını, eşit miktarda yakıt kullanılması durumunda motor performansının daha da yüksek olacağını belirtmişlerdir [81]. Sunil ve diğerleri, farklı biyodizel yakıt örneklerine TiO₂ ilavesinin etkisini incelemiş ve yakıt örneğine TiO₂ eklenmesiyle ısı verimin olumsuz etkilendiğini tespit etmişlerdir [82]. Kumar ve diğerleri, TiO₂ nanopartiküllerini kullanarak tek silindirli, sıkıştırmayla ateşlemeli içten yanmalı motorlarda dizel yakıt emisyonlarının davranışını incelediler. CO, hidrokarbon (HC) ve NO_x

emisyonlarının hem 50 ppm hem de 100 ppm TiO₂ nanopartikül miktarlarında saf dizelle göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir [11].

Yukarıdaki literatür incelendiğinde deneysel çalışmaların genel olarak biyodizel karışımlarına ikincil katkı olarak nanopartikül ilavesi şeklinde yapıldığı görülmüştür. Birkaç çalışmada saf dizelle birlikte tek doz veya iki doz nanopartikül veya su emülsiyonu işlemi uygulanarak yapılmıştır. Bu çalışma, farklı sıkıştırma oranı, hava/yakıt oranına sahip bir traktör motorunda benzer çalışmalarda bulunmayan saf dizelle birlikte 3 farklı konsantrasyonda (25 ppm, 50 ppm, 75 ppm) TiO₂ nanopartikül ilavesi ve farklı yüklerde motor performansı ve emisyonlar üzerindeki etkisini göstermeyi amaçlamaktadır.





3. MATERYAL VE YÖNTEM

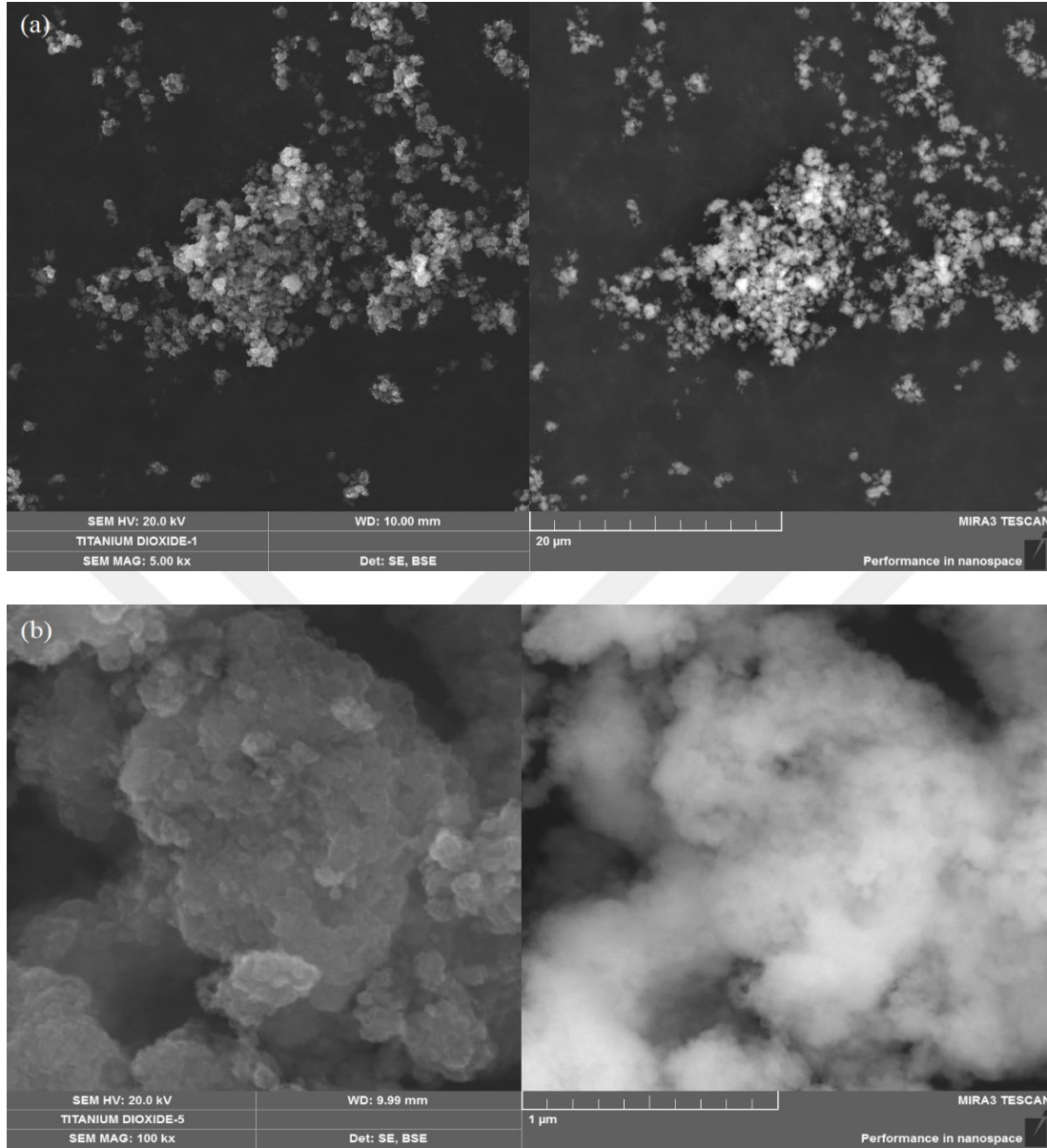
3.1. Nanopartikül Yakıt Karışımının Hazırlanması

Araştırmada kullanılan %99,95 saflıkta ve ortalama parçacık büyüklüğü 5-10 nm olan TiO₂ nanopartikülleri Nanografi firmasından (Ürün grupları: NG Materials, NG Chemicals) temin edilmiş olup, nanopartiküllerin özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Taramalı elektron kullanımı mikroskopisi (SEM) ile TiO₂ nanopartiküllerinin yüzeyi ve şekli araştırılmıştır. TiO₂ nanopartiküllerinin SEM sonuçları (20 µm ve 1 µm) sırasıyla Resim 3.1.(a) ve 3.1.(b)’de verilmiştir. Sağlanan nanopartiküllerin istenilen boyutta olduğu SEM görüntüsünden anlaşılmaktadır. Nanopartiküllerin boyutu yakıt enjektör memesinin çapından daha küçük olduğu için memedeki yakıt akışını engellemeyecektir [83]. Sağlanan nanopartiküller küresel şekillidir. Küresel yapı nedeniyle parçacıklar arasındaki küçük boşluklar yoğunlaşmaya sonrasında da topaklaşmaya neden olabilir [80]. Nanopartiküller Shimadzu AUW320 Analytical Balance cihazı yardımıyla 25 ppm, 50 ppm ve 75 ppm olarak ölçülerek ayrı ayrı paketler halinde karışım için hazırlandı. Çökeltme oluşumunu en aza indirmek için literatürden yararlanılarak nanopartiküllerin miktarı 75 ppm ile sınırlandırılmıştır [8].

Paketler halinde hazırlanan farklı konsantrasyonlardaki TiO₂ nanopartikülleri, yerel bir benzin istasyonundan deneyde kullanılacak miktarda temin edilen saf dizelle birlikte birer litrelik beherlere eklenmiştir. Karışım ilk önce manyetik bir karıştırıcıda otuz dakika, sonrasında ise bir ultrasonik karıştırıcıda 30-40 kHz frekans ayarlarında bir saat süreyle karıştırılmıştır [1, 80]. Yakıt ve nanopartikül karışımının hazırlanışı Şekil 3.1’de şematik olarak gösterilmiştir. Çökelmeyi önlemek için yakıt karışımı hazırlandıktan hemen sonra kullanılmıştır [8]. Hazırlanan dizel ve TiO₂ nanopartikül katkılı yakıt örneklerinin özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. [11].

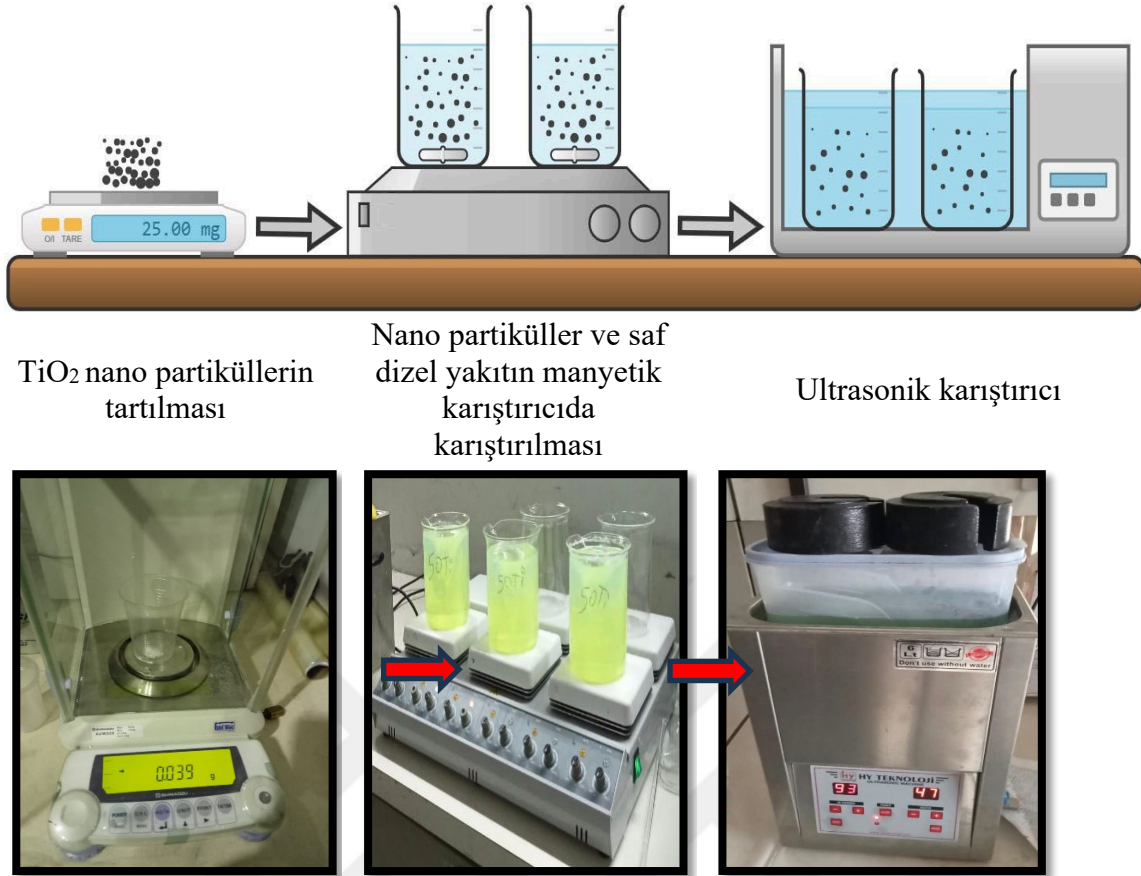
Çizelge 3.1. TiO₂ nano partiküllerinin özellikleri

Ürün Adı	Titanyum oksit nanopartikülleri
Kimyasal formülü	TiO ₂
Saflık derecesi	99.95 %
Ortalama partikül boyutu	5–10 nm
Renk	Beyaz
Molekül ağırlığı	79.87 g/mol

Resim 3.1. TiO₂ nano partiküllerinin SEM görüntüsü

Çizelge 3.2. Test yakıtlarının özellikleri [11].

Özellik	D100	D100+25 TiO ₂	D100+50 TiO ₂	D100+75 TiO ₂	Metot
Yoğunluk (kg/m ³)	750	740	740	740	ASTM D4052
Kinematik Vizkozite @40°C (mm ² /s)	2,7	2,6	2,5	2,4	ASTM D445
Kalorifik Değer (MJ/kg)	42.500	42.611	42.669	42.728	ASTM D240
Parlama noktası (°C)	45	46	47	48	ASTM D976
Setan numarası	49	49	50	50	ASTMD988



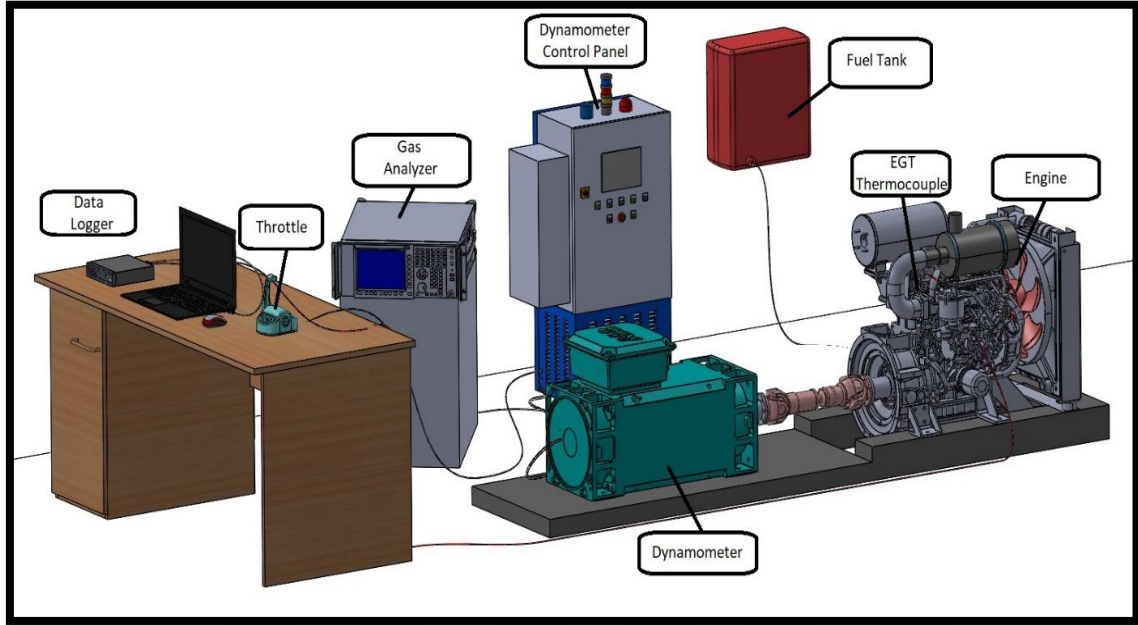
Şekil 3.1. Saf dizel ile TiO_2 nanopartikül karışımının hazırlanması

3.2. Deney Düzeneği

Bu deneyde dört zamanlı, üç silindirli, su soğutmalı ve turbo şarjlı dizel motor kullanılmıştır. Şekil 3.2, deney düzeneğinin 3 boyutlu şematik bir gösterimidir. Çizelge 3.3'te motora ilişkin teknik bilgiler yer almaktadır. Dizel motor, kardan şaft yardımıyla yük ve hız kontrolünü sağlayan bir elektrikli dinamometreye montajlanmıştır. Motor egzoz emisyonları; CO, CO₂, HC, O₂ ve NO_x emisyonlarını ölçmek için ise gaz analizörü Capelec Cap 3200 kullanılmıştır. Çizelge 3.4'te emisyon analiz cihazının teknik özellikleri verilmiştir.

Motoru ısıtmak ve stabil bir çalışmayı sağlamak amacıyla başlangıçta saf dizel yakıt kullanıldı. Motor soğutma suyu sıcaklığı 85 °C'ye ulaştıktan sonra tüm testler başlatıldı. Saf dizel ve TiO_2 karışımları, %100 dizel (D100), %100 dizel + 25 ppm TiO_2 (D100+25 TiO_2), %100 dizel + 50 ppm TiO_2 (D100+50 TiO_2) ve %100 dizel + 75 ppm TiO_2 (D100+75 TiO_2) şeklinde düzenlenmiştir. Öncelikle tam yükte, sırasıyla 1200 dev/dk, 1400 dev/dk, 1600

dev/dk ve 1800 dev/dk motor hızlarında veriler elde edilmiştir. Sonrasında ise motor hızı 1800 dev/dk'ya sabitlenerek sırasıyla %25 (50Nm), %50 (100Nm), %75 (150Nm) ve %100 tam yüklerde deneyler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Motor deney düzeneği

Çizelge 3.3. Dizel motorun özellikleri

Motor bilgileri	Özellikler
Model	New Holland Engine T4.55S - S8000
Silindir sayısı	3
Silindir hacmi, cm ³	2930
Çap / Strok (mm)	104 / 115
Biyel kol (mm)	182
Basınç oranı	17.5: 1
Nominal motor gücü ISO TR14396 - ECE R120 [kW/hp]	41 / 55
Nominal motor hızı (rpm)	2300
Maks. Tork ISO TR14396 (Nm@rpm)	258@1400
Enjeksiyon sistemi	Port yakıt enjeksiyonu
Kompresör basınç oranı	1.40
Soğutma tipi	Su

Çizelge 3.4. Capelec Cap 3200 emisyon analiz cihazının özellikleri

Ölçümler	Ölçüm aralıkları	Hassasiyet
HC (ppm)	0-20 000	10
CO ₂ (% vol.)	0-20	0.3
CO (% vol.)	0-15	0.03
O ₂ (% vol.)	0-21.7	0.1
NO _x (ppm)	0-5000	60 (1001-2000)

3.3. Belirsizlik Analizi

Verilerin güvenilirliği için deneyler üç kez tekrarlandı. Tekrarlarda elde edilen sonuçlar, ekipmanın bakımı, kalibrasyonu, çalışma durumu, gözlem doğruluğu ve çevre koşulları gibi değişkenlere bağlı olarak farklılık göstermiştir. Mevcut çalışma için deneysel hata analizi değerleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

Motor ve emisyon analiz cihazının test parametreleri elde edilirken oluşan belirsizlik değerleri, ilgili ekipmanların üreticileri tarafından beyan edildiği üzere Çizelge 3.5'te listelenmiştir. Performans parametreleri için toplam yüzdesel belirsizlik analizi, Eş. 3.1'de gösterildiği gibi ortalama karekök yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

$$w_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n\right)^2} \quad (3.1)$$

R değeri, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ gibi bağımsız değişkenlere bağlı olan belirli bir fonksiyondur. Ayrıca w_R , sonuçlardaki deneysel değerlerin toplam yüzde belirsizliği olarak tanımlanır ve w_1, w_2, \dots, w_n bağımsız değişkenlerin belirsizlikleri verilir [1, 84].

Yüzdesel olarak toplam belirsizlik;

$$\begin{aligned} w_R &= \sqrt{(\text{Yük})^2 + (\text{Güç})^2 + (\text{BSFC})^2 + (\text{BTE})^2 + (\text{EGS})^2 + (\text{CO}_2)^2 + (\text{NO}_x)^2} \\ &= \sqrt{(0.4)^2 + (0.5)^2 + (0.7)^2 + (0.6)^2 + (1.1)^2 + (0.4)^2 + (0.5)^2} \\ &= \pm 1.69\% \end{aligned}$$

Çizelge 3.5. Farklı parametrelere ait belirsizlik değerleri

Ölçümler	Belirsizlik (%)
Yük	0.4
Fren gücü	0.5
BSFC	0.7
BTE	0.6
EGS	1.1
CO ₂	0.4
NO _x	0.5

3.4. Denklemler ve Hesaplamalar

Motor torku, yakıt tüketimi, egzoz gazı sıcaklığı ve gerçek motor hızı gibi parametreler, motor üzerinde bulunan sensörler yardımıyla ve elektrikli dinamometre aracılığıyla alınmıştır. Fren gücü, fren ısı verimliliği ve fren özgül yakıt tüketimi verileri aşağıdaki formülasyonlarla elde edilmektedir.

Fren gücü;

$$BP = \frac{2\pi NT}{60000} (kW) \quad (3.2)$$

burada Eş 3.2' de, BP fren gücünü (kW), T motor torkunu (Nm) ve N motor hızını (dev/dk) temsil eder [17].

Fren ısı verimi;

$$\eta_{bte} = \frac{BP}{m_f \times CV} \times 100\% \quad (3.3)$$

burada Eş 3.3'te, η_{bte} fren ısı verimini (%), BP fren gücünü (kW), m_f sağlanan yakıtın kütlesini (kg/s) ve CV yakıtın düşük kalorifik değerini (kJ/kg) temsil eder [17].

Fren özgül yakıt tüketimi;

$$BSFC = \frac{m_f}{BP} (g / kWh) \quad (3.4)$$

burada Eş 3.4'te BSFC fren özgül yakıt tüketimini (g/kWh), m_f yakıt tüketimini (g/s) ve BP motor fren gücünü (kW) temsil eder [17].





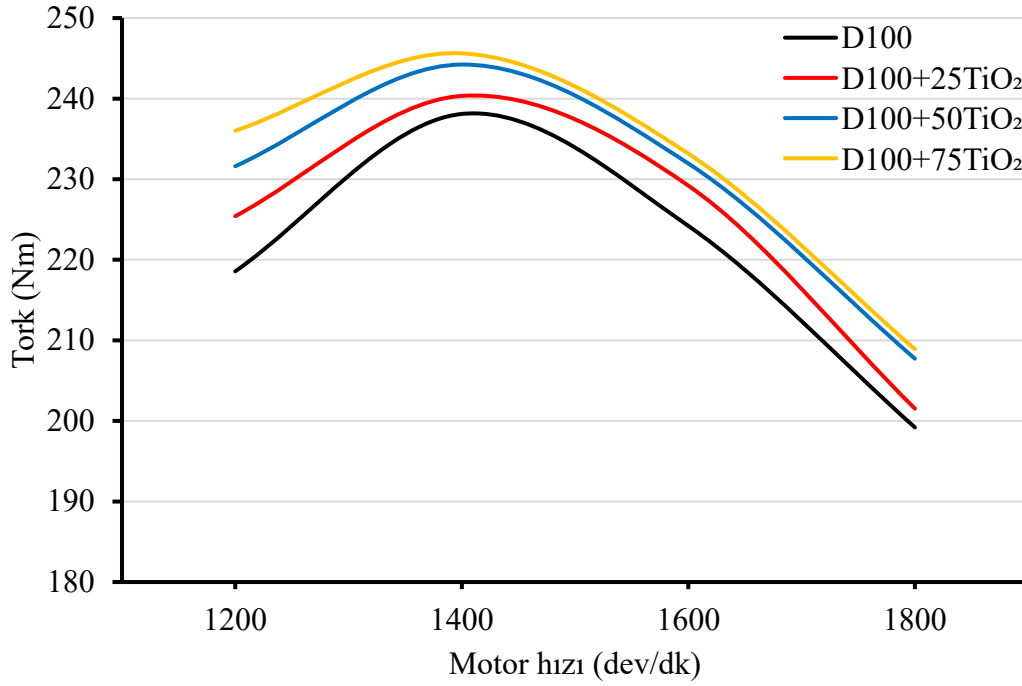
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, tam yükte farklı motor hızlarında (1200 dev/dk, 1400 dev/dk, 1600 dev/dk ve 1800 dev/dk) ve farklı yük koşullarında 1800 devir/dk sabit devirde, farklı konsantrasyonlarda TiO₂ nanopartikül ilavesinin fren torku, fren gücü (BP), fren ısı verimi (BTE), fren özgül yakıt tüketimi (BSFC), egzoz gazı sıcaklıkları, CO₂ ve NO_x emisyonları gibi veriler elde edilerek motor performansı ve emisyon değerlerindeki değişimler incelenmiştir. Elde edilen bütün deneysel veriler literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmış ve çalışmanın sonuçları değerlendirilmiştir.

4.1. Tam Yükte ve Farklı Motor Hızlarında Verilerin Analizi

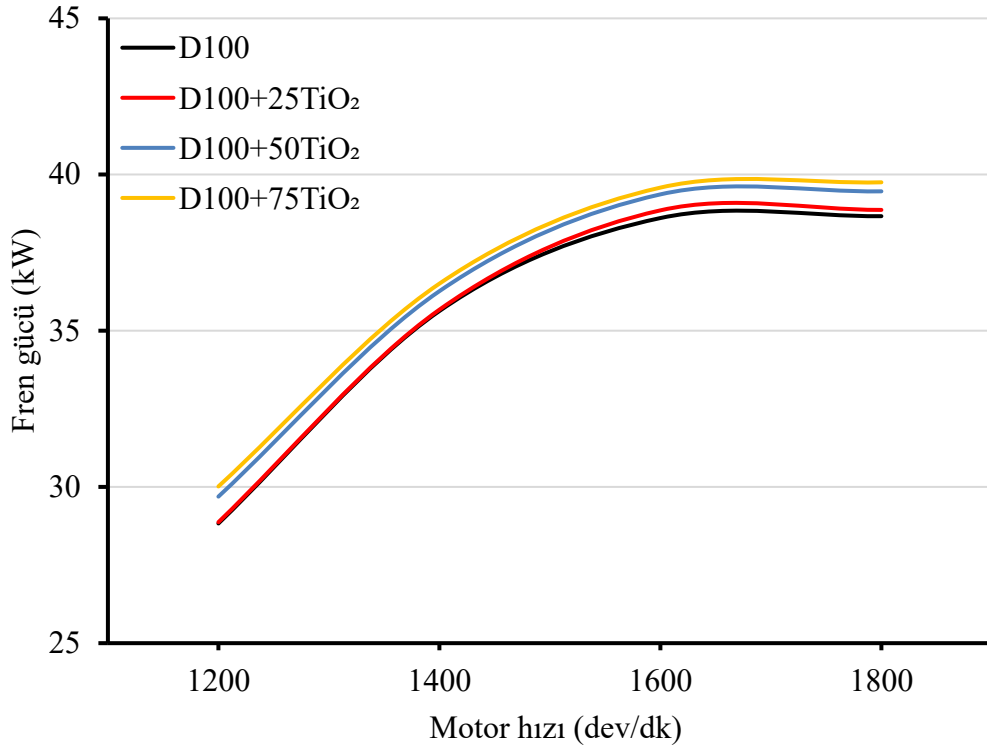
4.1.1. Fren torku ve fren gücü

Şekil 4.1’de tam yükte ve farklı konsantrasyondaki yakıt numunelerine ait tork değerlerinin motor hızına göre değişimi görülmektedir. Tork değerleri bütün yakıt türlerinde motor üreticisinin Çizelge 3.4’te belirttiği gibi 1400 dev/dk’da maksimum değerlere ulaşarak sonrasında düşüşe geçmektedir. Maksimum tork değerleri, yakıt numuneleri için sırasıyla D100 için 238,1 Nm, D100+25TiO₂ için 240,3 Nm, D100+50TiO₂ için 244,2 Nm, D100+75TiO₂ için 245,6 Nm olarak gerçekleşmiş ve yakıtta TiO₂ eklentisi ile tork değerlerinin her devirde arttığı görülmüştür. Dizele kıyasla tork değerindeki en fazla artış ise %7,9 ile 1200 dev/dk’da D100+75TiO₂ yakıt numunesinde gerçekleşmiştir.



Şekil 4.1. Tam yükte yakıt numunelerinin değişken hızlardaki tork değerleri

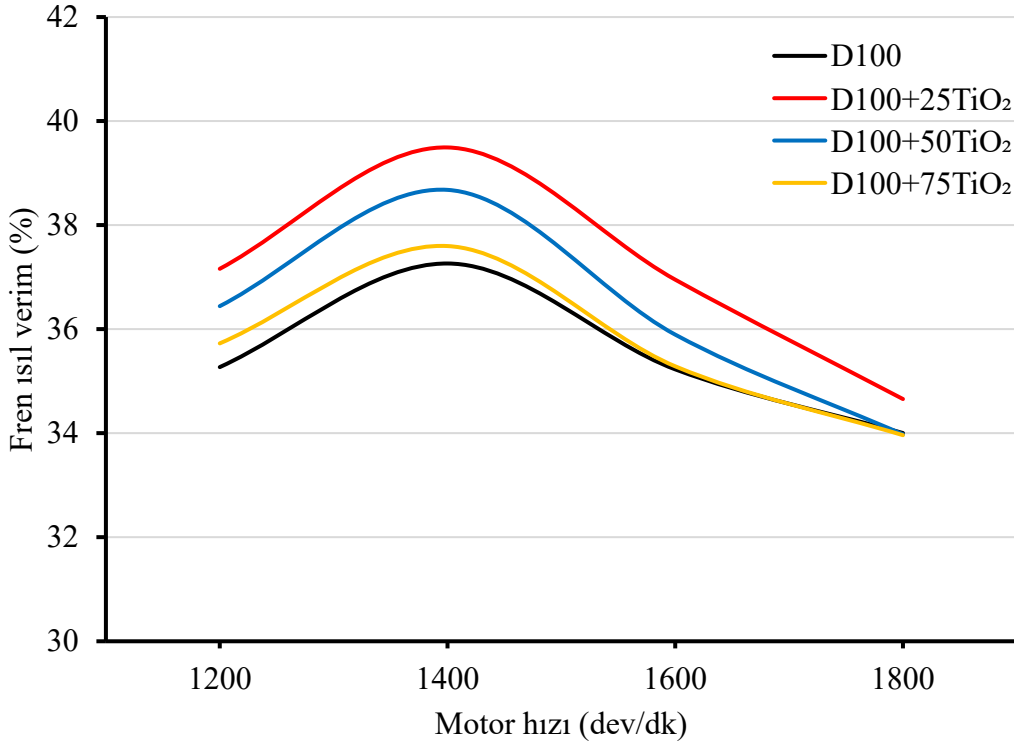
Şekil 4.2' de fren gücü (BP) ve motor hızının (dev/dk) karşılaştırılmalı grafiklerinde, motor hızı arttıkça fren gücünün de arttığı görülmektedir. Eş. 3.2 denkleminde de görüldüğü gibi motor torku ve hızı doğrudan motor fren gücü ile ilişkilidir, dolayısıyla fren tork değerlerindeki değişiklikler, aynı motor hızında motor fren gücünü doğrudan etkiler [1]. Maksimum fren gücü 1800 dev/dk ve 75 ppm katkılı yakıt numunesinde gerçekleşmiş ve dizele kıyasla en fazla artış oranı ise 75 ppm katkılı yakıtta %4,1 ile 1200 dev/dk'da gerçekleşmiştir. Fren gücü ve fren torku grafiklerinde TiO₂ ilavesinde her iki grafikte de dizele kıyasla tüm devirlerde daha yüksek çıktığı görülmektedir. Bu artışın, TiO₂'nin yüksek enerji içeriğine bağlı olduğu düşünülmektedir [1]. Nanopartikül yükü arttıkça karışımın yoğunluğu ve motorun hacimsel verimliliği de artar, bu da gücün artmasına neden olabilir [85, 86]. Yakıtta nanopartikül eklentisinin daha yüksek tepe basıncına yol açması nedeniyle daha yüksek fren gücüne ulaşılması sağlanabilir [85, 87]. Ayrıca nanopartiküllerin yüksek yüzey-hacim oranı, yakıt karışımlarının daha iyi oksidasyonunu sağlar. Böylece yüksek yanma entalpisi ve enerji yoğunluğu serbest bırakılarak maksimum motor fren torku ve gücü artırılabilir [1, 88]. Yakıttaki nanopartikül konsantrasyonunun artışı motor hızının artmasıyla hem torkta hem de fren gücünde artış sağlamıştır. Bu durum nanopartiküllerin oksijen takviyesi ile yakıt karışımının yanma kalitesini arttırarak hem tork hem de fren gücü performansının artışına neden olması şeklinde yorumlanmıştır [85, 89].



Şekil 4.2. Tam yükte yakıt numunelerinin değişken hızlardaki fren gücü değerleri

4.1.2 Fren Isıl Verim (BTE)

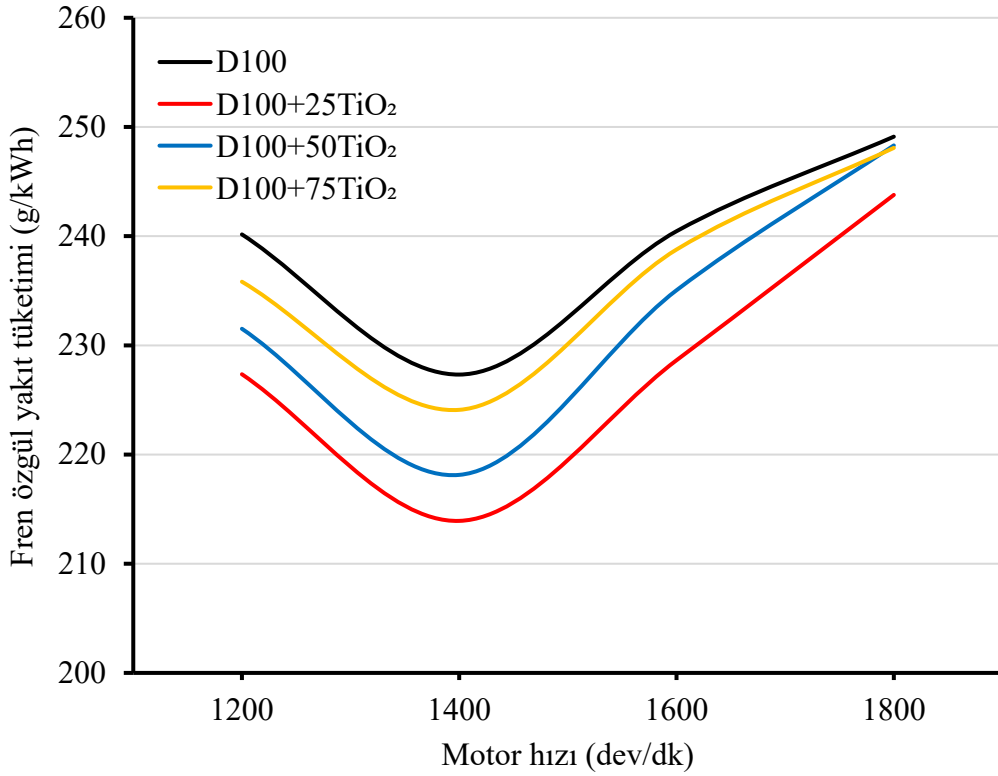
Şekil 4.3'te görüldüğü üzere fren ısıl verimin, maksimum tork devrinde en yüksek değerde olduğu görülmektedir. Fren ısıl verimi, her devirde nanopartikül ilavesinde dizele göre daha yüksek çıkmıştır. Bu artışın nedenlerinden biri nanopartiküllerin mikro patlama eğiliminin artması olarak gösterilebilir [8, 90, 91]. Diğer nedenleri ise katkı nanopartiküllerinin yakıt fren termal performansını iyileştirilmesi, dağılmış nanopartiküllerin geliştirilmiş atomizasyonu ve yakıtın hızlı buharlaşmasından kaynaklanmaktadır, bu da hava/yakıt karışımında daha iyi bir karışıma yol açmaktadır. Ayrıca yakıt parçacığında artan yüzey alanı, oksijen ile yakıt molekülleri arasında daha iyi bir reaksiyona yol açabilir [92-94]. Ancak her devirde nanopartikül miktarı 25 ppm'den 75 ppm'e çıktıkça ısıl verimin azaldığı görülmüştür. Yakıttaki nanopartikül miktarı arttıkça fren ısıl verimdeki azalmalar, nanopartiküllerin neden olduğu radyatif ısı kayıplarındaki artıştan kaynaklanıyor olabilir [82]. Isıl verimdeki en yüksek artış, dizelle kıyaslandığında %5,9 ile 1400 dev/dk ve D100+25TiO₂ yakıt numunesinde gerçekleşmiştir.



Şekil 4.3. Tam yükte yakıt numunelerinin değişken hızlardaki fren ısı verim değerleri

4.1.3 Fren özgül yakıt tüketimi (BSFC)

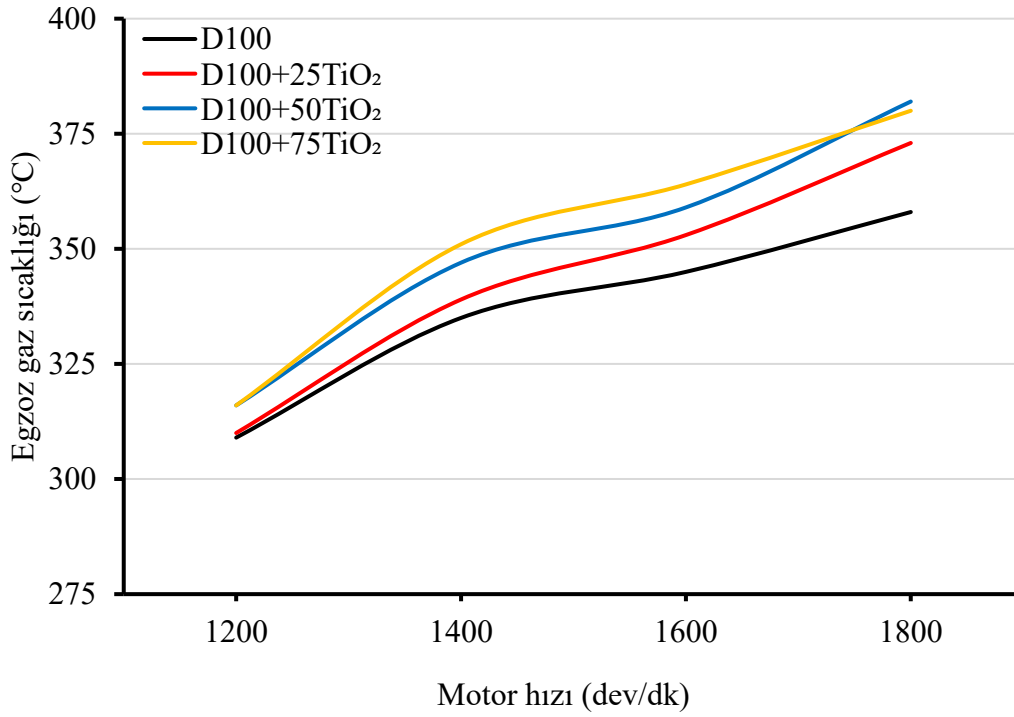
Şekil 4.4'te fren özgül yakıt tüketimi (BSFC) torkun maksimum olduğu 1400 dev/dk'da en düşük değerdedir. Ayrıca TiO₂ eklentili yakıt numunelerinin fren özgül yakıt tüketimi değerleri, bütün devirlerde dizel yakıtın altında çıkmıştır. TiO₂ nanopartiküllerinin eklenmesinin, fren özgül yakıt tüketimini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Bu durum, reaksiyon yüzey alanının iyileştirilmesi nedeniyle daha iyi yanma kalitesine yol açan TiO₂'nin yüksek yüzey alanına atfedilir [1]. Yakıt karışımına TiO₂ eklenmesinin, saf dizele kıyasla fren özgül yakıt tüketimini azalttığı görülmektedir [1, 8, 95]. Ayrıca TiO₂ konsantrasyonunun artışı ile fren özgül yakıt tüketiminin arttığı görülmektedir. Bunun nedeni, düşük konsantrasyonlu TiO₂ karışımında, hava ve yakıtın daha iyi karışarak daha iyi yanma sağlaması olabilir [8, 79]. Fren özgül yakıt tüketimindeki bu düşüşün başka bir sebebi de yakıt damlacıklarının daha küçük olması nedeniyle daha iyi buharlaşması ve daha iyi bir yanmayla sonuçlanmasından kaynaklanabilir [96]. Fren özgül yakıt tüketiminin saf dizele göre en düşük olduğu değer, fren ısı verimin en yüksek olduğu ve maksimum torkun görüldüğü 1400 devir/dk'da ve 25 ppm TiO₂ katkılı yakıt numunesinde %5,9 olarak görülmüştür [81].



Şekil 4.4. Tam yükte yakıt numunelerinin değişken hızlardaki fren özgül yakıt tüketimi değerleri

4.1.4. Egzoz gaz sıcaklığı (EGS)

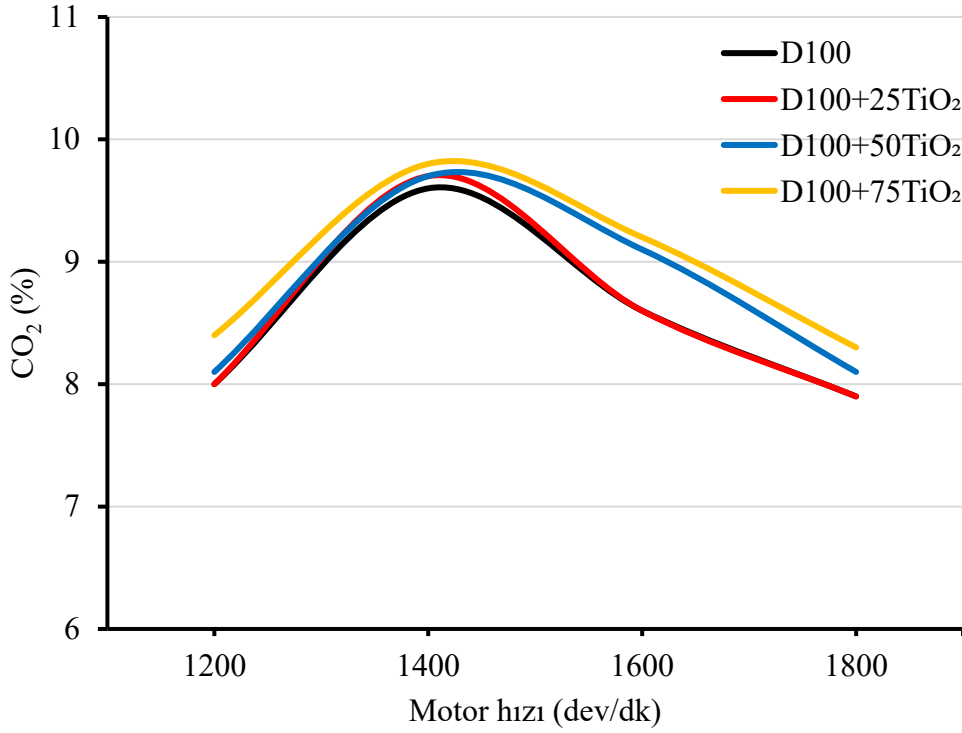
Şekil 4.5'te tam yükte, dizel yakıt ve farklı konsantrasyonda TiO₂ eklenmiş yakıt numunelerinin farklı motor hızlarındaki egzoz gaz sıcaklıkları görülmektedir. Motor hızının artışı ile egzoz gaz sıcaklıkları, her yakıt numunesinde artış göstermiştir. Aynı zamanda egzoz gaz sıcaklığı, nanopartikül eklentisiyle dizel yakıt sıcaklık değerlerinin üstünde çıkmış ve nanopartikül miktarının artışı ile de sıcaklıklar daha da yüksek çıkmıştır. En yüksek sıcaklık değeri, 1800 dev/dk'da ve D100+50TiO₂ yakıt numunesinde gerçekleşmiştir. Daha yüksek sıcaklıkların, nanopartiküllerin daha reaktif olmasına neden olduğu dikkate alındığında, daha iyi yanma sağlanabilmekte ve daha yüksek sıcaklıklar önemli miktarda yakıtın yakılmasını sağlayabilmektedir [81]. Bu durum Örs ve diğerlerinin çalışmasında kullandığı B20But10 yakıtına TiO₂ eklenmesi ile benzer şekilde artış gerçekleştiği görülmektedir [1].



Şekil 4.5. Tam yükte yakıt numunelerinin değişken hızlardaki egzoz gaz sıcaklığı değerleri

4.1.5. Karbondioksit (CO₂) emisyonları

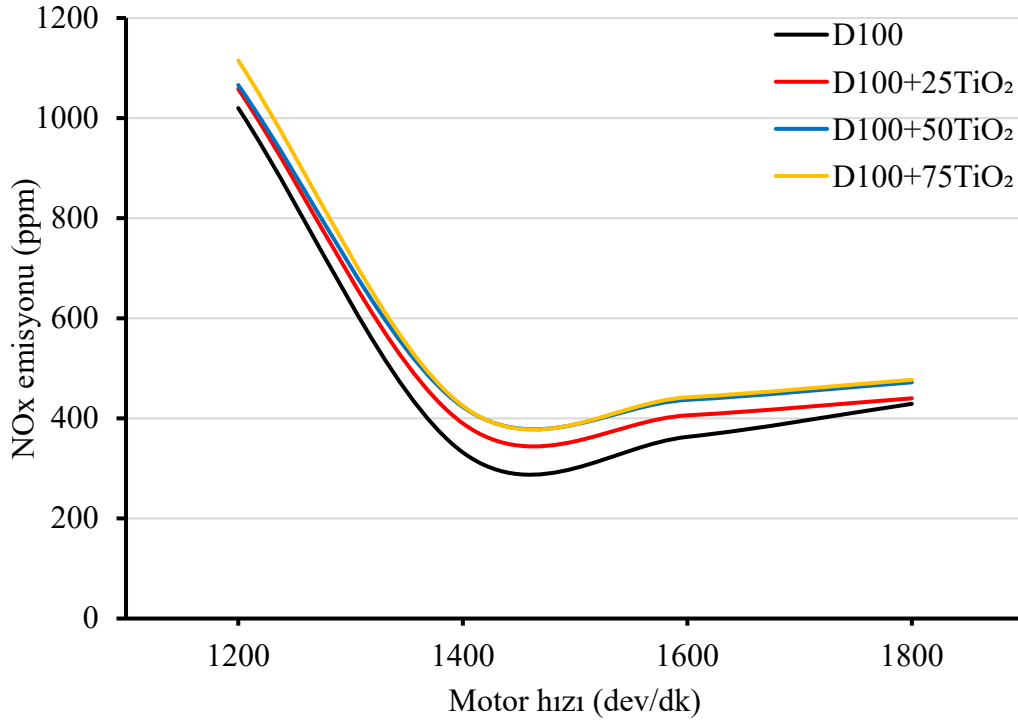
Şekil 4.6'da tam yükte, dizel yakıt ve farklı konsantrasyonda TiO₂ eklenmiş yakıt numunelerinin, farklı motor hızlarındaki karbondioksit emisyon değerleri görülmektedir. CO₂ emisyonunun en yüksek değerleri, 1400 dev/dk'da maksimum tork değerlerinde ortaya çıkmıştır. Yakıt karışımına TiO₂ eklenmesi, her devirde ortalama CO₂ emisyon değerlerini artırmaktadır. Bu durum, nanopartiküllerin yanma sürecini iyileştirdiği ve böylece CO emisyonu azaldığında, CO₂'nin artış göstermesi, CO ve CO₂ emisyonları arasında bir dengenin varlığıyla açıklanabilir. Dolayısıyla TiO₂ katkısı, sadece CO₂ emisyonunu arttırmakla kalmıyor, aynı zamanda nanopartikül katkısı içermeyen yakıt karışımlarına göre CO emisyonunu da azalttığı görülebilmektedir [1, 8]. Ayrıca her devirde nanopartikül miktarının artışı daha fazla CO₂ oluşumuna sebep olmuştur. Bu durum, TiO₂ nanopartiküllerinin artan katalitik aktivitesine bağlanabilir. Bu etki nedeniyle yanma odasındaki hava-yakıt karışımı iyileştirilir ve tam yanma sağlanır [8, 80, 97]. CO₂ emisyonları her bir devirde saf dizele kıyasla en yüksek D100+75TiO₂ yakıt numunesinde ortalama %4,7 değerinde gerçekleşmiştir.



Şekil 4.6. Tam yükte yakıt numunelerinin değişken hızlardaki CO₂ emisyon değerleri

4.1.6. Nitrojen oksit (NO_x) emisyonları

Şekil 4.7’de tam yükte, dizel yakıt ve farklı konsantrasyonda TiO₂ eklenmiş yakıt numunelerinin farklı motor hızlarındaki nitrojen oksit emisyon değerleri görülmektedir. Minimum NO_x değerleri, tüm yakıt numunelerinde 1400 dev/dk ve maksimum tork değerlerinde gerçekleşmiştir. Ancak TiO₂ eklentisi ile tüm devirlerde NO_x artışı gözlemlenmiştir. Bu durum, silindir içinde yanma sırasında oluşan yüksek sıcaklık ve basıncın, nitrojen oksitlerin (NO_x) oluşumuna neden olmasından kaynaklanabilmektedir [98]. TiO₂’nin yüksek reaktivitesi ve yüksek yüzey alanı nedeniyle silindir içi basınç ve sıcaklık açısından yanma özelliklerinin iyileştirilmesine katkıda bulunması daha yüksek NO_x oluşumuna sebep olabilir [1]. Ayrıca TiO₂ miktarı arttıkça ilave oksijen miktarı ve nanopartikül içerikli yakıtın katalitik aktivitesi nedeniyle NO_x emisyonunu arttırabilmektedir [8, 9, 99]. Maksimum torkun olduğu 1400 dev/dk’da D100+75TiO₂ yakıtında saf dizele göre en yüksek NO_x artışı gözlemlenmiş ve bu değer %28 olarak ölçülmüştür.



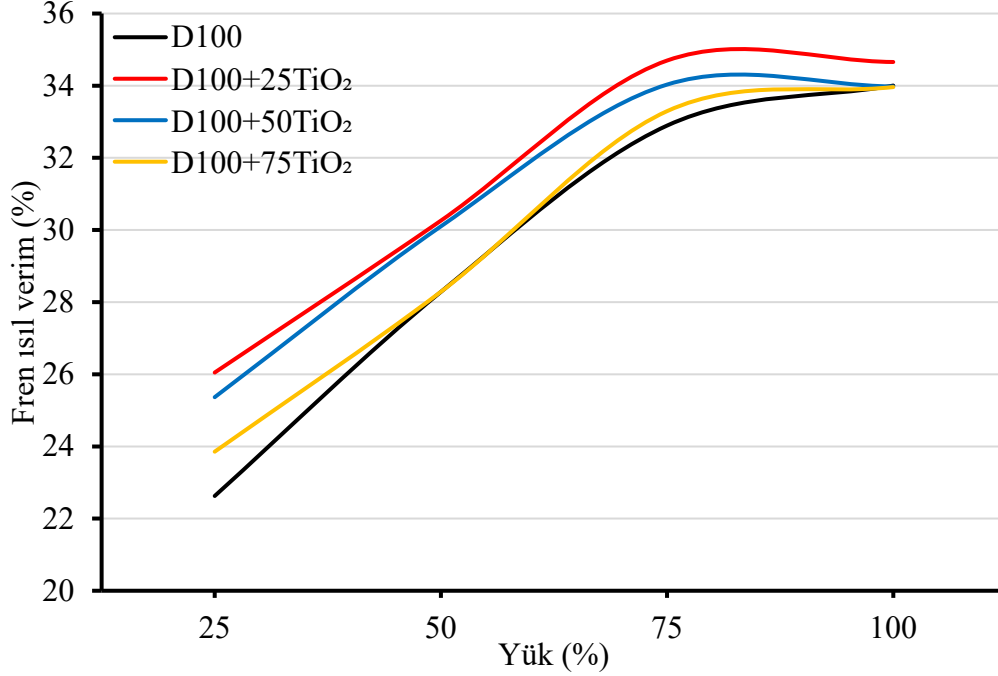
Şekil 4.7. Tam yükte yakıt numunelerinin değişken hızlardaki NO_x emisyon değerleri

4.2. 1800 dev/dk ve Farklı Yüklerde Performans ve Emisyon Verilerin Analizi

4.2.1. Fren ısı verimi (BTE)

Şekil 4.8, 1800 dev/dk'da ve farklı yüklerde dizel yakıt ve TiO₂ ilaveli yakıtın fren ısı verimi (BTE) sonuçlarını göstermektedir. Fren ısı verimliliği ve fren gücü (BP), motor yükündeki artışla doğrudan ilişkilidir, motor yükü arttıkça yanma odasının tepe sıcaklığı da artış gösterebilmektedir [1, 9]. Yakıtta TiO₂ nanopartiküllerinin kullanılmasıyla fren ısı verim, tüm yüklerde saf dizel yakıtı göre artmıştır. Bu artışın nedenlerinden biri nanopartiküllerin mikro patlama eğiliminin artması olarak gösterilebilir [8, 90, 91]. Nanopartikül katkıli yakıtlarda fren ısı verim, saf dizele göre daha yüksek olmasına rağmen yük arttıkça aynı konsantrasyondaki yakıtın fren ısı veriminin artış hızı azalmaktadır. Yani 25 ppm nanopartikül ilaveli yakıtın fren gücü, saf dizele göre her yük artışında artmış ancak artış hızı tam yüke doğru azalmıştır. Ayrıca her yükte nanopartikül miktarı 25 ppm'den 75 ppm'e çıktıkça fren ısı veriminin azaldığı görülmüştür. Yakıttaki nanopartikül miktarı arttıkça fren ısı verimindeki azalmalar, nanopartiküllerin neden olduğu radyatif ısı kayıplarındaki artıştan kaynaklanıyor olabilir [82]. Fren ısı veriminin pik artış oranları 25 ppm konsantrasyonda ve en düşük yükte gerçekleşmiştir. Maksimum fren termal verimliliği

artışı, %25 (50Nm) yükte saf dizel ile karşılaştırıldığında D100+25 TiO₂ için %15,12 olmuştur.

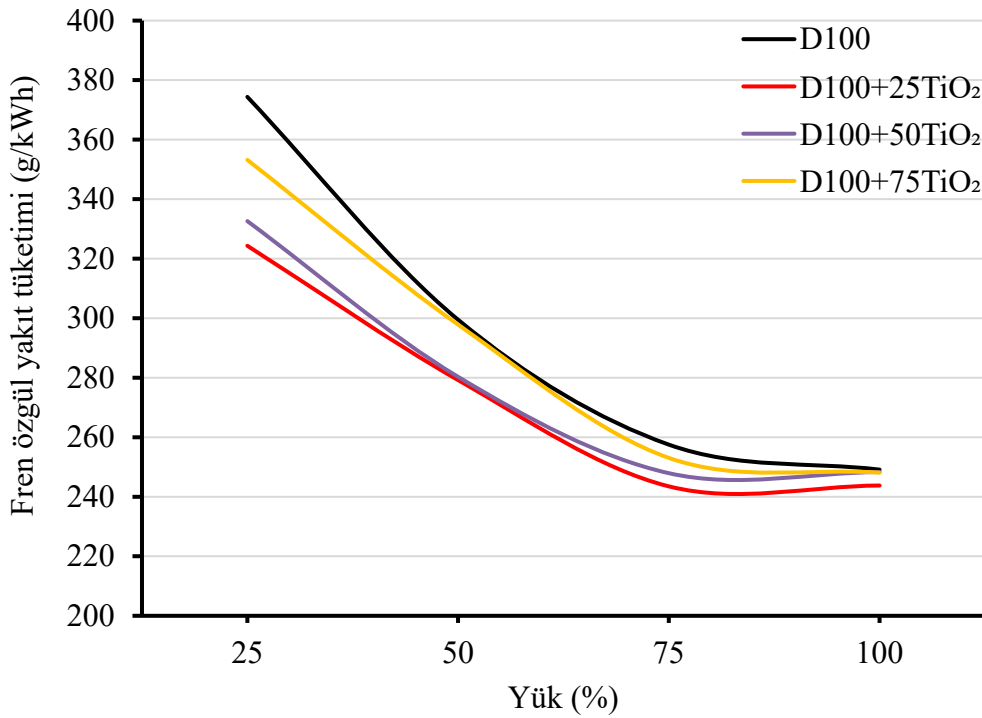


Şekil 4.8. Yakıt numunelerinin 1800 dev/dk sabit hızda ve farklı yüklerdeki fren ısı verim değerleri

4.2.2. Fren özgül yakıt tüketimi (BSFC)

Şekil 4.9, 1800 dev/dk'da ve farklı yüklerde dizel yakıt ve TiO₂ katkısının fren özgül yakıt tüketimine (BSFC) ait sonuçlarını göstermektedir. Tüm yakıt örneklerinde yükün artmasıyla fren özgül yakıt tüketimi değerinin düştüğü gözlenmiştir. Ayrıca TiO₂'nin tüm konsantrasyonlarında fren özgül yakıt tüketimi, her yükte dizel yakıtla kıyasla daha düşük çıkmıştır. Bu, TiO₂ nanopartikül parçacıklarının yüksek yüzey alanının, reaksiyon yüzey alanını iyileştirmesi nedeniyle yanma kalitesinin artmasına katkı sağlayabilmektedir [1]. En düşük fren özgül yakıt tüketim değerleri, maksimum yükte ve düşük TiO₂ nanopartikül karışımlarında görülmektedir. Bunun nedeni, düşük konsantrasyonlu TiO₂ karışımında hava ve yakıtın daha iyi karışarak daha iyi yanma sağlaması olabilir [8, 79]. Ayrıca tam yüke doğru gidildikçe tüm yakıt numunelerindeki fren özgül yakıt tüketim değerleri, birbirine yaklaşmakta ve azalmaktadır. Sunil ve arkadaşlarının çalışmalarında da benzer sonuçlar elde ettiği görülmektedir [82]. Yük arttıkça, daha yüksek termal verim elde edildiğinden fren özgül yakıt tüketim değeri düşebilmektedir [81]. Burada fren ısı veriminin grafikleri

incelendiğinde fren özgül yakıt tüketim değerleri ile uyumlu olduğu görülmekte ve deneysel verileri doğrulayan niteliktedir. Biraz daha netleştirmek gerekirse, ısıl verime ait şekil 4.8’de yük arttıkça performansın arttığı, aynı zamanda her yükteki TiO_2 miktarı arttıkça performansın düştüğü görülmektedir. Fren özgül yakıt tüketimine ait Şekil 4.9 incelendiğinde, ısıl verim değerlerin aksine olması gereken şekilde, yük arttıkça azaldığı ve her yükte düşük TiO_2 konsantrasyonundan yüksek konsantrasyona doğru arttığı gözlemlenmiştir. Dizel ile karşılaştırıldığında en düşük fren özgül yakıt tüketimi değeri %13,36 ile düşük yükte ve 25 ppm TiO_2 ’li yakıt örneğinde gerçekleşmiştir.

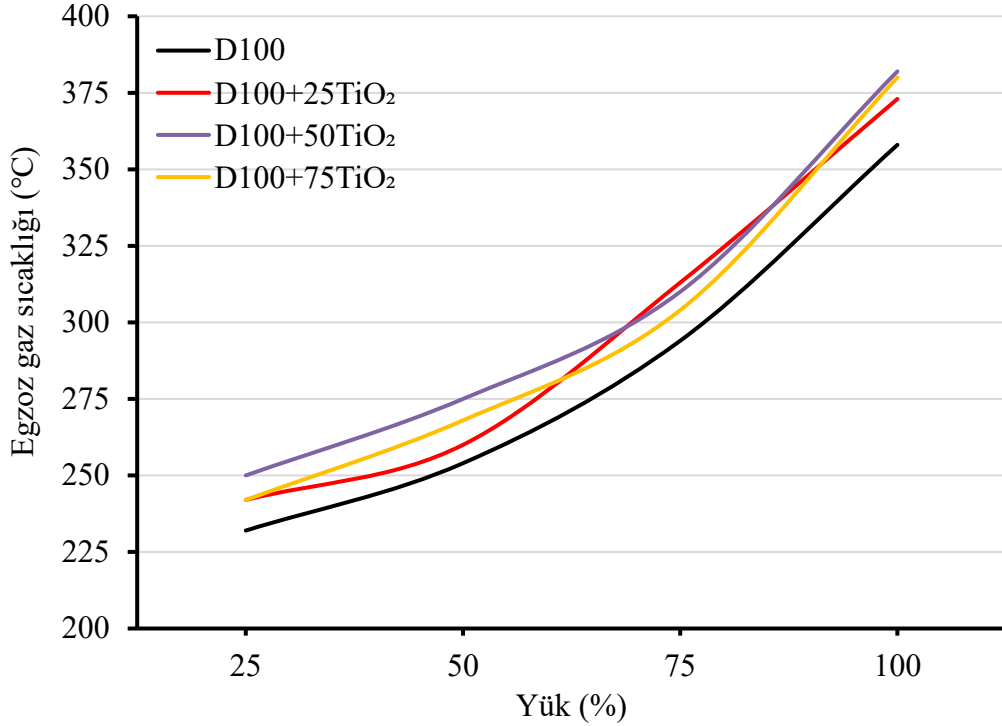


Şekil 4.9. Yakıt numunelerinin 1800 dev/dk sabit hızda ve farklı yüklerdeki fren özgül yakıt tüketim değerleri

4.2.3. Egzoz gaz sıcaklığı (EGS)

Şekil 4.10, 1800 dev/dk’da ve farklı yüklerde dizel yakıt ve farklı konsantrasyondaki TiO_2 katkısının egzoz gazı sıcaklığı (EGS) üzerindeki etkisini göstermektedir. Egzoz gaz sıcaklığı, yanma sırasında açığa çıkan enerjinin bir göstergesi olabilir [82]. Sonuçlar, tüm yakıt örnekleri için yük arttıkça egzoz gaz sıcaklığının arttığını göstermektedir. TiO_2 katkılı yakıt örneklerinin egzoz gaz sıcaklıkları, saf dizele göre daha yüksek çıkmıştır. Bu durumda, TiO_2 katkılı yakıt örneklerinin kısa tutuşma gecikmeleri nedeniyle yanma kalitesinin saf

dizele göre daha iyi olduğu ileri sürülebilir. Aynı zamanda yüksek sıcaklıkların, nanopartiküllerin daha reaktif olmasına neden olduğu dikkate alındığında, daha iyi yanma ile önemli miktarda yakıtın yakılmasını sağlayabilmektedir [81].

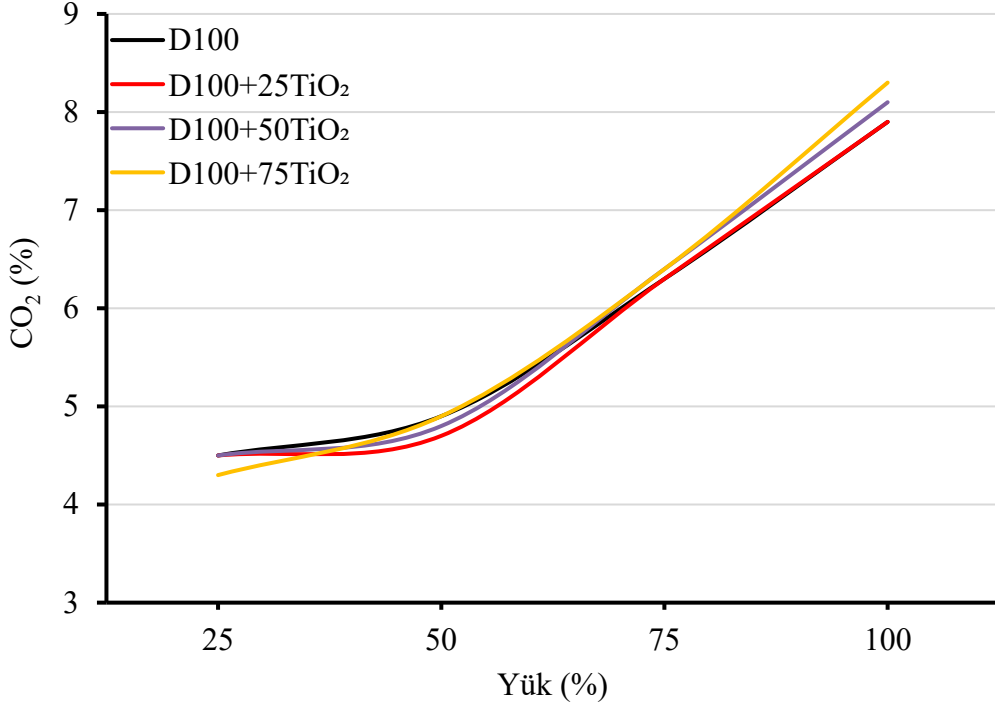


Şekil 4.10. Yakıt numunelerinin 1800 dev/dk sabit hızda ve farklı yüklerdeki egzoz gaz sıcaklık değerleri

4.2.4. Karbondioksit (CO₂) emisyonları

Şekil 4.11, 1800 dev/dk'da ve farklı yüklerde dizel yakıt ve farklı konsantrasyonlardaki TiO₂ katkısının karbondioksit (CO₂) değerlerine ait sonuçlarını göstermektedir. Sonuçlar, yük arttıkça bütün yakıt örneklerinde CO₂ değerlerinin arttığını göstermektedir. CO₂'deki bu artış, yükün artmasıyla birlikte silindir içindeki sıcaklığın da artması ve yanmanın daha iyi olmasından kaynaklanıyor olabilir [8]. Yanma sürecinde, nanopartiküllerin daha iyi yanma sağlamasıyla CO emisyonlarının azalması ve CO₂ emisyonlarının artması şeklinde bir dengeden söz edilebilir. Bu durum, daha net bir ifadeyle TiO₂ katkısının, saf dizele kıyasla CO₂ emisyonunu arttırdığını ve CO emisyonunu ise azalttığı şeklinde yorumlanmaktadır [1]. TiO₂ katkılı yakıt numunelerinde, CO₂ düzeyi düşük yüklerde dizele göre daha düşük iken, tam yüke doğru TiO₂ miktarı arttıkça dizelden daha yüksek çıkmıştır. 75 ppm TiO₂ yakıt karışımında ve maksimum yükte CO₂ değerinin dizele göre %5 daha yüksek olduğu

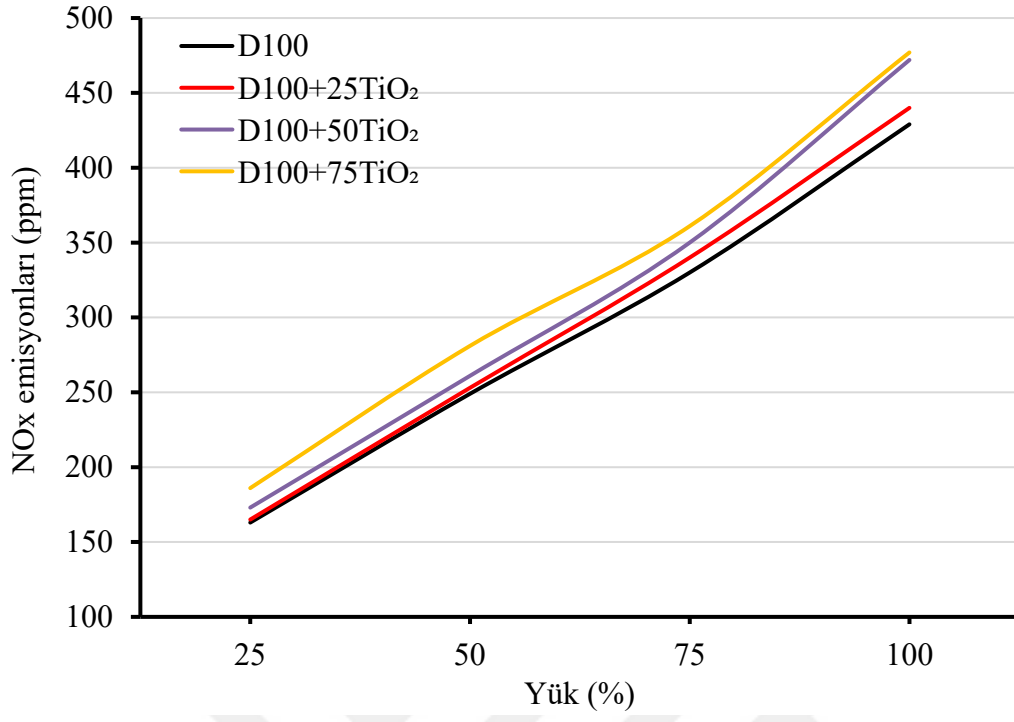
ölçülmüştür. Bu, TiO_2 nanopartiküllerinin artan katalitik aktivitesine bağlanabilir. Bu etki nedeniyle yanma odasındaki hava-yakıt karışımı iyileştirilerek tam yanma sağlanabilir [8, 80, 97].



Şekil 4.11. Yakıt numunelerinin 1800 dev/dk sabit hızda ve farklı yüklerdeki CO_2 değerleri

4.2.5. Nitrojen oksit (NO_x) emisyonları

Şekil 4.12, 1800 dev/dk'da ve farklı yüklerde dizel yakıt ve farklı konsantrasyonlardaki TiO_2 katkısının nitrojen oksit (NO_x) değerlerine ait sonuçlarını göstermektedir. NO_x değerlerinin, yük artışıyla birlikte tüm yakıt örneklerinde arttığı görülmektedir. Artan yükte birlikte sıcaklık seviyesi de artmakta ve oksijen konsantrasyonu NO_x emisyonlarının oluşması için uygun bir ortam sağlayabilmektedir [8, 82]. Nanopartikül eklentisi ile her yükte dizel yakıtı kıyasla NO_x değerlerinin arttığı görülmektedir. TiO_2 'nin yüksek reaktivitesi ve daha yüksek yüzey alanı nedeniyle silindir içi basınç ve sıcaklık açısından yanma özelliklerinin iyileştirilmesine katkıda bulunarak yüksek NO_x seviyelerine yol açabilir [81]. Ayrıca TiO_2 miktarı arttıkça, oksijen miktarının artması nedeniyle nanopartikül yakıtın katalitik aktivitesi de artar. Bu durum, NO_x emisyonlarının artış göstermesine de neden olabilir [8, 9, 99].



Şekil 4.12. Yakıt numunelerinin 1800 dev/dk sabit hızda ve farklı yüklerdeki NO_x değerleri



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Saf dizel ve farklı konsantrasyonlarda TiO₂ nanopartikülleri içeren karışımlar kullanılarak motorun performansı ve emisyon özellikleri; tam yükte, farklı motor hızlarında ve 1800 devir/dk sabit devirde, farklı yük koşullarında olmak üzere iki farklı deneysel çalışmada incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

Tam yükte ve farklı motor hızlarında;

- Nanopartikül miktarının artışı ile bütün devirlerde hem fren torkunda hem de fren gücünde saf dizele göre artış gerçekleşmiştir. Saf dizele kıyasla fren torkunda en fazla artış %7,9 ile 1200 devir/dk'da D100+75TiO₂ yakıt numunesinde gerçekleşmiştir. Fren gücünde ise en fazla artış oranı D100+75TiO₂ katkılı yakıtta %4,1 ile 1200 devir/dk'da gerçekleşmiştir.
- Fren ısı verimi, bütün devirlerde nanopartikül eklentisinde, saf dizele göre daha yüksek çıkmıştır ve en yüksek artış %5,9 ile 1400 devir/dk ve D100+25TiO₂ yakıt numunesinde gerçekleşmiştir.
- Fren özgül yakıt tüketimi, tüm devirlerde nanopartikül katkısı ile saf dizele göre daha düşük çıkmıştır. En düşük yakıt tüketimi 1400 devir/dk gerçekleşmiş ve 25 ppm TiO₂ katkılı yakıt numunesinde saf dizele göre %5,9 olarak daha düşük ölçülmüştür.
- Motor hızı ve nanopartikül miktarının artışı, egzoz gaz sıcaklığının artışına sebep olmuştur. En yüksek sıcaklık değeri, 1800 dev/dk'da ve D100+50TiO₂ yakıt numunesinde gerçekleşmiştir.
- En yüksek CO₂ seviyeleri, 1400 devir/dk motor hızında gerçekleşmiştir. Nanopartikül miktarının artışı ile CO₂ emisyonları, saf dizele göre artış göstermiş ve en yüksek değerler ortalama %4,7 ile 75 ppm nanopartikül katkısında gerçekleşmiştir.
- En düşük NO_x değerleri, tüm yakıt numunelerinde 1400 devir/dk motor hızında ve en yüksek tork değerinde gerçekleşmiştir. Ancak, nanopartikül miktarının artması ile tüm devirlerde, saf dizele göre NO_x emisyonları artmış ve en yüksek artış, 1400 devir/dk motor hızında D100+75TiO₂ yakıtında %28 oranında gerçekleşmiştir.

1800 devir/dk sabit devirde ve farklı yüklerde;

- En düşük yükte ve 25 ppm TiO₂ eklenmiş yakıt numunesinde, fren ısı verimliliği en yüksek değerlere ulaşmıştır. Minimum %25 (50 Nm) yükte D100+25TiO₂ için maksimum fren ısı verim artışı saf dizele göre %15,12 olmuştur.
- BSFC değerleri, her yük değerinde, düşük TiO₂ konsantrasyonundan yüksek TiO₂ konsantrasyona doğru artış gösterdi ve yük arttıkça fren özgül yakıt tüketimi azaldı. Fren özgül yakıt tüketiminde maksimum düşüş, düşük yükte 25 ppm TiO₂'li yakıt numunesinde gerçekleşti ve dizele kıyasla yakıt tüketiminde %13,36 oranında azalma gözlemlendi.
- TiO₂ katkılı yakıt örneklerinin egzoz gaz sıcaklıkları, saf dizele göre daha yüksek çıkmıştır. En yüksek sıcaklık artışı ise tam yükte D100+50TiO₂ yakıtında gerçekleşmiştir.
- Düşük yüklerde, TiO₂ yakıt örneklerinin CO₂ seviyesi dizelden daha düşüktür; ancak TiO₂ miktarı artışı ile tam yüke doğru dizelden daha yüksek değerler elde edilmiştir. Tam yükte ve 75 ppm TiO₂ yakıt karışımında, CO₂ seviyesi dizele göre %5 daha yüksek çıkmıştır.
- TiO₂ eklentisi ile NO_x emisyonlarının, saf dizele göre daha yüksek çıktığı görülmüştür. En yüksek NO_x değerleri, 75 ppm TiO₂ yakıtta saf dizele kıyasla ortalama %11,44 daha yüksek çıkmıştır.

Elde edilen verilere göre dizel yakıtla çalışan motorlarda TiO₂ nanopartiküllerinin kullanımının her iki deneysel çalışmada motor performansına, olumlu anlamda etki ettiği gözlemlenmiştir. Emisyonlar konusunda ise TiO₂ nanopartiküllerinin NO_x ve CO₂ emisyonlarını arttırması nedeniyle kullanımı konusunda olumsuz bir durum oluşturmuştur. Özellikle silindir içi sıcaklıklarının yüksek olması bu emisyonların oluşmasına neden olarak gösterilebilir ve bu sıcaklıkların düşürülmesi konusunda çalışmalara ihtiyaç vardır. Bu konuda emiş havasının giriş sıcaklıklarının düşürülmesi veya motor soğutma sistemlerinin geliştirilmesi gibi çözümlerle deneysel çalışmaların yeniden yapılması gerekmektedir. Nanopartikül boyutlarında veya miktarlarında değişiklik yapılarak motorun uzun süreli çalışma durumları araştırılmalıdır. Ayrıca nanopartiküllerin yakıt karışımlarında aglomerasyonu önleme ve bu durumu uzun süreli muhafaza etme noktasında çalışmalara ihtiyaç vardır.

KAYNAKLAR

1. Örs, I., Sarıkoç, S., Atabani, A.E., Ünalın, S., and Akansu, S.O. (2018). The effects on performance, combustion and emission characteristics of DICl engine fuelled with TiO₂ nanoparticles addition in diesel/biodiesel/n-butanol blends. *Fuel*, 234, 177-188.
2. Ghanati, S.G., Doğan, B., and Yeşilyurt, M.K. (2023). The effects of the usage of silicon dioxide (SiO₂) and titanium dioxide (TiO₂) as nano-sized fuel additives on the engine characteristics in diesel engines: a review. *Biofuels*, 15 (2), 229-243.
3. Alex, Y., Earnest, J., Raghavan, A., George Roy, R., and Koshy, C.P. (2022). Study of engine performance and emission characteristics of diesel engine using cerium oxide nanoparticles blended orange peel oil methyl ester. *Energy Nexus*, 8, 100-112.
4. Jit Sarma, C., Sharma, P., Bora, B.J., Bora, D.K., Senthilkumar, N., Balakrishnan, D., et al. (2023). Improving the combustion and emission performance of a diesel engine powered with mahua biodiesel and TiO₂ nanoparticles additive. *Alexandria Engineering Journal*, 72, 387-398.
5. Praveen, A., Lakshmi Narayana Rao, G., and Balakrishna, B. (2018). Performance and emission characteristics of a diesel engine using Calophyllum Inophyllum biodiesel blends with TiO₂ nanoadditives and EGR. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27 (4), 731-738.
6. Agarwal, A.K. (2007). Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33 (3), 233-271.
7. Celik, M., Bayindirli, C., and İlhak, M.İ. (2022). Investigation of the Performance and Emissions of an Engine Operated with CEO₂ Nano Additive Doped Biodiesel. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 6 (2), 113-119.
8. D'Silva, R., Binu, K.G., and Bhat, T. (2015). Performance and Emission Characteristics of a C.I. Engine Fuelled with Diesel and TiO₂ Nanoparticles as Fuel Additive. *Mater Today: Proceedings*, 2 (4), 3728-3735.
9. Vigneswaran, R., Balasubramanian, D., and Sastha, B.D.S. (2021). Performance, emission and combustion characteristics of unmodified diesel engine with titanium dioxide (TiO₂) nano particle along with water-in-diesel emulsion fuel. *Fuel*, 285, 119-132.
10. Aksoy, F., Akay, F., Ayhan Baydır, Ş., Solmaz, H., Yılmaz, E., Uyumaz, A., et al. (2019). An Experimental Investigation on The Effects of Waste Olive Oil Biodiesel on Combustion, Engine Performance and Exhaust Emissions. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 8 (3), 103-116.
11. Senthil kumar, J., Ramesh Bapu, B.R., and Gugan, R. (2020). Emission examination on nanoparticle blended diesel in constant speed diesel engine. *Petroleum Science and Technology*, 38 (2), 98-105.

12. Sungur, B., Topaloglu, B., and Ozcan, H. (2016). Effects of nanoparticle additives to diesel on the combustion performance and emissions of a flame tube boiler. *Energy*, 113, 44-51.
13. Beerge, R. and Devarmani, S. (2024). *Diesel-Powered Engine and Agriculture*. Dharwad: IntechOpen, 15-22.
14. Guzzella, L. and Amstutz, A. (1998). Control of diesel engines. *IEEE Control Systems Magazine*, 18 (5), 53-71.
15. Aktaş, F. (2021). *Bir Dizel Motorda Çift Yakıt Olarak Propan-Dizel Kullanımının Yanma Rejimine, Motor Performansına Ve Emisyon Değerlerine Olan Etkilerinin Sayısal Olarak İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
16. Kaya, T. (2024). *Piroliz Yağı/Nano Parçacık (B₂O₃) Karışımlarının Dizel Motor Performans ve Emisyonlarına Etkilerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.
17. Heywood, J.B. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals* (2nd Edition). New York: McGraw-Hill Education, 45-48.
18. Benson, R.S. and Whitehouse, N.D. (1979). A Detailed Introduction to the Thermodynamics of Spark and Compression Ignition Engines, Their Design and Development. *Internal Combustion Engines*, 5, 97-138.
19. Challen, B.J. and Baranescu, R.A. (1999). *Diesel engine reference book* (Second Edition). Oxford: Butterworth-Heinemann, 22-24.
20. Demirtaş, G. (2023). *Biyodizel n-Oktanöl Yakıt Karışımına Nanopartikül İlavesinin Motor Performansı Ve Yanma Üzerine Etkisinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
21. Kannan, K. and Udayakumar, M. (2009). Modeling of Nitric Oxide Formation in Single Cylinder Direct Injection Diesel Engine Using Diesel-Water Emulsion. *American Journal of Applied Sciences*, 6 (7), 1313-1320.
22. Ekin, F. (2024). *Investigation Of The Effects Of Alternative Fuel Use On Performance And Emissions In A Compression Ignition (CI) Diesel Engine*, Ph.D. Thesis, Istanbul Technical University Naval Architecture and Marine Engineering, İstanbul.
23. Gupta, H.N. (2006). *Fundamentals Of Internal Combustion Engines*. New Delhi: Prentice-Hall Of India, 114-117.
24. Balogh, J.M. and Jámor, A. (2017). Determinants of CO₂ Emission: A Global Evidence. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 7 (5), 217-226.
25. Rangabashiam, D., Rathinam, S., Subbiah, G., j. b., S., and s, S.B. (2020). Emission behaviour studies on the cause of ZnO nanoparticle inclusion in neat biodiesel. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42 (16), 1989-1996.

26. Soudagar, M.E.M., Shelare, S., Marghade, D., Belkhode, P., Nur-E-Alam, M., Kiong, T.S., et al. (2024). Optimizing IC engine efficiency: A comprehensive review on biodiesel, nanofluid, and the role of artificial intelligence and machine learning. *Energy Conversion and Management*, 307, 118-161.
27. Ampah, J.D., Yusuf, A.A., Agyekum, E.B., Afrane, S., Jin, C., Liu, H., et al. (2022). Progress and Recent Trends in the Application of Nanoparticles as Low Carbon Fuel Additives—A State of the Art Review. *Nanomaterials*, 12 (9), 1515-1574.
28. Anbarsooz, M. (2023). Combustion characteristics of nanofuels: A comprehensive review on diesel/biodiesel-based nanofuels. *Fuel*, 337, 126-144.
29. Khond, V.W. and Kriplani, V.M. (2016). Effect of nanofluid additives on performances and emissions of emulsified diesel and biodiesel fueled stationary CI engine: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1338-1348.
30. Fayyazbakhsh, A. and Pirouzfard, V. (2017). Comprehensive overview on diesel additives to reduce emissions, enhance fuel properties and improve engine performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 891-901.
31. Nanthagopal, K., Kishna, R.S., Atabani, A.E., Al-Muhtaseb, A.H., Kumar, G., and 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, 112-161.
32. Kumar, A. and Subudhi, S. (2019). Preparation, characterization and heat transfer analysis of nanofluids used for engine cooling. *Applied Thermal Engineering*, 160, 1-9.
33. Soudagar, M.E.M., Nik-Ghazali, N.N., Abul Kalam, M., Badruddin, I.A., Banapurmath, N.R., and 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.
34. Tuan Hoang, A., Xuan Le, M., Nižetić, S., Huang, Z., Ağbulut, Ü., Veza, I., et al. (2022). Understanding behaviors of compression ignition engine running on metal nanoparticle additives-included fuels: A control comparison between biodiesel and diesel fuel. *Fuel*, 326, 124-169.
35. Gad, M.S., Ağbulut, Ü., Afzal, A., Panchal, H., Jayaraj, S., Qasem, N.A.A., et al. (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, 8-23.
36. Pereira, J., Moita, A., and Moreira, A. (2023). Noble Nanofluids and Their Hybrids for Heat Transfer Enrichment: A Review and Future Prospects Coverage. *Applied Sciences*, 13 (17), 9568-9607.
37. Wang, Y., Dong, S., Li, X., Hong, C., and Zhang, X. (2022). Synthesis, properties, and multifarious applications of SiC nanoparticles: A review. *Ceramics International*, 48 (7), 8882–8913.

38. Wong, T. Lo, Vallés, C., Nasser, A., and Abeykoon, C. (2023). Effects of boron-nitride-based nanomaterials on the thermal properties of composite organic phase change materials: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 187, 1-23.
39. Yadav, N., Srivastava, P.K., and Varma, M. (2021). Recent advances in catalytic combustion of AP-based composite solid propellants. *Defence Technology*, 17 (3), 1013-1031.
40. Mishra, K., Devi, N., Siwal, S.S., and Thakur, V.K. (2023). Insight perspective on the synthesis and morphological role of the noble and non-noble metal-based electrocatalyst in fuel cell application. *Applied Catalysis B: Environmental*, 334, 122-173.
41. Rashidi, S., Karimi, N., Sunden, B., Kim, K.C., Olabi, A.G., and Mahian, O. (2022). Progress and challenges on the thermal management of electrochemical energy conversion and storage technologies: Fuel cells, electrolyzers, and supercapacitors. *Progress in Energy and Combustion Science*, 88, 100-150.
42. Soukht Saraee, H., Jafarmadar, S., Taghavifar, H., and Ashrafi, S.J. (2015). Reduction of emissions and fuel consumption in a compression ignition engine using nanoparticles. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12 (7), 2245-2252.
43. Yang, Z., Huang, H., and Lin, F. (2022). Sustainable Electric Vehicle Batteries for a Sustainable World: Perspectives on Battery Cathodes, Environment, Supply Chain, Manufacturing, Life Cycle, and Policy. *Advanced Energy Materials*, 12 (26), 220-241.
44. Yang, L., Liu, Q., Han, R., Fu, K., Su, Y., Zheng, Y., et al. (2022). Confinement and synergy effect of bimetallic Pt-Mn nanoparticles encapsulated in ZSM-5 zeolite with superior performance for acetone catalytic oxidation. *Applied Catalysis B: Environmental*, 309, 1-13.
45. Rathinavel, S., Priyadarshini, K., and Panda, D. (2021). A review on carbon nanotube: An overview of synthesis, properties, functionalization, characterization, and the application. *Materials Science and Engineering: B*, 268, 95-123.
46. Kałużny, J., Merkisz-Guranowska, A., Giersig, M., and Kempa, K. (2017). Lubricating Performance Of Carbon Nanotubes In Internal Combustion Engines-Engine Test Results For Cnt Enriched Oil. *International Journal of Automotive Technology*, 18 (6), 1047-1059.
47. Vellaiyan, S. (2019). Enhancement in combustion, performance, and emission characteristics of a diesel engine fueled with diesel, biodiesel, and its blends by using nanoadditive. *Environmental Science and Pollution Research*, 26 (10), 9561-9573.
48. Hosseini, S.H., Taghizadeh-Alisaraei, A., Ghobadian, B., and Abbaszadeh-Mayvan, A. (2017). Performance and emission characteristics of a CI engine fuelled with carbon nanotubes and diesel-biodiesel blends. *Renewable Energy*, 111, 201-213.
49. Zhang, Z., Lu, Y., Wang, Y., Yu, X., Smallbone, A., Dong, C., et al. (2019). Comparative study of using multi-wall carbon nanotube and two different sizes of cerium oxide nanopowders as fuel additives under various diesel engine conditions. *Fuel*, 256, 1-16.

50. Bai, Y., Yue, H., Zhang, R., Qian, W., Zhang, Z., and Wei, F. (2021). Mechanical Behavior of Single and Bundled Defect-Free Carbon Nanotubes. *Accounts of Materials Research*, 2 (11), 998-1009.
51. Chen, Y., Jha, S., Raut, A., Zhang, W., and Liang, H. (2020). Performance Characteristics of Lubricants in Electric and Hybrid Vehicles: A Review of Current and Future Needs. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 6, 57-76.
52. Muhamad Azim, M.K., Arifutzzaman, A., Saidur, R., Khandaker, M.U., and Bradley, D.A. (2022). Recent progress in emerging hybrid nanomaterials towards the energy storage and heat transfer applications: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 360, 443-478.
53. Maio, A., Pibiri, I., Morreale, M., La Mantia, F.P., and Scaffaro, R. (2021). An overview of functionalized graphene nanomaterials for advanced applications. *Nanomaterials*, 11 (7), 17-49.
54. Yetter, R.A., Risha, G.A., and Son, S.F. (2009). Metal particle combustion and nanotechnology. *Proceedings of the Combustion Institute*, 32 (2), 1819-1838.
55. Bhagwat, V.A., Pawar, C., and Banapurmath, N.R. (2015). Graphene Nanoparticle-Biodiesel Blended Diesel Engine. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4 (2), 75-78.
56. Kharabati, S. and Saedodin, S. (2024). A systematic review of thermal management techniques for electric vehicle batteries. *Journal of Energy Storage*, 75, 109-177.
57. Mitra, A., Kumar, R., Singh, D.K., and Said, Z. (2022). Advances in the improvement of thermal-conductivity of phase change material-based lithium-ion battery thermal management systems: An updated review. *Journal of Energy Storage*, 53, 195-215.
58. Kumar, L.H., Kazi, S.N., Masjuki, H.H., and Zubir, M.N.M. (2022). A review of recent advances in green nanofluids and their application in thermal systems. *Chemical Engineering Journal*, 429, 132-150.
59. Chuhadiya, S., Himanshu, Suthar, D., Patel, S.L., and Dhaka, M.S. (2021). Metal organic frameworks as hybrid porous materials for energy storage and conversion devices: A review. *Coordination Chemistry Reviews*, 446, 214-239.
60. Zhang, Z., Zheng, Y., Qian, L., Luo, D., Dou, H., Wen, G., et al. (2022). Emerging Trends in Sustainable CO₂-Management Materials. *Advanced Materials*, 34 (29), 220-266.
61. Ogunkunle, O. and Ahmed, N.A. (2021). Overview of biodiesel combustion in mitigating the adverse impacts of engine emissions on the sustainable human-environment scenario. *Sustainability*, 13 (10), 54-82.
62. Ahmad, S., Ali, K., Rizwan, M., and Ashraf, M. (2021). Heat and mass transfer attributes of copper-aluminum oxide hybrid nanoparticles flow through a porous medium. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25, 1-11.

63. Wong, W.P., Kagalkar, A., Patel, R., Patel, P., Dharaskar, S., Walvekar, R., et al. (2023). Nano-enhanced phase change materials for thermal energy storage: A comprehensive review of recent advancements, applications, and future challenges. *Journal of Energy Storage*, 74, 109-138.
64. Xu, H.J., Xing, Z.B., Wang, F.Q., and Cheng, Z.M. (2019). Review on heat conduction, heat convection, thermal radiation and phase change heat transfer of nanofluids in porous media: Fundamentals and applications. *Chemical Engineering Science*, 195, 462-483.
65. Balitskii, A., Kindrachuk, M., Volchenko, D., Abramek, K.F., Balitskii, O., Skrypnyk, V., et al. (2022). Hydrogen Containing Nanofluids in the Spark Engine's Cylinder Head Cooling System. *Energies*, 15 (1), 59-79.
66. Pondicherry, R., Besch, M.C., Thiruvengadam, A., and Carder, D. (2021). A Vehicle Activity-based Windowing approach to evaluate real-world NOx emissions from Modern Heavy-duty Diesel Trucks. *Atmospheric Environment*, 247, 118-129.
67. Kılıç, A. (2024). *Dizel/Nano Parçacık (MgO) Karışımlarının Dizel Motor Parametrelerine Etkilerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.
68. Kałużny, J., Waligórski, M., Szymański, G.M., Merkisz, J., Różański, J., Nowicki, M., et al. (2020). Reducing friction and engine vibrations with trace amounts of carbon nanotubes in the lubricating oil. *Tribology International*, 151, 484-496.
69. Mariani, A., Minale, M., and Unich, A. (2021). Use of biogas containing CH₄, H₂ and CO₂ in controlled auto-ignition engines to reduce NOx emissions. *Fuel*, 301, 120-138.
70. Singh, P., Sharma, S., Almohammadi, B.A., Khandelwal, B., and Kumar, S. (2020). Applicability of aromatic selection towards newer formulated fuels for regulated and unregulated emissions reduction in CI engine. *Fuel Processing Technology*, 209, 1-11.
71. Mahian, O., Bellos, E., Markides, C.N., Taylor, R.A., Alagumalai, A., Yang, L., et al. (2021). Recent advances in using nanofluids in renewable energy systems and the environmental implications of their uptake. *Nano Energ*, 86, 69-97.
72. Küçükosman, R., Yontar, A.A., and Ocakoglu, K. (2022). Nanoparticle additive fuels: Atomization, combustion and fuel characteristics. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 165, 105-180.
73. Ağbulut, Ü. (2022). Understanding the role of nanoparticle size on energy, exergy, thermoeconomic, exergoeconomic, and sustainability analyses of an IC engine: A thermodynamic approach. *Fuel Processing Technology*, 225, 60-86.
74. Vinayagam, N.K., Hoang, A.T., Solomon, J.M., Subramaniam, M., Balasubramanian, D., El-Seesy, A.I., et al. (2021). Smart control strategy for effective hydrocarbon and carbon monoxide emission reduction on a conventional diesel engine using the pooled impact of pre-and post-combustion techniques. *Journal of Cleaner Production*, 306, 310-323.

75. Silva, L.S., Silva, J.A., Henríquez, J.R., and de Lira Junior, J.C. (2023). Numerical Analysis of Effects of Engine Downsizing and Turbocharging on the Parameters of Performance and Emissions of an Internal Combustion Engine. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48 (3), 2795-2805.
76. Chakraborty, S. and Panigrahi, P.K. (2020). Stability of nanofluid: A review. *Applied Thermal Engineering*, 174, 259-285.
77. Yasmin, H., Giwa, S.O., Noor, S., and Aybar, H. (2023). Reproduction of Nanofluid Synthesis, Thermal Properties and Experiments in Engineering: A Research Paradigm Shift. *Energies*, 16 (3), 11-43.
78. Esmaeilzadeh, P., Ghazanfari, M.H., and Molaei Dehkordi, A. (2022). Tuning the Wetting Properties of SiO₂-Based Nanofluids to Create Durable Surfaces with Special Wettability for Self-Cleaning, Anti-Fouling, and Oil-Water Separation. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 61 (23), 8005-8019.
79. El-Seesy, A.I. and Hassan, H. (2019). Combustion characteristics of a diesel engine fueled by biodiesel-diesel-n-butanol blend and titanium oxide additives. *Energy Procedia*, 162, 48-56.
80. Simhadri, K., Rao, P.S., and Paswan, M. (2024). Improving the combustion and emission performance of a diesel engine with TiO₂ nanoparticle blended Mahua biodiesel at different injection pressures. *International Journal of Thermofluids*, 21, 100-115.
81. Bello, Y.H., Ookawara, S.A., Ahmed, M.A., El-Khouly, M.A., Elmehasseb, I.M., El-Shafai, N.M., et al. (2020). Investigating the engine performance, emissions and soot characteristics of CI engine fueled with diesel fuel loaded with graphene oxide-titanium dioxide nanocomposites. *Fuel*, 269, 117-130.
82. Sunil, S., Chandra Prasad, B.S., Kakkeri, S., and Suresha (2021). Studies on titanium oxide nanoparticles as fuel additive for improving performance and combustion parameters of CI engine fueled with biodiesel blends. *Materials Today: Proceedings*, 44 (1), 489-499.
83. Nanthagopal, K., Ashok, B., Tamilarasu, A., Johny, A., and Mohan, A. (2017). Influence on the effect of zinc oxide and titanium dioxide nanoparticles as an additive with Calophyllum inophyllum methyl ester in a CI engine. *Energy Conversion and Management*, 146, 8-19.
84. Albayrak Çeper, B., Yıldız, M., Akansu, S.O., and Kahraman, N. (2017). Performance and emission characteristics of an IC engine under SI, SI-CAI and CAI combustion modes. *Energy*, 136, 72-79.
85. Ghanbari, M., Mozafari-Vanani, L., Dehghani-Soufi, M., and Jahanbakhshi, A. (2021). Effect of alumina nanoparticles as additive with diesel–biodiesel blends on performance and emission characteristic of a six-cylinder diesel engine using response surface methodology (RSM). *Energy Conversion and Management: X*, 11, 91-100.

86. Krupakaran, R.L., Hariprasad, T., Gopalakrishna, A., and Babu, P. (2016). The performance and exhaust emissions investigation of a diesel engine using γ -Al₂O₃ nanoparticle additives to biodiesel. *Carbon Management*, 7 (3-4), 233-241.
87. Ghanbari, D., Shirkavand Hadavand, B., and Pishvaei, M. (2021). Morphology and viscoelastic properties of UV cured-polyurethane acrylate/silicon carbide nanocomposites. *Iranian Polymer Journal*, 30 (1), 35-45.
88. Saxena, V., Kumar, N., and Saxena, V.K. (2017). A comprehensive review on combustion and stability aspects of metal nanoparticles and its additive effect on diesel and biodiesel fuelled C.I. engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 563-588.
89. Anchupogu, P., Rao, L.N., and Banavathu, B. (2018). Effect of alumina nano additives into biodiesel-diesel blends on the combustion performance and emission characteristics of a diesel engine with exhaust gas recirculation. *Environmental Science and Pollution Research*, 25 (23), 23294-23306.
90. Mendonca, S., Bhat, T., Prabhu, R., and Dsouza, R. (2021). Experimental Analysis of Influence of Injection Pressure on Compression Ignition Engine with Biodiesel and Nanoparticles Blend. *Materials Science and Engineering*, 1013, 12-22.
91. Mohamed, M.S.E., Al -Dawody, F. (2019). Effect of Nano Fuel Additives on the Characteristics of Diesel Engine Fed with Biodiesel Blended Fuel. *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, 27 (4), 124-141.
92. Jafarmadar, S. and Amini Niaki, S.R. (2022). Experimental exergy analyses in a DI diesel engine fuelled with a mixture of diesel fuel and TiO₂ nanoparticle. *Environmental Progress and Sustainable Energy*. 41 (1), 1-13.
93. Jalilpour, B., Jafarmadar, S., Rashidi, M.M., Ganji, D.D., Rahime, R., and Shotorban, A.B. (2018). MHD non-orthogonal stagnation point flow of a nanofluid towards a stretching surface in the presence of thermal radiation. *Ain Shams Engineering Journal*, 9 (4), 1671-1681.
94. Amirabedia, M., Jafarmadar, S., Khalilarya, S., and Kheyrollahi, J. (2019). Experimental comparison the effect of Mn₂O₃ and Co₃O₄ nano additives on the performance and emission of Si gasoline fueled with mixture of ethanol and gasoline. *International Journal of Engineering*, 32 (5), 769-776.
95. Fangsuwannarak, K. and Triratanasirichai, K. (2013). Effect of metalloid compound and bio-solution additives on biodiesel engine performance and exhaust emissions. *American Journal of Applied Sciences*, 10 (10), 1201-1213.
96. Rezaei, R.A. (2023). Experimental Investigation on the Effect of TiO₂ Nanoparticles Emulsion in Water on Emissions and Performance Characteristics of DI Diesel Engine. *Power Engineering and Engineering Thermophysics*, 2 (1), 1-14.
97. Ranjan, A., Dawn, S.S., Jayaprabakar, J., Nirmala, N., Saikiran, K., and Sai Sriram, S. (2018). Experimental investigation on effect of MgO nanoparticles on cold flow properties, performance, emission and combustion characteristics of waste cooking oil biodiesel. *Fuel*, 220, 780-791.

98. Razzaq, L., Abbas, M.M., Waseem, A., Jauhar, T.A., Fayaz, H., Kalam, M.A., et al. (2023). Influence of varying concentrations of TiO₂ nanoparticles and engine speed on the performance and emissions of diesel engine operated on waste cooking oil biodiesel blends using response surface methodology. *Helicon*, 9 (7), 58-74.
99. Najafi, G. (2018). Diesel engine combustion characteristics using nanoparticles in biodiesel-diesel blends. *Fuel*, 212, 668-678.







Gazili olmak ayrıcalıktır