

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



DİZEL YAKITINA BİZMUT OKSİT NANOPARTİKÜL
KATKISININ MOTOR PARAMETRELERİ ÜZERİNDEKİ
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMED TURAL

TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Alaattin Osman EMİROĞLU

BOLU, TEMMUZ - 2023

KABUL VE ONAY SAYFASI

Muhammed TURAL tarafından hazırlanan “**DİZEL YAKITINA BİZMUT OKSİT NANOPARTİKÜL KATKISININ MOTOR PARAMETRELERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ**” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliğiyle kabul edilmiştir. 19/07/2023

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Doç. Dr. Alaattin Osman EMİROĞLU
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Prof. Dr. Suat SARIDEMİR
Düzce Üniversitesi

.....

Üye
Doç. Dr. Mehmet ŞEN
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim 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.

Teze ilişkin Turnitin adlı programında enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı %30'u geçmemektedir.

.....

MUHAMMED TURAL

ÖZET

**DİZEL YAKITINA BİZMUT OKSİT NANOPARTİKÜL KATKISININ
MOTOR PARAMETRELERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ**
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MUHAMMED TURAL
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. ALAATTİN OSMAN EMİROĞLU)

BOLU, TEMMUZ - 2023

XIV + 66

Fosil yakıtların yanması sonucu açığa çıkan birçok zararlı emisyon vardır. Bu emisyonların varlığı, insan sağlığını ve çevreyi olumsuz etkilemektedir. Geçmişten günümüze bu zararlı emisyonları azaltmak adına türlü çalışmalar yapılmıştır. Günümüzde egzoz emisyonlarını azaltmak, motor performansını arttırmak ve yakıt özelliklerini iyileştirmek amacıyla alternatif yakıtlar kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada alternatif yakıtlar, dizel yakıt içerisine 50 ppm, 100 ppm ve 150 ppm bizmut oksit nanopartikül katkısı ile elde edilmiştir. Elde edilen alternatif yakıtların yakıt özelliklerine, yanma parametrelerine, motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışma 1500, 2000 ve 2500 dev/dak'da ve 10, 15, 20 ve 25 Nm motor yüklerinde gerçekleştirilmiştir. Bizmut oksit nanopartikülün kullanımıyla birlikte setan sayısı, ısıl değer ve viskozite artmış, ancak yoğunluk değerleri değişmemiştir. Nanopartikül katkılı yakıt kullanımı tutuşma gecikmesini genellikle arttırmıştır. Düşük yüklerde nanopartikül katkılı yakıtın yanma süresi artarken, yüksek yüklerde dizel yakıtın yanma süresi daha fazla olmuştur. Dizel yakıtın egzoz sıcaklığının yüksek yüklerde nanopartikül katkılı yakıtla oranla daha fazla olduğu gözlenmiştir. Dizel yakıtta nanopartikül katkısı özgül yakıt tüketimini azaltırken, ısı verimi ise arttırmıştır. Nanopartikül katkılı yakıtların karbondioksit ve is emisyonları dizel yakıtla oranla genellikle daha yüksek çıkmıştır. Azot oksit emisyonlarının ise nanopartikül katkısı ile azaldığı görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER: Nanopartikül, Egzoz Emisyonu, Dizel Yakıt, Motor Performansı, Bizmut Oksit

ABSTRACT

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF BISMUTH OXIDE
NANOPARTICLE ADDITION TO DIESEL FUEL ON ENGINE
PARAMETERS
MSC THESIS
MUHAMMED TURAL
BOLU ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. ALAATTIN OSMAN EMIROGLU)**

BOLU, JULY 2023

XIV + 66

There are many harmful emissions resulting from the combustion of fossil fuels. The presence of these emissions adversely affects human health and the environment. From past to present, various studies have been carried out to reduce these harmful emissions. Nowadays, alternative fuels are used to reduce exhaust emissions, increase engine performance and improve fuel properties. In this study, alternative fuels were obtained by adding 50 ppm, 100 ppm and 150 ppm bismuth oxide nanoparticles into diesel fuel. The effects of the obtained alternative fuels on fuel properties, combustion parameters, engine performance and exhaust emissions were investigated. Experimental study was carried out at 1500, 2000 and 2500 engine speeds and at 10, 15, 20 and 25 Nm engine loads. Cetane number, calorific value and viscosity increased with the use of bismuth oxide nanoparticle, but the density values did not change. The use of fuel with nanoparticles generally increased the ignition delay. While the combustion time of nanoparticle added fuel increased at low loads, the combustion time of diesel fuel was longer at high loads. It has been observed that the exhaust temperature of diesel fuel is higher than the fuel with nanoparticle additives at high loads. The nanoparticle addition to the diesel fuel decreased the specific fuel consumption and increased the thermal efficiency. Carbon dioxide and smoke emissions of fuels with nanoparticle additives were generally higher than diesel fuel. On the other hand, nitrogen oxide emissions were found to decrease with nanoparticle additives.

KEYWORDS: Nanoparticle, Exhaust Emissions, Diesel Fuel, Engine Performance, Bismuth Oxide

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL VE ONAY SAYFASI	iii
ETİK BEYAN.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
TABLO LİSTESİ	x
FOTOĞRAF LİSTESİ	xi
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xii
TEŞEKKÜR	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
3. DİZEL YAKIT ÖZELLİKLERİ	10
3.1 Setan Sayısı.....	10
3.2 Viskozite	11
3.3 Yoğunluk	12
3.4 Parlama ve Alevlenme Noktası	12
3.5 Isıl Değer	12
3.6 Soğuk Akış Özellikleri	13
3.7 Özgül Ağırlık.....	13
3.8 Uçuculuk.....	14
3.9 Kükürt ve Kül Miktarı	14
4. DİZEL MOTORLARDA YANMA VE EMİSYON.....	15
4.1 Dizel Motorlarda Yanma İşlemi	16
4.1.1 Tutuşma Gecikmesi	18
4.1.2 Kontrolsüz Yanma	18
4.1.3 Kontrollü Yanma	18
4.1.4 Art Yanma	19
4.2 Dizel Motor Emisyonları	20
4.2.1 Hidrokarbon (HC) Emisyonu	23
4.2.2 Karbonmonoksit (CO) Emisyonu.....	23
4.2.3 Azotoksit (NO _x) Emisyonu.....	24
4.2.4 Partikül Madde (PM) Emisyonu.....	25
4.2.5 Kükürt (SO _x) Emisyonu	26
4.2.6 Karbondioksit (CO ₂) Emisyonu	27
5. MATERYAL VE YÖNTEM	28
5.1 Nanopartikül Katkılı Yakıtların Hazırlanması.....	28

5.1.1 Bi ₂ O ₃ Katkı Maddesi	28
5.1.2 Hassas Terazı	29
5.1.3 Manyetik Karıştırıcı	31
5.1.4 Ultrasonik Karıştırıcı	31
5.2 Deney Düzeneği ve Deney Malzemeleri	33
5.2.1 Test Motoru	35
5.2.2 Tork Ölçümü	36
5.2.3 Silindir Basıncı Ölçümü	36
5.2.4 Hat Basıncı Ölçümü	37
5.2.5 Enkoder	37
5.2.6 Emisyon Ölçümü	38
5.2.7 Veri Analizi	39
5.3 Yöntem	39
5.4 Hesaplamalarda Kullanılan Denklemler	39
5.4.1 Efektif Güç	39
5.4.2 Özgöl Yakıt Tüketimi	40
5.4.3 Isıl Verim	40
5.4.4 Isı Salınım Oranı	41
6. BULGULAR VE TARTIşMA	42
6.1 Yanma Parametreleri	42
6.2 Motor Performans Sonuçları	54
6.3 Egzoz Emisyon Sonuçları	56
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	60
8. KAYNAKLAR	63

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Setan Cetveli.....	11
Şekil 4.1. Dizel motorun ateşleme sistemi elemanları.....	15
Şekil 4.2. Dört zamanlı dizel motorun çalışma sistemi	16
Şekil 4.3. Dizel yanma aşamaları.....	17
Şekil 4.4. Dizel motorlarda yanma süreci.....	19
Şekil 4.5. Dizel yakıt damlasında meydana gelen emisyonlar.....	21
Şekil 4.6. Partikül madde emisyonu yapısı.....	26
Şekil 5.1. Motor test düzeneğinin şematik görünümü	34
Şekil 6.1. Yakıtların tutuşma gecikmesi verileri.....	44
Şekil 6.2. Yakıtların yanma süresi verileri.....	45
Şekil 6.3. Yakıtların egzoz sıcaklığı verileri.....	47
Şekil 6.4. Yakıtların 1500 dev/dak'daki silindir basınç grafikleri.....	48
Şekil 6.5. Yakıtların 2000 dev/dak'daki silindir basınç grafikleri.....	49
Şekil 6.6. Yakıtların 2500 dev/dak'daki silindir basınç grafikleri.....	50
Şekil 6.7. Yakıtların 1500 dev/dak'daki ısı salınım oranı grafikleri.....	51
Şekil 6.8. Yakıtların 2000 dev/dak'daki ısı salınım oranı grafikleri.....	52
Şekil 6.9. Yakıtların 2500 dev/dak'daki ısı salınım oranı grafikleri.....	53
Şekil 6.10. Yakıtların özgül yakıt tüketimi verileri	54
Şekil 6.11. Yakıtların ısı verim verileri	55
Şekil 6.12. Yakıtların NO _x emisyon verileri.....	56
Şekil 6.13. Yakıtların CO ₂ emisyon verileri	57
Şekil 6.14. Yakıtların is emisyon verileri	58

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1. Yakıt türüne göre motorlu kara taşıtı sayısı	20
Tablo 4.2. Binek otomobiller için Euro Standartları	22
Tablo 5.1. Bizmut oksit nanopartikülünün özellikleri.....	29
Tablo 5.2. Test yakıtlarının isimleri	33
Tablo 5.3. Test yakıtlarının özellikleri	33
Tablo 5.4. Test motorunun özellikleri	35
Tablo 6.1. Yakıtların püskürtme ve yanma verileri.....	43
Tablo 6.2. Yakıtların egzoz sıcaklık, ısı salınım ve basınç verileri.....	46



FOTOĞRAF LİSTESİ

Sayfa

Fotoğraf 5.1. Bizmut oksit nanopartikülü	28
Fotoğraf 5.2. Ohaus-Pioneer hassas terazi	29
Fotoğraf 5.3. Saf dizel yakıt.....	30
Fotoğraf 5.4. Hazırlanmış bizmut oksit nanopartikülü	30
Fotoğraf 5.5. Heidolph manyetik karıştırıcı.....	31
Fotoğraf 5.6. Isolab ultrasonik banyo	32
Fotoğraf 5.7. Nanopartikül katkılı dizel test yakıtı	32
Fotoğraf 5.8. Motor test düzeneği.....	34
Fotoğraf 5.9. Test motoru	35
Fotoğraf 5.10. Tork ölçüm sistemi.....	36
Fotoğraf 5.11. Silindir basınç sensörü ve yükseltici	36
Fotoğraf 5.12. Hat basınç sensörü ve yükseltici	37
Fotoğraf 5.13. Enkoder	37
Fotoğraf 5.14. Egzoz emisyon ölçüm cihazı.....	38
Fotoğraf 5.15. İş emisyon ölçüm cihazı.....	38
Fotoğraf 5.16. Veri analiz cihazı.....	39

KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

°C	: Santigrat derece
°KMA	: Krank mili açısı
Ag	: Gümüş
Al	: Alüminyum
Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
AÖN	: Alt ölü nokta
Bi₂O₃	: Bizmut Oksit
Bi0	: Saf dizel yakıt
Bi50	: 50 ppm Bi ₂ O ₃ katkılı dizel yakıt
Bi100	: 100 ppm Bi ₂ O ₃ katkılı dizel yakıt
Bi150	: 150 ppm Bi ₂ O ₃ katkılı dizel yakıt
C	: Karbon
CeO₂	: Seryum Oksit
Ce(CH₃CO₂)₃	: Seryum Asetat
CI	: Sıkıştırma ateşlemeli motor
CO	: Karbonmonoksit
CO₂	: Karbondioksit
CTAB	: Setrimonyum Bromür
CuO	: Bakır Oksit
Cu(NO₃)₂	: Bakır Nitrat
H₂O	: Su
H₂SO₄	: Sülfürik Asit
HC	: Hidrokarbon
MgO	: Magnezyum Oksit
Mn	: Mangan
Nm	: Newton metre
NO_x	: Azot Oksit
O₂	: Oksijen
PM	: Partikül Madde
ppm	: Milyonda bir birim
S	: Kükürt
SI	: Buji ateşlemeli motor

Si	: Silisyum
SiO₂	: Silisyum Dioksit
SO₂	: Kükürt Dioksit
Ti	: Titanyum
TiO₂	: Titanyum Dioksit
ÜÖN	: Üst ölü nokta
Zn	: Çinko
ZnO	: Çinko Oksit



TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca engin bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, her türlü imkanı sunan, desteğini hiç bir zaman esirgemeyen saygıdeğer ve kıymetli tez danışmanım Doç. Dr. Alaattin Osman EMİROĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Beni yetiştiren ve bu günlere getiren, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, koşulsuz şartsız her daim yanımda olan, tez çalışmam süresince bana inanan, güvenen ve her türlü fedakarlığı gösteren sevgili aileme en içten dileklerimle teşekkür ederim.



1. GİRİŞ

Günümüzde gelişen teknoloji, artan nüfus, sanayileşme ve ulaşım faktörleri sebebi ile enerjiye duyulan ihtiyaç hızla artmaktadır. İhtiyaç duyulan bu enerji fosil kaynaklar ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmektedir. Bu enerjinin ise büyük bir kısmı fosil kaynaklardan (petrol, kömür, doğalgaz vb.) elde edilmektedir. Fosil yakıtlardan elde edilen enerji küresel enerji ihtiyacının %86'sını oluşturup, bu yakıtlar; %36 petrol, %27 gaz, %23 kömür olup geriye kalan yalnızca %14'lük bölümü yenilenebilir enerji kaynakları oluşturur (Abas ve arkadaşları, 2015). Fosil kaynaklı yakıtlar tükenebilir olduğundan ve yenilenebilir olmadığından dolayı zaman içerisinde yok olması kaçınılmazdır.

Nüfusun artması ile birlikte ve enerjiye duyulan ihtiyacın artmasıyla enerji kaynaklarının daha etkili ve daha verimli kullanılması gerekir, hali hazırda bulunan rezervlerin kullanıldığı enerji kaynaklarının içinde bulunduğumuz yüzyıl içerisinde tamamen tükeneceği öngörülmektedir (Uluer ve arkadaşları, 2018). Tükenmenin yanı sıra ulaşım sektörüne baktığımız zaman bu sektörde harcanan enerji geçtiğimiz yıllara nazaran %29 artış göstermektedir. Ulaşım sektöründe kullanılan enerjinin açığa çıkardığı zararlı emisyonlardan olan CO₂ oranı ise %24 artmıştır. Bazı büyük kuruluşlara göre 2100 yılına kadar dünya nüfusunun 17,6 milyar olması tahmin edildiğinden zararlı emisyon miktarındaki artış da kaçınılmazdır (Corlu ve arkadaşları, 2020). Açığa çıkan zararlı emisyonlar yalnızca CO₂ ile sınırlı kalmamaktadır. CO₂ dışında HC, CO ve NO_x gibi emisyonlar da olmakla birlikte, bu emisyonlar hem insan sağlığını olumsuz etkilemekte hem de yaşadığımız doğal çevreye zarar vermektedir. Bu sebeplerden dolayı fosil yakıtlar temiz ve çevreci bir yakıt olarak değerlendirilemez.

Fosil yakıtların tükenmesi, insana ve çevreye verdiği zararlar göz önüne alındığında bu negatif etkilerin önüne geçebilmek ve zararı en aza indirmek için çeşitli çalışmalar yapılmış ve çeşitli çözümler ortaya çıkmıştır. Bu araştırmalar sonucunda bulunan bazı yöntemler ve sistemler araç ekipmanları ve motor üzerinde değişiklik yapmayı gerekli kıldığından dolayı araçlarda kullanımı kısmen pahalı olmakla birlikte performans düşüşüne de sebebiyet vermekteydi. Emisyon azaltmada yardımcı olan bu sistemler gerçekten iyi bir iş çıkarsalar bile fosil yakıtların zamanla tükeneceği gerçeği değişmiyordu. Bundan dolayı son yıllarda çalışmaları hala sürmekte olan alternatif yakıt arayışlarına girildi.

Alternatif yakıt arayışlarında ilk olarak karşımıza çıkan alternatif yakıt biyodizellerdir. Biyodizeller çeşitli hayvansal yağlardan, atık yağlardan ve bitkisel yağlardan elde edilen alternatif bir yakıttır. Biyodizelin özellikleri kullanılan hayvansal yağın kaynağına veya bitkisel yağın türüne göre değişiklik gösterir. Bu özelliklerin değişiklik göstermesi ile birlikte yakıtın özellikleri, emisyon değerleri ve performans değerleri de değişir. Biyodizel yakıtlar da saf dizel yakıtlar gibi araç ekipmanı ve motoru üzerinde herhangi bir değişiklik yapmadan doğrudan veya karışım şeklinde kullanılabilirler. Aynı zamanda biyodizel kullanımı ile birlikte HC, CO ve is emisyonlarında azalmalar sağlanabilir (Özsezen ve Çanakçı, 2008).

Biyodizelin dizele oranla daha yüksek setan sayısı, daha iyi ateşleme performansı, daha yüksek yanma verimine sahip olması ve emisyonlardaki azalma gibi avantajlarının yanı sıra dezavantajları da bulunmaktadır. Biyodizel kullanımının önemli sorunlarından biri düşük sıcaklıklarda akış özelliğinin iyi olmamasıdır. Akış özelliği kısmen kötü olup viskozitesi yüksek olduğundan dolayı yakıtın püskürtülmesi işlemi zorlaşır ve bu da aracın performansında düşüşe sebebiyet verebilir. Bunun yanı sıra her ne kadar HC, CO ve is emisyonlarını azaltma eğilimi gösterse bile içeriğindeki oksijen sebebiyle NO_x emisyonlarında artışa sebebiyet vermektedir (Ma ve arkadaşları, 2021).

Biyodizelin bu dezavantajlarından dolayı araştırmacılar, yeni bir yakıt veya katkı maddesi kullanıp bu dezavantajları gidermeye çalışarak daha verimli bir alternatif yakıt arayışına girdiler. Yapılan birçok araştırmanın sonucunda dizel yakıtı veya alternatif yakıtlara eklenebilecek nanopartiküller adı altında birbirinden farklı içerikteki katkı maddeleri kullanılmaya başlandı.

Gelişen teknoloji ile birlikte birçok farklı alanda kullanılmaya başlanan nanopartiküller, yakıt özelliklerini iyileştirme, motor performansı için gözle görülür bir artış ve yanma sonucu açığa çıkan zararlı emisyonları azaltma konusunda etkili sonuçlar ortaya koyduğu yapılan araştırmalar sonucunda elde edilmiştir.

Nanopartiküllerin kullanımı ile birlikte enerji depolama, katalitik aktivite iyileşmesi, tutuşma gecikmesini azaltması, daha düzgün yanma süreci ve çok küçük toz taneciklerinden oluşması sebebiyle yakıt ile karışımının homojen ve kolay olması önemli avantajlarından. Bunların yanı sıra birçok nanopartikülün yakıtın setan sayısında da iyileşmeler ortaya koyduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca birçok nanopartikülün açığa çıkan zararlı emisyonları azalttığı ve motor performansında iyileşmeler ortaya koyduğu dikkat çekmektedir (Saraee ve arkadaşları, 2017).

Bu çalışmada gün geçtikçe tükenen fosil yakıtlara alternatif bir yakıt geliştirilmesi, çevreye ve insana verdiği zararlardan dolayı fosil yakıt emisyonlarının azaltılması ve motor performansının iyileştirilmesi amacıyla Bi₂O₃ nanopartikülünün 50, 100 ve 150 ppm dozajlarında saf dizel yakıtı katkı maddesi olarak eklenerek bu dezavantajların giderilmesi ve iyileştirmelerin sağlanması amaçlanmıştır.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Dizel, biyodizel, karışım yakıtlar ve son yıllarda sık kullanılan nanopartikül katkılı yakıtların motor performansı, emisyon ve yanma özellikleri üzerinde meydana getirdikleri değişimler ile alakalı yapılmış birçok önemli çalışma bu bölümde bulunmaktadır.

Dhadad ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada Al_2O_3 nanopartikülünü 100 ve 150 ppm dozajında saf dizel yakıtı ilave ederek performans ve emisyon değerlerini incelemişlerdir. Deney sonucunda dozaj miktarı arttıkça özgül yakıt tüketimi ve termal verimde artış olduğu gözlemlenmiştir. Bunların yanı sıra emisyonların hepsinde azalmalar meydana gelmiştir, yalnızca düşük yüklerde HC ve CO emisyonları dizel yakıtı oranla daha fazla çıkmıştır (Dhadad ve arkadaşları, 2017).

Aynı nanopartikül olan Al_2O_3 üzerinde bu kez Karagöz çalışma yapmıştır. Karagöz farklı olarak %90 dizel yakıtı %10 metanol ilave edip ardından 50, 100 ve 200 ppm değerlerinde Al_2O_3 nano katkısı kullanmıştır. Çalışma sonucunda setan sayısının arttığını, alt ısı değerini ise azaldığını gözlemlemiştir. Karışımdaki nanopartikülün oksijen içeriği sayesinde ise yanma veriminin iyileştiğini gözlemlemiştir. Farklı olarak deneyde titreşim ve gürültü değerleri de incelenmiştir. Test yakıtına nanopartikül katkısının titreşim ve gürültüyü bir miktar arttırdığını ve katkı maddesi miktarı arttıkça da titreşim ve gürültü miktarının da arttığını gözlemlemiştir (Karagöz, 2020).

Gümüş ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada saf dizel yakıtı Al_2O_3 ve CuO farklı iki nanopartikül katkılarının etkileri incelenmiş ve bu katkılar karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda yine aynı şekilde setan sayısında ve parlama noktası sıcaklığında artış olduğu gözlemlenmiştir. Performans testlerinde katkı ilaveli test yakıtlarının saf dizel oranla fren gücü ve tork değerlerinde de artış olduğu gözlemlenmiştir. Emisyon kısmında ise Al_2O_3 ilaveli yakıtın, saf dizel yakıtı oranla CO emisyonu %11, HC emisyonu %13, NO_x emisyonunda ise %6 azalma gözlemlenmiştir. CuO ilaveli yakıtın saf dizel yakıtı oranla CO emisyonu %5, HC emisyonu %8, NO_x emisyonu %2 oranında azalmıştır (Gumus ve arkadaşları, 2016).

Kalaimurugan ve arkadaşları %80 saf dizel ve %20 biyodizel içerikli yakıtı 25, 50, 75 ve 100 ppm dozajlarında CeO_2 nanopartikülü ilave edip motor ve emisyon karakteristiklerini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlarda termal verimin

ve yakıt viskozitesinin iyileştiği gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra tutuşma gecikmesi ve özgül yakıt tüketimi de azalmıştır. HC, CO ve is emisyon değerlerinde de azalma gözlemlenmiş ancak, biyodizel oksijen içeriği ve nanopartikül oksijen içeriği sebebiyle NO_x emisyonunda artış gözlemlenmiştir (Kalaimurugan ve arkadaşları, 2020).

Ağbulut ve arkadaşları da CuO nanopartikülünü yüksek dozajlarda saf dizel yakıtı eklemişlerdir. 1000 ve 2000 ppm değerlerinde CuO saf dizel yakıtı eklenmesi sonucu, oksijen molekülleri sayesinde yanma sürecini hızlandırmıştır. Deney sonuçları katkı ilaveli alternatif yakıtın dizel yakıtı kıyasla CO, HC ve NO_x emisyonlarını azalttığı görülmektedir. CO emisyonu 1000 ppm miktarında %14,6 2000 ppm miktarında ise %20,8 azalmıştır. HC emisyonu 1000 ppm de %6,2 2000 ppm de ise %13,4 azalmış ve NO_x emisyonu da 1000 ppm dozajında %4 2000 ppm de ise %4,7 oranında azalmıştır. Emisyonların dışında ise özgül yakıt tüketimi 1000 ppm de %4,5 azalırken, 2000 ppm de ise %8 azalmıştır. Termal verimde ise artış gözlenip bu artış 1000 ppm de %5,5 2000 ppm de ise %14,6 olmuştur. Tutuşma gecikmesi süresi 1000 ppm de %3,03 2000 ppm de %5,45 olarak kısalmıştır. Diğer birçok çalışmadan farklı olarak yüksek dozajda nanopartikül kullanılan bu çalışmada nanopartiküllerin boyutlarının toz taneciği büyüklüğünde olduğundan dolayı karışımın homojen olması hususunda bir sorun teşkil etmemiştir (Ağbulut ve arkadaşları, 2021).

Bir başka çalışmada Özgür ve arkadaşları, MgO ve SiO_2 nanopartiküllerini 25 ve 50 ppm dozajlarında biyodizel yakıtı katkı maddesi olarak ekleyip sonuçları incelemiş ve karşılaştırmıştır. Katkı maddelerinin eklenmesi yakıt yoğunluğunda önemli bir değişiklik göstermezken, katkı maddeli yeni yakıtın viskozitesinin azaldığı, akma noktasının ise bir miktar yükseldiği gözlemlenmiştir. Motor performans testleri sonucunda ise fren gücü ve tork değerlerinde az bir miktar artış olmuştur. CO emisyonları her iki nanopartikülün eklenmesiyle de biyodizel yakıtı göre azalmıştır. Maksimum azalma 25 ppm SiO_2 nanopartikülünde %10,4 oranında olmuştur. Öte yandan CO_2 emisyonunda artış gözlemlenmiştir. Bu artışın en yüksek olduğu nokta ise MgO nanopartikülünün 25 ppm dozajında kullanılması sonucunda %7 olarak ölçülmüştür. NO_x emisyonunda ise azalma söz konusu olmuştur. En fazla azalma %7,2 olarak kaydedilmiş ve bu azalma MgO nanopartikülünün 50 ppm dozaj ilavesinde ortaya çıkmıştır. Aynı zamanda bu çalışmada maliyet analizi ve karşılaştırılması da yapılmış olup, MgO nanopartikülünün daha uygun bir fiyatı

olduğu ancak SiO₂ nanopartikülünün ise yakıt özellikleri, motor performansı ve egzoz emisyonları konusunda daha iyi bir iş çıkardığı gözlemlenmiştir (Özgür ve arkadaşları, 2015).

Bir başka çalışmada Çelik, biyodizel yakıtta organik Mn katkısını 4, 8, 12 ve 16 µmol/L miktarlarında eklemesiyle farklı bir alternatif yakıt elde etmiştir. Katkı ilaveli yeni yakıtlarda motor gücü genel olarak artış gösterirken maksimum artış %7,94 olup, özgül yakıt tüketiminde ise %5,54 oranında azalma meydana gelmiştir. Mn katkı ilavesi ile birlikte viskozite, parlama noktası ve yoğunlukta azalma gözlenmesi yanma performansını iyileştirmiştir. Alt ısı değerinde yükselme meydana gelmiştir. Katkı maddesi dozajı arttıkça motor performans değerlerinde düşüşler meydana gelmektedir. Hatta belli bir katkı maddesi oranından sonra yakıt özellikleri yakıtın kullanılabilirlik sınırlarını aştığını göstermektedir. Egzoz emisyonlarına bakıldığında ise 12 µmol/L katkı miktarında maksimum azalma gözlenmiş olup, azalma miktarları CO için %11,63, HC için %5,02 ve is emisyonları için ise %3,93 olarak ölçülmüştür. NO_x emisyonunda ise artış meydana gelip en yüksek artış yine 12 µmol/L katkısında %22,22 olmuştur (Çelik, 2016).

Bir diğer çalışmada Saraee ve arkadaşları, saf dizel yakıtta nanopartikül katkı maddesi olarak farklı miktarlarda Ag kullanmış olup, açığa çıkan sonuçları incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre saf dizel yakıtta gümüş ilavesinin yakıt tüketimini %3 oranında iyileştirdiği görülmüştür. Bunun dışında motor performansına bakıldığı zaman motor gücünde de yaklaşık %6 gibi bir yükselme gözlenmiştir. Yanma odası içerisindeki metalik nanoparçacıklar ile ısı transferi artıp, yanma süreci hızlanarak tutuşma gecikmesi ise azalmıştır. Nanopartikül parçacıklar püskürtme sırasında yakıtın basınçlı havaya daha fazla nüfuz etmesine katkı sağlar, tüm bunlar yanmayı iyileştirir ve zararlı egzoz emisyonlarının azalmasına büyük katkı sağlar, sonuçlara göre HC emisyonu %28 oranında, CO emisyonu %20,5 oranında ve NO_x emisyonu da %13 oranında azalmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre saf dizel yakıtta gümüş katkısının motor performans, emisyon ve yakıt özelliklerinde hatırı sayılır derecede iyileşmeler ortaya koyduğu görülmüştür (Saraee ve arkadaşları, 2015).

Farklı bir çalışmada ise Mehta ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak nano emülsiyon yakıtlar kullanmıştır. Saf dizel, dizel-su emülsiyonuna Al ve Si katkısının etkileri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Yakıt özelliklerine bakıldığı zaman saf dizele göre yoğunluk her üç yakıt tipi için de

artmıştır. Saf dizele göre dizel-su emülsiyonunun viskozitesi artmış ancak nanopartikül katkılı yakıtların viskozitesi ise emülsiyon yakıtı göre azalmıştır. Setan sayısında da artış gözlenip, en yüksek artış Si katkılı alternatif yakıtta olmuştur. Motor gücünde de bir miktar artış görülmüştür. Yine yakıt özelliklerinden özgül yakıt tüketiminde ortalama %21 düşüş gözlemlenmiştir. Termal verim ise Al katkılı yakıt için %16 artarken, Si katkılı alternatif yakıt için %14 artmıştır. NO_x emisyonuna bakıldığında zaman Al katkılı yakıt %5 ve Si katkılı yakıt ise NO_x emisyonunu %4 arttırmıştır. Öte yandan emülsiyon dizel yakıtta ise NO_x emisyonu maksimum yükte %13 azalmıştır. HC ve CO emisyonunda ise genel olarak azalma gözlemlenmiş ve maksimum azalma her yük değeri için Al katkılı alternatif yakıtta olmuştur (Mehta ve arkadaşları, 2014).

Bu çalışmada ise Babu ve Raja, saf dizel yakıtı 25, 50 ve 75 ppm miktarında Al nanopartikül katkısının etkilerini incelemiş ve karşılaştırmıştır. İlk olarak yakıt özelliklerine bakıldığında, viskozitenin hemen hemen hiç değişmediği gözlemlenmiş, yoğunluğun ise yakıt katkı maddesi miktarı arttıkça azaldığı görülmüştür. Parlama noktası ise dizel yakıtı oranla artmıştır, katkı maddesi miktarının artmasıyla da artmaya devam etmiştir. Termal verime bakıldığında ise katkı maddesi miktarı artması ile arttığı gözlenmiş, 75 ppm dozajında %39,6 oranında artmıştır. Düşük yüklerde özgül yakıt tüketiminde iyileşme görülmüş ancak genel olarak değişim oldukça az olmuştur. NO_x emisyonuna bakıldığında ise düşük yüklerde saf dizelin emisyon oranının daha az olduğu, ancak yüksek yüklerde katkı maddesi miktarının artmasına bağlı olarak emisyon oranında azalma olduğu gözlenmiştir. CO emisyonları ise nanopartikül katkılı yakıtlarda saf dizele oranla daha yüksek olmuştur. Yüksek yüklerde HC emisyonu değerleri de nanopartikül katkılı alternatif yakıtlar için yükselmiştir. Duman koyuluğunun saf dizele göre daha az olduğu gözlenmiş ancak alternatif yakıtın CO₂ emisyonu saf dizel yakıtı göre bir miktar artmıştır (Babu ve Raja, 2015).

Keskin ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada Ti içerikli yakıt katkı maddesinin 25, 50, 75 ve 100 ppm miktarlarında saf dizel yakıt ile karışımından oluşan alternatif yakıtın emisyon ve performans değerlerini incelemiş, saf dizel yakıt ile karşılaştırmışlardır. Deney sonuçlarına bakıldığında yakıt özelliklerinden akma noktası ortalama %12 civarında azalmıştır. 100 ppm titanyum katkılı yakıt için minimum akma noktası gözlenmiş ve bu değer -28 °C olarak ölçülmüştür. Özgül yakıt tüketiminin ise azaldığı gözlenmiş olup 100 ppm titanyum katkılı

yakıtta %5,72 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Performans değerlerinden güç ve tork için önemli değişimler meydana gelmemiştir. Egzoz emisyonlarına bakıldığında zaman ise CO emisyonlarının genel olarak yüksek oranda azalma eğiliminde olduğu gözlenmiş ve maksimum azalma miktarı yine 100 ppm titanyum katkılı yakıtta %64,56 oranında olmuştur. NO_x emisyonlarının ise düşük ve yüksek devirlerde çok fazla değişmediği ancak ara değerlerde titanyum katkılı yakıtların NO_x emisyonunda bariz azalmalar meydana getirdiği gözlenmiş olup 100 ppm katkılı yakıtın yine en iyi sonucu verdiği görülmüştür. İS emisyonlarına bakıldığında zaman ise genel olarak yine azalmalar meydana gelmiştir, incelemeler sonucu katkı maddesi miktarı arttıkça da İS emisyonu miktarında azalma gözlemlenmiştir (Keskin ve arkadaşları, 2013).

Bir başka çalışmada Yaşar ve arkadaşları, saf dizel yakıtta 25 ppm TiO₂ ve 25 ppm Cu(NO₃)₂ ardından yine saf dizel yakıtta 50 ppm TiO₂ ve 50 ppm Cu(NO₃)₂ katkı ilavesi ardından saf dizel yakıtta 25 ppm TiO₂ ve 25 ppm Ce(CH₃CO₂)₃H₂O ardından yine saf dizel yakıtta 50 ppm TiO₂ ve 50 ppm Ce(CH₃CO₂)₃H₂O katkısı ile dört farklı alternatif yakıt elde etmiştir. Sabit devirde, 4 Nm ve 8 Nm yüklerinde gerçekleştirilen deneyde TiO₂ nanopartikülünün dizel ve diğer iki nanopartikül ile karışımı sonucu elde edilen dört farklı alternatif yakıtın bulguları paylaşılmıştır. Yakıt özelliklerine bakıldığında nanopartikül katkı etkisiyle ısı değeri ve setan sayısında iyileşme gözlenmiştir. Buna karşın yoğunluk ve viskozite değerlerinde önemli ölçüde bir değişim gözlenmemiştir. Metal bazlı katkı maddelerinin etkisiyle yanma iyileşip, özgül yakıt tüketiminde azalma meydana gelmiştir. Emisyon değerlerine bakıldığında ise CO ve HC emisyonları her yük altında saf dizele oranla daha düşük çıkmış ve yük arttıkça da emisyon oranı azalmıştır. En düşük değerler ise TiO₂ ve Ce(CH₃CO₂)₃H₂O karışımından elde edilen yakıtta gözlenmiştir. Cu(NO₃)₂ katkısının katalizör etkisi ile birlikte maksimum sıcaklığı artırıp yanmayı iyileştirdiği ve bu nedenle NO_x emisyonlarını bir miktar arttırdığı gözlenmiş olup genel olarak yük miktarı arttıkça NO_x emisyonu miktarı da artmıştır. Bu verilerin dışında titreşim ve ses basınç ölçümleri de yapılmış olup, saf dizel yakıtın motor yükü arttıkça bu özelliklerin de arttığı gözlenmiş olup nanopartikül katkılı yakıtların her motor yükünde titreşim ve ses basınç seviyelerini azalttığı gözlenmiştir. Saf dizel yakıtta toplamda 100 ppm katkı ilavesi daha iyi sonuçlar vermiştir (Yaşar ve arkadaşları, 2019).

Bir diğerk çalışmada ise Khatri ve arkadaşları, saf dizel yakıtı 5, 10, 15, 20 ve 25 mg miktarlarında ZnO katkı maddesi ve belirli oranlarda CTAB katkısı ilave ederek yeni alternatif yakıtlar oluşturup, 1500 dev/dak'da 2, 4, 6, 8, 10 ve 12 kW motor yüklerinde test etmişlerdir. Bu yakıtları ve saf dizel yakıtı inceleyip karşılaştırmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda 20 mg Zn katkılı yakıtın diğerk karışım yakıtlara oranla termal veriminde %15,58 oranında artış gözlenmiş, özgül yakıt tüketiminde ise saf dizel yakıtı oranla %11,11 oranında azalma sağladığı gözlemlenmiştir. Emisyon ölçümlerine bakıldığında ise yine en etkili karışım miktarının 20 mg Zn katkısı olduğu gözlenip en iyi sonuçları yüksek yüklerde vermiştir. 20 mg Zn katkılı alternatif yakıtın maksimum iyileşme sağladığı emisyon değerlerine bakıldığında CO emisyonunu %58,93 azalttığı, HC emisyonunu %78,78 azalttığı, NO_x emisyonunu %57,46 azalttığı, CO₂ emisyonunu %41,85 azalttığını, is emisyonunu ise %42,51 gibi önemli oranlarda azalttığı gözlenmektedir (Khatri ve arkadaşları, 2019).

3. DİZEL YAKIT ÖZELLİKLERİ

İçten yanmalı motorlarda silindir içerisindeki yakıt ve hava karışımının kimyasal reaksiyonu ile yakıt enerjisi ısı enerjisine dönüştürülür. Yakıt hava karışımı yanma reaksiyonu süresince silindir içerisinde kalması gerektiğinden içten yanmalı motorlarda yanma safhasını hızlı bir şekilde tamamlayabilecek yakıtlar kullanılmalıdır (Haşimoğlu, 2005).

İçten yanmalı motorlarda sıvı hidrokarbonlar, çeşitli alkoller ve gaz yakıtlar kullanılır. Bunlardan sıvı hidrokarbonların ham petrolün damıtılması yöntemiyle içten yanmalı motorlarda sıkça kullanılan benzin ve dizel yakıtlar elde edilir. Ham petrolün damıtılması sırasında dizel yakıt 200-300 °C arasında elde edilir. Damıtma yöntemiyle ayrıca propan, bütan gibi gaz yakıtlar ve asfalt, makine yağı gibi bileşikler de elde edilir. Dizel yakıt eldesi için hidrokarbonlardan olefinler, naften, parafin, aromatikler vb. daha uygundur (Özcan, 2018).

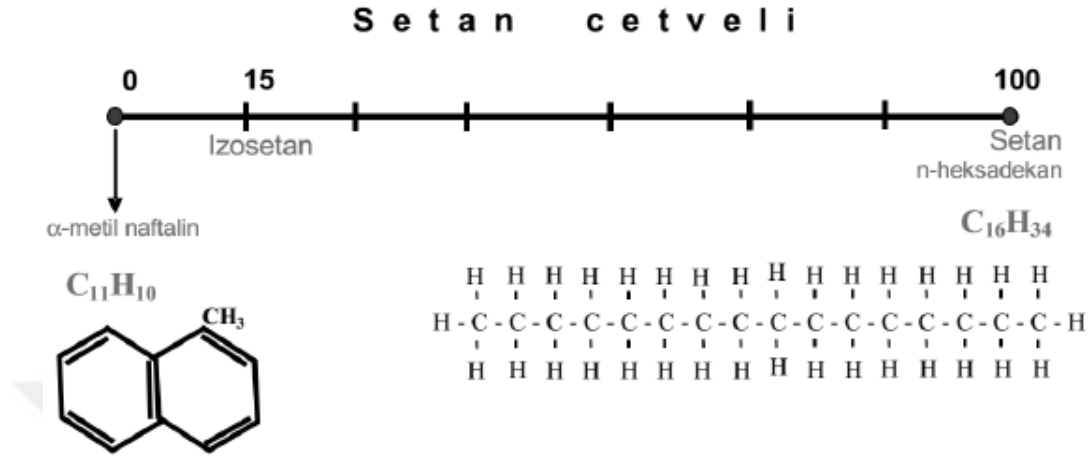
Kullanım yerine göre uygun dizel yakıtı bulabilmek ve elde etmek için dizel yakıt özelliklerini bilmek gerekir. Dizel yakıtların genel özellikleri aşağıda verilmiştir.

3.1 Setan Sayısı

Dizel motorda yakıtın ısınan hava içerisinde kendi kendine tutuşma özelliğini belirten bir sayıdır. Setan sayısının artması dizel yakıtın kendi kendine tutuşma yönelimini de arttırmaktadır. Benzinli motorlarda bu durum istenen bir özellik değilken dizelde tam tersi bir durum söz konusudur. Dizel yakıtın setan sayısının artmasıyla kendi kendine tutuşma süresinin azalması aracın ilk hareketini daha kolay ve sorunsuz yapmasını sağlar. Bunun yanı sıra ani yanma aşamasında oluşan ani basınç artışı sonucu motor parçalarının zarar görmesinin de önüne geçilir. Setan sayısı için optimum bir değer söz konusudur, setan sayısının fazla yüksek olması da tutuşma gecikmesi süresini çok fazla kısaltabileceğinden yakıtın silindir içerisine iyice dağılmasına süre yetmeyebilir. Böyle bir durumda sıvı yakıt henüz buhar formuna geçmeden tutuştuğundan dolayı verimli bir yanma işlemi gerçekleşmez. Süre kısaldığından dolayı yakıt püskürtüldüğü gibi yanar, böylelikle yanma, yakıt püskürtülen enjektöre yakın bir yerde olur ve zamanla enjektörde tıkanmalar, tahribat ve karbonlaşma ile karşı karşıya kalınabilir (Haşimoğlu, 2005).

Yakıtın tutuşma hızı ve yanma kalitesini belirtebilmek amacıyla setan sayısı ve setan cetveli kullanılmıştır. Setan cetvelinde yanma veriminin maksimum

olduğu en yüksek setan sayısı 100 olarak belirlenmiş ve n-heksadekan konumlandırılmıştır. Minimum yanma veriminin gösterildiği değer olan 0 setan sayısı ise α -metil naftalin olarak gösterilmiştir (Gökçe, 2022).



Şekil 3.1. Setan Cetveli (Gökçe, 2022)

3.2 Viskozite

Sıvıların iç sürtünmeleri sebebiyle akmaya karşı gösterdikleri dirence viskozite adı verilir. Viskozite kinematik ve dinamik viskozite olarak ikiye ayrılır. Dinamik viskozite sıvının kayma gerilmesinin kayma hızına oranı olarak ifade edilip, sıvının akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Kinematik viskozite ise sıvının dinamik viskozitesinin aynı sıcaklıkta sıvının yoğunluğuna bölünmesidir. Kinematik viskozite sıvının yerçekimi etkisinde akmaya karşı gösterdiği dirence denir (Sarıköç, 2019).

Yakıt viskozitesi yakıtın kalitesini ve yanma verimini etkilediğinden oldukça önemlidir. Yakıt viskozitesi arttıkça silindirlere püskürtülen yakıt daha büyük tanecikli olmaya başlar, yakıt taneciklerinin büyük olması hava ile karışımını zorlaştıracığından eksik yanmaya sebebiyet verebilir. Yakıtın büyük tanecikli olması enjektörleri tıkayabilir veya emisyon oluşumuna sebebiyet verebilir. Bunların yanı sıra yakıtın akmaya karşı direnci arttıkça yakıtı pompalamak da zorlaşacağından, güç ve performans kaybı yaşanabilir. Viskozitenin düşük olduğu durumlarda ise yakıt parçacıkları daha küçük taneli olacağından dolayı silindir içerisinde hava yakıt karışımı daha iyi olur bu da yanma verimini artırır. Ancak viskozitenin gereğinden daha az olması sıvının akış özelliğini çok fazla

arttıracğından sıvı yakıt, yakıt sisteminde kaçaklara sebebiyet verebilir. Petrol kökenli yakıtların viskozitesi sıcaklık arttıkça azalır (Sarıkoc, 2019).

3.3 Yoğunluk

Yoğunluk, sıvının birim hacimdeki kütesini ifade eder. Yoğunluk sıcaklığa bağılı olmakla birlikte yakıtın enerji içeriğinin bir göstereimidir. Yüksek yoğunluklu yakıt genellikle yüksek enerjiye sahip olur. Dizel yakıt birbirinden farklı yoğunluktaki birden fazla hidrokarbondan oluştuğundan dolayı, dizel yakıtın yoğunluğu dizel yakıt eldesi sırasında kullanılan hidrokarbonların yoğunluk ve moleköl ağırlıklarının bileşimidir.

Yoğunluk, setan sayısı, viskozite ve distilasyon gibi değışkenlere bağıdır. Distilasyon sıcaklığının maksimum noktasının azaltılması halinde dizel yakıt içeriğindeki ağır hidrokarbonların içeriğı de azalacağından yakıtın yoğunluğu da azalır. Yakıt yoğunluğunun is emisyonları üzerine etkisi oldukça fazladır. Ancak bunun yanı sıra motor performansını, yakıt sarfiyatını ve püskürtme zamanını da etkiler (Doğan, 2012).

3.4 Parlama ve Alevlenme Noktası

Dizel yakıt bir kap içerisinde ısıtılırken kap üzerinde oluşan yakıt buharının bir alev kaynağıyla teması sonucu tutuşabileceğı minimum sıcaklıktır. Parlama noktası seviyesi yüksek yakıtların uçuculuk özelliğı az iken parlama noktası seviyesi düşük yakıtların uçuculuğı daha fazladır (Doğan, 2012).

Yakıtlara alev yaklaştırıldığında yakıt içerisinde bulunan bazı maddeler buhar durumuna erkenden geçebildiklerinden dolayı yakıtların yanma sıcaklıklarından çok daha düşük seviyelerde parladıkları görölür. Parlama noktası yakıtın depolanması, taşınması ve güvenliğı açısından oldukça önemlidir. Parlama noktası düşük olan yakıtlara yaklaşım her zaman temkinli olmayı gerektirir.

Alevlenme noktası ise parlama noktası sıcaklığından biraz yüksek olup tutuşma buharının sönmeden yanmaya devam ettiğı sıcaklık noktasıdır. Yakıtın kaynama noktasının düşük olması alevlenme noktasını da genellikle düşürür. Bundan dolayı dizel yakıtlar gibi buharlaşma sıcaklığı yüksek seviyelerde olan yakıtlar daha emniyetli kabul edilir (Haşımoğlu, 2005).

3.5 Isıl Değer

Isıl değıer, yakıtın yanması sonucunda açığa çıkardığı kütle başına düşen enerji miktarına denir. Kullanılan yakıttan elde edilebilecek enerji miktarını ifade eder. Genellikle kJ/kg veya kcal/kg birimlerinde gösterilir. Kullanılan dizel yakıtın

motor performansı ve yanma kalitesini belirten önem arz eden bir özellik olmakla birlikte yakıt tüketiminin de bağlı olduğu bir özelliktir (Sarıkoc, 2019).

Isıl değerin alt ve üst sınırları arasındaki fark yanma sonunda açığa çıkan suyun buharlaşması için gereken enerjiyi gösterir. Kullanılan yakıt için ısıl değerin her daim yüksek olması istenip, yüksek ısıl değere sahip yakıtlar yakıt enerjisinin de yüksek olduğunu gösterir. Düşük ısıl değere sahip bir yakıt ise motor güç ve momentinde düşüşler meydana getirdiği gibi özgül yakıt tüketiminde de artışa sebebiyet verir. Yakıt içeriğindeki hidrojen miktarının azalması da ısıl değerin düşük seviyelerde olmasına sebep olur (Aydın, 2022).

3.6 Soğuk Akış Özellikleri

Dizel motorlarda kullanılan yakıtın soğuk akış özellikleri, değişen hava koşullarına göre dizel yakıtın sergilediği özellikleri kapsar. Soğuk havalarda yakıtın püskürtülmesi ve yanması normal hava şartlarına göre daha zordur. Sıvı yakıt soğudukça yakıt molekülleri sıvı kristalleri oluşturur soğuma devam ettikçe de sıvı kristalleri oluşmaya devam eder.

Soğutulan yakıtın ilk kristallenmeye başladığı noktaya bulutlanma veya dumanlanma noktası denir. Sıcaklığın bu noktadan düşmesi de bir noktadan sonra yakıtın akma özelliğini yavaş yavaş kaybetmesine sebep olur. Sıvı yakıtın akmasının durduğu sıcaklığa ise akma noktası denir. Genellikle bulutlanma noktası akma noktasının ortalama 5 °C üstündedir. Soğuk havalarda sıvı yakıtın akışını akma noktası belirler, dizel yakıtın akma noktasının yüksek olması, yakıtın akmasını zorlaştıracığından yakıtı dondurabilir veya yakıt püskürtme enjektörlerini tıkayıp motorun çalışmamasına sebebiyet verebilir. Bundan dolayı akma noktası ortam sıcaklığından düşük olması istenmektedir (Haşimoğlu, 2005).

3.7 Özgül Ağırlık

Özgül ağırlık farklı yakıt ve yağların kolay ve hızlı bir şekilde ayrılmasını sağlayan bir yakıt özelliğidir. Dizel yakıtların özgül ağırlığının bilinmesi bu yakıtların doğru kullanımı için önem arz etmektedir. Özgül ağırlık sıvı yakıt yoğunluğunun bir ölçüsü olmakla birlikte birim hacimdeki ağırlık olarak tanımlanır. Aynı sıcaklıktaki yakıt yoğunluğunun yine aynı sıcaklıktaki su yoğunluğuna oranı da denebilir (Ergen, 2006).

Özgül ağırlığı yüksek olan akaryakıtlar karbon oranı bakımından da zengin olmakla birlikte ısıl değerleri de fazladır. Özgül ağırlık düşük seviyelerde

olduğunda yakıtın daha kolay tutuştuğu gözlenir. Bunun yanı sıra sıcaklık artışı da özgül ağırlık değerinde düşüşe sebebiyet vermektedir (Gökçe, 2022).

3.8 Uçuculuk

Yakıtın önemli özelliklerinden biri de uçuculuk özelliğidir. Dizel yakıtların benzin yakıtlara oranla uçuculukları daha azdır. Sıvı yakıtlar yanmadan önce uygun yakıt hava karışımı ve yanmanın verimliliği için buharlaşması gerekir. Uçuculuk sıvı yakıtların buharlaşabilme özelliğini ifade etmektedir. Düşük sıcaklıklarda daha kolay buharlaşan yakıtlar, buharlaşmak için yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyan yakıtlardan daha uçucudur (Haşımoğlu, 2005).

Uçuculuk özelliği fazla olan yakıtlar soğuk hava durumlarında motorun ilk hareketini kolaylaştırdığı gibi yakıt tüketiminin azaltılmasında da büyük rol oynar. Aynı zamanda uçuculuğu yüksek yakıtların zararlı emisyonlardan olan is emisyonunu azalttığı da gözlemlenmiştir. Uçuculuk özelliği düşük olan yakıtlar ise genellikle yüksek hız ve devire ihtiyaç duyulan içten yanmalı motorlarda kullanılmalıdır (Gökçe, 2022).

3.9 Kükürt ve Kül Miktarı

Kül, küçük katı parçacıklardan ve yağ ya da dizel yakıtın içerisinde bulunan metalik çözünebilir bileşiklerden oluşmaktadır. Az bir miktar yakıt içerisindeki yanıcı maddelerin yanması sonucu kül miktarı hesaplanabilir. Yakıt içerisinde yanması gereken maddelerin yanmaması sonucu ortaya çıkan atıklar kül olarak adlandırılıp, yanmış yakıtın ağırlığının yüzdesi cinsinden gösterilir. Kül miktarının fazla olması yakıt sisteminde aşınma ve tıkanmalara sebebiyet verdiğinden dizel yakıt için önem arz etmektedir (Haşımoğlu, 2005).

Ham petrolden dizel yakıt eldesi için yapılan damıtma işlemi sırasında ham petrolde bulunan kükürt yakıttan büyük oranda arındırılır. Ancak arındırılmayan kükürt dizel yakıt içerisinde bulunarak yakıt ve hava ile birlikte dizel yanma safhalarına katılır. Yanma safhasında O_2 ile birleşerek SO_2 bileşiği oluşumuna sebep olur. SO_2 oluşumu büyük sıkıntılar yaratmazken SO_2 'nin biraz daha O_2 bulması durumunda SO_3 meydana gelir. Bu da yanma sonu ürünlerinden olan H_2O ile birlikte tehlikeli ve aşındırıcı bir madde olan H_2SO_4 oluşumuna sebebiyet verir. Bu aşındırıcı, motor ekipmanları üzerinde tahribata yol açıp, silindir ve yanma odası içerisinde de aşınma ve arızalanmalara sebebiyet verir (Çelik, 2015).

4. DİZEL MOTORLARDA YANMA VE EMİSYON

Rudolf Diesel tarafından 1892 yılında keşfedilen dizel motorlarda yanma işlemi sıkıştırılan gazın sıcaklığının yükselmesi ilkesine bağlı olarak çalışır. Dizel motorun silindirinin içine emilen hava piston vasıtasıyla sıkıştırılır. Dizel yakıt yanma işlemi sırasında püskürtüldüğünden sıkışma oranı benzine oranla daha fazladır. Sıkıştırılan hava ortalama 800 °C ye kadar ulaşabilir. Piston üst noktaya ulaştığında yanma işlemi gerçekleşmesi için dizel yakıt silindire püskürtülür. Dizel yakıt yanma odasındaki yüksek basınç ve sıcaklıktaki hava ile karışarak yanma işlemi gerçekleşir. Yanma işleminin gerçekleşmesi ile silindir içerisindeki hava genişler ve piston aşağı yönde hareket eder, pistonun aşağı doğru bu hareketini ise biyel kolu, güç üretmek amacıyla krank mili çıkışına aktarır. Yanma işlemi tamamlandıktan sonra ise yanma odası içerisinde yanma sonucu oluşan zararlı emisyonlar uzaklaştırılıp, temiz hava yeniden yanma odasına alınır, bu işlem motor çalıştığı sürece devam eder (Ünver, 2013).

Şekil 4.1’de silindir içerisindeki elemanlar gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Dizel motorun ateşleme sistemi elemanları (Toksöz, 2010)

Yukarıda bahsedilen işlemler dizel motorda dört zamanlı olarak gerçekleşir. Bu zamanlar; emme, sıkıştırma, yanma ve egzoz zamanı olarak ifade edilir.

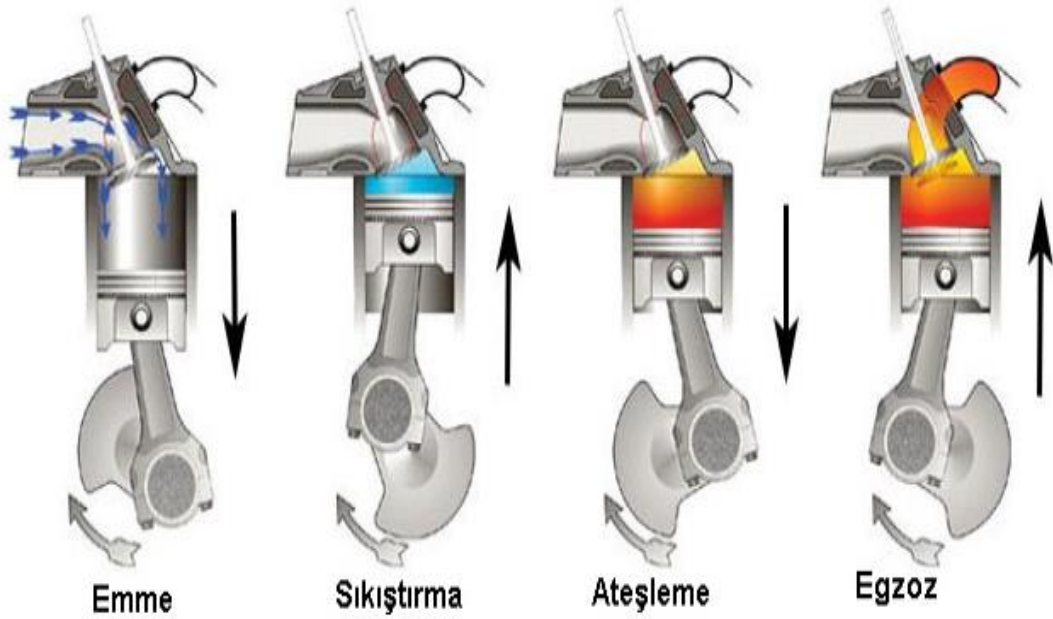
Emme Zamanı: Emme supabının açıldığı zamandır. Bu esnada silindir içerisine hava alınır, silindir içerisine alınan havanın etkisiyle piston ÜÖN'den AÖN'ye doğru hareket eder.

Sıkıştırma Zamanı: Emme supabı kapanır, ardından piston ÜÖN'ye doğru hareket ederek silindir içerisine alınan havanın sıkışması sağlanarak basınç ve sıcaklığı arttırılır.

Yanma Zamanı: ÜÖN'ye doğru hareket eden piston üst ölü noktaya gelirken silindir içerisine yakıt püskürtülür. Püskürtülen yakıt ve sıkıştırılan havanın etkisiyle yanma meydana gelir. Yanmanın etkisiyle genleşen hava pistonu aşağı doğru iter.

Egzoz Zamanı: Yanma işleminin ardından AÖN'de olan piston egzoz supabının açılmasıyla silindir içindeki egzoz gazlarını dışarı atar (Güner, 2019).

Şekil 4.2'de dizel motorun çevrim aşamaları gösterilmiştir.

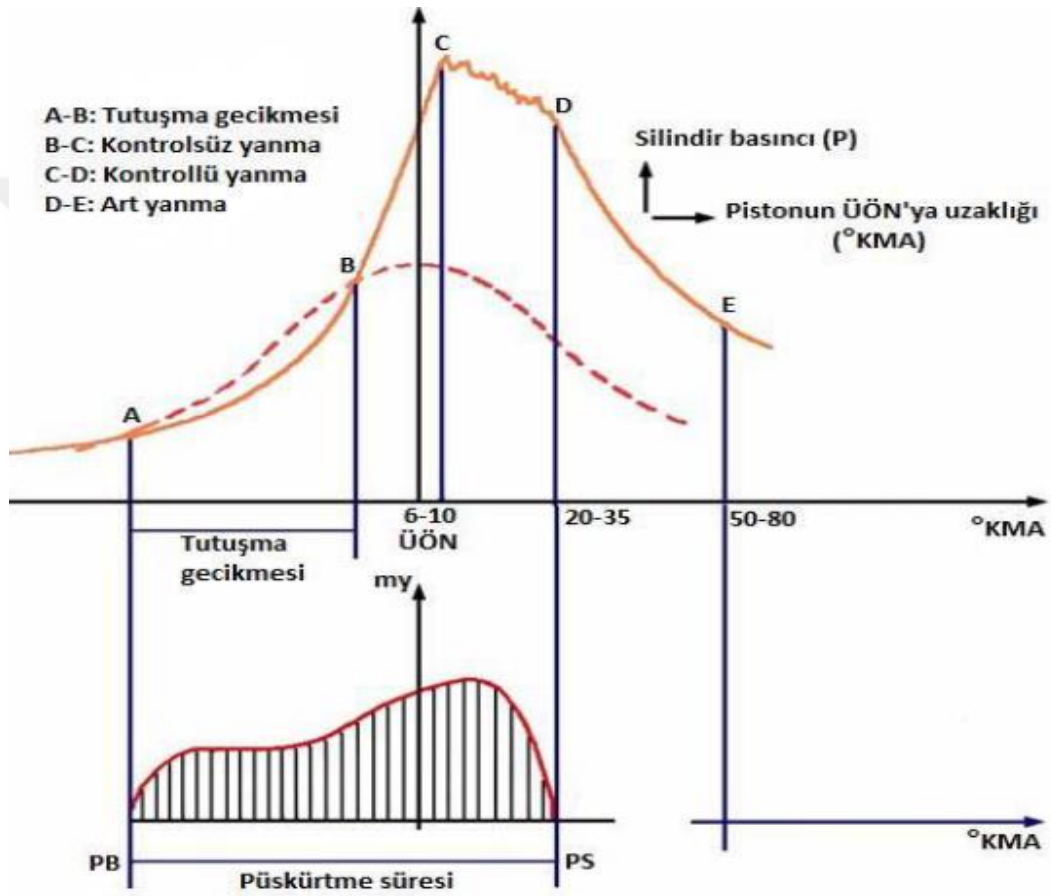


Şekil 4.2. Dört zamanlı dizel motorun çalışma sistemi (Tuncer, 2023)

4.1 Dizel Motorlarda Yanma İşlemi

Dizel motorlar CI motorlar olduğundan kendi kendine tutuşabilmesi için yanma odası sıcaklığının SI motorlardan daha yüksek olması beklenir, bundan dolayı yüksek sıkıştırma oranına ihtiyaçları vardır. Bir dizel motorda uçuculuğu az

olan bir sıvı, atomize hale getirilmeli buharlaştırılıp hava ile karıştırılmalıdır. Sıcaklık kendiliğinden tutuşma sağlayacak bir noktaya getirilmelidir. İlk tutuşmanın ardından yanma, ön yanma ve ana yanma aşamalarını takip eder. Ön yanma aşamasında ısı oranı yüksek ve kısa süreli olup, yanma ve ısı oranı yakıt hava karışımına bağlıdır. Ana yanma sırasında yakıt sürekli bir şekilde enjekte edilirken yanma yarı kararlı bir şekilde devam eder. Dizel motorun çalışması esnasında yanma işlemi basınç krank açısı diyagramı ile ifade edilir (Akgül, 2021).



Şekil 4.3. Dizel yanma aşamaları (Aktaş, 2021)

Şekil 4.3 incelendiğinde A noktasında enjektörden silindir içerisine yakıtın püskürtülmeye başlandığını görülür. A-B aşamasında yakıt molekülleri tutuşma sıcaklığına gelmeden belirli bir süre geçer, bu sürenin ardından püskürtme başlangıcı sırasında silindire enjekte edilen yakıtın büyük bir kısmı kendiliğinden tutuşarak, B-C arasında ani basınç artışına sebebiyet verir. C-D aşamasında ise geri kalan yakıt, silindir içerisine enjekte olduğu gibi yanar (Akgül, 2021).

Dizel motorlarda yanma işlemi dört aşamada açıklanır:

4.1.1 Tutuşma Gecikmesi

Dizel yakıtın enjektör vasıtasıyla püskürtölüp yanma safhasının başladığı ana kadar geçen süreye tutuşma gecikmesi adı verilir. şekil 4.3'te A-B aralığı olarak gösterilmiştir. Tutuşma gecikmesi, verimlilik, yanma ve emisyon oluşum miktarları açısından önem arz etmektedir (Aktaş, 2021).

Tutuşma gecikmesi süresi sıcaklık, basınç ve dizel yakıtın özelliklerine göre değişkenlik göstermekte olup, püskürtölün sıvı yakıtın buharlaşması için geçen süreye de bağlıdır. Sıcaklık ve basınç arttıka A-B aralığında geçen süre kısalır. Setan sayısının yüksek olması da tutuşma gecikmesi süresini azaltır. Tutuşma gecikmesi süresi uzadıka silindir içerisinde zamanla daha fazla yakıt birikir. Biriken yakıt ilk tutuşma anında hızlı bir şekilde yanar ve basınçta ani bir artış meydana gelir. İstenmeyen bir durum olan ani basınç artışı ve ani yanma ile birlikte dizel motor gürültölü bir şekilde çalışır. Dizel motorun daha stabil ve düzgün çalışabilmesi açısından tutuşma gecikmesi süresi iyi ayarlanmalıdır (Arslan, 2022).

4.1.2 Kontrolsöl Yanma

Bu aşama şekil 4.3'te B-C aralığı olarak gösterilmiştir. Ani yanma aşaması da denilen bu aşamada ise tutuşma gecikmesi safhası sonunda yanabilecek hale getirilen yakıt hava karışımı yanma odası içerisinde yayılmış halde bulunur. Silindir içerisindeki yakıt hava karışımının alevlenmesi birden fazla noktadan başlar. Birbirini tetikleyen bu alevlenmeler silindir içerisinde yüksek bir hızla yayılıp, silindir içerisinde bir patlama etkisi yaratarak basıncın aniden artmasına sebebiyet verir. Yanmanın ardından tutuşma gecikmesi aşamasında hazırlanan yanmaya hazır yakıt hava karışımının miktarına bağlı olarak basıncın yükseldiği gözlenir (Toksöz, 2010).

Basınçtaki bu yükselme motora ani yük uygulanmasına sebebiyet verir. Bu ani yük dizel motorun gürültölü çalışması hali olan dizel vuruntusu olarak adlandırılır. Bu da motorun hareketli parçalarının yorulma hasarına ve motor parçalarında tahribata yol açarak motorun kullanım ömrünün kısalmasına sebebiyet verir (Akgöl, 2021).

4.1.3 Kontrollöl Yanma

Tutuşma gecikmesi ve kontrolsöl yanma aşamalarının ardından şekil 4.3'te gösterilen C-D aralığında kontrollöl yanma aşamasına geçilir. Kontrolsöl yanma aşaması sonunda silindir içerisindeki sıcaklık ve basınç yüksek olduğundan kontrollöl yanma aşamasında silindir içerisine püskürtölün yakıt doğrudan ve

gecikme yaşanmadan yanar. Bu aşamadaki yanma işlemi silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarı ile kontrol edildiğinden, bu aşamaya kontrollü yanma aşaması adı verilir (Toksöz, 2010).

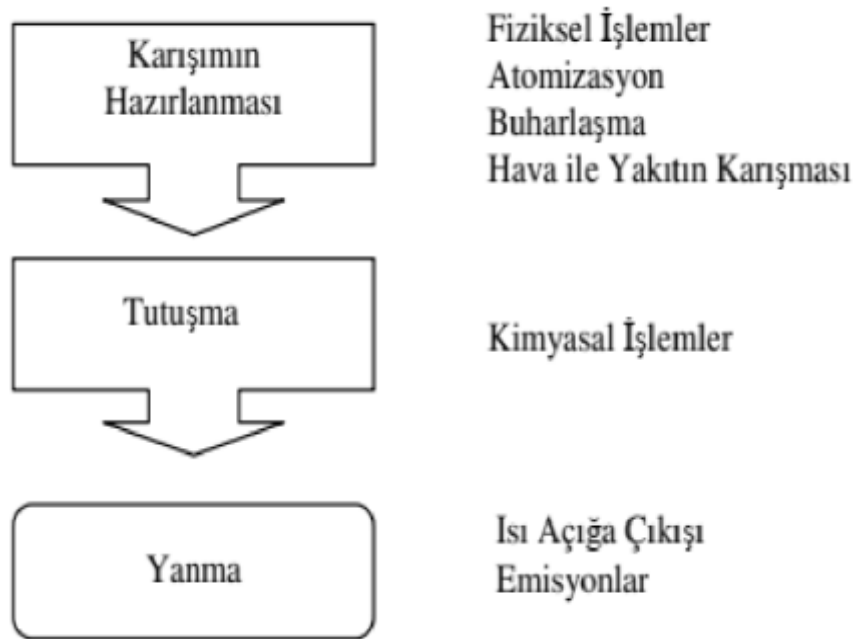
Kontrollü yanma aşamasında basınç en yüksek seviyeye gelinceye kadar artmaya devam eder. Bu safhada buharlaşma hızı ve sıvı haldeki yakıtın buharlaşıp hava ile karışması hızı, yanma hızını belirleyen önemli etkenlerdir. Dizel yakıt kalitesi, hava hareketi ve hava fazlalık katsayısı kontrollü yanma aşaması için önemli olmakla birlikte kontrollü yanma işleminin ÜÖN'ye yakın tamamlanması da ısı veriminin yüksek olması açısından önem arz etmektedir (Aydın, 2022).

4.1.4 Art Yanma

Kontrollü yanma aşamasının ardından Şekil 4.3'te görülen art yanma veya gecikmiş yanma olarak da adlandırılan aşamaya geçilir. Art yanma aşaması yakıt püskürtme işleminin sonlanması ve egzoz supabının açılması arasında geçen yanma süresidir. Bu aşama yanma işlemini tamamlayamamış ya da yanmamış hava yakıt karışımlarının yanmaya devam ettiği safhadır (Opuz, 2022).

Art yanma safhasının motor veriminde düşüş yaşamamak adına daha kısa olması gerekir. Art yanma süresinin uzaması motora zarar vererek silindir ve piston üzerinde tahribata yol açar, ayrıca egzoz sıcaklığının da artmasına sebebiyet verir (Aktaş, 2021).

Dizel motorlarda yanma süreci Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Dizel motorlarda yanma süreci (Akyüz, 2022)

4.2 Dizel Motor Emisyonları

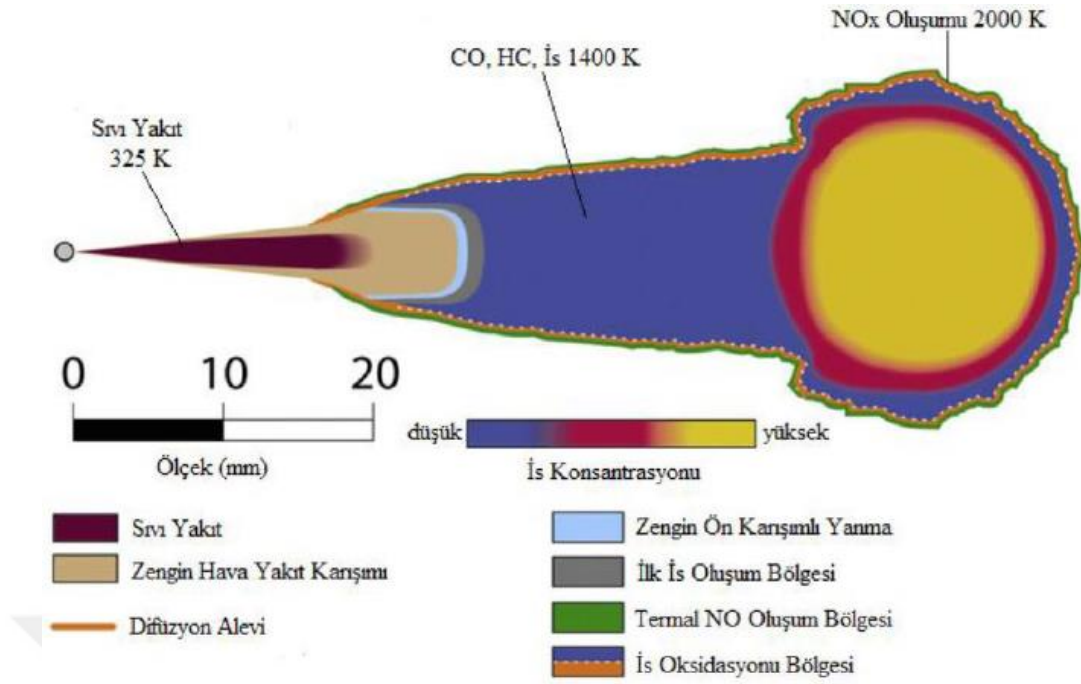
Hava kirliliğinin sebeplerinin başında içten yanmalı motorların çalışması esnasında havaya salınan zararlı gazlar gelmektedir. Hidrokarbon içerikli yakıtların kullanımı sonucu açığa çıkan HC, CO, NO_x, PM, CO₂ ve SO_x gibi zararlı emisyonlar, insan sağlığına ve doğal çevreye ciddi derecede zarar vermektedir.

İçten yanmalı motorlardan olan dizel motorlar düşük yakıt tüketimi, yüksek dayanıklılık ve verimlilik gibi olumlu yanları sayesinde zamanla taşıma, denizcilik ve tarım sektörlerinde en çok tercih edilen motorlar olmuşlardır. Dizel motorlarda meydana gelen teknolojik gelişmeler ile birlikte dizel motorlar binek araçlar için de daha çok tercih edilmeye başlanmıştır (İleri, 2012). TUIK verilerine göre Türkiye’de yakıt türüne göre taşıt sayısı aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 4.1. Yakıt türüne göre motorlu kara taşıtı sayısı

Yıl	Toplam	Dizel	Benzin	LPG	Elektirkli Hibrit	Bilinmeyen
2016	21 090 424	10 337 907	6 142 806	4 527 674	9 536	72 501
2017	22 218 945	11 102 943	6 321 658	4 705 599	18 261	70 484
2018	22 865 921	11 592 878	6 390 297	4 785 035	30 167	67 544
2019	23 156 975	11 865 482	6 427 550	4 749 808	49 744	64 391
2020	24 144 857	12 311 225	6 782 575	4 904 546	82 710	63 801
2021	25 249 119	12 704 380	7 296 270	5 028 359	157 153	62 957
2022	26 482 847	13 070 762	7 969 926	5 115 423	264 329	62 407

Petrol türevi yakıtların içten yanmalı motorlarda kullanımı ile birlikte açığa çıkan emisyonları sınırlandırmak ve azaltmak amacıyla 1900’lü yılların ortasından bu yana çeşitli çalışmalar yapılmış ve yasal düzenlemeler getirilmiş olup bu çalışmalar günümüzde hala devam etmektedir (Arslan, 2022).



Şekil 4.5. Dizel yakıt damlasında meydana gelen emisyonlar (Aydın, 2022)

İklim değişimi, küresel ısınma, insan ve çevreye verilen zararlarından ötürü kirlenici emisyonların kontrol altına alınması bir zorunluluk haline gelmiştir. Bundan dolayı birçok ülke hava kalite standartlarına uymaya sıcak bakmıştır.

Hava kirliliğine karşı ilk önlem 1810 yılı Fransa’da çıkartılan bir yasa ile olmuştur. Ardından 1821 yılında da İngiltere, buhar makinelerinin insan sağlığına olumsuz etkilerinden dolayı yasa çıkarmıştır. Ayrıca İngiltere 1857 yılında da hava kirliliği sebebiyle benzer bir yasa daha çıkarmıştır. Amerika Birleşik Devletleri’nin Chicago şehrinde de yoğun hava kirliliğinden dolayı benzer bir yasa çıkarılmıştır. Egzoz emisyonlarını azaltmaya yönelik ilk çalışma California eyaletinde 1960 yılında yapılmış ve günümüze kadar birçok ülke ve kuruluş emisyon standartlarını geliştirmiş ve iyileştirmişlerdir (İleri, 2012).

Yasal düzenlemeler ile birlikte araçlardan salınan egzoz emisyonlarına sınırlandırmalar getirilmiş ve emisyon standartları uygulanmıştır. Her geçen yıl ile birlikte sıkılaştıran emisyon standartlarına uymak için yeni motor teknolojileri, emisyon kontrol sistemleri, yakıt katkıları ve alternatif yakıtlar gibi çözümler geliştirilmiştir. İçten yanmalı motorlardan kaynaklanan emisyonlar 1990-2017 tarihleri arasında bu teknolojik gelişmeler aşamasında azalma eğilimi göstermiştir. Bu yıllar arasında CO %87, NO_x %40, PM %35 ve SO_x emisyonları ise %66 oranlarında iyileşme göstermiştir (Çakmak, 2021).

Geliştirilen emisyon standartları ile birlikte yeni üretilecek araçların hizmet sınıfına, yakıt ve motor tipine göre izin verilen, açığa çıkabilecek maksimum emisyon sınırlandırmaları getirilmiştir. Dünyanın farklı yerlerinde farklı emisyon standartları uygulanmasına karşın Avrupa ülkeleri ve Türkiye'nin de içinde bulunduğu euro emisyon standartları kullanılmaktadır. Euro emisyon standartları 1992 yılında Euro I olarak yürürlüğe girmiştir. Ardından 1996 yılında Euro II, 1999 yılında Euro III, 2005'te Euro IV, 2008'de Euro V ve 2013'te Euro VI standartları üretilecek ve kullanılacak taşıtlar için oluşturulmuştur (Çakmak, 2021).

Geçmişten günümüze kadar oluşturulan euro emisyon standartları için azot oksit, karbonmonoksit, partikül madde (is) ve hidrokarbon maksimum egzoz emisyon değerleri tabloda verilmiştir.

Tablo 4.2. Binek otomobiller için Euro Standartları (Aydın, 2022)

Emisyon Standardı	NO _x (g/km)	CO (g/km)	PM (g/km)	HC+NO _x (g/km)
Euro I	-	2,72	140	0,97
Euro II	-	1	80	0,7
Euro III	0,15	0,64	50	0,56
Euro IV	0,25	0,5	25	0,3
Euro V	0,18	0,5	5	0,23
Euro VI	0,08	0,45	4,5	0,17

Tablo 4.2'de görüldüğü üzere emisyon standartları gün geçtikçe sıkılaşmaktadır. Bunun etkisiyle doğa için daha temiz, insan sağlığı için ise daha sağlıklı ulaşım araçları üretilmektedir.

Bir dizel motorun çalışması ile hidrokarbon fosil yakıtların yanması sonucunda HC, CO, NO_x ve PM gibi ana kirletici emisyonlar atmosfere salınırken CO₂ ve SO_x gibi egzoz emisyonları da atmosfere salınır. Bu egzoz emisyonları ideal yanmanın olmaması, yakıt hava karışımının içerdiği kirleticiler ve yanma sonrasında azotun ayrışması sonucunda açığa çıkar (Kül, 2022).

4.2.1 Hidrokarbon (HC) Emisyonu

HC emisyonları dizel motorlarda eksik yanma sonucu oluşurlar. Eksik yanmanın sebebi ise sıvı yakıtın yeteri kadar oksijen bulamaması veya silindir içi yanma odasının sıcaklığının az olmasıdır. HC emisyonları yanma odasının geometrisine de bağlı olmakla birlikte dizel motorlarda genellikle 10-600 ppm miktarlarında oluşur (Keskin, 2005).

HC emisyonunun oluşum sebeplerinden biri de hava/yakıt karışımı oranıdır. Karışımın zengin olması yani silindir içerisine alınan yakıtın havaya oranla ideal seviyede olmaması durumunda sıvı yakıt yanmak için yeterli miktarda oksijen bulamadığından yakıtın tamamı yanamaz, yanamayan yakıt ise HC emisyonunu artırır. Karışımın fakir olması yani yanma odası içerisine alınan yakıtın havaya oranla çok daha az olması ve ideal seviyede olmaması durumunda ise HC emisyonları bir seviyeye kadar azalır ancak fakir karışım oranı arttıkça yanma işlemi verimli olmadığı gibi yanma odası içerisinde bazı kısımlarda yanmanın durduğu görülebilir bu durum da HC emisyonunu artırıcı yönde etki yapar. Karışımın homojen bir şekilde oluşumu sağlanamaz ve ideal bir karışım oluşturulmadığı bir durumda da eksik yanma meydana gelebilir ve bu durum HC emisyonlarını yine artırır (Kül, 2022).

Zararlı egzoz emisyonlarından biri olan hidrokarbonların tamamına toplam hidrokarbon denir. Yapısal değişikliklerine göre 100'den fazla hidrokarbon bulunur. Bunların bazıları emisyon oluşumunda aktif bir rol oynamazken, bazıları ise HC emisyonu oluşumunda büyük rol oynarlar. Hidrokarbonların verdiği zararlara bakıldığında bazı hidrokarbonların kansere sebep olduğu bazılarının da boğazda tahriş etkisi yarattığı ve pis kokulu oldukları gözlenmiştir (İlkılıç, 1999).

4.2.2 Karbonmonoksit (CO) Emisyonu

Karbonmonoksit emisyonu dizel motorlu taşıtlarda az seviyede salınırken genellikle benzin motorlu taşıtlardan salınırlar. Karbonmonoksit emisyonu tıpkı hidrokarbon gibi eksik yanma veya yanmama sonucu oluşabilir ayrıca CO₂ emisyonunun ısı parçalanmasıyla da oluşabilir. Karbonmonoksit emisyonu hava/yakıt karışımının zengin olduğu yani hidrokarbon oranının fazla olduğu durumlarda artış göstermektedir. Dizel motora sahip taşıtlar genellikle fakir karışım ile çalıştıklarından karbonmonoksit emisyonu dizel motorlarda genellikle düşük seviyelerdedir (Aktaş, 2021).

Dizel motorların hava/yakıt karışım oranı motor devir ve yük durumlarına göre değişmesine karşın dizel motor genellikle fakir hava/yakıt karışımı ile kullanılmaktadır. Fakir karışımda hava oranı fazla olduğundan oksijen oranı da fazla olur. Böylece açığa çıkması beklenen emisyonlardan olan CO, oksijen ile yanma sırasında tepkimeye girerek CO₂ emisyonuna dönüşmektedir. Fakat yanma sıcaklığının düşük olması veya hava içerisinde yetersiz oksijen olması durumunda karbonmonoksit emisyonu karbondioksite dönüşmeden egzozdan atılır. Oksijen miktarı silindire alınan hava içerisinde genel olarak yetersiz olabileceği gibi hava ve yakıtın homojen karışmaması durumunda da silindir içerisinde yer yer oksijen yetersizliği görülebilir. Bu durumda da karbonmonoksit emisyonlarında artış gözlenebilir. Karbonmonoksit emisyonlarının asıl oluşum sebebinin yanma olduğu görülmekle birlikte bu emisyonların oluşumunda motor parametrelerinin etkisi oldukça azdır. Bundan dolayı CO emisyonlarının azalması hava/yakıt oranına ve yanmanın verimine oldukça bağlıdır (Çelik, 2015).

Karbonmonoksit gazı renksiz, kokusuz ve tatsız bir gaz olmakla birlikte zehirli olan ve solunmasının tehlikeli olduğu bir gazdır. Karbonmonoksit gazı kanda bulunan hemoglobin ile birleşip vücuda oksijen taşınmasının önüne geçer. Karbonmonoksit gazının miktarına bağlı olarak insan sağlığına tehlikesi değişim göstermektedir. Az miktarda karbonmonoksit gazına maruz kalmak baş ağrısına neden olabildiği gibi yüksek miktarda karbonmonoksit gazına maruz kalmak ise bilinç kaybına ve hatta ölümlere sebebiyet verebilmektedir (Keskin, 2005).

4.2.3 Azotoksit (NO_x) Emisyonu

Dizel motor çalışması sırasında silindirlere alınan havanın içerisinde %79 oranında N bulunur ve yanma sonrasında oksitlenerek NO, NO₂, N₂O, N₂O₃ gibi genel olarak NO_x dediğimiz zararlı emisyon gazlarından olan azot oksiti açığa çıkarır. Yakıt/hava karışımının yanması sonucunda açığa çıkan azot oksitlerin çeşitli oluşum sebepleri vardır. Azot oksitler genellikle sıvı yakıtın içerisinde bulunan azot ile yanma odasına alınan havanın içeriğindeki oksijenin yanma safhası başlaması ile birlikte yüksek sıcaklıklarda birbirlerine bağlanması ile ortaya çıkarlar. NO_x emisyonlarında genellikle NO emisyonu oluşumu gözlenir bunun sebebi NO emisyonunun NO₂ ye dönüşebilmesi için yanma süresinin daha fazla olması gerektiğindendir (Dönmez, 2019).

Azot oksit emisyonu oluşumu, silindir içi yüksek sıcaklık ve fakir yakıt/hava karışımına bağlıdır. Emisyonun artışı ise yine sıcaklık artışına karışım

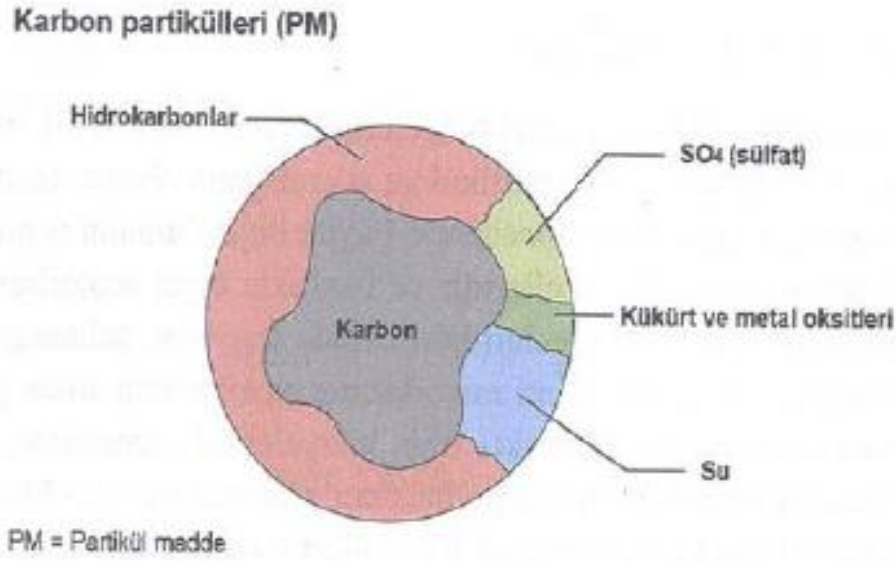
oranına ve motor yüküne bağlıdır. Azot oksit emisyonlarının yaklaşık %80'ini NO emisyonları oluşturur. Azot oksit emisyonunun azaltılması için ise enjektörlerden yapılan püskürtme işleminin geciktirilmesi emisyon azaltma yöntemlerinden yalnızca biridir (Tuncer, 2023).

Yaygın emisyonlardan biri olan azot oksitler, kokusuz ve renksiz bir karaktere sahiptir. Silindir içi sıcaklığın 1800 °C üzerine çıkmasıyla birlikte azot oksit emisyonları oluşmaya başlar. Motorda sıcaklığa bağlı olarak arttığından motorun ilk hareketi esnasında diğer zamanlara göre oldukça azdır. Azot oksidin hem insanlara hem de yeryüzüne verdiği zarar oldukça fazladır. Solunum hastalığı yaşayan insanlar için azot oksitler oldukça tehlikelidirler. Bunun dışında kirletici gazlardan kükürt oksitlerle beraber atmosfere salınımı sonucu yeryüzünden buharlaşan sularla birlikte tepkimeye girerek H₂SO₄ oluşumuna sebebiyet verirler. Bunun da bir sonucu olarak açığa çıkan asit yağmurları yeryüzüne inerek ormanlara, yeryüzünün bitki örtüsüne ve diğer canlılara zarar vermektedir. Dizel motorlardan atmosfere salınan azot oksit gazları 2000 ppm değerlerine kadar ulaşabilmektedir (Selvi, 2022).

4.2.4 Partikül Madde (PM) Emisyonu

Partikül maddelerin oluşumu dizel motorda açığa çıkan emisyonlardan biridir. Dizel motorlarda hidrokarbon kökenli dizel yakıtın zengin karışım yani sıvı yakıt oranının fazla olması durumunda yanma esnasında hava içeriğindeki oksijen ile sıvı yakıt içeriğindeki hidrojen H₂O formuna dönüşüp atmosfere salınabilirken sıvı yakıt içeriğindeki C atomlarının oksitlenemeyip artması sonucu partikül madde (is) emisyonu oluşur. Diğer emisyonların bazılarında da olduğu gibi eksik veya tam yanmama ile birlikte sıvı yakıt tanelerinin birleşimiyle de oluşabilir (Aksoy, 2021).

Açığa çıkan partikül madde emisyonu miktarı kullanılan yakıtın özelliklerine ve yakıttaki karbon hidrojen oranına bağlıdır. Yanma sonunda egzozdan salınan is, partikül madde emisyonlarını barındırarak insanlarda solunum sistemine ciddi zararlar vermektedir. Partikül maddenin içeriği egzoz sıcaklığına göre değişiklik göstermekle birlikte 500 °C üzerindeki sıcaklıklarda karbon küre yığını şeklinde gözlenir. Partikül maddenin kimyasal yapısı ise yakıt cinsine, sıcaklığa ve yanma odasına alınan hava miktarına bağlıdır. Ayrıca motor özellikleri ve performansının da partikül madde oluşumuna etkisi vardır. Bunun dışında ise püskürtme basıncı ve motor yağının da partikül madde emisyonu oluşumunda ve miktarında etkisi olduğu bilinmektedir (Selvi, 2022).



Şekil 4.6. Partikül madde emisyonu yapısı (Selvi, 2022)

Partikül maddelerin ortalama çapları 0,1 mikron gibi küçük değerlere ulaşabildiğinden insan solunum sistemine çok kolay ve hızlı bir şekilde işleyebilirler, bu partikül maddelerin varlığı insanlarda solunum sistemi içerisinde saklanabildiğinden ve akciğerlerde hastalıklara neden olabildiğinden dolayı insan sağlığı açısından büyük tehlikeler arz etmektedir (İlkılıç, 1999).

4.2.5 Kükürt (SO_x) Emisyonu

Kükürt oksit emisyonları renksiz, kötü kokulu ve aynı zamanda zehirlidirler. Dizel sıvı yakıtın içeriğinde bulunan kükürt, yanma aşaması sonrasında havada bulunan oksijen ile tepkimeye girerek SO_2 ve SO_3 emisyonlarını açığa çıkarır. Kükürt oksit emisyonlarının yarı ömürleri atmosfere salındıktan sonra 6-10 gün arasında değişmektedir. Oksitlenerek ve su ile tepkimeye girerek H_2SO_4 formuna geçip asit yağmurlarının oluşumuna sebebiyet vermektedirler. Kükürt oksit emisyonu oluşumu ve emisyon artışı dizel yakıt içerisinde bulunan kükürt oranına bağlıdır. Dizel yakıt içerisindeki kükürt miktarı ve hava yakıt oranının bilinmesi halinde egzozdan atmosfere salınacak kükürt oksit emisyonu miktarı hesaplanabilir (Keskin, 2005).

Kükürt oksit emisyonlarından biri olan SO_2 , H_2O ile tepkimeye girerek sülfirik asit meydana getirirler, sülfirik asit doğaya zarar verdiği gibi motor ekipmanlarına da aynı şekilde zarar vererek tahribata ve aşınmaya sebebiyet verir. Dizel yakıt emisyonlarından olan SO_x emisyonunu azaltabilmek adına çalışmalar

mevcut olduğu gibi, ülkemizde satılan dizel yakıtların kükürt oranı 50 ppm'i geçmemektedir (Aydoğan, 2008).

4.2.6 Karbondioksit (CO₂) Emisyonu

Karbondioksit diğer emisyonlara kıyasla daha zararsız olarak nitelendirilse de atmosferdeki CO₂ oranının kontrolsüzce artışı iklim değişikliklerine sebebiyet verebilmektedir. Sera gazlarından biri olan karbondioksidin atmosferdeki oranı %0,03'tür. İçten yanmalı motorlardan kaynaklanan karbondioksit emisyonları hidrokarbon yakıtın içerisinde bulunan karbonun oksitlenmesi sonucu ortaya çıkmaktadır (şen, 2016).

Dünya karbon döngüsünün bir parçası olan karbondioksit, atmosferde doğal olarak bulunur. İnsanlar karbondioksit oranını bazı teknolojik gelişmeler ile birlikte arttırırken aynı zamanda karbondioksit oranını azaltabilecek ve depolayabilecek orman ve toprağa da zarar vermektedir. Karbondioksit emisyonu çeşitli doğal yollarla oluşurken, son yıllarda sıkça bahsedilen atmosferdeki karbondioksit artışıının en önemli sebebi insan kaynaklı emisyonlardır (Kaya, 2022).

Karbondioksit gazı, dünya üzerindeki canlıların yaşamlarını sürdürebilmesi adına çok önemlidir. Atmosferdeki karbondioksit miktarının artışı kızılötesi ışınların absorbe edilmesine ve atmosfer dışına çıkmasına engel olup, atmosferin daha fazla ısınmasına ve küresel ısınmaya sebebiyet verir. Karbondioksit miktarının artışı ile beraber atmosfer daha fazla ısınır ve bu ısınma buzulların eriyerek dünya üzerindeki su seviyesinin yükselmesine sebep olur. Yükselen su seviyesi ile birlikte bazı kara parçalarının sular altında kalması tehlikesi ile karşı karşıya kalınabilir (şen, 2016).

5. MATERİYAL VE YÖNTEM

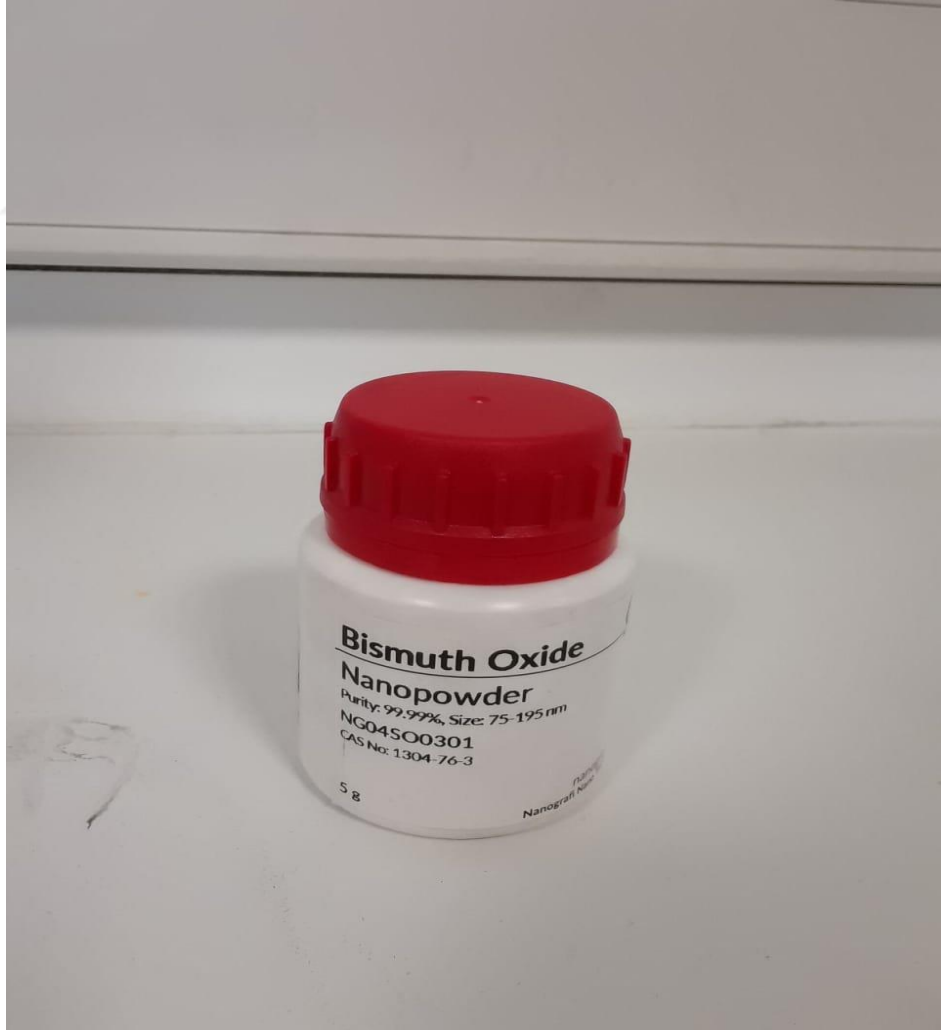
Bu bölümde, nanopartikül katkılı dizel yakıtın elde edilişi ve özellikleri anlatılmıştır. Deneyde kullanılan materyaller ve bu materyallerin özellikleri ile birlikte deneyle ilgili bilgiler yer almaktadır.

5.1 Nanopartikül Katkılı Yakıtların Hazırlanması

Çalışmanın tamamlanabilmesi için Bi_2O_3 nanopartikülünün özellikleri ve hazırlanma süreci bu başlıkta verilmiştir. Deney yakıtlarının hazırlanabilmesi için kullanılan deney malzemeleri de bu başlık kapsamındadır.

5.1.1 Bi_2O_3 Katkı Maddesi

Deneyde kullanılacak olan nanopartikül katkılı yakıtın elde edilebilmesi için ilk olarak piyasadan bizmut oksit nanopartikülü temin edildi. Temin edilen bizmut oksidin fotoğrafı Fotoğraf 5.1’de partikül özellikleri ise Tablo 5.1’de gösterilmiştir.



Fotoğraf 5.1. Bizmut oksit nanopartikülü

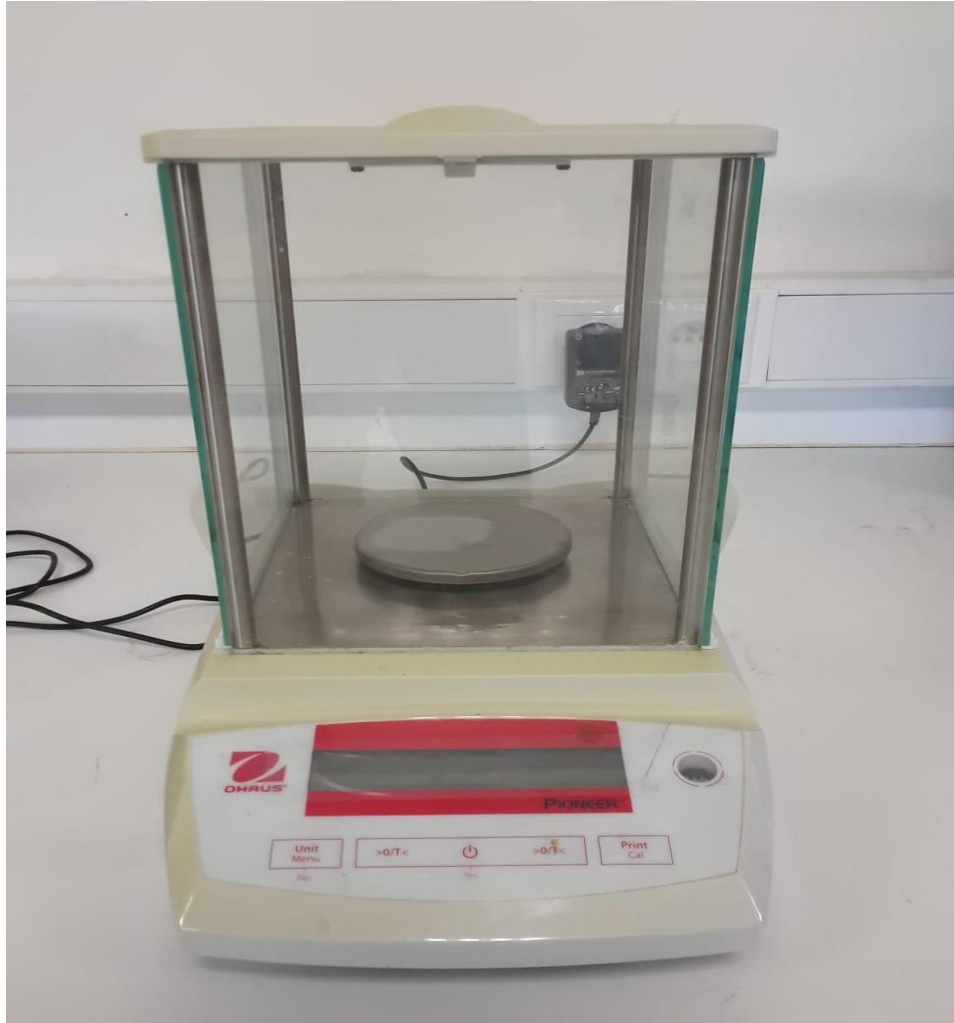
Tablo 5.1. Bizmut oksit nanopartikülünün özellikleri

Saflık	% 99,99
Renk	Sarı
Ortalama Parçacık Boyutu	75 nm-195 nm
Özgül Yüzey Alanı	4 m ² /g – 6 m ² /g
Yoğunluk	9,2 g/cm ³

Bizmut oksidin dizel yakıt içerisine eklenmeden önce hassas terazi aracılığıyla uygun miktarların elde edilmesi sağlanmıştır.

5.1.2 Hassas Terazi

Kullanılacak nanopartikül miktarını 50, 100 ve 150 ppm miktarlarında ayarlayabilmek için Fotoğraf 5.2’de gösterilen 0,0001 g hassasiyete sahip PA214C model Ohaus-Pioneer marka hassas terazi kullanılmıştır.



Fotoğraf 5.2. Ohaus-Pioneer hassas terazi

Hassas terazi yardımıyla 50 ppm, 100 ppm ve 150 ppm dozajlarında hazırlanan bizmut oksit nanopartikül tozları sırasıyla 3 farklı kaptaki bulunan 700 g saf dizel yakıt içerisine eklenmiştir. Hazırlanan bizmut oksit nanopartikülünün fotoğrafı ve saf dizel yakıt fotoğraflarda gösterilmiştir.



Fotoğraf 5.3. Saf dizel yakıt



Fotoğraf 5.4. Hazırlanmış bizmut oksit nanopartikülü

Fotoğrafta gösterildiği gibi 50, 100 ve 150 ppm miktarlarında hazırlanan nanopartiküller yine fotoğrafta gösterilen saf dizel yakıt içerisine eklenerek yeni yakıtın eldesi için ilk adım tamamlandıktan sonra partikül toz taneciklerinin dizel yakıt içerisinde karışımı için bir sonraki aşama olan manyetik karıştırıcıda karıştırma işlemine geçilmiştir.

5.1.3 Manyetik Karıştırıcı

Uygun miktarda hazırlanan nanopartikül katkılı dizel yakıtların ilk karışım işlemi için $\pm\%2$ hız hassasiyetli, 100 – 1400 dev/dak aralıklarında çalışabilen MR Hei-Tec model Heidolph marka manyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Karışımın yapılabilmesi için manyetik balık adı verilen silindirik mıknatıslar dizel-nanopartikül karışım yakıt içerisine konumlandırılıp karışım işlemi 5 dakika boyunca yapılmıştır. Fotoğraf 5.5'te manyetik karıştırıcı gösterilmiştir.



Fotoğraf 5.5. Heidolph manyetik karıştırıcı

5.1.4 Ultrasonik Karıştırıcı

Manyetik karıştırıcı ile topak haline gelmiş veya daha büyükçe olan nano toz zerreciklerinin dizel yakıt içerisinde karışımı sağlandıktan sonra, 30 °C sıcaklık ayarında 60 dk boyunca isolab marka ultrasonik karıştırıcı vasıtasıyla geri kalan nano toz tanelerinin de homojen bir şekilde karışımı sağlanmıştır.

Fotoğraf 5.6’da ultrasonik karışım işlemi için kullanılan isolab marka ultrasonik banyo gösterilmiştir.



Fotoğraf 5.6. Isolab ultrasonik banyo

Ultrasonik karışım işleminin ardından homojen bir şekilde karışımı sağlanmış ve deney aşaması için hazır olan nanopartikül katkılı dizel yakıt Fotoğraf 5.7’de gösterilmiştir.



Fotoğraf 5.7. Nanopartikül katkılı dizel test yakıtı

Homojen karışım sağlandıktan sonra elde edilen 3 farklı nanopartikül katkılı deney yakıtı, yapılacak deneyler için hazırlanmıştır. Yeni yakıtların yakıt özellikleri ve isimlendirilmesi tablolarda verilmiştir.

Tablo 5.2. Test yakıtlarının isimleri

Yakıt	Açıklama
Bi0	Saf dizel yakıt
Bi50	50 ppm bizmut oksit nanopartikül katkılı yakıt
Bi100	100 ppm bizmut oksit nanopartikül katkılı yakıt
Bi150	150 ppm bizmut oksit nanopartikül katkılı yakıt

Tablo 5.3. Test yakıtlarının özellikleri

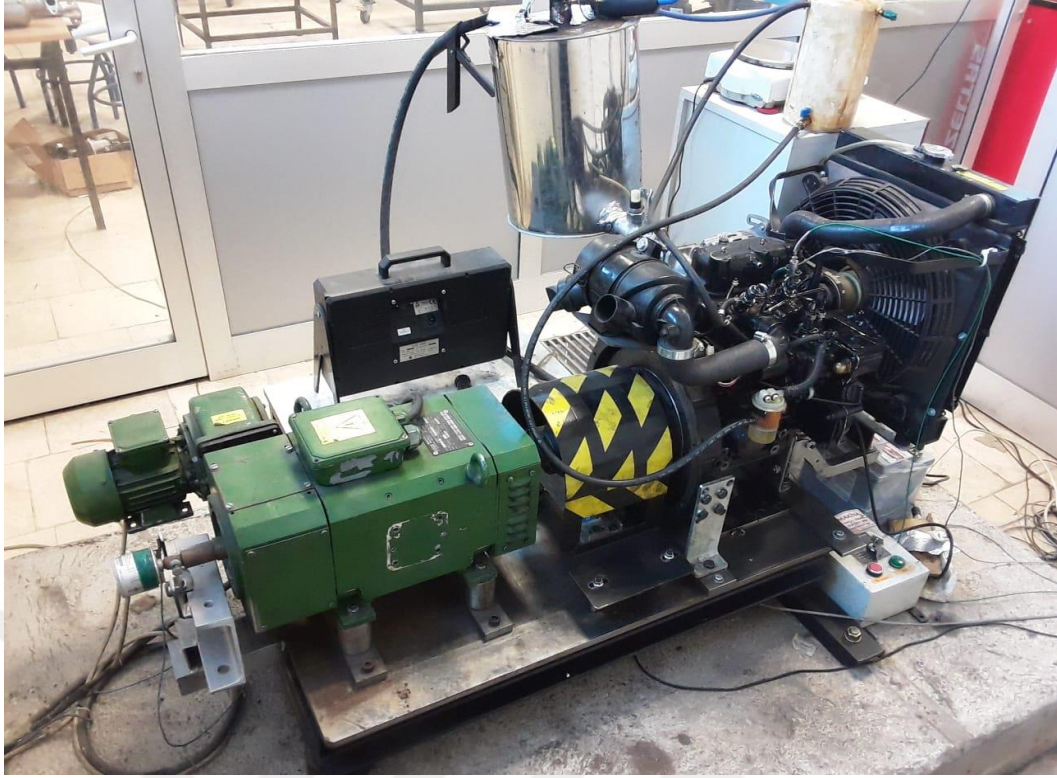
Yakıt	Setan Sayısı	Yoğunluk (kg/m ³)	Isıl değer (MJ/kg)	Viskozite (mm ² /s)
Bi0	58,8	831,5	43,2	2,4
Bi50	59,5	831,5	45,2	3,6
Bi100	59,6	831,5	45,3	3,8
Bi150	59,8	831,5	45,5	3,9

5.2 Deney Düzeneği ve Deney Malzemeleri

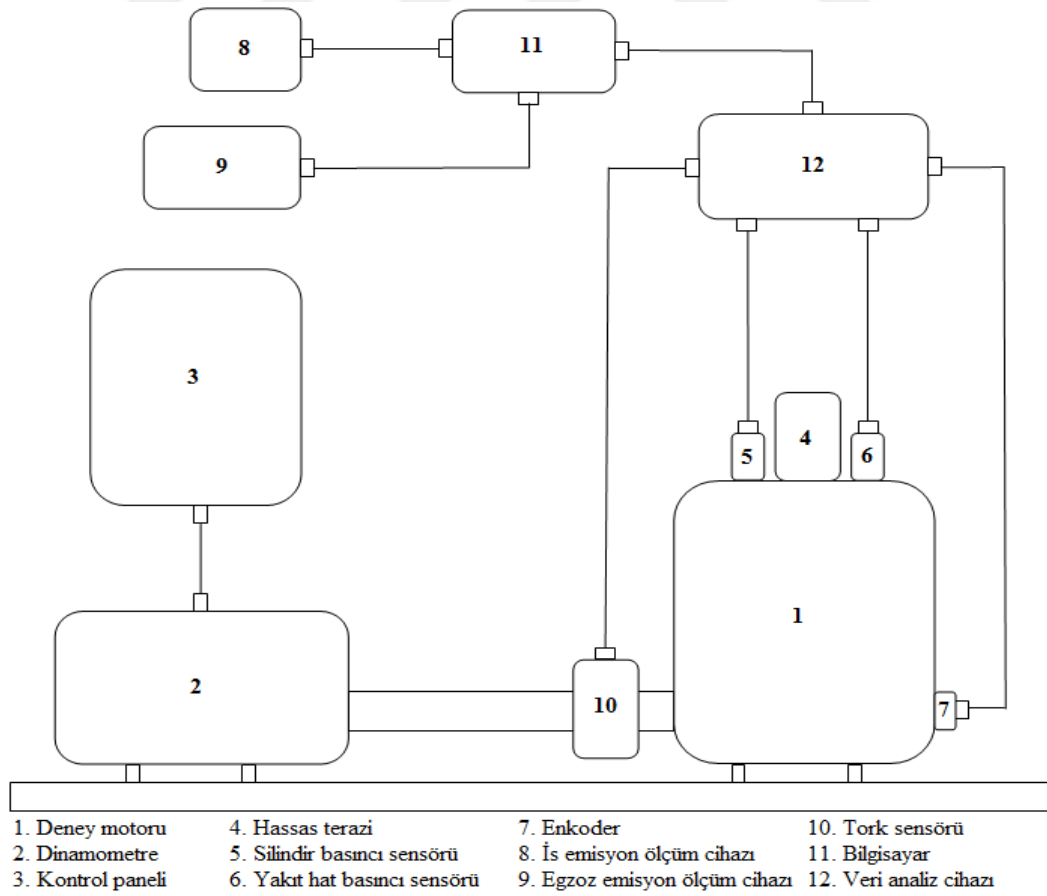
İlk aşamada elde edilen nanopartikül katkılı dizel test yakıtlarının dizel motorda gerçekleştirilen testleri bu bölümde anlatılmıştır. Deneyin yapılışı, deney düzeneği ve deney malzemelerine de bu başlıkta yer verilmiştir.

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Motor Laboratuvarında yapılan deneylerde Bi0, Bi50, Bi100 ve Bi150 nanopartikül katkılı dizel yakıtlar sırasıyla 1500, 2000 ve 2500 dev/dak'da ve her bir motor devri için 10, 15, 20 ve 25 Nm yüklerde test edilmiştir.

Testler için kullanılan motor test düzeneği Fotoğraf 5.8'de test düzeneğinin şematik görünümü ise Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



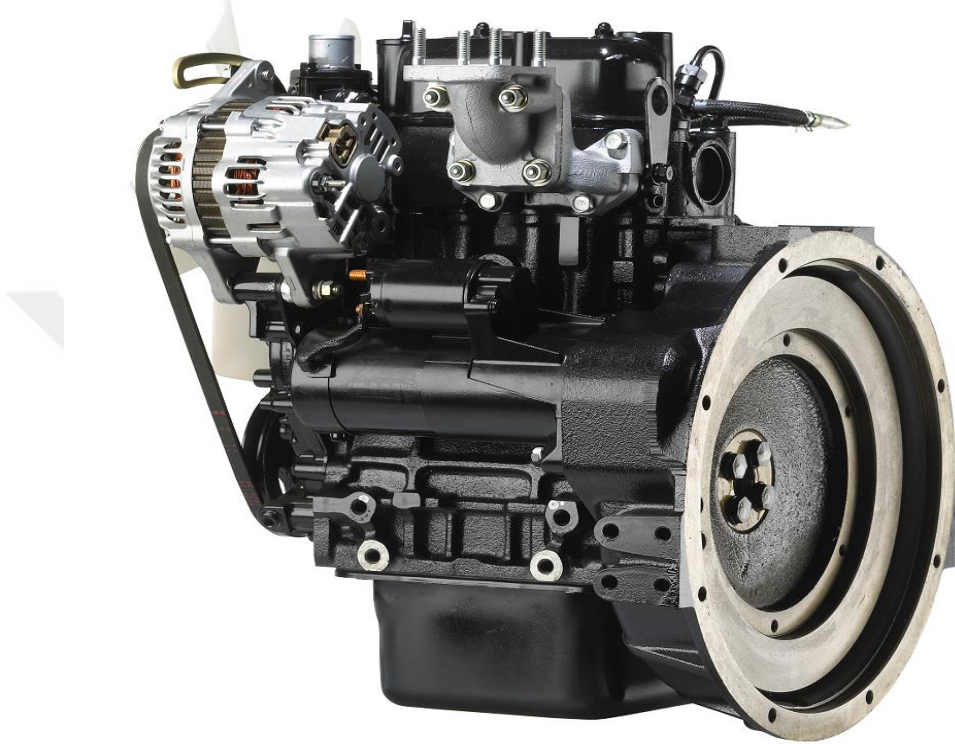
Fotoğraf 5.8. Motor test düzeneği



Şekil 5.1. Motor test düzeneğinin şematik görünümü

5.2.1 Test Motoru

Deneyde kullanılan su soğutmalı, dört zamanlı ve çift silindirli L2E model Mitsubishi marka dizel test motoru Fotoğraf 5.9’da gösterilmiştir. Test motorunun teknik özellikleri ise Tablo 5.4’te verilmiştir.



Fotoğraf 5.9. Test motoru

Tablo 5.4. Test motorunun özellikleri

Model	Mitsubishi L2E
Motor Tipi	4 Zamanlı, Dizel Motor
Silindir Sayısı	2
Silindir Çapı	76 mm
Kurs	70 mm
Sıkıştırma Oranı	23:1
Enjeksiyon Pompa Tipi	ND-PFR
Maksimum Güç	11,3 kW
Maksimum Tork	33,2 Nm
Maksimum Devir	3600 dev/dak

Deney düzeneğinde motor çıkışından sonra konumlanan Kemsan marka dinamometre yürütülen çalışma için motor yükünü ayarlamak ve kuvveti ölçebilmek adına kullanılmıştır.

5.2.2 Tork Ölçümü

Deney düzeneğinde motorun yüklenmesinin ardından motorun yük durumunu tayin etmek amacıyla Fotoğraf 5.10’da gösterilen 200 Nm tork sınırına kadar ölçüm yapabilen mile flanşla montaj edilebilir 4550 A model Kistler marka tork ölçüm sistemi kullanılmıştır.



Fotoğraf 5.10. Tork ölçüm sistemi

5.2.3 Silindir Basıncı Ölçümü

Farklı yakıtlarla birlikte silindir basınç değerlerini ölçmek ve karşılaştırmak amacıyla A3 6052C model Kistler marka silindir basınç sensörü kullanılmıştır. Sensörü destekleyebilmek amacıyla 5064 model Kistler marka amplifikatör (yükseltici) kullanılmıştır. Fotoğraf 5.11’de bu ekipmanlar gösterilmiştir.



Fotoğraf 5.11. Silindir basınç sensörü ve yükseltici

5.2.4 Hat Basıncı Ölçümü

Yakıt hat basınçlarını ölçmek amacıyla 4065B model Kistler marka basınç sensörü kullanılmıştır. Silindir basıncı ölçümünde de kullanıldığı gibi bir yükseltici kullanılmıştır. Fotoğraf 5.12’de sensör ve yükseltici gösterilmiştir.



Fotoğraf 5.12. Hat basınç sensörü ve yükseltici

5.2.5 Enkoder

Enkoder denilen optik krank açısı kodlayıcı, krank açısını, motor devrini ve ÜÖN gibi değerlerin tespiti için krank miline montajı yapılarak kullanılmıştır. Ağırlığı yükseltici kullanılmadan 390 g olan 2614B model Kistler marka krank açısı kodlayıcının görünümü Fotoğraf 5.13’te gösterilmiştir.



Fotoğraf 5.13. Enkoder

5.2.6 Emisyon Ölçümü

Yapılan deneyler esnasında emisyon ölçümü iki farklı cihazla yapılmıştır. Egzoz emisyonlarının ölçümü için Fotoğraf 5.14'te gösterilen Mexa-584L model Horiba marka egzoz emisyon ölçüm cihazı kullanılmıştır. İS emisyonu ölçümü için ise Fotoğraf 5.15'te gösterilen Mobydic marka İS ölçüm cihazı kullanılmıştır.



Fotoğraf 5.14. Egzoz emisyon ölçüm cihazı



Fotoğraf 5.15. İS emisyon ölçüm cihazı

5.2.7 Veri Analizi

Deneyler sonucunda kullanılan sensörler vasıtasıyla elde edilen verilerin kaydedilmesi işlemini ve analizini yapan Kistler KiBox cihazı Fotoğraf 5.16’da gösterilmiştir.



Fotoğraf 5.16. Veri analiz cihazı

5.3 Yöntem

Deney aşamasına geçilmeden önce, motorun ilk kontrolleri yapılmış uygun ortam ve çalışma şartları sağlandıktan sonra testler başlatılmıştır. Motor ve deney düzeneğinin yapılacak testler için hazır hale getirilmesinin ardından nanopartikül katkılı yakıtların testinden önce saf dizel yakıtın testleri yapılmış, sensörler ve ölçüm cihazları ile veriler aktarılmıştır. Ardından ilk bölümde hazırlanma aşamaları anlatılmış olan nanopartikül katkılı yakıtların testleri yapılmıştır. Testler 1500, 2000 ve 2500 dev/dak’da ve her bir motor devri için 10, 15, 20 ve 25 Nm motor yüklerinde yapılmış olup yanma, performans ve emisyon sonuçları bilgisayar ve veri toplama cihazı aracılığıyla elde edilmiştir.

5.4 Hesaplamalarda Kullanılan Denklemler

Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler ile birlikte test yakıtlarının yanma, motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerinin görülebilmesi ve karşılaştırılabilmesi için kullanılan denklemler verilmiştir.

5.4.1 Efektif Güç

Bilinen diğer adları, gerçek güç, faydalı güç veya fren gücü olan bu güç motorun krank mili ucundan ölçülür. Motor momentinin veya açısal hızın değişimine bağlı olarak değişir.

$$Pe = M_d \times \omega = \frac{M_d \times n}{9549} \quad (5.1)$$

Pe : Efektif güç (kW)

M_d : Motor momenti (Nm)

ω : Açısal hız (rad/s)

n : Motor devri (dev/dak)

5.4.2 Özgül Yakıt Tüketimi

Motora sağlanan yakıtın verimi konusunda bilgi veren özgül yakıt tüketimi motorun tükettiği yakıtın birim güç miktarına oranıdır. Özgül yakıt tüketimi aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$b_e = \frac{B}{P_e} \times 1000 \quad (5.2)$$

b_e : Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)

B : Yakıt tüketimi (kg/h)

P_e : Efektif motor gücü (kW)

5.4.3 Isıl Verim

Motorun efektif gücünün başka bir deyişle motordan elde edilen faydalı gücün, yakıtın tamamen yanması sonucunda motora giren enerjiye oranıdır (Şen, 2019). Isıl verim yakıtın yanma kabiliyetini gösterip, yakıt enerjisinin ne ölçüde mekanik enerjiye dönüştüğünü gösterir (Emiroğlu, 2018). Isıl verim hesabı aşağıdaki denklem kullanılarak yapılmıştır.

$$n_t = \frac{P_e}{B \times H_u} \times 3600 \quad (5.3)$$

n_t : Isıl verim (%)

P_e : Efektif güç (kW)

B : Yakıt tüketimi (kg/h)

H_u : Yakıt alt ısı değeri (kJ/kg)

5.4.4 Isı Salınım Oranı

Isı salınım oranı, yanmanın ilerleyişi ve yanma aşamaları hakkında önemli bilgiler verir. Isı salınım oranı yakıtın yanması sırasında yakıttan açığa çıkan kimyasal enerjinin salınım oranını ifade eder (Emiroğlu ve Şen, 2018). Isı salınım oranı hesabı için aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} P \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\gamma - 1} V \frac{dp}{dt} \quad (5.4)$$

Q : Isı salınımı (J)

P : Basınç (Pa)

V : Hacim (m³)

γ : Özgül ısı oranı

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde deneysel olarak yapılan çalışmada; 50, 100 ve 150 ppm Bi₂O₃ nanopartikül katkılı dizel yakıtın 1500, 2000 ve 2500 dev/dak'da ve her bir motor devri için 10, 15, 20 ve 25 Nm tork seviyelerinde yapılan testlerden elde edilen verilerin yanma özellikleri, motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkileri incelenmiştir.

6.1 Yanma Parametreleri

Yapılan çalışmada dizel motorun yanma aşamasında süreci etkileyen faktörleri ve diğer parametreler ile olan ilişkisini anlayabilmek adına hesaplanan ve elde edilen verilerin incelenmesi önem arz etmektedir. Bundan dolayı yapılan çalışmanın bu bölümünde; silindir basınçları, ısı salınım oranları ve bu parametrelerin maksimum değerleri ile birlikte bu maksimum değerlere hangi noktalarda ulaştıkları, her bir yakıt ve yük durumu için egzoz sıcaklıkları, yakıt püskürtme başlangıcı, yanma başlangıcı, tutuşma gecikmesi, yanma sonu ve yanma süresi gibi parametrelerin sonuçları ve elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır.

Püskürtme başlangıcı yakıtın silindir içerisine enjeksiyon vasıtasıyla ilk püskürtüldüğü zamandır. Yakıtın püskürtülme işlemi piston üst ölü noktaya gelmeden önce yapılmıştır. Viskozite, yoğunluk gibi yakıt özelliklerinin püskürtme başlangıcına etkisi büyüktür. Püskürtme başlangıç zamanındaki değişim motorun egzoz ve performans parametrelerini de etkiler.

Tablo 6.1 ve Tablo 6.2'de her bir test yakıtının farklı devir ve yüklerdeki yanma parametreleri gösterilmiştir.

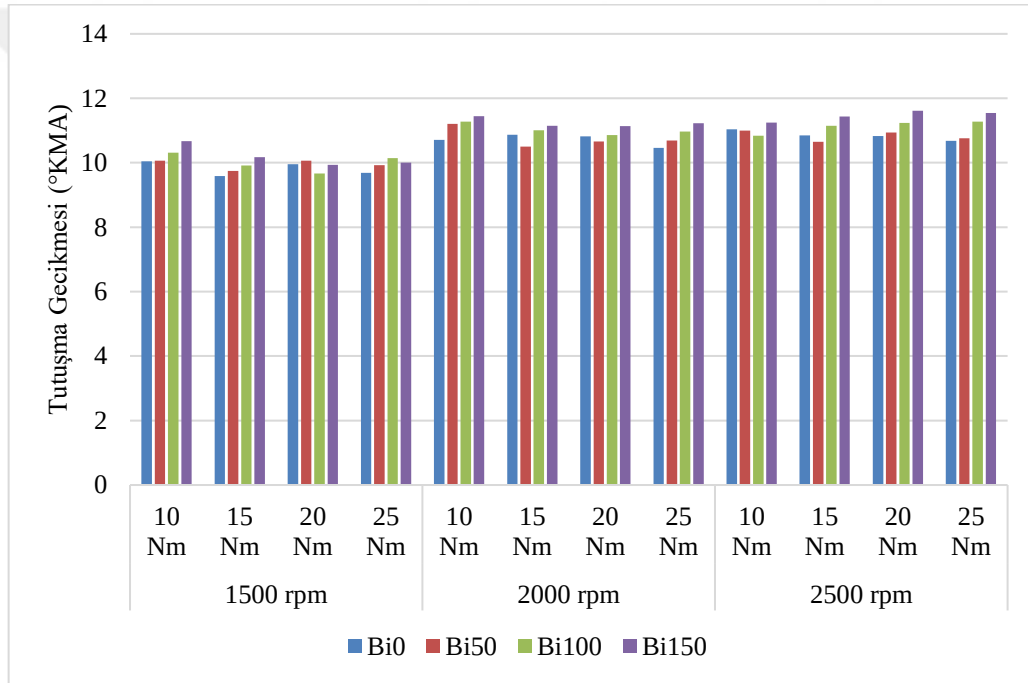
Tablo 6.1 incelendiğinde her bir devir ve yük değeri için yakıtların püskürtme başlangıçlarının birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Her yakıt tipi için yükün sabit kalıp devrin ise arttığı durumlarda püskürtme başlangıcı genellikle 1-1,5 °KMA daha geç başlamıştır. Yine her yakıt için bakıldığı zaman devir sabit ve yük artarken püskürtme başlangıcının daha erken başladığı gözlemlenmiştir. 2500 dev/dak'da bütün yakıtların püskürtme başlangıçları diğer devir ve yüklere göre daha geç başlamıştır. Partikül madde miktarının artışı ise püskürtme başlangıcını genellikle daha erken başlatmıştır. Dizel yakıtı oranla nanopartikül katkılı yakıtların püskürtme başlangıçları yüksek devir ve tork seviyelerinde genellikle daha erken başlamıştır.

Tablo 6.1. Yakıtların püskürtme ve yanma verileri

Motor Devri (dev/dak)	Motor Yüğü (Nm)	Yakıt	Tutuşma Gecikmesi (°KMA)	Püskürtme Başlangıcı (°KMA)	Yanma Başlangıcı (°KMA)	Yanma Sonu (°KMA)	Yanma Süresi (°KMA)
1500	10	Bi0	10,0	-9,5	0,5	21,0	20,49
		Bi50	9,6	-9,2	0,4	22,7	22,32
		Bi100	10,0	-9,1	0,9	22,8	21,96
		Bi150	9,7	-9,1	0,6	22,6	21,98
	15	Bi0	10,1	-9,3	0,8	25,8	25,02
		Bi50	9,7	-9,2	0,5	27,4	26,85
		Bi100	10,1	-9,4	0,7	25,6	24,91
		Bi150	9,9	-9,3	0,6	26,8	26,17
	20	Bi0	10,3	-10,2	0,1	31,3	31,15
		Bi50	9,9	-9,4	0,5	32,4	31,88
		Bi100	9,7	-8,4	1,3	32,5	31,18
		Bi150	10,1	-9,6	0,5	31,2	30,62
	25	Bi0	10,7	-9,7	1,0	46,5	45,57
		Bi50	10,2	-9,8	0,4	45,3	44,95
		Bi100	9,9	-9,6	0,3	42,9	42,53
		Bi150	10,0	-9,7	0,3	41,6	41,30
2000	10	Bi0	10,7	-9,6	1,1	23,5	22,35
		Bi50	10,9	-9,4	1,5	24,1	22,65
		Bi100	10,8	-9,1	1,7	25,9	24,18
		Bi150	10,5	-9,2	1,3	24,8	23,55
	15	Bi0	11,2	-9,6	1,6	26,3	24,65
		Bi50	10,5	-9,2	1,3	26,9	25,59
		Bi100	10,7	-9,4	1,3	26,5	25,20
		Bi150	10,7	-9,3	1,4	26,0	24,56
	20	Bi0	11,3	-9,5	1,8	30,8	29,06
		Bi50	11,0	-9,3	1,7	31,1	29,41
		Bi100	10,9	-9,5	1,4	30,0	28,63
		Bi150	11,0	-9,4	1,6	30,2	28,61
	25	Bi0	11,4	-9,6	1,8	36,4	34,52
		Bi50	11,1	-9,2	1,9	39,9	37,95
		Bi100	11,1	-9,6	1,5	35,9	34,33
		Bi150	11,2	-9,4	1,8	36,5	34,68
2500	10	Bi0	11,0	-8,4	2,6	25,5	22,82
		Bi50	10,8	-8,1	2,7	26,3	23,52
		Bi100	10,8	-8,3	2,5	25,1	22,56
		Bi150	10,7	-8,2	2,5	26,0	23,48
	15	Bi0	11,0	-8,3	2,7	28,7	25,96
		Bi50	10,6	-7,9	2,7	29,8	27,08
		Bi100	10,9	-8,4	2,5	28,9	26,32
		Bi150	10,8	-8,2	2,6	28,8	26,26
	20	Bi0	10,8	-8,2	2,6	33,5	30,84
		Bi50	11,1	-8,4	2,7	33,2	30,45
		Bi100	11,2	-8,4	2,8	36,3	33,43
		Bi150	11,3	-8,4	2,9	34,2	31,27
	25	Bi0	11,2	-8,2	3,0	44,3	41,21
		Bi50	11,4	-8,4	3,0	40,4	37,39
		Bi100	11,6	-8,8	2,8	40,3	37,43
		Bi150	11,5	-8,5	3,0	41,2	38,13

Yanma başlangıcı setan sayısı ve parlama noktası gibi yakıt özelliklerinden etkilenir. Tablo 6.1 incelendiğinde yanma başlangıçları bütün yakıtlar için pistonun üst ölü noktadan alt ölü noktaya hareketi esnasında meydana gelmiştir. Yine bütün yakıtlar için motor devrinin artması ile birlikte yanma daha geç başlamıştır. Aynı devirde yükün artması ile birlikte genellikle yanma başlangıcının 0,5-1 °KMA daha sonra başladığı görülmektedir. Saf dizel yakıta oranla nanopartikül katkılı yakıtlar yanmaya erken başlamıştır, bunun sebebinin setan sayısı olduğu düşünülmüştür.

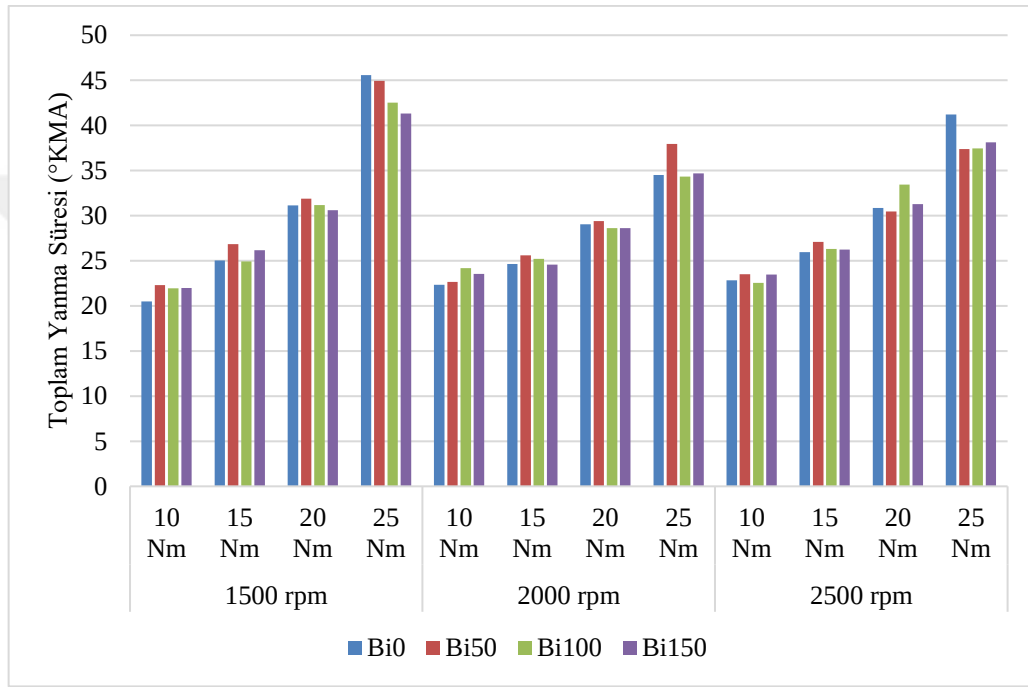
Tutuşma gecikmesi yakıt püskürtme başlangıcı ile silindir içerisindeki yakıt hava karışımının yanması arasında geçen zamandır. Tutuşma gecikmesi sonuçları Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. Yakıtların tutuşma gecikmesi verileri

Tutuşma gecikmesinin Bi150 yakıtında genellikle daha yüksek çıktığı Şekil 6.1’den görülmektedir. Düşük devir ve düşük tork değerlerinde saf dizel yakıtın tutuşma gecikmesi diğer yakıtlara oranla daha düşük olmuştur. Bi50 katkılı yakıt saf dizel yakıta en yakın sonuçları ortaya koymuştur ve dahası bazı devir ve yük değerlerinde Bi50 yakıtının saf dizele oranla tutuşma gecikmesi daha düşük çıkmıştır. Devir artışı genellikle tüm yakıtlar için tutuşma gecikmesi süresini uzatmıştır. Yük artışının 2000 ve 2500 dev/dak’da tutuşma gecikmesi üzerine etkisi az olmasına karşın 1500 dev/dak’da yükün artışı tutuşma gecikmesini düşürmüştür.

Deney yakıtlarının yanma sonu değerleri yine krank açısı cinsinden Tablo 6.1’de görülmektedir. Devir sayısındaki artış yakıtların yanma sonu sürelerini arttırmaktadır. Aynı şekilde yük artışı da yanma sonu krank açısı değerlerini arttırdığı gözlenmektedir. Düşük devir ve yüklerde saf dizelin yanma işlemi diğer yakıtlara oranla daha önce sonlanmıştır. Ancak yüksek tork değerlerine bakıldığında ise saf dizel yakıtın nanopartikül katkılı yakıtlara oranla yanma işleminin daha uzun sürdüğü görülmektedir.



Şekil 6.2. Yakıtların yanma süresi verileri

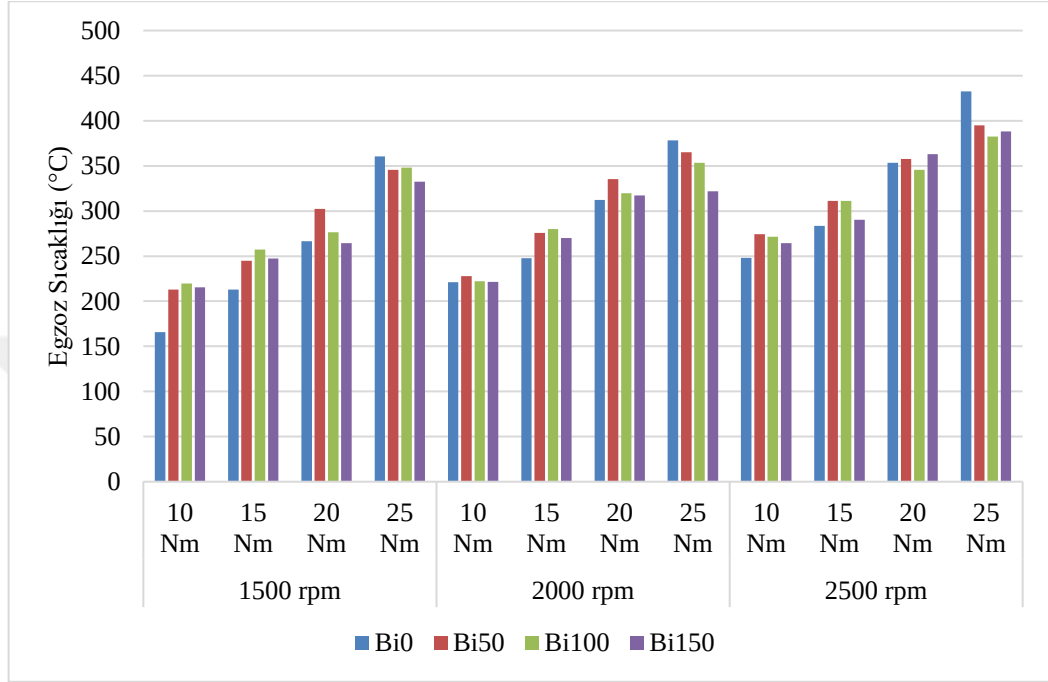
Yanma süresine ait bilgiler Şekil 6.2’de verilmiştir. Yanma süresi yanma başlangıcı ile yanma sonu arasındaki zamanı ifade eder. Yükün artışı ile birlikte her bir yakıt tipi için yanma sürelerinin arttığı Şekil 6.2’den görülebilmektedir. Motorun yüksek yüklerde çalışması silindir içerisine daha fazla yakıt hava karışımı gönderilmesi anlamına gelir. Yanma odasındaki yakıt hava karışımı miktarının artışı da ister istemez yanma sonu süresini uzatacağından yanma süresi de daha yüksek krank açılarındaki son bulur. Yakıtlar yüksek yük oranları dışında genellikle aynı krank açısı kadar yanma süresi verilerine sahip olmuşlardır. Yakıt özellikleri kısmında bizmut oksit nanopartikül katkılı yakıtların ısı değerlerinin saf dizel yakıttan yüksek olması sebebiyle özellikle yüksek yüklerde yanma sürelerinin saf dizel yakıtı oranla daha düşük çıktığı görülmektedir.

Tablo 6.2. Yakıtların egzoz sıcaklık, ısı salınım ve basınç verileri

Motor Devri (dev/dak)	Motor Yüğü (Nm)	Yakıt	Egzoz Sıcaklığı (°C)	Maks. Silindir Basıncı (bar)	Maks. Isı Salınımı (J/°KMA)	Maks. Silindir Basınç Yeri (°KMA)	Maks. Isı Salınım Yeri (°KMA)
1500	10	Bi0	166	63,6	15,4	7,1	3,6
		Bi50	213	61,5	12,7	7,3	5,1
		Bi100	220	63,3	15,1	7,8	4,7
		Bi150	216	62,1	13,7	7,5	4,9
	15	Bi0	213	64,7	15,6	7,9	4,3
		Bi50	245	63,1	13,7	8,0	5,5
		Bi100	257	63,8	14,6	8,0	5,1
		Bi150	247	63,4	14,2	7,8	5,3
	20	Bi0	267	66,0	14,7	7,7	4,4
		Bi50	302	63,4	13,4	8,1	6,0
		Bi100	276	63,9	14,9	8,8	6,6
		Bi150	264	64,3	14,3	8,0	5,5
	25	Bi0	360	63,5	13,3	8,0	5,8
		Bi50	346	63,9	12,8	8,0	6,4
		Bi100	348	64,0	13,0	8,2	6,7
		Bi150	332	64,2	13,1	8,0	6,0
2000	10	Bi0	221	63,8	14,9	7,6	5,2
		Bi50	228	62,6	14,3	8,1	6,1
		Bi100	222	63,5	15,3	8,5	6,4
		Bi150	222	64,2	15,1	8,1	5,4
	15	Bi0	248	64,1	15,5	8,2	6,2
		Bi50	276	64,1	14,9	8,4	6,3
		Bi100	280	64,2	14,8	8,4	6,6
		Bi150	270	63,3	14,5	8,5	6,5
	20	Bi0	312	64,0	15,7	8,3	6,9
		Bi50	335	63,1	14,9	8,5	7,8
		Bi100	320	63,7	14,3	8,2	7,2
		Bi150	317	63,9	15,0	8,4	7,2
	25	Bi0	378	64,1	15,9	8,6	7,3
		Bi50	365	63,3	15,0	8,5	7,9
		Bi100	354	64,0	14,8	8,5	7,6
		Bi150	322	63,4	15,0	8,7	8,1
2500	10	Bi0	248	64,9	20,3	9,6	5,8
		Bi50	274	64,8	20,5	9,8	6,0
		Bi100	272	64,7	19,9	9,7	6,1
		Bi150	264	64,3	18,3	9,7	6,4
	15	Bi0	283	66,3	21,1	9,9	6,1
		Bi50	311	65,2	19,4	10,1	6,5
		Bi100	311	65,7	19,6	9,6	5,9
		Bi150	290	66,0	19,8	9,9	6,3
	20	Bi0	353	65,6	19,1	9,9	6,1
		Bi50	358	65,5	19,2	9,8	6,2
		Bi100	346	65,8	19,2	9,9	6,3
		Bi150	363	64,8	17,9	10,3	7,5
	25	Bi0	432	64,9	18,7	10,1	6,7
		Bi50	395	64,7	18,1	10,2	7,6
		Bi100	383	65,6	18,2	10,1	7,0
		Bi150	388	64,5	18,5	10,1	6,6

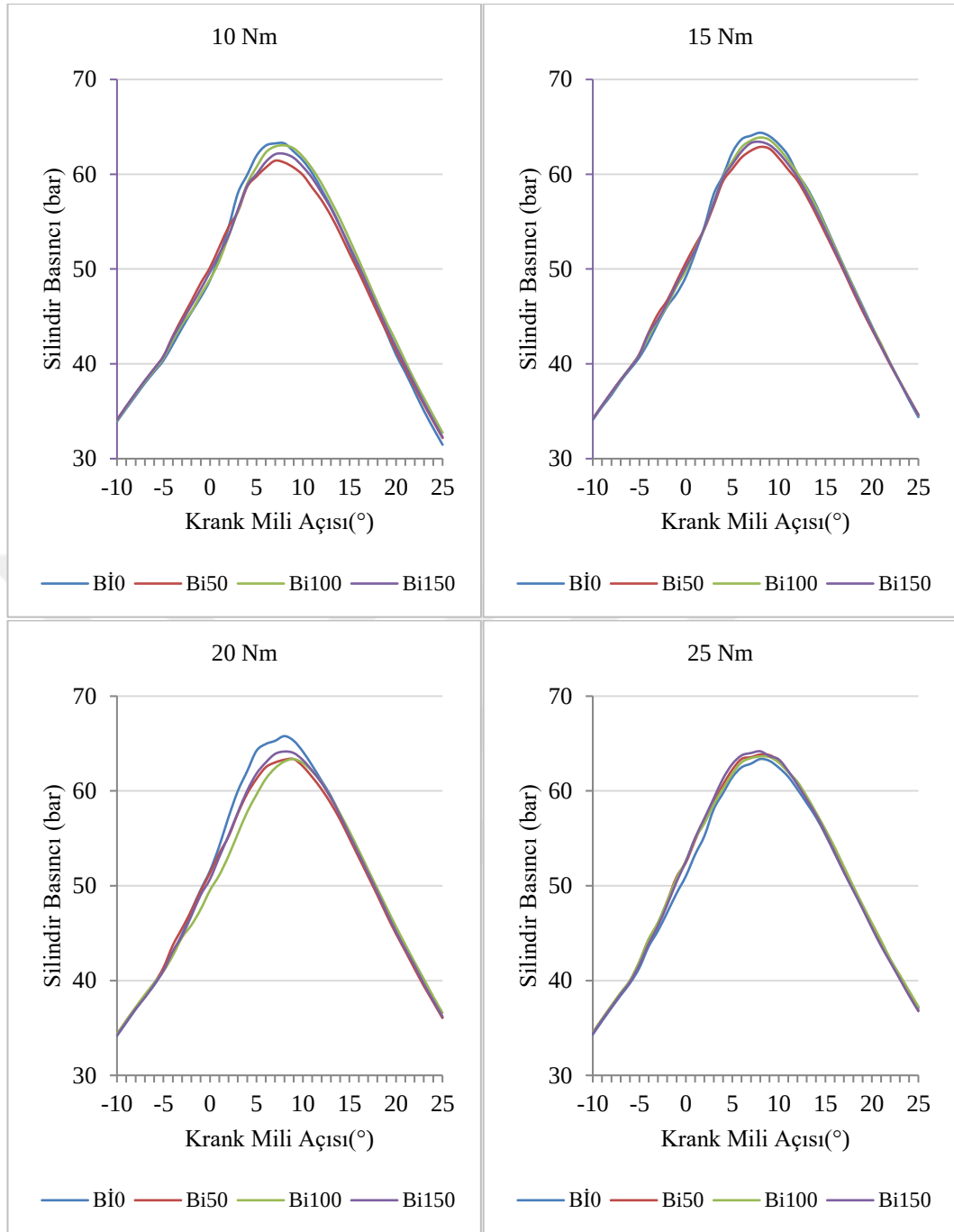
Yanma parametrelerinin devamı olarak incelenen egzoz sıcaklığı, maksimum silindir basıncı, maksimum ısı salınımı, maksimum silindir basıncı yeri ve maksimum ısı salınımının yeri Tablo 6.2’de gösterilmiştir.

Deney yakıtlarının egzoz sıcaklığına ait verileri Şekil 6.3’te verilmiştir.



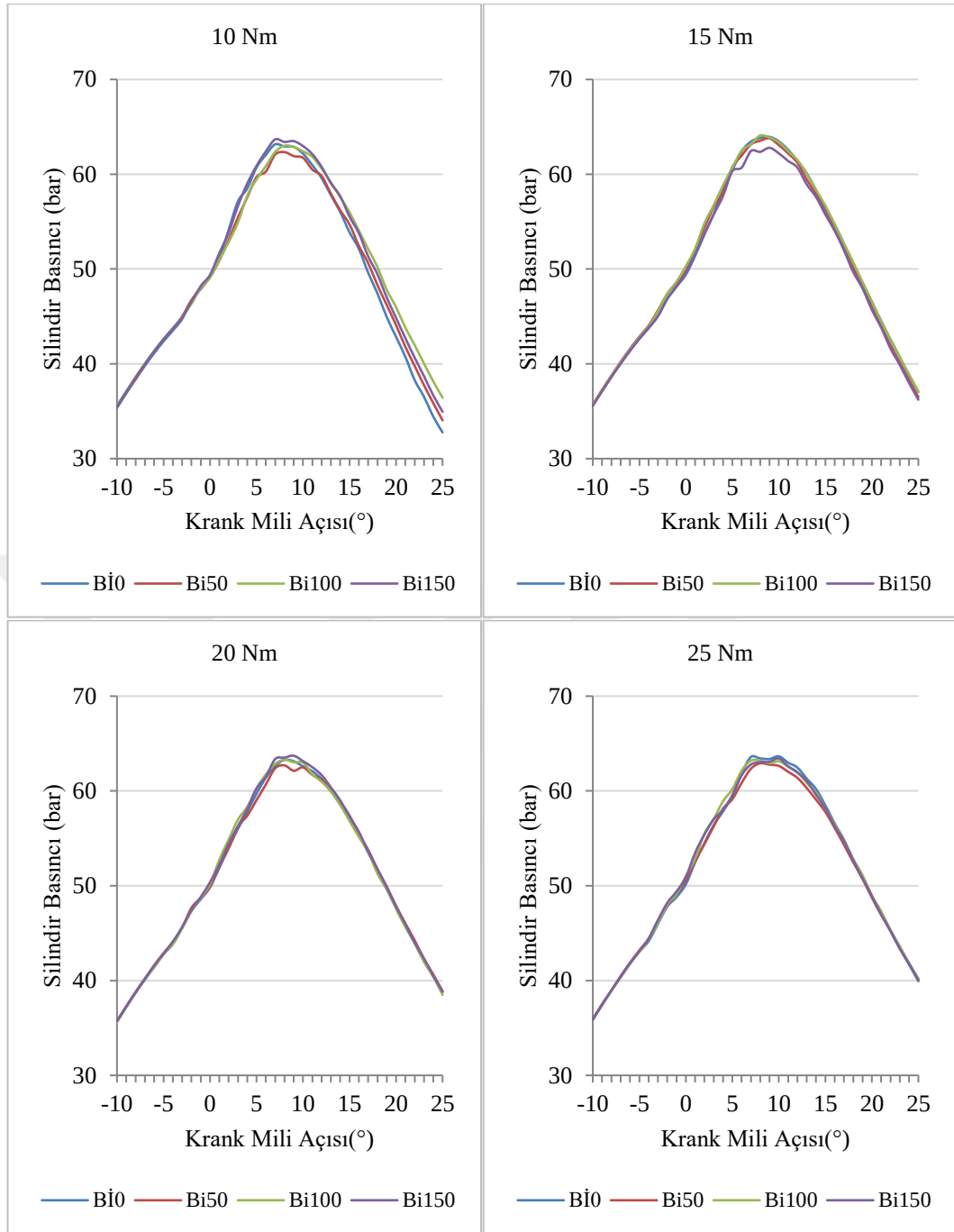
Şekil 6.3. Yakıtların egzoz sıcaklığı verileri

Egzoz gazı sıcaklığı motor yüküne, silindir içerisine alınan yakıt hava karışım miktarına ve yanma aşamalarındaki değişimlere bağlı olarak değişir. Egzoz gazı sıcaklığının dizel yakıtı bizmut oksit nanopartikül ilavesi ile arttığı Şekil 6.3’te görülmektedir. Motor devrindeki artış aynı yakıt tipinin egzoz sıcaklığını da arttırmıştır. 1500, 2000 ve 2500 dev/dak ve 25 Nm yük seviyesinde saf dizel yakıtın egzoz sıcaklığı değerinin yüksek çıkmasının sebebi saf dizel yakıtın yanma süresinin o seviyelerde fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Maksimum egzoz sıcaklığı değeri 2500 dev/dak ve 25 Nm yük seviyesinde dizel yakıt için 432 °C olarak ölçülmüştür. Minimum egzoz sıcaklığı değeri ise 1500 dev/dak ve 10 Nm yük seviyesinde saf dizel yakıt için 166 °C olarak ölçülmüştür. Partikül maddelerin saf dizele katkısı yakıt hava karışımındaki oksijen oranını arttırdığından dolayı egzoz gazı sıcaklığının saf dizele oranla genellikle yüksek olduğu gözlenmiştir. Şekil 6.4, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6’da farklı devir ve yüklerdeki silindir basınç grafikleri verilmiştir.



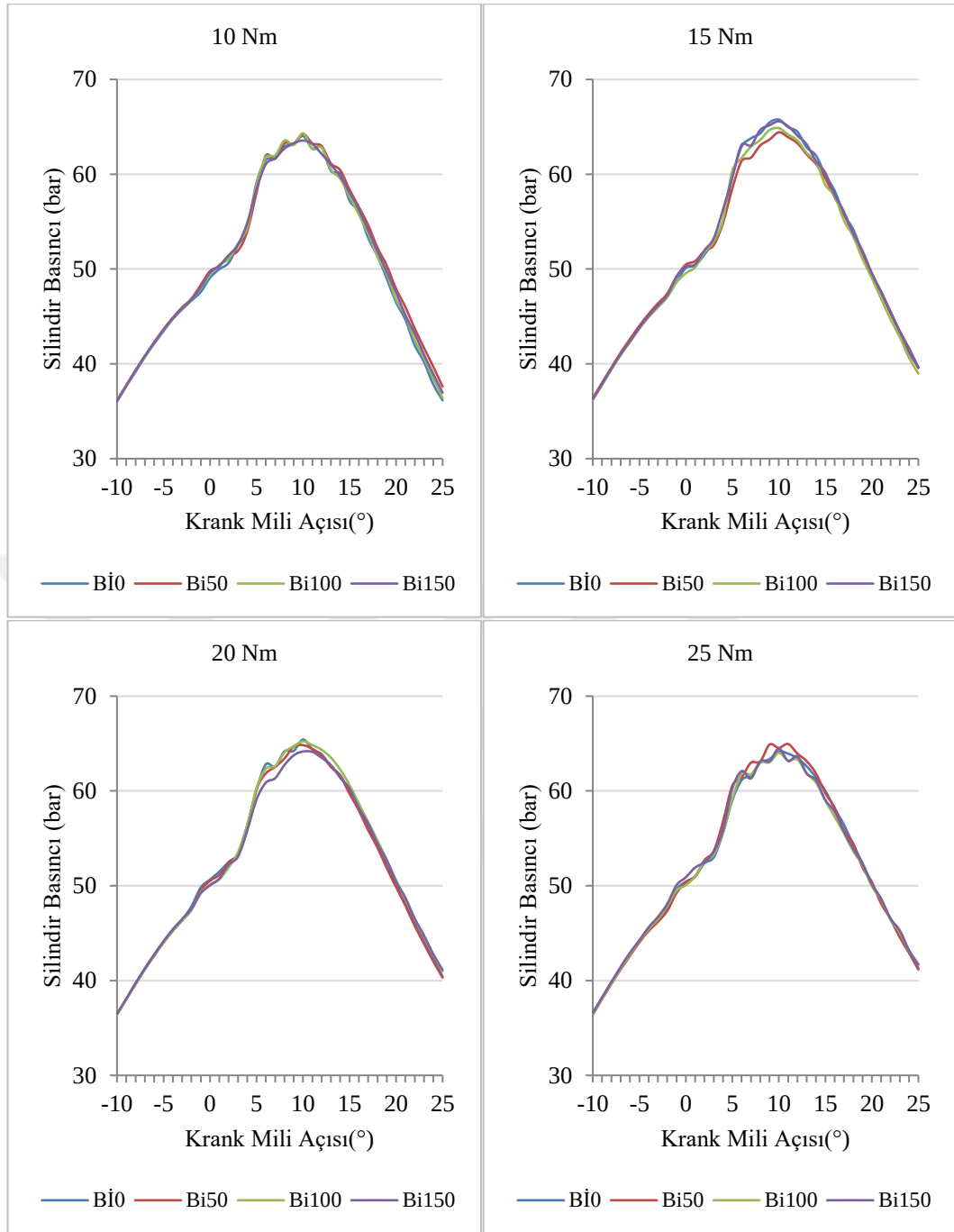
Şekil 6.4. Yakıtların 1500 dev/dak'daki silindir basınç grafikleri

Şekil 6.4'te yakıtların silindir basınç değerlerinin birbirlerine yakın değerlerde olduğu görülebilir. Ancak üst ölü noktadan sonra 5-10 °KMA aralığında yanma başlangıcının ardından silindir içi basınçlarının da arttığı gözlenmektedir. Düşük yüklerde saf dizel yakıt maksimum değerlere ulaşırken 25 Nm yükte Bi150 yakıtı maksimum basınca ulaşmıştır. Yük artışı silindirlere püskürtülen yakıt miktarını da arttırdığından maksimum silindir basınçları da artış göstermiştir.



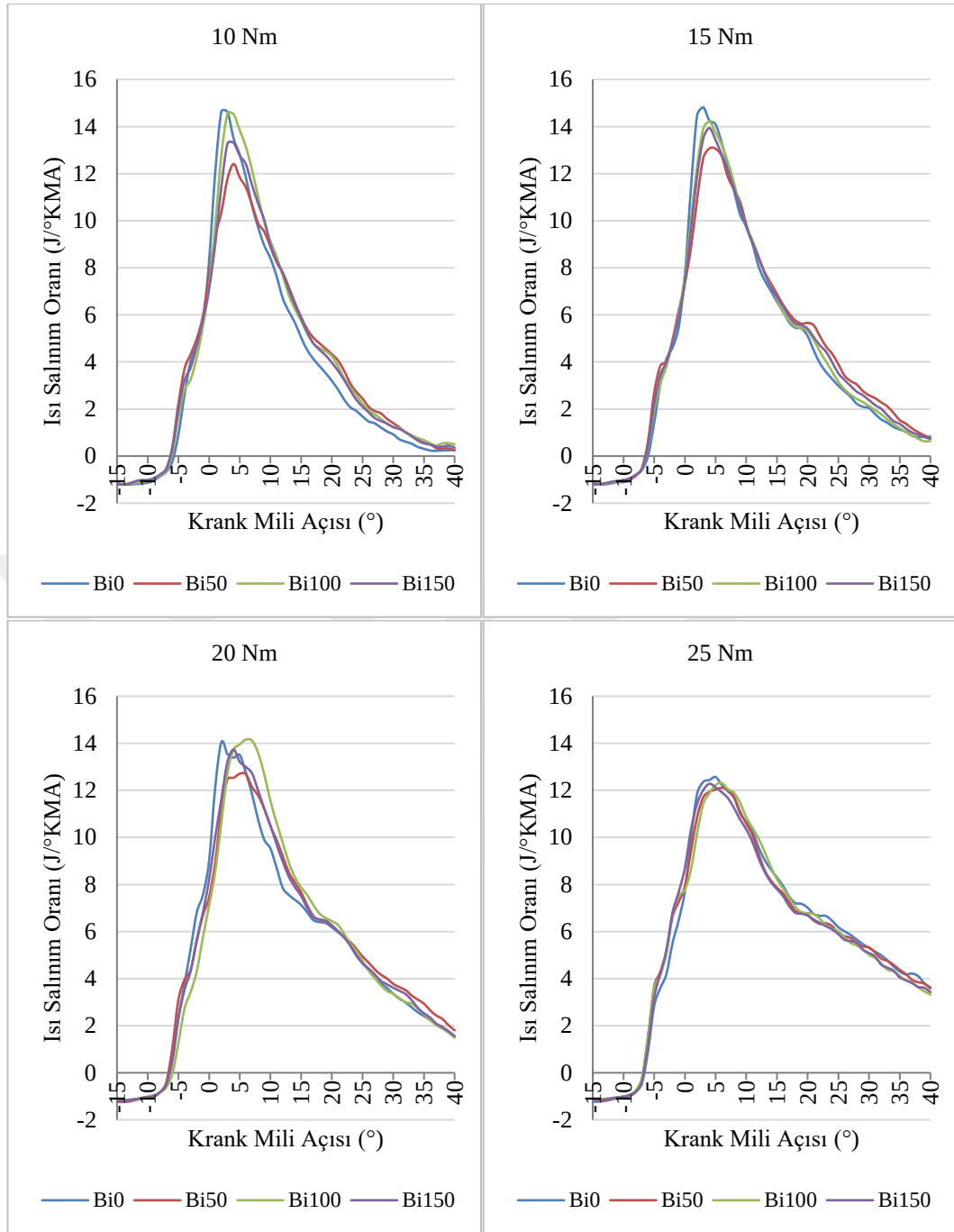
Şekil 6.5. Yakıtların 2000 dev/dak'daki silindir basınç grafikleri

Motor devrinin artışı ile birlikte maksimum silindir basınç değerleri de yakıt miktarı artışından dolayı artmıştır. Maksimum basıncın meydana geldiği yerler ise yanma sonuna doğru yaklaşma eğilimindedir. Bunun sebebi yakıtların yanma başlangıçlarının daha geç başlamasıdır. 2000 motor devrindeki maksimum silindir basınçları yüksek motor yüklerinde yakın değerler çıkmasına karşın düşük yüklerde Bi100 ve Bi150 karışım yakıtlarının daha yüksek çıkmıştır.



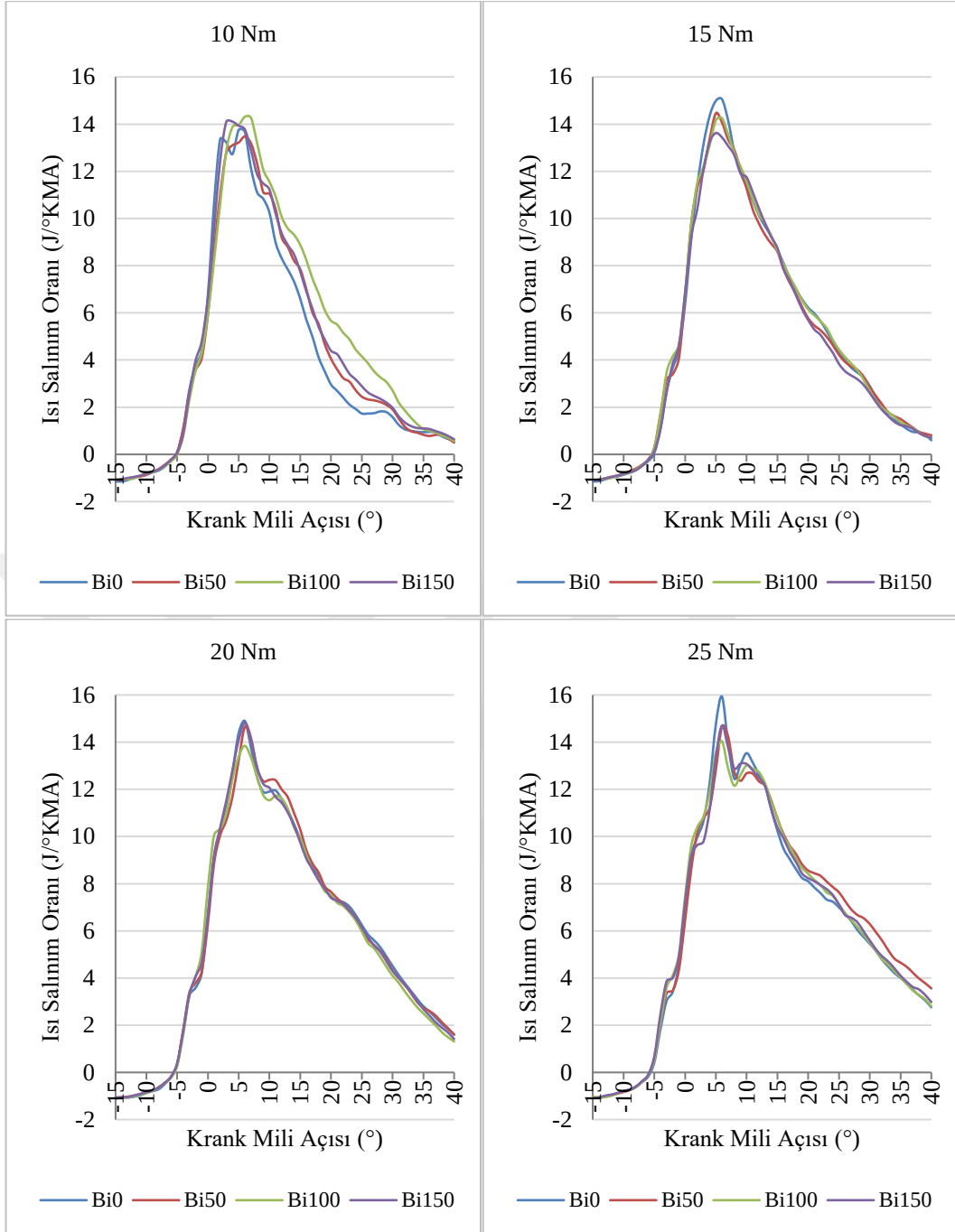
Şekil 6.6. Yakıtların 2500 dev/dak'daki silindir basınç grafikleri

Devir artışı aynı yükteki yakıtların maksimum silindir basıncının artışı ile sonuçlanmıştır. Silindir basınçları yakıt miktarı dışında tutuşma gecikmesine de bağlıdır. Yakıtın geç tutuşması ani basınç yükselmesine sebebiyet verebilir. Bundan dolayı Tablo 6.1'de verilen tutuşma gecikmesi uzun süren yakıtların maksimum basınçlarının da yüksek çıktığı Şekil 6.6 'da doğrulanır. Şekil 6.7, Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'da farklı devir ve yüklerdeki ısı salınım oranı grafikleri verilmiştir.



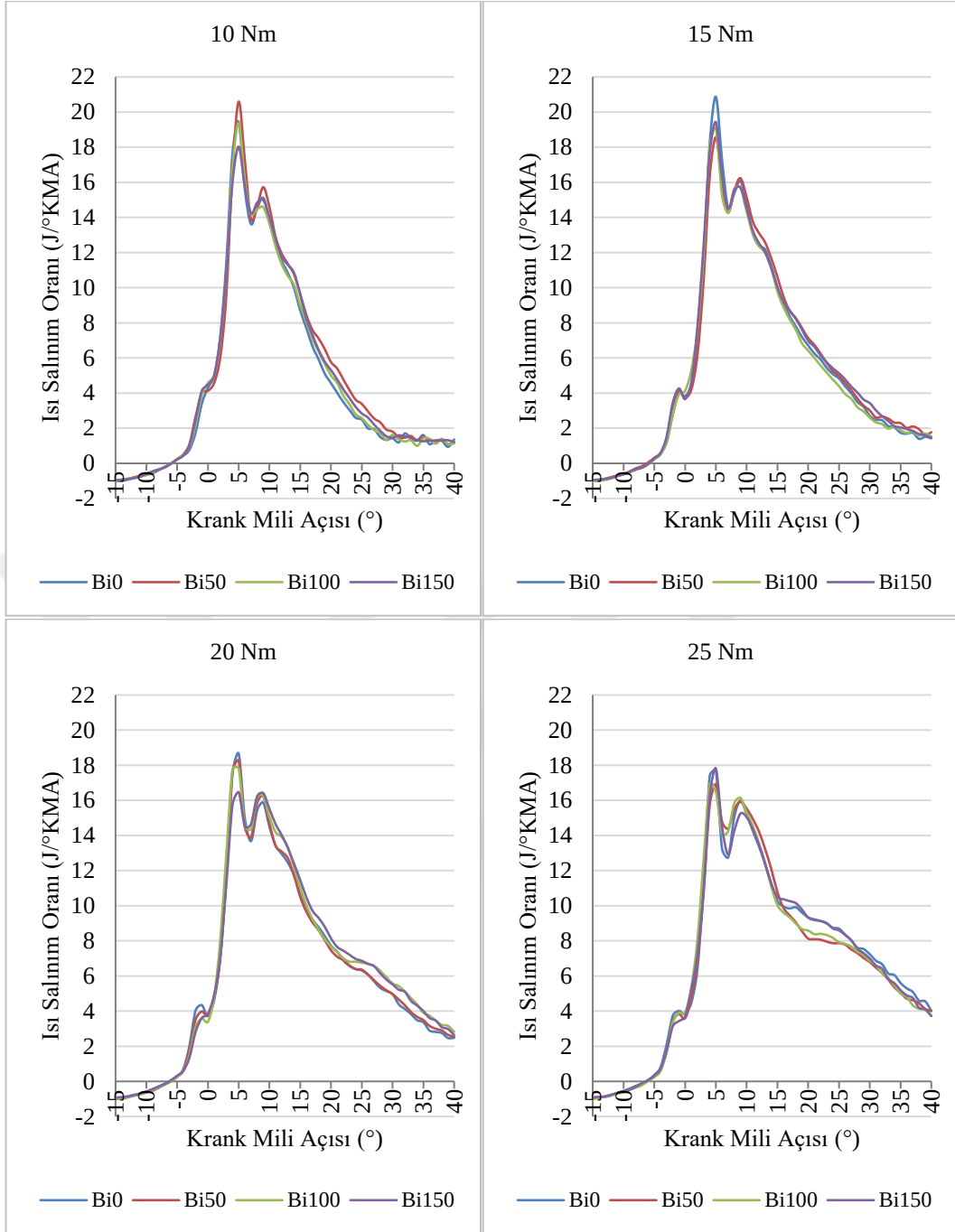
Şekil 6.7. Yakıtların 1500 dev/dak'daki ısı salınım oranı grafikleri

Şekil 6.7'de görüldüğü üzere saf dizel yakıtın maksimum ısıl salınım yerleri karışım yakıtlardan daha önce gerçekleşmektedir. Bunun en büyük sebebi saf dizel yakıtın setan sayısının nanopartikül katkılı yakıtlardan daha az olmasıdır. Maksimum ısı salınım oranlarına bakıldığında ise Bi0 ve Bi100 yakıtlarının oranları diğer yakıtlara oranla daha yüksek olmuştur. Grafiklere genel olarak bakıldığında ise ısı salınım oranlarının birbirine yakın değerlerde olduğu görülmektedir.



Şekil 6.8. Yakıtların 2000 dev/dak'daki ısı salınım oranı grafikleri

Şekil 6.8 incelendiğinde ise düşük yüklerde nanopartikül katkılı yakıtların maksimum ısı salınım oranı daha yüksek çıkmıştır ancak yüksek yüklerde saf dizel yakıtın maksimum ısı salınımının daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebi tutuşma gecikmesidir. Tutuşma gecikmesi süresinin uzaması ile birlikte silindir içerisine püskürtülen yakıt yanma başlangıcı sırasında aniden yanmaya başlar ve bu ani yanma durumunda ısı salınımı maksimum değerine ulaşmıştır.

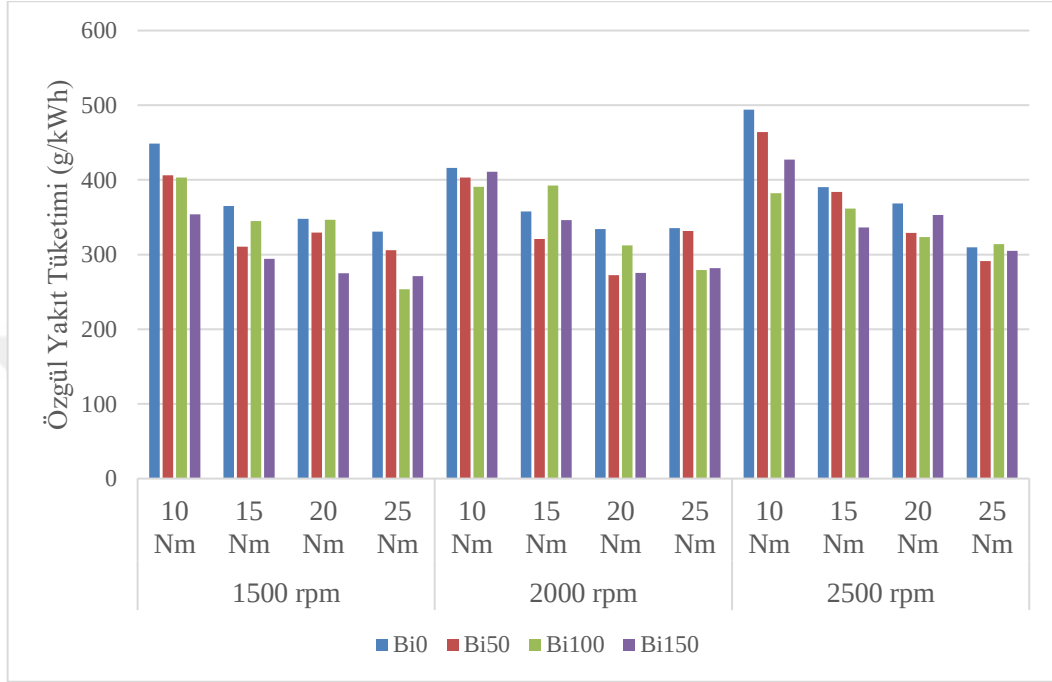


Şekil 6.9. Yakıtların 2500 dev/dak'daki ısı salınım oranı grafikleri

Motor devrinin artışı ile birlikte kullanılan tüm yakıt tiplerinin maksimum ısı salınım oranlarının ve ısı salınım yerlerinin arttığı Şekil 6.9'da ve Tablo 6.2'de görülmektedir. Motor devrinin artışı ile birlikte püskürtülen yakıt miktarındaki artış ısı salınım oranlarının da yükselmesine sebep olarak gösterilebilir. Düşük yüklerde Bi0 ve Bi50 yakıtlarının diğer yakıtlara oranla daha yüksek maksimum ısı salınımı değerlerine ulaştıkları gözlenmiştir.

6.2 Motor Performans Sonuçları

Çalışmanın bu bölümünde motor performans parametrelerinden olan yakıtların özgül yakıt tüketimi ve ısı verimleri parametrelerinin sonuçları verilmiş olup, elde edilen sonuçların analizi yapılmıştır.



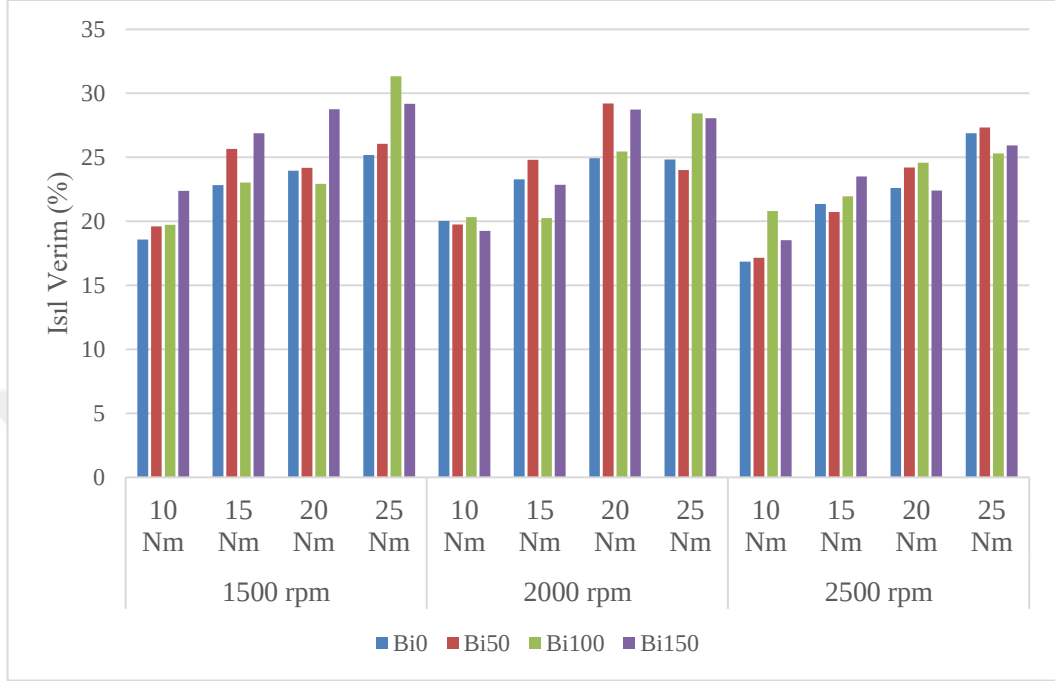
Şekil 6.10. Yakıtların özgül yakıt tüketimi verileri

Özgül yakıt tüketimi motor çıkışındaki güç başına harcanan yakıt miktarını ifade etmektedir. İdeal yanma koşullarında özgül yakıt tüketiminin daha düşük değerlerde çıkması beklenir. Yakıtın sahip olduğu özelliklerden yakıtın kimyasal ve fiziksel özellikleri, yakıt yoğunluğu, yakıt viskozitesi, ısı değeri ve yakıt püskürtme sisteminin özellikleri özgül yakıt tüketim miktarını büyük oranlarda etkiler (Aydın, 2022).

Şekil 6.10'da görüldüğü üzere en düşük özgül yakıt tüketim miktarı Bi100 yakıtının 1500 motor devrinde ve 25 Nm yükte elde edilmiştir. Bi100 yakıtının bu noktada özgül yakıt tüketim miktarı ise 253 g/kWh olmuştur. En yüksek özgül yakıt tüketimi ise 2500 motor devrinde ve 10 Nm yükte Bi0 yakıtıyla elde edilmiştir. Bi0 yakıtının bu noktadaki değeri ise 494 g/kWh olmuştur.

Şekil 6.10'dan hareketle partikül madde miktarının artışı özgül yakıt tüketimini genellikle düşürdüğü görülmektedir. Bunun sebebi ısı değeri olarak görülmüştür. Yakıtların ısı değerinin artışı yanma kalitesini ve verimini

iyileştirdiğinden özgül yakıt tüketimini azalttığı bilinmektedir. Aynı motor devrindeki yük artışının yanma kalitesini arttırmasıyla beraber aynı şekilde özgül yakıt tüketimini azalttığı yine Şekil 6.10’da görülmektedir.



Şekil 6.11. Yakıtların ısı verim verileri

Isıl verim yanma odasındaki yakıt hava karışımının yanma sonucunda açığa çıkardığı enerjinin faydalı işe dönüşme miktarını temsil eder. Nanopartikül katkısının fiziksel ve kimyasal özellikleri yanmayı iyileştirdiğinden ısı verimi de arttırması kaçınılmazdır (Arslan, 2022).

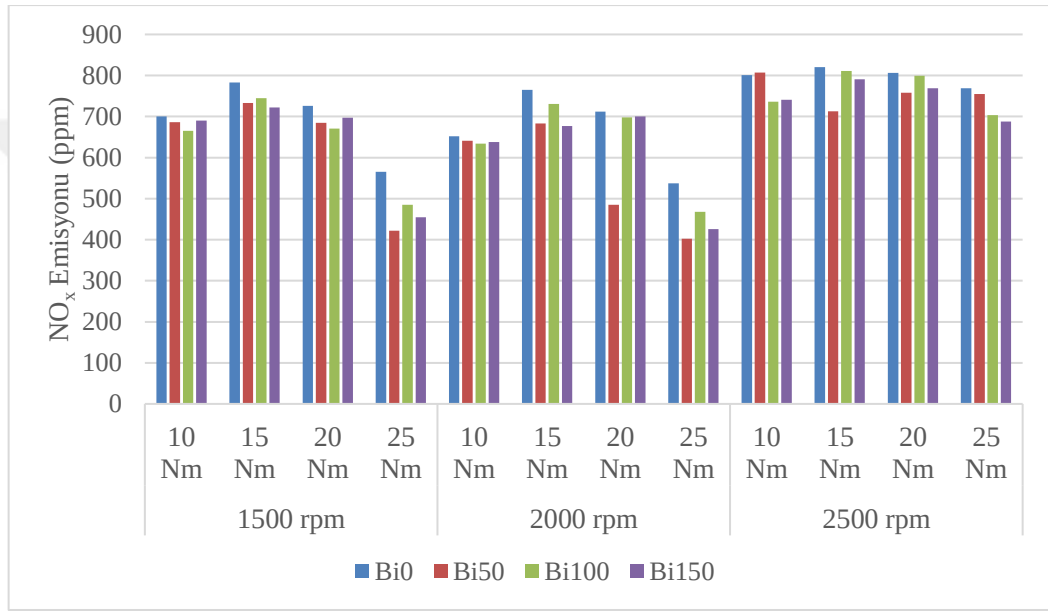
Şekil 6.11 incelendiğinde, en yüksek ısı verimi 1500 dev/dak’da ve 25 Nm yükte Bi100 yakıtı sağlamıştır. Bi100 yakıtının bu noktadaki değerinin %31 olduğu gözlenmektedir. Şekil 6.10’da en düşük özgül yakıt tüketimini de bu dozajdaki nanopartikül katkılı yakıt sağlamıştı. Özgül yakıt tüketiminin en az olması durumu yanmanın o noktada yüksek verimde olduğunu gösterdiğinden ısı verimin de aynı noktada yüksek çıkması beklenen bir sonuçtur. En düşük ısı verim ise %16 değerinde Bi0 yakıtıyla elde edilmiştir. Aynı şekilde bu noktadaki özgül yakıt tüketimi de yanmanın o noktada düşük verimde olmasından dolayı Şekil 6.10’da maksimum değerine ulaşmıştı.

Yükün artışı ile beraber her bir motor devri için yakıt hava karışım miktarındaki oksijen oranının artmasıyla birlikte yanma iyileştiğinden ısı verimin

arttığı gözlenmiştir. Partikül madde miktarının artışı genellikle ısı verimi de arttırdığı gözlenmiştir. Bunun sebebi partikül madde içeriğindeki oksijen miktarının artması ve ısı değerin artışı ile birlikte yanma kalitesinin artışı olarak görülmüştür.

6.3 Egzoz Emisyon Sonuçları

Çalışmanın bu bölümünde egzoz emisyonlarından olan NO_x, CO₂ ve is emisyonlarının oluşum miktarları ve yüzdeleri elde edilmiştir. Elde edilen veriler karşılaştırılıp analiz edilmiştir.



Şekil 6.12. Yakıtların NO_x emisyon verileri

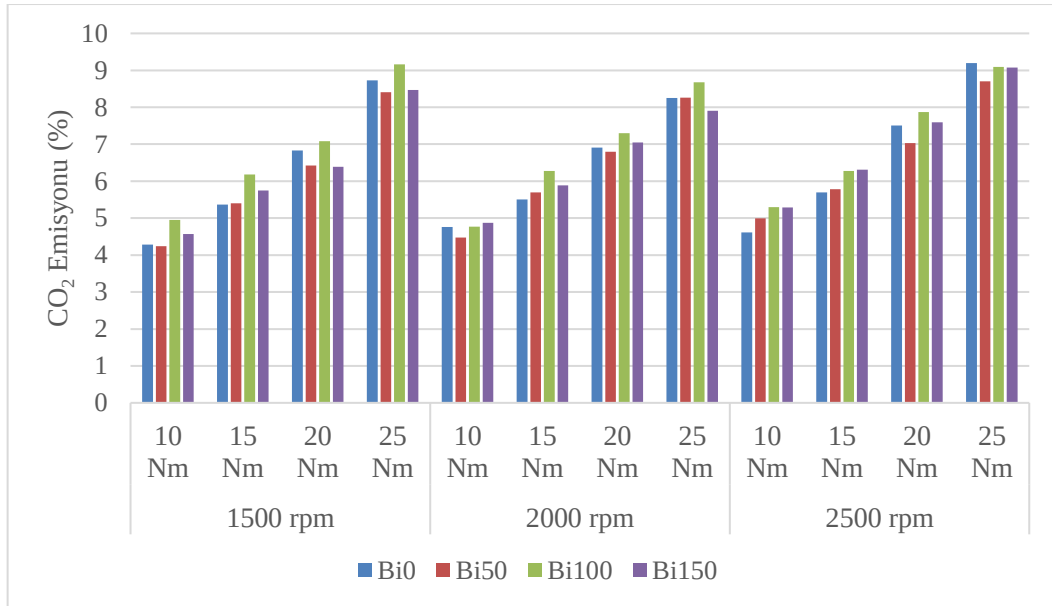
Silindir içerisine yanma işlemi için alınan havanın içeriğinde bulunan azot atomları yanma esnasında oksijen atomları ile birleşerek azot oksit emisyonlarını meydana getirirler. Azot oksit emisyonunun oluşum miktarı ise hava yakıt karışım oranına, sıcaklık artışına, yanma parametrelerine, basınç artışına ve motor yükü gibi yakıt ve motor özelliklerine bağlıdır (Tuncer, 2023).

Şekil 6.12 incelendiğinde nanopartikül katkılı yakıtların azot oksit emisyon miktarlarını azalttığı gözlenmektedir. Bunun sebebi olarak, nanopartiküllerin ısı transfer özelliklerinin çok iyi olduğu gösterilebilir, yanma odasındaki ısı transferini destekleyen nanopartiküller katalizör etkisi yaparak silindir içerisindeki karışım yakıtın tamamen yanmasını sağlar. Bu durum NO_x emisyonlarının azalmasına yardımcı olur (Babu ve Raja, 2015).

Bunun dışında Tablo 6.1 incelendiğinde Bi0 yakıtının genellikle püskürtme başlangıcı diğer yakıtlara göre daha önce gerçekleşmiştir. Daha önce gerçekleşen püskürtmeler yakıtın yanma süresini uzatma eğilimi gösterdiğinden saf dizel yakıtın açığa çıkardığı NO_x emisyonlarının miktarı artmıştır.

Motor yükünün en yüksek yük değeri olan 25 Nm olduğu sırada azot oksit emisyonlarında azalma gözlenmiştir. Bunun sebebinin daha kısa ön karışimli yanmanın ve daha uzun difüzyonlu yanmanın 25 Nm yükte olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Durum böyle olunca maksimum basınç ve maksimum sıcaklık 20 Nm yük değerlerine göre daha az olmuştur. Bundan dolayı maksimum ısı salınımı 25 Nm yük değerlerinde azalmış ve buna bağlı olarak azot oksit emisyonları da yine 25 Nm yük değerlerinde azalma eğilimi göstermiştir (Emiroğlu, 2018).

Maksimum azot oksit emisyonu 2500 dev/dak ve 15 Nm motor yükünde Bi0 yakıtı tarafından açığa çıkmıştır. Bu noktadaki azot oksit emisyon miktarı 820 ppm olarak ölçülmüştür. Minimum azot oksit emisyonuna sahip yakıt ise 2000 dev/dak ve 25 Nm motor yükünde Bi50 yakıtı olmuştur. Bu noktadaki değeri 402 ppm olarak ölçülmüştür.



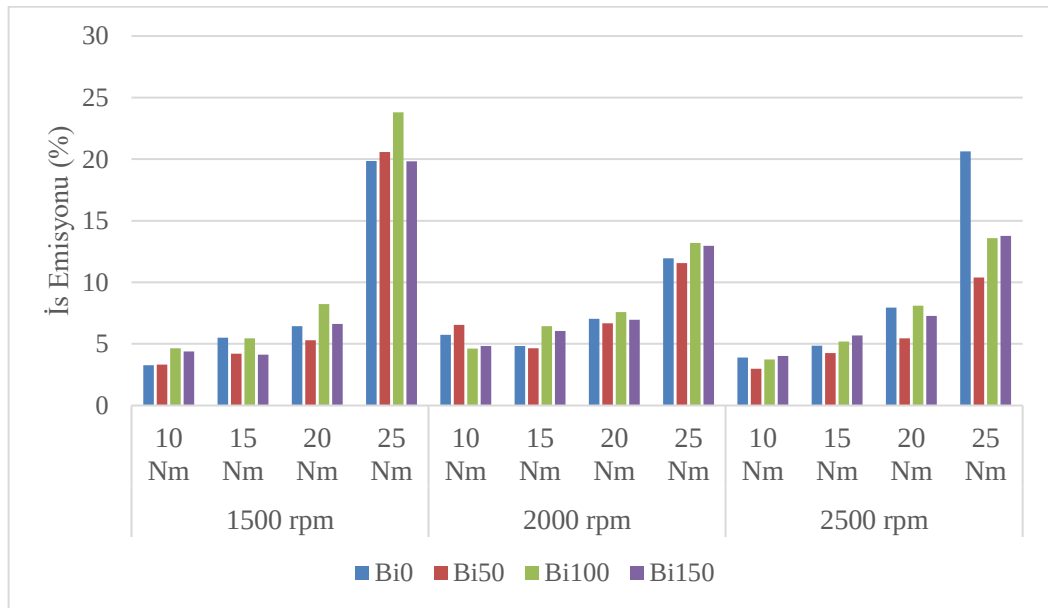
Şekil 6.13. Yakıtların CO₂ emisyon verileri

Karbondiyoksit emisyonu tam yanma sonucu açığa çıkar. Eksik yanma veya yetersiz yanma sonucu oksijen yetersizliğinden dolayı karbonmonoksit ve

hidrokarbon emisyonları açığa çıkar. Tam yanma veya ideal yanma olması durumunda hidrokarbon, içeriğindeki hidrojenleri oksijen ile bağlayarak H₂O'ya karbonları ise yine oksijen ile bağlayarak CO₂'ye dönüştürür (Kül, 2022).

Şekil 6.13 incelendiğinde yükün artışı ile beraber CO₂ emisyonlarının da arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi yükün artması ile beraber yanmanın iyileşme göstermesidir. Yanmanın iyileşmesi ile birlikte oksijen yetersizliği azalacağından CO₂ emisyonlarında artış gözlenir. Nanopartikül miktarının artışı da karbondioksit emisyonlarının artmasına sebebiyet vermiştir. Bunun sebebi ise nanopartiküllerin içeriğindeki oksijendir. Partikül madde miktarındaki artış nanopartikül katkısı içeriğindeki oksijen miktarını da arttırdığından yanma iyileşir. Yanma iyileştikten dolayı da karbondioksit emisyonları artmaya başlar.

Maksimum karbondioksit emisyonu açığa çıkaran yakıtlar 1500 dev/dak'da, 25 Nm motor yükünde Bi100 ve 2500 dev/dak'da, 25 Nm motor yükünde Bi0 yakıtı olmuştur. Bu noktalardaki Bi100 yakıtının karbondioksit emisyon değeri %9,16 olarak ölçülürken, Bi0 yakıtının değeri %9,19 olarak ölçülmüştür. Minimum karbondioksit emisyonu açığa çıkaran yakıtlar ise 1500 dev/dak, 10 Nm motor yükünde Bi0 ve Bi50 yakıtları olmuştur. Bu noktalarda Bi0 yakıtının değeri %4,28 olarak ölçülürken, Bi50 yakıtının değeri %4,24 olarak ölçülmüştür. Genel olarak bakıldığında nanopartikül katkılı yakıtların karbondioksit emisyonu miktarını arttırdığı söylenebilir.



Şekil 6.14. Yakıtların is emisyon verileri

İs emisyonları, yanma esnasında sıvı yakıt içeriğindeki karbon atomlarının yeteri kadar oksijene ulaşamayıp, bu karbon atomlarının birikmesi sonucu meydana gelir. Egzoz gazındaki is miktarı, yakıt hava karışım miktarına, yanma aşamalarına, silindir içerisindeki oksijen miktarına, yakıt püskürtme sistemine, püskürtülen yakıt miktarına, kullanılan yakıtın özelliklerine, kullanılan katkı maddelerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır (Aydın, 2022).

Şekil 6.14'te görüldüğü üzere yük artışı is emisyon miktarını arttırmıştır. Daha düşük yük seviyelerinde püskürtülen yakıt miktarının az olması sıvı yakıt içeriğindeki karbon miktarının azalmasına ve bu da is emisyonlarının yüksek yüklere göre daha az olmasına sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Ancak yükün 25 Nm olduğu zaman diliminde is emisyon miktarının artışı diğer yük seviyelerine göre fazla olmuştur. Bunun nedeni ise yüksek yüklerde püskürtülen yakıt miktarının fazla olması ve yanma odası içerisine daha fazla karbon içerikli yakıtın alınmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Nanopartikül katkılı yakıtların da is emisyonlarını arttırdığı Şekil 6.14'de görülmektedir. Bunun nedeni nanopartikül katkılı yakıtın yanma odasına püskürtülmesi ile birlikte yakıtın katı formdaki parçacıklarının silindir içerisinde yanmaması ve varlığını sürdürmesi, partikül sayısını artırıp partikül madde emisyonu miktarına katkı sağlaması olabilir (Çakmak, 2021).

Nanopartikül katkılı yakıtların is emisyon miktarını arttırmasının bir diğer sebebinin ise yüksek viskozite olduğu düşünülmektedir. Nanopartikül katkılı yakıtların viskoziteleri dizel yakıtı göre daha yüksektir. Artan viskozite ile birlikte silindirlere püskürtülen yakıtın tanecik boyutu da büyür, yakıt taneciklerinin büyümesi de hava yakıt karışımını zorlaştıracığından yanma verimini düşürüp eksik yanmaya sebebiyet verebilir bu da is emisyonlarının artışı anlamına gelir. Aynı zamanda yüksek viskozite ile birlikte yakıt püskürtme sisteminde meydana gelebilecek tıkanmalar da is emisyon miktarını arttırabilir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Deneysel olarak yapılmış olan bu çalışmada saf dizel yakıt içerisinde Bi_2O_3 nanopartikülünün katkı maddesi olarak eklenerek dört zamanlı ve çift silindirli bir dizel motorda, farklı motor devri ve motor yüklerinde testleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan nanopartikül miktarları 50 ppm, 100 ppm ve 150 ppm olarak ayarlanmış, manyetik ve ultrasonik karıştırıcı vasıtasıyla saf dizel yakıt içerisinde homojen karışımı sağlanmıştır. Dizel yakıtta Bi_2O_3 katkısının ve katkı miktarının yanma parametrelerine, motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuç ve öneriler aşağıda listelenmiştir.

1. Dizel yakıtta Bi_2O_3 nanopartikül katkısının yakıt özelliklerine etkisine bakıldığında setan sayısı, ısıl değer ve viskoziteyi artırırken yoğunluk üzerine etkisi yok denecek kadar az olmuştur.
2. Dizel yakıtlar, nanopartikül katkılı yakıtlara göre daha erken püskürtülmeye başlamıştır. Bunun nedeni partikül katkılı yakıtların viskoziteyi artırması olarak düşünülmüştür. Özellikle düşük yüklerde nanopartikül katkılı yakıtlar yanmaya daha erken başlamıştır. Bunun sebebi ise setan sayısının dizele oranla yüksek olmasından kaynaklanmıştır.
3. Test yakıtlarının tutuşma gecikmesi süreleri birbirlerine yakın çıkmıştır. Ancak yüksek yüklerde tutuşma gecikme süresinin genellikle azaldığı gözlenmiştir. Bunun nedeninin yüksek yüklerde oksijen içeriğinin artıp yanmanın iyileşmesi ile yanma odası sıcaklığının yükselmesinden dolayı yakıt hava karışımının daha erken tutuşmasını sağladığı düşünülmüştür. Toplam yanma sürelerine bakıldığında ise yüksek yüklerde nanopartikül katkılı yakıtların yanma süresinin genellikle daha az olduğu gözlenmiştir. Bu durum nanopartikül katkılı yakıtların yüksek ısıl değere sahip olmasına bağlanmıştır.
4. Yakıtların egzoz gazı sıcaklığı verilerine bakıldığında nanopartikül katkılı yakıtların içeriğindeki oksijen sebebiyle yanmayı iyileştirdiği ve egzoz gazı sıcaklığını arttırdığı gözlenmiştir. Dizel yakıtın yüksek yüklerde egzoz sıcaklığının nanopartikül yakıtta göre az bir seviyede yüksek çıkmasının sebebi ise dizel yakıtın o yüklerde yanma süresinin fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür.

5. Nanopartikül katkılı yakıtların özgül yakıt tüketimleri genellikle daha düşük seviyelerde olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni yüksek ısıl değere sahip olduklarından yanma kalite ve verimini arttırmalarıyla ilişkilendirilebilir. Aynı zamanda yük artışı da yanmayı iyileştirdiğinden özgül yakıt tüketimini azaltmıştır. Özgül yakıt tüketim değerleri ısıl verim konusunda da bilgi sağlar. Özgül yakıt tüketimi saf dizele oranla daha az olan nanopartikül katkılı yakıtların ısıl verimleri ise daha yüksektir. Bunun sebebi o noktalarda yanma veriminin daha yüksek olmasıdır. Aynı şekilde yükün artması da verimi arttırdığından ısıl verim yük arttıkça yükselme eğilimindedir.
6. Emisyonlara bakıldığında ise nanopartikül katkılı yakıtların genellikle azot oksit emisyonlarını azalttığı gözlenmiştir. Nanopartiküllerin ısı transfer özelliklerinin iyi olması, silindir içerisindeki yakıtın tamamen yanmasını sağlayarak azot oksit emisyonlarını azalttığı düşünülmektedir. Saf dizel yakıtın ise açığa çıkardığı azot oksit emisyonlarının artması yanma süresine bağlanmıştır.
7. Karbondioksit emisyonları nanopartikül katkı miktarı artışıyla beraber artmıştır. Bunun sebebi ise nanopartikül içeriğindeki oksijen miktarının artmasıdır. İis emisyonları ise motor yükünün artmasıyla artış göstermiştir. Düşük yüklerde yanma odası içerisine alınan yakıt az olduğundan yakıt içeriğindeki karbon miktarı da az olur. Karbon miktarının azalması is emisyon miktarını da azaltır. Ancak yükün artışı ile birlikte yanma odası içerisine daha fazla yakıt alındığından yanma odası içerisindeki karbon miktarı da artmıştır. Bu sebeple is emisyon miktarında da artış gözlenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda dizel yakıtta Bi_2O_3 nanopartikül ilavesinin avantajlarının yanı sıra dezavantajlarının da olduğu görülmüştür. Karşılaşılan bu dezavantajların giderilmesi adına Bi_2O_3 katkısının farklı nanopartikül katkılarla birlikte kullanılması veya biyodizel karışım yakıtlarında kullanılması farklı sonuçlar alınmasında yardımcı olabilir.

Dizel yakıt içerisine Bi_2O_3 nanopartikül katkısının yapılacak sonraki çalışmalara katkı sağlaması adına şu önerilerde bulunulabilir:

1. Nanopartikül katkı maddelerinin farklı miktarlarda kullanımının motor performans ve egzoz emisyonlarına etkileri incelenebilir.

2. Farklı motor devri ve motor yüklerinde deneysel çalışmalar yapılarak motor parametrelerine etkileri incelenebilir.
3. Fiziksel ve kimyasal özellikleri farklı Bi_2O_3 nanopartiküllerinin deneysel çalışmaları yapılabilir.
4. Motor titreşim ve gürültü deneyleri yapılarak farklı motor performans parametreleri incelenebilir.



8. KAYNAKLAR

Bu tez çalışmasında APA atıf sistemi kullanılmıştır.

- Abas, N. Kalair, A. Khan, N. (2015). "Review of fossil fuels and future energy technologies" *Futures*, 69, 31-49.
- Ağbulut, Ü. Sarıdemir, S. Rajak, U. Polat, F. Afzal, A. Verma, T. N. (2021). "Effects of high-dosage copper oxide nanoparticles addition in diesel fuel on engine characteristics" *Energy*, 229.
- Akgül, V. (2021). "Art püskürtme ve dahili egr stratejilerinin dizel motorlarda uygulanmasının model tabanlı incelenmesi ve optimizasyonu" *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Doktora Tezi, İstanbul.
- Aksoy, N. (2021). "Dizel motorlarda scr sisteminde kullanılan katalizörlerin NO_x emisyonlarına etkilerinin nümerik olarak incelenmesi" *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı*, Yüksek Lisans Tezi, Afyon.
- Aktaş, F. (2021). "Bir dizel motorda çift yakıt olarak propan-dizel kullanımının yanma rejimine, motor performansına ve emisyon değerlerine olan etkilerinin sayısal olarak incelenmesi" *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Doktora Tezi, Ankara.
- Akyüz, O. (2022). "Altı silindirdi dizel bir motorda farklı yakıt katkıları kullanarak motor verimi ve emisyon değerlerinin incelenmesi" *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.
- Arslan, A. B. (2022). "Dizel yakıt içerisine CeO₂ nanoparçacık ilavesinin motor performansı ve emisyonlarına etkisinin incelenmesi" *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük.
- Aydın, B. (2022). "Nano yakıt katkı maddesi ilave edilen biyodizel dizel karışımının motor performans ve emisyon üzerindeki etkisinin incelenmesi" *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük.
- Aydoğan, B. (2008). "Biyodizel kullanılan dizel motorlarda NO_x emisyonlarının ve NO_x emisyonları azaltma yöntemlerinin incelenmesi" *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Yüksek Lisans Tezi, Denizli.
- Babu, K. R. Raja, R. B. (2015). "Theoretical and experimental validation of performance and emission characteristics of nanoadditive blended diesel engine" *International Journal of Research in Aeronautical and Mechanical Engineering*, 3(5), 17-30.
- Corlu, C. G. de la Torre, R. Serrano-Hernandez, A. Juan, A.A. Faulin, J. (2020). "Optimizing energy consumption in transportation: Literature review, insights and research opportunities" *Energies*, 13(5).
- Çakmak, A. (2021). "Üretilen farklı yakıt katkılarıyla bir dizel motorunun yanma, performans ve emisyon karakteristiklerinin iyileştirilmesinin deneysel incelenmesi" *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Doktora Tezi, Samsun.
- Çelik, M. (2015). "Biyodizel yakıt özelliklerinin motor performansı ve emisyon karakteristiklerine etkilerinin incelenmesi" *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı*, Doktora Tezi, Ankara.
- Çelik, M. (2016). "Combustion, performance and exhaust emissions characteristics of organic based manganese addition to cotton methyl ester" *Applied Thermal Engineering*, 108, 1178-1189.

- Dhahad, H. A. Hamadi, A. S. Ali, S. A. (2017). "Effect of aluminum oxide nanoparticles fuel additives on the performance and the emissions of diesel engine" *Engineering and Technology Journal*, 35(9), 956-960.
- Doğan, O. (2012). "Atık taşıt lastiğinden üretilen pirolitik yakıtın bir dizel motorda kullanımının deneysel olarak araştırılması" *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı*, Doktora Tezi, Karabük.
- Dönmez, N. (2019). "İçten yanmalı motorlarda azot oksit emisyonlarının modellenmesi" *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Emiroğlu, A. O. (2018). "Experimental examination of performance, exhaust emission and combustion behaviours of a CI engine fuelled with biodiesel/diesel fuel blends" *Sakarya University Journal of Science*, 22(5), 1274-1281.
- Emiroğlu, A. O. Şen, M. (2018). "Combustion, performance and exhaust emission characterizations of a diesel engine operating with a ternary blend (alcohol-biodiesel-diesel fuel)" *Applied Thermal Engineering*, 133, 371-380.
- Ergen, G. (2006). "Ön ısıtma uygulanarak kullanılan biyodizel yakıtının motor performans ve emisyonlarına etkisinin incelenmesi" *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- Gökçe, İ. (2022). "Tek silindirli dizel bir motorda susam yağı/dizel yakıt karışımlarına grafen oksit ($C_{140}H_{42}O_{20}$) ilavesinin performans ve emisyon parametrelerine etkisinin incelenmesi" *İstanbul Aydın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Gumus, S. Ozcan, H. Ozbey, M. Topaloglu, B. (2016). "Aluminum oxide and copper oxide nanodizel fuel properties and usage in a compression ignition engine" *Fuel*, 163, 80-87.
- Güner, E. (2019). "Dizel motorlarda çoklu yakıt püskürtme stratejisinin deneysel belirlenmesi ve modellenmesi" *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Doktora Tezi, Erzurum.
- Haşimoğlu, C. (2005). "Düşük ısı kayıplı bir dizel motorunda biyodizel kullanımının performans ve emisyon parametrelerine etkisi" *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı*, Doktora Tezi, Sakarya.
- İleri, E. (2012). "Biyodizele antioksidan eklenmesinin NO_x emisyonuna etkilerinin deneysel olarak incelenmesi" *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Güneş Enerjisi Anabilim Dalı*, Doktora Tezi, İzmir.
- İlkılıç, C. (1999). "Çeşitli alternatif yakıtların dizel motoru emisyonlarına etkilerinin teorik ve deneysel incelenmesi" *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı*, Doktora Tezi, Elazığ.
- Kalaimurugan, K. Karthikeyan, S. Periyasamy, M. Mahendran, G. (2020). "Emission analysis of CI engine with CeO_2 nanoparticles added neochloris oleoabundans biodiesel-diesel fuel blends" *Materials Today: Proceeding*, 33(7), 2877-2881.
- Karagöz, M. (2020). "Dizel – metanol - nanopartikül ile çalışan bir dizel motorda titreşim ve gürültü değişimlerinin incelenmesi" *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8, 1995-2004.
- Kaya, O. (2022). "Biyodizele farklı türde nanopartiküller eklenmesinin dizel motor performansı ve emisyonlarına etkisi" *İstanbul Aydın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Keskin, A. (2005). "Tall yağı esaslı biyodizel ve yakıt katkı maddesi üretimi ve bunların dizel motor performansı üzerindeki etkileri" *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı*, Doktora Tezi, Ankara.

- Keskin, A. Ocakoğlu, K. Reşitoğlu, İ. A. Gürü, M. (2013). "Titanyum esaslı yakıt katkı maddesinin dizel motor performans ve emisyonları üzerindeki etkisi" *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(3), 671-676.
- Khatri, D. Goyal, R. Darad, A. Jain, A. Rawat, S. Khan, A. Johnson, A. T. (2019). "Investigation for the optimal combination of zinc oxide nanoparticle-diesel fuel with optimal compression ratio for improving performance and reducing the emission features of variable compression ratio diesel engine" *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(2), 1485-1498.
- Kül, V. S. (2022). "Sıkıştırılmış doğalgaz ve dizel karışımları ile nano bor katkısının ağır hizmet tipi bir motorda kısmi yüklerde motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisinin deneysel incelenmesi" *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.
- Ma, Q. Zhang, Q. Liang, J. Yang, C. (2021). "The performance and emissions characteristics of diesel/biodiesel/alcohol blends in a diesel engine" *Energy Reports*, 7, 1016-1024.
- Mehta, R. N. Chakraborty, M. Parikh, P. A. (2014). "Impact of hydrogen generated by splitting water with nano-silicon and nano-aluminum on diesel engine performance" *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(15), 8098-8105.
- Opuz, M. (2022). "Biyodizel içerisine metalik esaslı yakıt katkı maddesi ilavesinin motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkisinin incelenmesi" *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Yüksek Lisans Tezi, Afyon.
- Özcan, C. (2018). "Dizel yakıtı ile birlikte lpg kullanan dual yakıtlı bir dizel motorun verimlilik performans ve emisyon yönünden deneysel olarak incelenmesi" *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Özgür, T. Özcanlı, M. Aydın, K. (2015). "Investigation of nanoparticle additives to biodiesel for improvement of the performance and exhaust emissions in a compression ignition engine" *International Journal of Green Energy*, 12(1), 51-56.
- Özsezen, A. N. Çanakçı, M. (2008). "Atık kızartma yağından elde edilen metil esterinin ön yanma odalı bir dizel motorda kullanımının performans ve emisyonlara etkisinin incelenmesi" *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(2), 395-404.
- Saraee, H. S. Taghavifar, H. Jafarmadar, S. (2017). "Experimental and numerical consideration of the effect of CeO₂ nanoparticles on diesel engine performance and exhaust emission with the aid of artificial neural network" *Applied Thermal Engineering*, 113, 663-672.
- Saraee, H. S. Taghavifar, H. Jafarmadar, S. 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.
- Sarıkoç, S. (2019). "Biyodizel-bütanol-dizel karışımlarına hidrojen ve titanyum dioksit ilavesinin performans ve emisyon parametrelerine etkilerinin araştırılması" *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Doktora Tezi, Kayseri.
- Selvi, İ. (2022). "Dizel motorlarda hava filtresinde oluşan kirlilik (tıkanıklık) seviyesinin, motorun karakteristik özelliklerine ve emisyonu etkilerinin incelenmesi" *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Yüksek Lisans Tezi, Edirne.
- Şen, M. (2016). "Taşıt emisyonlarının azaltılmasında ZnO nanotel dizinlerinin katalizör aktif metal taşıyıcısı olarak kullanılması" *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Doktora Tezi, Karabük.
- Şen, M. (2019). "The influence of canola oil biodiesel on performance, combustion characteristics and exhaust emissions of a small diesel engine" *Sakarya University Journal of Science*, 23(1), 121-128.

- Toksöz, S. (2010). “Bir dizel motorun yanma olayının analizi” *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- Tuncer, A. (2023). “Dizel yakıtı-pentanol karışımlarının dizel motorda kullanımının performans ve emisyonlara etkisi” *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük.
- Uluer, O. Karaağaç, İ. Aktaş, M. Durmuş, G. Ağbulut, Ü. Khanları, A. Çelik, D. (2018). “Genleştirilmiş perlitin ısı yalıtım teknolojilerinde kullanılabilirliğinin incelenmesi” *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(1), 36-42.
- Ünver, B. (2013). “Dizel motorların modellenmesi, modele dayalı hava yolu ve emisyon kontrolörü geliştirilmesi/uygulanması” *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı*, Doktora Tezi, İstanbul.
- Yaşar, A. Keskin, A. Yıldızhan, Ş. Uludamar, E. (2019). “Emission and vibration analysis of diesel engine fueled diesel fuel containing metallic based nanoparticles” *Fuel*, 239, 1224-1230.

