

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



Co_3O_4 NANOPARTİKÜL KATKILI DİZEL
VE DİZEL/BİYODİZEL KARIŞIMI YAKITLARIN DİZEL
MOTOR YANMA, PERFORMANS VE EGZOZ
EMİSYONLARI ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMRE ŞEMENİ

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Alaattin Osman EMİROĞLU

BOLU, TEMMUZ 2025

KABUL VE ONAY SAYFASI

Emre ŞEMENİ tarafından hazırlanan “Co₃O₄ NANOPARTİKÜL KATKILI DİZEL VE DİZEL/BİYODİZEL KARIŞIMI YAKITLARIN DİZEL MOTOR YANMA, PERFORMANS VE EGZOZ EMİSYONLARI ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Makine Mühendisliği Yüksek Lisans Programı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliğiyle kabul edilmiştir.
16/07/2025

Jüri Üyeleri

İmza

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

.....

Üye
Prof. Dr. Gürcan YILDIRIM
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Doç. Dr. Mustafa KARAGÖZ
Karabük 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 Kılavuzu ve Şablonuna 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.

.....

EMRE ŞEMENİ

ÖNSÖZ

Fosil kökenli yakıtların neden olduğu ekonomik, sosyal ve özellikle çevresel sorunlar, günümüzde tüm dünyanın karşı karşıya olduğu ortak problemler arasında yer almaktadır. Bu sorunlara yönelik küresel farkındalığın artması, alternatif enerji kaynaklarının araştırılmasını ve bu alandaki çalışmaların yoğunlaşmasını beraberinde getirmiştir.

Dizel motorlar için biyodizel gibi alternatif yakıt çözümlerine yönelik arayışlar sürerken, son yıllarda dikkat çeken gelişmelerden biri de **nano yakıt teknolojileridir**. Nano yakıtlar, çeşitli türde nanopartiküllerin yakıtlara eklenmesiyle elde edilmekte ve motor performansı ile emisyon değerleri üzerinde önemli etkiler yaratmaktadır.

Bu alanda birçok farklı nanopartikül kullanılarak yapılan araştırmalar bulunmakla birlikte, **kobalt oksit (Co_3O_4) nanopartikülleri** ile yapılan çalışmaların sayısı oldukça sınırlıdır. Bu durum, kobalt oksit nanopartikülüne olan ilgimi artırmış ve çalışmamın temel yönlendiricilerinden biri olmuştur.

Bilimsel merak ve araştırma heyecanı ile başladığım bu çalışmayı, elde ettiğim sonuçlar doğrultusunda memnuniyetle sunuyorum.

Emre ŞEMENİ

BOLU – 16/07/2025

ÖZET

Co₃O₄ NANOPARTİKÜL KATKILI DİZEL VE DİZEL/BİYODİZEL KARIŞIMI YAKITLARIN DİZEL MOTOR YANMA, PERFORMANS VE EGZOZ EMİSYONLARI ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMRE ŞEMENİ

BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ALAATTİN OSMAN EMİROĞLU)

BOLU, TEMMUZ – 2025

XVIII + 156 sayfa

Biyodizeller, dizel motorlarda hem saf halde hem de petrodizel ile karışım yakıtı olarak kullanılabilir. Nanopartikül katkıları ise hem dizel yakıtlarda hem de saf veya karışım biyodizellerde yakıt özelliklerini iyileştirerek kullanım potansiyelini artırmaktadır. Bu deneysel çalışmada, dizel yakıt ve kütlece %20 kanola biyodizeli içeren karışım yakıtı 100 ppm kobalt oksit nanopartikül tozu ilave edilmiştir. Elde edilen nano yakıtların yakıt özellikleri ile doğal emişli, direkt enjeksiyonlu, dört zamanlı, tek silindirli ve hava soğutmalı bir dizel motor üzerindeki performans, yanma ve egzoz emisyon karakteristiklerine etkileri incelenmiştir. Deneyler, 1800, 2400 ve 3000 dev/dk motor hızlarında ve 3, 6 ve 9 Nm motor yüklerinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel bulgular, artan motor devir sayısının maksimum ısı salınım oranlarını artırırken, artan motor yükünün maksimum silindir basınçlarını yükselttiğini ortaya koymuştur. Kobalt oksit nanopartikül katkısının yakıtlara eklenmesiyle setan sayısının, ısıl değerin, viskozitenin, yoğunluğun ve oksijen içeriğinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, söz konusu nanopartikül katkısının püskürtme ve yanma başlangıçlarını erkene çektiği, maksimum silindir basınç noktalarını öne aldığı, tutuşma gecikmesini ve maksimum ısı salınım oranlarını azalttığı, yanma süresini uzatarak yanma sonlarını geciktirdiği ve egzoz sıcaklıklarını artırdığı tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, efektif ısı verimleri ortalama 4,26% artırırken özgül yakıt tüketimlerini ortalama 6,36% azalttığı gözlemlenmiştir. Egzoz emisyonları açısından değerlendirildiğinde, kobalt oksit nanopartikül katkısının azot oksit emisyonlarını genel olarak artırmasına rağmen, is emisyonunu azaltıcı etki gösterdiği belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Dizel, Emisyon, Kanola, Kobalt oksit, Nanopartikül

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF Co_3O_4 NANOPARTICLE ADDED-DIESEL AND DIESEL/BIODIESEL BLENDED FUELS ON DIESEL ENGINE COMBUSTION, PERFORMANCE AND EXHAUST

EMISSIONS

MSC THESIS

EMRE ŞEMENİ

BOLU ABANT İZZET BAYSAL UNIVERSITY

INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. ALAATTİN OSMAN EMİROĞLU)

BOLU, JULY - 2025

XVIII + 156 pages

Biodiesels can be used in diesel engines both in pure form and as a blend with petrodiesel. Nanoparticle additives enhance the fuel properties of both diesel and pure or blended biodiesel, thereby increasing their usability. In this experimental study, 100 ppm cobalt oxide nanoparticle powder was added to diesel fuel and a blend containing canola biodiesel at a mass fraction of 20%. The effects of the resulting nano fuels on fuel properties, as well as the performance, combustion, and exhaust emission characteristics of a naturally aspirated, direct injection, four-stroke, single-cylinder, air-cooled diesel engine, were investigated. The experiments were conducted at engine speeds of 1800, 2400 and 3000 rpm and at engine loads of 3, 6, and 9 Nm. Experimental findings indicated that increasing engine speed elevated the maximum heat release rates, while higher engine loads led to increased maximum cylinder pressures. The addition of cobalt oxide nanoparticles to the fuels resulted in increased cetane number, calorific value, viscosity, density, and oxygen content. Furthermore, this nanoparticle additive advanced injection and combustion start points, shifted maximum cylinder pressure locations earlier, reduced ignition delays and peak heat release rates, prolonged combustion duration by delaying combustion end, and increased exhaust gas temperatures. In addition, it was observed that the effective thermal efficiency increased by an average of 4.26%, while the specific fuel consumption decreased by an average of 6.36%. From an exhaust emissions perspective, cobalt oxide nanoparticle additives generally increased nitrogen oxide emissions, whereas they showed a reduction effect on soot emissions.

KEYWORDS: Diesel, Emission, Canola, Cobalt oxide, Nanoparticle

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
TABLO LİSTESİ	xii
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xiii
TEŞEKKÜR	xviii
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Araştırması.....	4
1.2 Dizel Motoru Çalışması ve Yakıtları	15
1.2.1 Dizel Motorlarda Yanma Periyotları	17
1.2.1.1 Tutuşma Gecikmesi Periyodu	17
1.2.1.2 Kontrolsüz Yanma Periyodu	18
1.2.1.3 Kontrollü Yanma Periyodu	18
1.2.1.4 Art Yanma Periyodu	18
1.2.2 Dizel Motorlarında Yanmaya Etki Eden Parametreler	19
1.2.2.1 Dizel Motorlarında Yanmaya Fiziksel Olarak Etki Eden Parametreler	19
1.2.2.1.1 Motor Devri	19
1.2.2.1.2 Girdap Hareketleri	19
1.2.2.1.3 Motor Büyüklüğü	20
1.2.2.2 Dizel Motorlarında Yanmaya Kimyasal Olarak Etki Eden Parametreler	20
1.2.2.2.1 Püskürtme Avansı.....	20
1.2.2.2.2 Hava-Yakıt Oranı	20
1.2.2.2.3 Sıkıştırma Oranı	21
1.2.2.2.4 Giriş Basıncı	22
1.2.2.2.5 Soğutucu Akışkan ve Emme Havaşı Giriş Sıcaklığı	22
1.2.2.2.6 Püskürtülen Yakıt Miktarı	22
1.2.2.2.7 Yakıt Özellikleri	22
1.2.2.2.8 Aşırı Doldurma	23
1.2.2.2.9 Püskürtme Karakteristikleri.....	23
1.2.2.2.10 Egzoz Gazının Yanma Odasında Kalan Yüzdesi	23
1.2.3 Dizel Motorlarda Kullanılan Yakıtların Yanmasından Sonra Oluşan Emisyonlar.....	23
1.2.4 Dizel Yakıtı.....	26

1.2.4.1 Dizel Yakıtının Fiziksel Özellikleri	30
1.2.4.1.1 Viskozite.....	30
1.2.4.1.2 Yoğunluk	31
1.2.4.1.3 Uçuculuk Noktası	32
1.2.4.1.4 Parlama Noktası	33
1.2.4.1.5 Donma Noktası.....	34
1.2.4.1.6 Su ve Tortu Miktarı	35
1.2.4.1.7 Buharlaştırma Noktası	35
1.2.4.1.8 Düşük Sıcaklık Davranışı.....	36
1.2.4.2 Dizel Yakıtının Kimyasal Özellikleri.....	37
1.2.4.2.1 Ateşleme Noktası	37
1.2.4.2.2 Kükürt Miktarı.....	37
1.2.4.2.3 Kül Miktarı	38
1.2.4.2.4 Karbon Artıkları	39
1.2.4.2.5 Setan İndisi (Dizel İndeksi).....	39
1.2.4.2.6 Setan Sayısı	41
1.2.4.2.7 Aromatik Yüzdesi.....	44
1.2.5 Biyodizel	45
1.2.5.1 Biyodizelin Tarihsel Gelişimi	47
1.2.5.2 Bitkisel Yağlardan Biyodizel Üretimi.....	51
1.2.5.3 Yağ Asitleri	54
1.2.5.4 Kanola ve Yağı.....	56
1.2.5.5 Bitki Tohumlarından Yağ Elde Etme Yöntemleri	58
1.2.5.6 Bitkisel Yağların Yakıt Özelliklerini İyileştirme Yöntemleri.....	59
1.2.5.6.1 Transesterifikasyon Yöntemi	61
1.2.5.7 Biyodizel Kullanımının Avantajları ve Dezavantajları.....	63
1.2.5.8 Yakıt Katkı Maddeleri	67
1.2.5.8.1 Nanopartikül Katkı Maddeleri.....	72
1.2.5.8.2 Nanopartikül Katkısı Olarak Kobalt Oksit.....	78
2. MATERYAL ve YÖNTEM.....	80
2.1 Deneyde Kullanılan Materyaller.....	80
2.1.1 Yakıt Numuneleri.....	80
2.1.1.1 Dizel Yakıtı	80
2.1.1.2 Kanola B20 Karışım Yakıtı.....	81
2.1.1.3 Kobalt Oksit Nanopartikül Katkı Maddesi	82
2.1.2 Yakıt Numuneleri Hazırlanırken Kullanılan Cihazlar	84
2.1.2.1 Hassas Terazı	84
2.1.2.2 Manyetik Karıştırıcı	85
2.1.2.3 Ultrasonik Karıştırıcı.....	86
2.1.3 Deney Düzenegi ve Ekipmanları	87
2.1.3.1 Dizel Motoru	88
2.1.3.2 Kuvvet ve Yük Ölçüm Cihazı.....	89
2.1.3.3 Tork Ölçüm Cihazı.....	90

2.1.3.4 Silindir Basınç Ölçüm Cihazı	91
2.1.3.5 Yakıt Hat Basınç Ölçüm Cihazı.....	92
2.1.3.6 Enkoder Cihazı.....	93
2.1.3.7 Egzoz Emisyonları Ölçüm Cihazları.....	94
2.1.3.8 Veri Toplama Cihazı	96
2.1.3.9 Bilgisayar	96
2.2 Deneyin Yöntemi.....	96
2.2.1 Yakıt Numunelerinin Hazırlanışı	96
2.2.2 Yakıt Numunelerinin Test Edilmesi	99
2.2.3 Ölçülen ve Hesaplanan Parametreler	100
2.2.3.1 Motor Torku	100
2.2.3.2 Efektif Güç	100
2.2.3.3 Özgül Yakıt Tüketimi	101
2.2.3.4 Efektif Isıl Verim	101
2.2.3.5 Net Isı Salınım Oranı	102
3. BULGULAR	104
3.1 Yanma Karakteristikleri.....	104
3.2 Motor Performans Karakteristikleri.....	122
3.3 Egzoz Emisyon Karakteristikleri.....	128
4. TARTIŞMA	136
4.1 Yanma Karakteristikleri.....	137
4.2 Motor Performans Karakteristikleri.....	140
4.3 Egzoz Emisyon Karakteristikleri.....	141
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	143
KAYNAKLAR	148

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Püskürtülen yakıtın tutuşmaya kadar olan süre içerisinde hareketleri .	16
Şekil 1.2. Krank mili açısına göre net ısı yayılımı eğrisi üzerinde yanma periyotları	17
Şekil 1.3. Dizel motorlarda genel olarak HFK ile emisyonlar arasındaki ilişki diyagramı.....	25
Şekil 1.4. Dizel motorundan çıkan egzoz gazı bileşenlerinin yaklaşık yüzdeleri.	26
Şekil 1.5. Ham petrolün rafineride işlenmesiyle oluşan ürünler.....	27
Şekil 1.6. Dizel yakıtının moleküler yapısı.....	27
Şekil 1.7. Setan cetveli.....	43
Şekil 1.8. Yakıtın setan sayısının tutuşma gecikmesine etkisi	44
Şekil 1.9. Biyodizelin enerji döngüsü	47
Şekil 1.10. Bir pilot biyodizel üretim tesisinin şematik görünüşü	51
Şekil 1.11. Bitkisel yağ sentezinin kimyasal gösterimi	52
Şekil 1.12. Bitkisel tohumlardan yağ elde edilmesine dair akış şeması	59
Şekil 1.13. Bitkisel yağların yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi	61
Şekil 1.14. Biyodizelin metanol kullanılarak transesterifikasyonla üretim şeması	63
Şekil 1.15. Nanoparçacıkların farklı niteliklerine göre sınıflandırılması	74
Şekil 1.16. Kobalt oksit nanopartikülünün alan emisyonlu taramalı elektron mikroskopundaki görüntüsü.....	79
Şekil 2.1. Deneyde kullanılmak üzere temin edilmiş dizel yakıtı	81
Şekil 2.2. Kanola B20 yakıt karışımı	82
Şekil 2.3. Kobalt oksit nanopartikülü	83
Şekil 2.4. 0,0001 gram hassasiyetinde PA214C model Ohaus Pioneer marka hassas terazi.....	84
Şekil 2.5. 0,01 gram hassasiyetinde PA4102 model Ohaus Pioneer marka hassas terazi.....	85
Şekil 2.6. MR Hei-Tec model Heidolph marka manyetik karıştırıcı	86
Şekil 2.7. Standart model Isolab marka ultrasonik karıştırıcı	87
Şekil 2.8. Deney düzeneğinin şematik görünümü	87
Şekil 2.9. Deney düzeneği	88
Şekil 2.10. Lombardini marka 15 LD 350 model dizel motoru.....	89
Şekil 2.11. Deney düzeneğinde motor yükünü ve frenlemeyi ayarlayan Kemsan marka dinamometre.....	90
Şekil 2.12. 4550 A modeli ile Kistler marka tork ölçüm ünitesi	91
Şekil 2.13. Kistler marka A3 6052C modeli ile silindir basıncını ölçen piezoelektrik basınç sensörü ve 5064 modeli ile sensörü desteklemek için şarj amplifikatörü	92
Şekil 2.14. Kistler marka 4065B modeli ile yakıt hattı basıncını ölçen piezorezistif sensör ve 4665 model amplifikatör	93
Şekil 2.15. Kistler marka 2614B model enkoder cihazı	94
Şekil 2.16. Mexa-584L model Horiba marka egzoz emisyon cihazı	95
Şekil 2.17. Mobydic marka is ölçüm cihazı.....	95
Şekil 2.18. Kistler KiBox veri toplama cihazı	96

Şekil 2.19. Ölçülen kobalt oksit nanopartikül tozu.....	97
Şekil 2.20. Kobalt oksit nanopartikülü tozu eklenmiş dizel yakıtı numunesi.....	98
Şekil 2.21. Kobalt oksit nanopartikülü tozu eklenmiş B20 karışım yakıtı numunesi	98
Şekil 3.1. 1800 dev/dk ve 3 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı silindir basınçlarının değişimi.....	109
Şekil 3.2. 1800 dev/dk ve 6 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı silindir basınçlarının değişimi.....	110
Şekil 3.3. 1800 dev/dk ve 9 Nm yükte yakıt numunelerinin KMA değerlerine bağlı silindir basınçlarının değişimi.....	110
Şekil 3.4. 2400 dev/dk ve 3 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı silindir basınçlarının değişimi.....	111
Şekil 3.5. 2400 dev/dk ve 6 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı silindir basınçlarının değişimi.....	111
Şekil 3.6. 2400 dev/dk ve 9 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı silindir basınçlarının değişimi.....	112
Şekil 3.7. 3000 dev/dk ve 3 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı silindir basınçlarının değişimi.....	113
Şekil 3.8. 3000 dev/dk ve 6 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı silindir basınçlarının değişimi.....	113
Şekil 3.9. 3000 dev/dk ve 9 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı silindir basınçlarının değişimi.....	114
Şekil 3.10. 1800 dev/dk ve 3 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı net ısı salınım oranlarının değişimi	115
Şekil 3.11. 1800 dev/dk ve 6 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı net ısı salınım oranlarının değişimi	116
Şekil 3.12. 1800 dev/dk ve 9 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı net ısı salınım oranlarının değişimi	117
Şekil 3.13. 2400 dev/dk ve 3 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı net ısı salınım oranlarının değişimi	118
Şekil 3.14. 2400 dev/dk ve 6 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı net ısı salınım oranlarının değişimi	118
Şekil 3.15. 2400 dev/dk ve 9 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı net ısı salınım oranlarının değişimi	119
Şekil 3.16. 3000 dev/dk ve 3 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı net ısı salınım oranlarının değişimi	119
Şekil 3.17. 3000 dev/dk ve 6 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı net ısı salınım oranlarının değişimi	120
Şekil 3.18. 3000 dev/dk ve 9 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı net ısı salınım oranlarının değişimi	121
Şekil 3.19. Değişen motor devirleri ve yüklerine göre tüm yakıt numunelerinin özgül yakıt tüketimleri	123
Şekil 3.20. Değişen motor devirleri ve yüklerine göre tüm yakıt numunelerinin efektif ısı verimleri.....	125
Şekil 3.21. Değişen motor devirleri ve yüklerine göre tüm yakıt numunelerinin karbondioksit emisyonlarının yüzdeleri.....	128
Şekil 3.22. Değişen motor devirleri ve yüklerine göre tüm yakıt numunelerinin azot oksit emisyon miktarları.....	131
Şekil 3.23. Değişen motor devirleri ve yüklerine göre tüm yakıt numunelerinin is emisyonlarının yüzdeleri	133

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 1.1. ASTM D975'e göre dizel yakıtın özellikleri	28
Tablo 1.2. EN 590 dizel yakıt standartları.....	28
Tablo 1.3. Setan indisleri ile setan sayılarının birbirlerine karşılık gelen değerleri.....	40
Tablo 1.4. Bazı bitkisel yağların element bileşenleri ve dizel yakıtıyla karşılaştırılması	52
Tablo 1.5. Bazı bitkisel yağlar ile karşılaştırma amaçlı dizel yakıtının fiziksel ve kimyasal özellikleri	53
Tablo 1.6. Biyodizel ve petrodizel özelliklerinin karşılaştırılması.....	64
Tablo 2.1. Kobalt oksit nanopartikülünün ürün bilgileri ve özellikleri.....	83
Tablo 2.2. Lombardini 15 LD 350 dizel motorun fabrika üretimi teknik özellikleri.....	89
Tablo 2.3. Deneyde kullanılan yakıt numunelerinin adlandırılması	99
Tablo 2.4. Deneyde kullanılan yakıtların özellikleri	99
Tablo 3.1. Yakıt numunelerinin motor devirleri ve yüklerine göre püskürtme ve yanma verileri.....	104
Tablo 3.2. Yakıt numunelerinin motor devirleri ve yüklerine göre maksimum silindir basıncı, maksimum ısı salınım oranı ve egzoz sıcaklığı verileri	107

KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

-	: Çıkarma
%	: Yüzde oranı
η_t	: Efektif ısı verim
/	: Bölme ve eğik çizgi
+	: Toplama
$\pm$	: Artı veya eksi tolerans
$\leftrightarrow$	: Tersinebilir kimyasal tepkime
$^{\circ}\text{C}$	: Celsius (Santigrad) derece
$^{\circ}\text{F}$	: Fahrenheit derece
$^{\circ}\text{K}$	: Kelvin derece
$^{\circ}\text{KMA}$	: Krank mili açısı derecesi
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
Ag	: Gümüş elementi
AgSCN	: Gümüş tiyosiyanat bileşiği
Al	: Alüminyum elementi
Al_2O_3	: Alüminyum oksit bileşiği
AÖNS	: Alt Ölü Nokta Sonrası
API	: American Petroleum Institute (Amerikan Petrol Enstitüsü)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Malzeme ve Deney Standardları Kuruluşu)
Au	: Altın elementi
B	: Yakıt tüketimi
B0Co100	: 100 ppm Co_3O_4 (kobalt oksit) katkılı dizel yakıtı
B100	: Saf biyodizel yakıtı
B20Co100	: Ağırlıkça %20 biyodizel olmak üzere geri kalanı dizel yakıtından oluşan 100 ppm Co_3O_4 (kobalt oksit) katkılı hibrit yakıt
B_2O_3	: Bor trioksit (bor oksit) bileşiği
bar	: Basınç
b_e	: Özgül yakıt tüketimi
BHA	: Bütillenmiş Hidroksi Anisol
BHT	: Bütil Hidroksil Toluen
Br	: Baryum elementi

B_yC_z ya da D_xB_yC_z	: Test yakıtlarının temsili gösterimleri. Harflerin karşılıkları; B=biyodizel, D=dizel, x=dizel oranı, y=biyodizel oranı, C=katkı maddesi, z=katkı maddesi miktarıdır.
Ca	: Kalsiyum elementi
Ce	: Seryum elementi
CeO₂	: Seryum dioksit veya seryum (IV) oksit bileşiği
CFR	: Cooperative Fuel Research (Kooperatif Yakıt Araştırması)
CH ve HC	: Hidrokarbon gösterimleri
CH₃OK	: Potasyum metoksit (potasyum metilat)
CH₃ONa	: Sodyum metoksit (sodyum metilat)
cm³	: Santimetreküp
CNG	: Compressed Natural Gas (Sıkıştırılmış Doğal Gaz)
CO	: Karbon monoksit gösterimi
Co	: Kobalt elementi
CO₂	: Karbondioksit gösterimi
Co₃O₄	: Kobalt oksit bileşiği
-COOH	: Karboksil kimyasal grubu
Cr	: Krom elementi
cSt	: Santistok
Cu	: Bakır elementi
Cu₂O	: Bakır (I) oksit bileşiği
CuO	: Bakır (II) oksit bileşiği
C_xH_yO_z	: Sayı indisleri x, y, z'ye göre aynı sıra ile karbon, hidrojen ve oksijenden oluşan bileşikler
D	: Bazı eşitliklerde yakıt yoğunluğu
D100 ve B0	: Saf dizel yakıtları
dev/dk	: Dakikadaki devir sayısı
DLS	: Dynamic Light Scattering (Dinamik Işık Saçınım Spektrometresi)
DPA	: Diphenylamine (Difenilamin)
e	: Matematik eksponansiyel üs
EGR	: Exhaust Gas Recirculation (Egzoz Gazı Geri Dolaşım Sistemi)
EN	: European Norm (Avrupa Standardı)
EPA	: Enviromental Protection Agency (Çevre Koruma Ajansı)
EPACT	: Energy Policy Act (Enerji Politikası Yasası)
fcc	: Face-centered cubic (Yüzey merkezli kübik)

Fe	: Demir elementi
Fe₂O₃	: Demir (III) oksit bileşigi
FE-SEM	: Field Emission Scanning Electron Microscope (Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu)
g	: Gram
g/cm³	: Gram bölü santimetreküp
g/kWh	: Gram bölü kilowatt-saat
H	: Hidrojen elementi
H₂O	: Su bileşigi
H₂O₂	: Hidrojen peroksit bileşigi
H₂SO₄	: Sülfürik asit bileşigi
hcp	: Hexagonal close packing (Altıgen kapalı paketlenme)
HFK	: Hava Fazlalık Katsayısı
H_u	: Yakıtın alt ısı değeri
IEA	: International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standart Örgütü)
J	: Joule
J/°KMA	: Joule bölü krank mili açısı derecesi
k	: Özgül ısıların oranı
K	: Potasyum elementi
kg	: Kilogram
kg/h	: Kilogram bölü saat
kg/kWh	: Kilogram bölü kilowatt-saat
kg/L	: Kilogram bölü litre
kg/m³	: Kilogram bölü metreküp
kJ/kg	: Kilojoule bölü kilogram
KOH	: Potasyum hidroksit bileşigi
kPa	: Kilopascal
kW	: KiloWatt
L	: Litre
LNG	: Liquefied Natural Gas (Sıvılaştırılmış Doğal Gaz)
log	: Logaritma
LPG	: Liquefied Petroleum Gas (Sıvılaştırılmış Petrol Gazı)
m²/g	: Metrekare bölü gram
Mg	: Magnezyum elementi
mg	: Miligram
mg/kg	: Miligram bölü kilogram

mg/L	: Miligram bölü litre
MgFe₂O₄	: Magnezyum demir oksit (magnezoferrit)
MJ/kg	: Megajoule bölü kilogram
mm²/s	: Milimetrekare bölü saniye
Mn	: Mangan (manganez) elementi
M_t	: Motor torku
n	: Motor devri
N	: Nitrojen (azot) elementi
N₂	: Nitrojen (azot) molekülü
Na	: Sodyum elementi
NaOH	: Sodyum hidroksit bileşiği
Ni	: Nikel elementi
nm	: Nanometre
Nm	: Newton çarpı metre
NO_x	: Azot oksit gösterimi
NPAH	: Nitro Polisiklik Aromatik Hidrokarbon
O	: Oksijen elementi
O₂	: Oksijen molekülü
-OH ve -HO	: Hidroksil kimyasal grubu
P	: Basınç
PAH	: Polisiklik Aromatik Hidrokarbon
Pb	: Kurşun elementi
P_e	: Efektif güç
PG	: Propil-Gallat
pH	: Potansiyel hidrojen
PL	: Pirogallol
PM	: Partikül Madde
ppm	: Parts per million (Milyon başına parçalar)
Pt	: Platinyum elementi
PVP	: Polyvinylpyrrolidone (Polivinilpirolidon)
QLC	: Quantitative Liquid Control (Kuantitatif Sıvı Kontrolü)
rad/s	: Radyan bölü saniye
R_n	: R=Kimyada radikal kök, n=sayı indisi
S	: Sülfür (kükürt) elementi
s.u.s	: Saybolt universal seconds (Saybolt evrensel saniye)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Tarama Elektron Mikroskobu)
SiO₂	: Silikon dioksit bileşiği

SO₂	: Kükürtdioksit bileşiği
SO₃	: Kükürt trioksit bileşiği
SO₄²⁻	: Sülfat iyonu
SO_x	: Kükürt oksit gösterimi
SrZnO	: Stronsiyum çinko oksit bileşiği
SYA	: Serbest Yağ Asidi
T	: Sıcaklık
TBHQ	: Tert-Butylhydroquinone (Tert-Bütil Hidrokinon)
TEM	: Transmission Electron Microscope (Geçirimli Elektron Mikroskobu)
Ti	: Titanyum elementi
TiO₂	: Titanyum dioksit bileşiği
T_n	: T=sıcaklık, n=sayı indisi
Tween 80	: Polioksietilen Sorbitan Monooleate
US	: United States (Amerika Birleşik Devletleri)
UV	: Ultraviolet-Visible Spectrophotometry (Ultraviyole-Görünür Spektrofotometri)
ÜÖN	: Üst Ölü Nokta
ÜÖNÖ	: Üst Ölü Nokta Öncesi
V	: Hacim
VJTO	: Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (Flandre Teknolojik Araştırmalar Enstitüsü)
YAME ya da YME	: Yağ Asidi Metil Esteri
Zn	: Çinko elementi
ZnO	: Çinko oksit bileşiği
Zr₂O₃	: Zirkonyum oksit bileşiği
π	: Pi, sabit irrasyonel sayı
ρ	: Yoğunluk
ω	: Açısal hız

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince bilgi, deneyim ve katkılarıyla rehberlik eden, her aşamada desteğini esirgemeyen değerli tez danışmanım Prof. Dr. Alaattin Osman EMİROĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım. Aynı şekilde, sürece sağladığı katkılar ve akademik rehberliği için Doç. Dr. Mehmet ŞEN'e de teşekkür ederim.

Tez konumla ilgili olarak yaptığı açıklamalar ve paylaştığı değerli bilgilerle çalışmama katkıda bulunan Selami DİNÇTÜRK'e de teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni her koşulda destekleyen, sevgileriyle yolumu aydınlatan, bana inanan ve güvenen **sevgili aileme** en derin şükranlarımı sunuyorum. Bu zorlu süreçte yalnızca maddi değil, en önemlisi manevi olarak da yanımda oldular; sabırla, anlayışla ve fedakârlıkla beni desteklediler. Başarıya giden yolda attığım her adımda, dualarını ve sevgilerini hep hissettim.

Beni ben yapan değerleri, azmi ve çalışkanlığı aşıl原因, hayallerimi gerçekleştirme yolunda bana her zaman ilham veren aileme, bu tez çalışmasını tamamlamama olanak sağladıkları için minnettarım. Varlıkları ve destekleri olmadan bu süreci aşmam mümkün olmazdı.

Onların sonsuz sevgisi, özverisi ve bana duydukları güven, bu akademik yolculukta en büyük gücüm oldu. Bugün ulaştığım bu noktada payları tarifsizdir. Tezimi, bana kattıkları her şeyin küçük bir karşılığı olarak, onlara ithaf ediyorum.

1. GİRİŞ

Enerji, köken olarak Eski Yunanca'ya dayanan bir kelimedir. Eski Yunanca'da energia kelimesinden gelmektedir. Buna göre enerji, Eski Yunanca'da iç iş biçiminde anlamı olan birleşik bir kelimedir.

Enerji, insanlığın vazgeçilemez ve en önemli ihtiyaçlarından biridir. İnsanlığın var olduğu günden bugüne değin yaşamsal önemi muhakkaktır.

Başlangıçta barınma, ısınma ve karın doyurma için gereksinim duyulan enerji, insanoğlu yerleşik yaşama geçip geliştikçe, yeni şeyler ürettikçe ve keşfettikçe daha fazla gereksinimin temel ögesi haline gelmiştir (Bekar, 2020).

Enerji, önemli bir kavram olarak insanların günlük faaliyetlerini sürdürebilmesi ve her ulusun sanayi, altyapı, teknoloji, tarım, ulaşım ve diğer temel ihtiyaçları için vazgeçilemezdir (Karaca vd., 2024). Kişi başına düşen enerji miktarı aynı zamanda ülkelerin kalkınmışlığın bir ölçüsü olarak kabul edilmektedir. Tüm bunlarla beraber Dünya'da nüfusun daha çok sayılara ulaşması, enerji açığını beraberinde giderek artırmaktadır (Keskin, 2005).

Ülkeler, kendi gelecekleriyle ilgili plan ve projeler oluştururken; enerji boyutunu göz önüne almaları kaçınılmazdır. Enerji üretimi açısından kendine yetemeyen ve dışa bağımlı olan ülkelerde toplumsal ve ekonomik kalkınma projeleri üzerinde enerji maliyetleri önemli bir yük oluşturmaktadır (Karaca vd., 2024).

Ülkeler, enerji ihtiyaçlarını karşılamak için ilk olarak yerel kaynakların kullanılmasına öncelik vermektedirler. Kullanılan enerjinin, enerji ihtiyacını karşılarlarken aynı zamanda çevreye; daha az zarar verecek, verimli ve sürekli olmasını gözetmektedirler (Özcan, 2023).

Ülkeler, enerji ihtiyaçları için birçok farklı kaynaktan yararlanmakla birlikte toplam birincil enerji ihtiyacının büyük bir kısmını; yerin altında kalan bitki ve canlı kalıntıların, bataklık alanlarında biriken tabakaların değişime uğramasıyla oluşan fosil kökenli yakıtlardan karşılamaktadırlar (Eryılmaz, 2009; Keskin, 2005). Petrol, Dünya'da kullanılan fosil kökenli yakıtlar içerisinde en önemli payı almaktadır (Keskin, 2005). Dünya'da tüketilen enerji kaynaklarının %82,3'ünü petrol, doğal gaz ve kömür gibi fosil yakıtların bütünü oluşturmaktadır (Koçman, 2022).

Kirletici gazların salınımında, karayolu ulaşımındaki motorlu taşıtların payı göz ardı edilemez boyuttadır. Günümüzde, motorların yakıt tüketimi ve emisyon

değerleri, eskiye göre daha düzgün olarak üretilmektedir. Fakat, emisyonları olabildiğince azaltabilmek için, bu tek başına yeterli değildir (Özcan, 2023). Bu olumsuzlukların önüne geçebilmek ve zararların en aza indirilebilmesi için türlü çalışmalar yapılmış ve türlü çözümler ortaya konmuştur. Bu çalışmaların sonucunda bulunan yöntemler ve sistemlerden bazıları, araç ekipmanları ve motorları üzerinde değişiklik yapmayı zorunlu kıldığı için, bunların tercih edilmesi kısmen pahalı olmakla birlikte motorlarda performans kayıplarına da neden olabilmektedir. Bu sistemler, emisyonları azaltmada gerçekten iyi olsalar bile, petrol kaynaklarının ömürlerinin sınırlı oldukları ortadadır (Aydoğan, 2008; Tural, 2023; Uçkun, 2004).

Motorların, çalışma aksanları ve yapılarının haricinde; kullanılan yakıtların, motorlar üzerinde performansa ve verime etkisi büyüktür. Petrol ürünlerinin sınırlı ve tükeniyor olması, motorların enerji kaynağı olan benzin ve dizel yakıtının üretimini zamanla kötü etkileyecektir ve sonrada bunlar azalacaktır. Bu gibi nedenlerden dolayı, araçlarda kullanılacak enerji için alternatiflerin geliştirilmesi çok önemlidir (Özcan, 2023).

İkinci Dünya Savaşı, 1970'li yıllardaki petrol darboğazı gibi, vuku bulan dönemlerden sonra, yeni dönemde çevre bilincinin de artması ile; Dünya'da hazır petrol sektörü dışında alternatif yakıtlara yönelim artmıştır (Soysal, 2008). Motorlu taşıtlarda kullanılmak üzere alternatif yakıtlarda arayışlar ve çalışmalar günümüzde halen sürmektedir. Hazırda olan alternatif yakıtlardan sıkıştırılmış doğal gaz (CNG), sıvı petrol gazı (LPG), sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) ve biyoyakıtlar sayılmakla birlikte diğer alternatif yakıtlar bulunmaktadır. Sayılanlar arasında biyoyakıtlar ayrıca önem arz etmektedir (Uçkun, 2004).

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında kaynağı, bitkilerin ve canlı organizmaların kökeni olan biyokütlenin önemi büyüktür. Yenilenebilir ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak biyokütle, asit yağmurlarına dahi neden olan sera gazı emisyonlarının ve fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması bakımından oldukça önemlidir.

Temelde, doğadaki fotosentez döngüsüne dayanan biyokütle enerjisinin, geleneksel yakıtlarla pek çok ortak yönleri bulunmaktadır (Karaca vd., 2024; Kaya, 2022). Doğrudan yakılarak enerji elde edilebiliyor; çeşitli sıvı ve gaz formundaki biyoyakıtların üretiminde ham madde olarak kullanılabilir olması, örnek olarak verilebilmektedir (Karaca vd., 2024).

Benzine alternatif olarak etanol, dizel yakıtı alternatif olarak biyodizel yakıt, yenilenebilir alternatif yakıtlar içerisinde ön plana çıkmaktadır (Örnek, 2007).

Toksik olmayışı, biyolojik olarak ayrışabilir oluşu, doğaya geri dönüşünün oluşu, yenilenebilir yapısı, çevre dostu olmasının yanında dizel yakıtı alternatif olması nedeniyle de biyoyakıtlardan; biyodizelin uygulanabilir olarak iyi bir seçenek olmasını ve büyük ilgi görmesini sağlamaktadır (Eryılmaz, 2009; Karaca vd., 2024).

Bitkisel yağların, yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi halinde, saf halde biyodizel olarak kullanılabildiği gibi, petrodizel yakıtla belli oranlarda karıştırılarak kullanılması da mümkündür (Yiğit, 2009).

Biyodizel üretiminde kullanılması için, yağlı tohum bitkileri arasından kanola; kolzanın genetik modifikasyonlarına uğramış çeşididir (İşler, 2007). Kolza bitkilerinin tohumları, biyodizel üretiminde sıklıkla kullanılan soya fasulyesinin tohumlarından daha yüksek olarak, yüksek oranda içerdikleri yağ miktarları ve yağlarının kimyasal bileşimlerinin, dizel yakıtına en yakın olmaları sebebiyle biyodizel üretimi için tercih edilen bir üründür (Nayir, 2018; Tarım ve Orman Bakanlığı, 2021; U.S. Canola Association, 2024).

Dizel motorların üzerinde değişiklikler yapılarak biyodizelin kullanımı daha verimli hale getirilebilir (Oğuz, 2004). Yakıt tarafında ise hem dizel yakıtların hem biyodizel yakıtların, yakıt özellikleri katkı maddeleriyle iyileştirilebilmektedir ve yakıtların daha verimli hale getirilmesi mümkün olabilmektedir. Katkı maddelerinden, özellikle, nano boyuttaki katkı maddelerinin yakıtla karıştırılması halinde, yapılarındaki oksitleyicilerin de etkisiyle; daha iyi ateşleme, daha çabuk tutuşma, daha iyi yanma, daha iyi ısı transferiyle birlikte katalitik aktivitenin de arttığı, sayısız çalışmada görülmüştür. Ortaya çıkan nanopartikül katkılı yakıtın, daha iyi yanma verimine sahip olduğu, motorda güç, emisyon ve yakıt tüketim değerlerini değiştirebileceği, çeşitli çalışmalarda gözlemlenmiştir (Sarae vd., 2017).

Kobalt oksit (Co_3O_4) nanopartikülleri genelde, siyah ile koyu yeşil tonları arasında değişen görünümlere sahiptirler. Birçok alanda kullanılabilmektedirler. İçten yanmalı motorlarda, hava-yakıt karışımlarının daha iyi yanmasını sağlama potansiyelleri vardır.

Nanopartiküllerin, faydaları olmakla birlikte kullanımlarında dikkatli olunması gerektiğini ve bu çok küçük boyutlardaki partiküllerin; başta insanların

ve canlıların sağlıkları açısından, çevresel açıdan doğurabilecekleri riskleri de unutmamak gerekir (Vignesh vd., 2022).

Bu çalışmada; doğal emişli, dört zamanlı, direkt püskürtmeli, tek silindirli ve hava soğutmalı bir dizel motorunda test edilen kobalt oksit nanopartikülü katkılı hem dizel hem dizel-biyodizel karışım yakıtının, saf dizel yakıtına göre değişen yakıt özelliklerine bağlı olarak yanma, motor performansı ve egzoz emisyonunun karakteristik değerlerinin ortaya koyduğu sonuçlara ulaşılmıştır.

1.1 Literatür Araştırması

Nanopartikülü katkılı hem dizel hem biyodizel karışım yakıtlarını, dizel motorlarında; yanma, performans ve egzoz emisyonları üzerine etkileriyle ilgili çalışmalar mevcuttur.

Elkelawy ve arkadaşları, nano boyutta ve çapları 7,23 ile 7,98 nm değerleri arasında olan AgSCN partikülünü, hacimce %50 dizel ve atık yağlardan üretilen %50 biyodizel oranlı karışım yakıtına, katkı maddesi olarak 200, 400 ve 600 ppm dozajlarında katarak, meydana gelen karışım yakıtlarını, sabit 1400 dev/dk çalışan motorda, D100B0 saf dizel yakıtına göre kıyaslayarak test etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, D50B50 yakıtına farklı dozajlarda katılan AgSCN nanopartikülünün; performans, yanma ve emisyon bakımından en iyi sonuçların 400 ppm dozajında olduğunu gözlemlemişlerdir. D50B50N200 karışım yakıtının, D50B50 karışım yakıtına göre CO ve yanmamış HC emisyonları için ağırlıklı ortalama değerlerinde %40 azalma olduğunu bulmuşlardır. 400 ppm AgSCN nanopartikülünü, D50B50 karışımına kattıklarında, D100B0 yakıtına göre efektif ısı verimde %11,6 oranında bir artış gözlemlerken, 600 ppm dozajında ise egzoz gazı sıcaklığında %20,7'lik düşüş bulmuşlardır. D50B50N600 karışım yakıtının, D100B0 ve D50B50 karışımlarına göre NO_x emisyonlarında sırasıyla %25 ve %22,9 oranlarında azalma olduğunu tespit etmişlerdir (Elkelawy vd., 2021).

Al-Kheraif ve arkadaşları, 25 ppm dozajında Al₂O₃ nanopartikülü içeren %50 mum fıstığı, %50 sabun ceviziyle harmanlanmış biyodizeli, saf dizele sırasıyla %20, %30, %40 (B20, B30, B40) konsantrasyonlarında ekleyerek, bu karışım yakıtını, motorda farklı motor yükleriyle test etmişlerdir. Karışımlardaki biyodizel konsantrasyonların artmasıyla; NO_x, CO ve HC emisyonlarının azaldığını fark etmişlerdir. Al₂O₃ nanopartiklndeki oksijenin varlığının, CO ile reaksiyona girerek CO₂ oluşturduğunu görmüşlerdir. Nanopartiküllerin eklenmesiyle, efektif

ısı verimindeki ortalama artışın %12 olduğunu görmüşlerdir. B20 için, maksimum efektif ısı verimin %32,1, özgül yakıt tüketiminin 0,29 kg/kWh, B30 için, maksimum efektif ısı verimin %29,7, özgül yakıt tüketiminin 0,31 kg/kWh ve B40 için, maksimum efektif ısı verimin %27,5, özgül yakıt tüketiminin 0,34 kg/kWh olduğunu tespit etmişlerdir (Al-Kheraif vd., 2021).

Çakmak, hacimsel olarak %15 oranında biyodizel içeren dizel-biyodizel yakıt karışımını (B15), 100 ppm konsantrasyonundaki Al_2O_3 nanopartikülleriyle birlikte her biri 2000 ppm konsantrasyonlarındaki antioksidan katkı maddeleri olarak bütül hidroksi tolüen (BHT), tersiyer bütül hidrokinon ve karanfil esansiyel yağı ile birleştirilerek, elde edilen katkılı yakıtlar ile katkı içermeyen B15 ve dizel yakıtına göre karşılaştırarak motorda test etmiştir. Al_2O_3 nanopartiküllerinin tek başına yakıt katkısı olarak kullanıldığında; motor performansının iyileştiğini, CO , HC ve is emisyonlarının azaldığını fakat, aynı çalışma şartları altında NO_x emisyonunun ortalama %30,4 oranında arttığını görmüştür. Al_2O_3 nanoparçacıklarının ve antioksidan katkı maddelerinin birlikte kullanılması durumunda ise, NO_x emisyonunun ortalama %7,6 oranında azaldığını ve motor performans değerlerinin B15 yakıtına çok yakın çıktığını, NO_x emisyonunun azaltılmasında TBHQ antioksidan katkı maddesinin diğer antioksidanlara göre daha etkili olduğunu tespit etmiştir (Çakmak, 2024).

Çınar ve Akyüz, Al_2O_3 ve Cu_2O nanopartiküllerini, 50 ve 100 ppm dozajlarında dizel yakıtına ekleyerek; 600 dev/dk'da 50, 100, 150 ve 200 Nm tork çalışma koşulları altında, saf dizel yakıtına kıyasla motorda test etmişlerdir. Maksimum verimin, 100 ppm yakıt karışımlarında olduğunu bulmuşlardır. 100 ppm Al_2O_3 karışımının CO değerleri, saf dizel yakıtına göre yüksek iken, 50 ppm Al_2O_3 ile 50 ve 100 ppm Cu_2O karışım yakıtlarının CO değerlerinin, saf dizele göre daha düşük olduğunu görmüşlerdir. Silindir içi basınçlara göre en iyi performansın, 50 ppm Cu_2O ve 100 ppm Al_2O_3 karışımlarında olduğunu tespit etmişlerdir (Çınar vd., 2022).

Dhahad ve arkadaşları, dizel yakıtına Al_2O_3 , TiO_2 ve ZnO nanopartikülleri ekleyerek; 400 bar yakıt enjeksiyon basıncı ile 1500 dev/dk sabit hız koşullarında, motorda test etmişlerdir. Nanopartikül katkılarının; ısı (termal) verimin artmasına, ateşleme gecikmesinin ve özgül yakıt tüketiminin azalmasına neden olduğunu bulmuşlardır. Nanopartikül katkıları sayesinde, katalitik aktivitenin arttığını,

böylelikle içten yanmanın arttığını ve saf dizel yakıtı göre NO_x , CO, HC ve is emisyonlarında azalma olduğunu tespit etmişlerdir (Dhahad vd., 2022).

Fayad ve Dhahad, farklı dozajlarda Al_2O_3 nanopartiküllerini bir bütanol-dizel karışımına eklemişlerdir ve farklı motor yüklerinde test etmişlerdir. Aynı bütanol-dizel karışımının, nanopartikül eklenmeden önceki haline kıyasla; silindir basıncı ve ısı yayma oranında sırasıyla %6 ve %13 oranında artma görmüşlerdir. Aynı zamanda, özgül yakıt tüketiminin %7,3 azalırken, efektif ısı verimin %4,7 arttığını görmüşlerdir. Eklenen nanopartiküllerin dozajları arttıkça, emisyon miktarlarının daha düşük çıktığını tespit etmişlerdir (Fayad vd., 2021).

Karagöz, 50, 100 ve 200 ppm Al_2O_3 nanopartikülünü, hacimce %90 dizel yakıt, %10 metanol karışımından oluşan yakıtı ekleyerek motorda test etmiştir. Nanopartikül katkısı ile yakıtın kimyasal ve fiziksel özelliklerinin büyük ölçüde değiştiğini görmüştür. Ayrıca, yakıtın setan sayısının arttığını ve alt ısı değeri ise azaldığını görmüştür. Katkı maddesinin ilave edilmesiyle, oksijen içeriğinin arttığını ve yanma kalitesinin iyileştiğini görmüştür. Motorda, en yüksek titreşim ve gürültü değerlerinin 200 ppm dozajında olduğunu, dozaj miktarı arttıkça bu değerlerinde arttığını tespit etmiştir (Karagöz, 2020).

Sathish ve arkadaşları, atık yemeklik yağdan elde edilen biyodizelden %20 oranında, dizel yakıttan %80 oranında karışan karışım yakıtına, 50 ve 100 ppm dozajlarında Al_2O_3 nanopartikülleri ve çok duvarlı karbon nanotüpleri eklemişlerdir, sonrasında motor üzerinde deneyler yapmışlardır. 50 ppm Al_2O_3 ve 50 ppm çok duvarlı karbon nanotüpünün ikisinin birlikte eklenmesiyle oluşan nano katkılı karışım yakıtının, saf dizele göre efektif ısı veriminin daha fazla olduğunu görmüşlerdir. Aynı zamanda, saf dizel yakıtı göre silindir içi basıncın 13,39 bar daha düşük olduğunu ve maksimum ısı yayma oranının da daha düşük olduğunu görmüşlerdir. 100 ppm Al_2O_3 nanopartikül katkılı karışım yakıtının, en az NO_x , CO ve duman koyuluğu ürettiğini görmüşlerdir. 100 ppm dozajında katılan çok duvarlı karbon nanotüpleriyle oluşan karışım yakıtının, CO ve HC emisyon değerlerinin biraz daha yüksek olmasıyla beraber efektif ısı veriminin, saf dizel yakıtıyla hemen hemen eşit olduğunu tespit etmişlerdir (Sathish vd., 2023).

Venu ve Appavu, biyodizele 25 ppm ve 50 ppm dozajlarında Al_2O_3 nanopartikül maddeleri ekleyerek; 1500 dev/dk sabit motor hızında, değişen motor yüklerinde saf dizel yakıtı göre deney testleri gerçekleştirmişlerdir. Nanopartiküllerin eklenmesiyle özgül yakıt tüketimlerinin sırasıyla %6,6 ve %7,4

oranında düştüğünü gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda, ısı iletkenliğin iyileştiğini, ateşleme gecikmesinin daha düşük olduğunu, daha kaliteli atomizasyonun sağlandığını, silindir içi tepe basıncının ve yanma veriminin arttığını gözlemlemişlerdir. HC, CO ve duman koyuluğu gibi emisyonların sırasıyla %30,3, %31,5 ve %37,3 oranında azaldığını tespit etmişlerdir (Venu vd., 2020).

Venu ve Madhavan, 25 ppm dozajında Al_2O_3 nanopartikülünü %20 biyodizel, %70 dizel yakıtı ve %10 etanol içeriği olan karışım yakıtına ekleyerek, üç farklı enjeksiyon zamanlaması ile motorda test etmişlerdir. Al_2O_3 nanopartikül ilavesi ile enjeksiyon zamanlamasının iyileştirilmesi çabaları, standart zamanlamaya daha yakın olmakla birlikte daha yüksek silindir basıncı ve ısı salınımının ortaya çıktığını gözlemlemişlerdir. Öte yandan, yine aynı nanopartikül ilavesi ile birlikte enjeksiyon zamanlamasının geciktirilmesi halinde, daha düşük silindir basıncı ve ısı salınımı ile sonuçlar alındığını gözlemlemişlerdir (Venu vd., 2016).

Çakmak ve Özcan, B_2O_3 nanopartiküllerini 50, 100 ve 200 ppm dozajlarında, kanola yağından üretilen biyodizelden hacimsel olarak %20 ve dizel yakıttan %80 oranında oluşan karışım yakıtına eklemişlerdir ve nanopartiküller eklenmeden önceki dizel-biyodizel karışım yakıtına göre karşılaştırarak motorda test etmişlerdir. Yakıtta bor oksit (B_2O_3) nanopartiküllerini ilave etmenin, yakıtın soğukta akış özelliklerini geliştirdiğini fakat, kinematik viskozitesini artırdığını görmüşlerdir. 100 ppm dozajında, motorun özgül yakıt tüketiminin %1,7 oranında azaldığını ve efektif verimin %1 oranında arttığını görmüşlerdir. CO ve HC emisyonlarının ortalama olarak sırasıyla %1,3 ve %22,1 oranında azaldığını fakat, aynı çalışma şartları altında NO_x ve is emisyonlarının ortalama olarak sırasıyla %15 ve %31 oranında arttığını görmüşlerdir. Öte yandan, özgül yakıt tüketiminin düştüğünü ama, nanoparçacıkların yüksek fiyatı nedeniyle, birim efektif güç için, yakıt maliyetinin ortalama %116 oranında arttığını tespit etmişlerdir (Çakmak vd., 2022).

Aydın ve Çelik, pamuk yağından üretilen biyodizelden %20, dizel yakıttan %80 oranında olan karışım yakıtına 25, 50, 75 ve 100 ppm dozajlarında CeO_2 nanopartikülü ekleyerek dizel motorda test etmişlerdir. CeO_2 kullanımıyla birlikte yakıtın ısı iletkenliğinde artış, viskozite ve yoğunluk özelliklerinde ise azalma gözlemlemişlerdir. CeO_2 dozajının artmasıyla, egzoz gazı sıcaklıklarında artma, özgül yakıt tüketimi değerlerinde ise azalma gözlemlemişlerdir. CeO_2

nanopartikülünün içerdği fazla oksijenden ötürü ısı değeri arttığını, buna bağlı olarak; silindir içi yanma sıcaklıklarının arttığını, sonrasında havada bulunan azot moleküllerinin oksijen ile birleşerek NO_x emisyonlarında artışa neden olduğunu tespit etmişlerdir (Aydın vd., 2022).

Çelik ve Bayındırlı, pamuk ve kanola yağından üretilen biyodizel yakıtlara; CeO₂, Co₃O₄ ve TiO₂ nanopartikül katkı maddeleri ilave ederek, yakıt özelliklerinin, optimum katkı oranı ile iyileştirilmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmada; 84,01 moleküler ağırlığa ve %99,5 saflığa sahip NaOH ile yoğunluğu 0,791-0,793 kg/L aralığında olan, %99,5 saflığa sahip metanol eşliğinde, pamuk ve kanola bitkisel yağlarını transesterifikasyon tepkimelerine maruz bırakmışlardır. Elde edilen her iki biyodizele de CeO₂, Co₃O₄ ve TiO₂ nanopartiküllerinin hepsinden 50 ve 75 ppm miktarlarında ilave edilmiştir. Elde ettikleri bulgularda, artan miktarlar ile birlikte; CeO₂ ve TiO₂ nanopartikül katkı maddelerinin, yakıtların viskozitesini, yoğunluğunu, parlama noktası sıcaklıklarını azaltırken, Co₃O₄ nanopartikül katkı maddesinin ise viskoziteyi, yoğunluğu, parlama noktası sıcaklığını yakıtlarda artırdığını görmüşlerdir. Yakıtların ısı değerlerini ise, artan miktarlar ile birlikte; CeO₂ ve TiO₂ nanopartikül katkı maddelerinin artırdığını, Co₃O₄ nanopartikül katkı maddesinin ise azalttığını görmüşlerdir. Yakıtlara eklenecek nanopartikül katkı miktarlarının da çok iyi optimize edilmesinin önemli olduğunu, en önemli sonuçlardan biri olarak kaydetmişlerdir (Çelik vd., 2022).

Kalaimurugan ve arkadaşları, 25, 50, 75 ve 100 ppm dozajlarında CeO₂ nanopartikülü ilavesi ile birlikte %80 saf dizel yakıtı, %20 yosun yağından oluşan biyodizeli harmanlamışlardır ve motorda test etmişlerdir. Test edilen yakıtla birlikte; özgül yakıt tüketiminin düştüğünü, emisyonların azaldığını, efektif ısı veriminin ise arttığını görmüşlerdir. Nanopartikül eklenmeden önceki dizel-biyodizel karışımına göre kalorifik değerde ve kinematik viskozitede iyileşme olduğunu tespit etmişlerdir (Kalaimurugan vd., 2020).

Mohan ve Dinesha, %0,5, %1 ve %1,5 olmak üzere üç farklı H₂O₂ konsantrasyonu ile 40 ve 80 ppm dozajlarında CeO₂ nanopartiküllerini, %20 biyodizel, %80 dizel yakıtından oluşan karışım yakıtına dahil ederek motorda test etmişlerdir. Maksimum efektif ısı veriminin, %75 motor yükü ve %1,5 H₂O₂ (hidrojen peroksit) konsantrasyonundayken görmüşlerdir. H₂O₂ konsantrasyonlarının artması ile egzoz gazı sıcaklıklarının yükseldiğini, bununla birlikte H₂O₂ ve CeO₂ birleşik etkisine bağlı olarak NO_x emisyonlarında azalma

görmüşlerdir. H_2O_2 konsantrasyonunun O_2 ve OH radikallerine ayrışmasıyla meydana gelen aktivitenin, CeO_2 nanopartiküllerinin katalitik aktivitesine kıyasla çok daha baskın olduğunu belirtmişlerdir (Mohan vd., 2022).

Uslu ve Çelik, 25, 50, 75 ve 100 ppm CeO_2 nanopartiküllerini dizel yakıtı ekleyerek 8, 12, 16, 20 ve 25 Nm olarak farklı motor yüklerinde, dizel motorda test etmişlerdir. Deneyden elde edilen sonuçlara göre, CeO_2 nanopartikülü ilave etmenin; özgül yakıt tüketimini azalttığı, efektif ısı verim ve egzoz sıcaklığı değerlerini ise artırdığını görmüşlerdir. NO_x emisyonlarında artış görürlerken, HC ve CO emisyonlarında ise azalma olduğunu görmüşlerdir. 100 ppm CeO_2 nanopartikülü ve 12 Nm motor yükü için, motor değişkenlerinin optimum olduğunu, buna karşılık, efektif ısı verimi %23,1, egzoz gazı sıcaklığını 335,1 °C, özgül yakıt tüketimini ise 429,7 g/kWh olarak tespit etmişlerdir (Uslu vd., 2023).

Karthikeyan ve arkadaşları, üzüm çekirdeği yağından elde edilen biyodizelden %20, dizel yakıtından %80 oranında homojen karışım yakıtı oluşturmuşlardır. Daha sonra bu karışım yakıtının bir kısmından ultrasonik karıştırıcı aracılığıyla; 50 ve 100 ppm dozajlarında, nano parçacık boyutu aralığı 100 nm'den az olan Co_3O_4 nanopartikül katkıları eklenmiş, iki ayrı test yakıtı numunesi elde etmişlerdir. Dört zamanlı, tek silindirli, hava soğutmalı ve direkt enjeksiyonlu dizel motorda bütün yakıtları denemişlerdir. Elde ettikleri test yakıtlarının, nanopartikül katkısız karışım yakıtına göre; yakıt özellikleri, performans ve emisyon karakteristikleri bakımından sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Bütün yakıtların, yakıt özelliklerinin tespitlerini ve karşılaştırılmalarını, biyodizel için ASTM standart test yöntemlerine göre yapmışlardır. Karışım yakıtlarına Co_3O_4 nanopartikülleri eklenerek karıştırılmasının; yoğunluk, kinematik viskozite, akma noktası ve setan sayısı değerlerinde önemli bir fark oluşturmadığını gözlemlemişlerdir. Fakat, Co_3O_4 nanopartikül katkılarıyla, parlama noktasında artış eğilimi, egzoz gazı sıcaklığı değerlerinde ise düşüş görmüşlerdir. Ayrıca, tüm sonuçlar için olduğu gibi, nanopartikül katkı miktarlarıyla doğru orantılı olarak, katkısız karışım yakıtına göre, kalorifik değerde ve yakıt tüketiminde nanopartikül katkılı yakıtlarda iyileşme gözlemlemişlerdir. Kobalt oksit (Co_3O_4) nanopartikül katkı maddelerinin eklenmesinin yakıt için; yanmayı, efektif ısı verimi artıran ve tam yük koşullarında özgül yakıt tüketimini azaltan bir oksijen tamponu görevi gördüğü fark etmişlerdir. Deneydeki dizel motoru tam yükte çalışırken; hidrokarbon (HC), karbon monoksit

(CO), duman opaklığı ve azot oksit (NO_x) emisyonlarında azami biçimde azalmanın olduğunu gözlemlemişlerdir (Karthikeyan vd., 2014).

Bitire ve Jen, maydanozdan üretilen biyodizelden %20, dizel yakıtından %80 oranında oluşan karışım yakıtına 50 ve 100 ppm CuO nanopartikülleri ekleyerek motorda test etmişlerdir. Nanopartikül eklenmeden önceki dizel-biyodizel karışım yakıtında, efektif ısı verim %32,5 iken, bu karışım yakıtına 50 ppm CuO eklendiğinde %33, 100 ppm CuO eklendiğinde ise %32,9 olarak görmüşlerdir. 50 ppm dozajlı karışım yakıtının, nanopartikülsüz karışım yakıtına göre CO, HC ve NO_x emisyonlarının sırasıyla %5,7, %1,6 ve %4,7 oranında azaldığını görmüşlerdir. Ulaştıkları sonuçlardan, 50 ppm CuO nanopartikül katkılı karışım yakıtının daha tercih edilebilir olduğu ortaya çıkmıştır. Fakat, saf dizele göre %2,2 daha yüksek CO_2 emisyonunun meydana geldiğini tespit etmişlerdir (Bitire vd., 2022).

Chatur ve arkadaşları, atık yemeklik yağdan üretilen biyodizelden %20 ile dizel yakıtından %80 oranında karışarak oluşan yakıtta 10, 20, 30 ve 40 ppm CuO nanopartikülleri ilave ederek, saf dizel yakıtına göre kıyaslayarak motorda test etmişlerdir. Karışım yakıtındaki CuO nanopartiküllerinin, dozajlarının artmasıyla NO_x emisyonlarının da arttığını görmüşlerdir. Ayrıca, özgül yakıt tüketiminin %4,5 oranında düştüğünü görmüşlerdir (Chatur vd., 2023).

Lenin ve arkadaşları, domates çekirdeği yağından üretilen biyodizel ile dizel yakıtı karışımından oluşan yakıtta, 50 nm çapındaki CuO nanopartikül katkı maddelerini ekleyerek motorda test etmişlerdir. Dizel, biyodizel ve nanopartikül katkılı karışım yakıtlarının, motor üzerindeki yük arttıkça, efektif ısı verimlerinin daha yüksek olduğunu görmüşlerdir. Öte yandan, CuO nanopartiküllerinin, karışımların hem viskozitesini hem parlama noktasını yükselttiğini fark etmişlerdir (Lenin vd., 2022).

Suhel ve arkadaşları, tavuk yağından üretilen biyodizel ile dizel yakıtı karışımından oluşan yakıtta 50, 100 ve 150 ppm dozajlarında Fe_2O_3 nanopartikülleri ekleyerek, motorda test etmişlerdir. Deneyden elde ettikleri sonuçlara göre, yanma performansını iyileştiren ve emisyon zararlarını azaltan en iyi karışımın 100 ppm Fe_2O_3 nanopartikül katkılı olduğunu görmüşlerdir. Bu dozajdaki nanopartikül katkılı karışım yakıtı için; efektif ısı veriminde %4,8, özgül yakıt tüketiminde %10,4, özgül enerji tüketiminde %9,4, egzoz gazı sıcaklığında %19,5, CO emisyonunda %53,2, yanmamış HC emisyonunda %21,7, NO_x emisyonunda %15,4 ve is

emisyonda %14,7 iyileşme olduğunu bulmuşlardır. 100 ppm dozajdaki Fe_2O_3 katkısının, dizel-biyodizel karışımında buharlaşma sürecini geliştirdiğini ve böylelikle, ateşlemenin daha iyi olduğunu, dolayısıyla yanmanın daha verimli olduğunu kaydetmişlerdir. Fakat, 100 ppm'in üzerindeki nanopartikül katkılarının; yakıtın katalitik aktivitesinin azalmasına neden olduğunu, topaklanmaların başladığını, yakıtın viskozitesini ve yoğunluğunu artırarak yoksun atomizasyona neden olduğunu, zararlı emisyonların yükselmeye başladığını da kaydetmişlerdir (Suhel vd., 2021).

Banapurmath ve arkadaşları, hint kayın ağacından elde edilen yağdan üretilen biyodizel yakıtı, farklı metal ve metal oksit nanopartiküller ekleyerek, hibrit karışım hazırlamışlardır ve motorda test etmişlerdir. Nanopartikülleri 25 ve 50 ppm dozajlarında yakıtı eklemişlerdir. Bu nanopartikül katkı maddelerini; grafen, gümüş ve çok duvarlı karbon nanotüplerinden seçmişlerdir. Deneyde kullanılan hint kayın ağacının yağından üretilen biyodizelin; düşük efektif ısı verimliliğe sahip olmasıyla beraber is, CO ve HC emisyonları açısından kötü sonuçlar verdiğini görmüşlerdir. Fakat, nano boyutta grafen, gümüş, çok duvarlı karbon nanotüplerinin eklenmesinin, yakıtın yanma özelliklerini ve katalitik aktivitesini artırarak, tutuşma gecikmesini ve emisyon değerlerini azalttığını görmüşlerdir. 50 ppm grafen eklenmiş biyodizel yakıtın, HC ve CO emisyonu açısından, çok duvarlı karbon nanotüpü eklenmiş biyodizele ve gümüş eklenmiş biyodizele göre daha iyi sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir (Banapurmath vd., 2014).

Chacko ve Jeyaseelan, grafen bazlı nanopartikülleri 20, 40, 60 ppm dozajlarında katkı maddesi olarak dizel yakıtı ve biyodizel karışımlarında birleştirerek motorda test etmişlerdir. Nano katkı maddelerinin eklenmesiyle, efektif ısı veriminde %0,7 ile %2,3 aralığında marjinal artış görmüşlerdir (Chacko vd., 2020).

Pullagura ve arkadaşları, grafen bazlı nanopartikül, hidrojen ve alkol katkısı ile %20 biyodizel, %80 dizel yakıttan oluşan hibrit yakıtı motorda test etmişlerdir. Hibrit yakıtta, ısıtma değerinin daha da yükseldiğini, atomizasyon özelliklerinin geliştiğini, hidrojenin etkisiyle alev almanın daha çabuk olduğunu, ısı yayılımının da daha çok olduğunu, nano tabakaların katalitik etkisi ve alkolün sayesinde daha yüksek oksijen seviyesine ulaşıldığını görmüşlerdir. Tüm bunların yansıması olarak

motor performansının, yanmanın daha iyi hale geldiğini, emisyonların ise, daha iyi bir netice olarak, azaldığını görmüşlerdir (Pullagura vd., 2024).

Razzaq ve arkadaşları, 40, 80, 120 ppm dozajlarında grafen bazlı nanopartiküller ile, dimetil karbonat ve palmiye yağından üretilen biyodizel ile hibrit karışım oluşturarak; 1150dev/dk ile 2400 dev/dk arasında değişen hızlarla motorda test etmişlerdir. Özgül yakıt tüketimi, efektif ısı verim, HC emisyonlarında genel olarak iyileşme gözlemlemişlerken; 80 ve 120 ppm nanopartikül katkılı hibrit yakıtlar için CO emisyonlarında %0,6 ve %3,2'lik hafif bir artış gözlemlemişlerdir (Razzaq vd., 2021).

Sürer ve arkadaşları, %80 dizel yakıtı, %20 atık kızartma yağlarından elde edilen biyodizel oranlı karışım yakıtına 25, 50, 75, 100 ppm dozajlarında karbon nanotüp katkı maddesini ilave ederek motorda test etmişlerdir. Karbon nanotüp katkı maddesinin, yanma başlangıcını öne aldığını ve efektif ısı verimi iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Yakıtlardaki katkı maddesinin miktarının arttıkça, motorun efektif veriminin de arttığını ve özgül yakıt tüketiminin ise azaldığını görmüşlerdir. 100 ppm karbon nanotüp katkısı kullanıldığında, efektif ısı veriminin en fazla %39,3'e ulaştığını görmüşlerdir. Karbon nanotüplerin, karışım yakıtına eklenmeden öncesine göre CO, HC, is emisyonlarını sırasıyla %20, %26, %7,9 oranında azalttığını görmüşlerdir. Fakat, motor performansının iyileşmesine bağlı olarak NO_x emisyonlarının da yaklaşık %11 artırdığını yine görmüşlerdir (Sürer vd., 2023).

Sarvestani ve arkadaşları, dizel-biyodizel karışım yakıtına Mg katyonları ile Fe₃O₄ nanopartiküllerinin birleşiminden oluşan MgFe₂O₄ ürününü ekleyerek, turboşarjlı bir motorda test etmişlerdir. Bu hibrit karışım yakıtı içerisinde, Fe₃O₄ nanopartiküllerine Mg katyonlarının dopinglemesinin, yakıtın içerisinde nanokatalizör gibi davranmasıyla; özgül yakıt tüketiminde, efektif ısı veriminde ve belirtilen güçte önemli ölçüde değişiklik meydana getirmediğini tespit etmişlerdir. Sentezlenen nanopartiküllerin, yakıtın fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak, yanma özellikleri üzerinde kayda değer etkilerinin olmadığını kaydetmişlerdir. Emisyonlar bakımından ise; Mg konsantrasyonunun artmasıyla, oksijen kapasitesinin etkilendiğini, HC, CO gibi emisyonlarda, saf dizele göre azalma olduğunu kaydetmişlerdir (Sarvestani vd., 2021).

Elkelawy ve arkadaşları, Mn içeren nano boyutta supramoleküler kompleksleri, atık yemeklik yağdan üretilen biyodizel ve dizel yakıtından oluşan

karışım yakıtlarına ekleyerek hibrit karışım oluşturmuşlardır ve motorda test etmişlerdir. Öncelikle, hibrit yakıt oluşturmada önce, emülsiyon oluşabilmesi için, supramoleküler kompleks ile H_2O_2 (hidrojen peroksit) maddesini karıştırmışlardır. Bu emülsiyonlu yakıtlarda, saf dizel yakıtla kıyasla efektif ısı veriminin arttığını görmüşlerdir. CO ve HC emisyonları emisyonlarının, yine saf dizel yakıtla kıyasla önemli ölçüde azaldıklarını görmüşlerdir. NO_x emisyonlarının ise arttığını ve duman emisyonlarının azaldığını görmüşlerdir (Elkelawy vd., 2020).

Kana ve Shaija, atık avakadolarından üretilmiş biyodizel ile dizel yakıtından oluşan karışım yakıtlarına, manganez (Mn) katkılı Al_2O_3 nanopartiküllerinden 30, 60, 90 ppm dozajlarında ekleyerek, motorda test etmişlerdir. Sonuçları, dizel yakıtla göre karşılaştırmışlardır. 90 ppm dozajında nanopartiküller eklenmiş biyodizel-dizel karışım yakıtının, test ettikleri arasında en iyi sonuçları vermesiyle birlikte saf dizel yakıtla göre; efektif ısı veriminde %5,7'lik bir artış, özgül yakıt tüketiminde %12,1'lik bir azalma görmüşlerdir. CO emisyonunda %8,5, yanmamış HC emisyonunda %23,2, NO_x emisyonlarında %6,5 ve ısı emisyonunda ise %20,5'lik bir azalma olduğunu yine görmüşlerdir. Nanopartiküller eklenmiş hibrit karışımlarda; silindir basıncının ve ısı salınım oranının, saf dizel ile dizel-biyodizel karışım yakıtlarına göre daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır (Kana vd., 2022).

Soudagar ve arkadaşları, hint yağı bitkisinden elde edilen biyodizel ile dizel yakıtından oluşan karışım yakıtına 30, 60, 90 ppm dozajlarında, $SrZnO$ nanopartikülleri ekleyerek, motorda test etmişlerdir. Nanopartikül katkısı eklenmeden önceki karışım yakıtına kıyasla, nanopartikül eklemenin; efektif ısı veriminde %20,8, ısı salınım oranında %24,3, silindir basıncında %9,5 oranında artışa neden olduğunu kaydetmişlerdir. Öte yandan, nanopartikül eklemenin, yakıt maliyetini biraz artırdığını belirtmişlerdir (Soudagar vd., 2021).

Jayaraman ve arkadaşları, manilkara zapota (sapodilla) ağacının tohumundan üretilen biyodizel ile dizel yakıtından oluşan karışım yakıtlarına TiO_2 nano katkı maddeleri ekleyerek, motorda test etmişlerdir. Karışım yakıtlarına TiO_2 nano katkı maddelerinin eklenmesi halinde, bunların TiO_2 nano katkıları eklenmemiş dizel-biyodizel karışım yakıtı haline kıyasla efektif ısı veriminin daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Yine bunlar için; NO_x değerlerinin daha düşük olduğunu gözlemlemişlerken, CO_2 emisyonlarının da daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir (Jayaraman vd., 2021).

Karthikeyan ve Viswanath, tamanu bitkisinden elde edilen biyodizel ile dizel yakıtından oluşan karışım yakıtına 25, 50, 75 ,100 ppm dozajlarında TiO_2 nanopartikül katkılarından ekleyerek, farklı yük koşullarında motorda test etmişlerdir. Bütün nanopartikül dozaj katkılı karışım yakıtlarında; HC, CO_2 , CO ve NO_x ve is emisyonlarının azaldıklarını görmüşlerdir. Test ettikleri yakıtlar arasından, 100 ppm TiO_2 katkılı dizel-biyodizel karışım yakıtının en uygun olduğunu görmüşlerdir (Karthikeyan vd., 2020).

Vigneswaran ve arkadaşları, 30, 60, 90 ppm dozajlarında TiO_2 nanopartiküllerini, %10'unu dizel yakıtı içinde su, %89,8'ini dizel yakıtı, %0,2'sini yüzey aktif maddeden hazırlayarak emülsiyon yakıtına entegre etmişlerdir ve bunları motorda test etmişlerdir. Su ve dizel yakıtı bazlı emülsiyon yakıtını nanopartiküllerle takviye ederek, motor performansı ve emisyon değerleri açısından daha iyi sonuçlar elde edilebileceğini görmek için deneyler gerçekleştirmişlerdir. Emülsiyon yakıtın, dizel yakıtı kıyasla efektif ısı veriminin %5,6 oranında daha fazla olduğunu görmüşlerdir. Emülsiyon yakıtlarda, nanopartiküllerden gelen oksijen sebebiyle, is emisyonunun büyük ölçüde azaldığını, bununla birlikte HC ve CO emisyonlarının da özellikle tam yükteyken, net bir biçimde azaldıklarını görmüşlerdir. Diğer yandan, dizel yakıtı kıyasla emülsiyon yakıtların; NO_x emisyonlarının, silindir içi basınç değerlerinin ve ısı salınım oranlarının daha fazla olduğunu görmüşlerdir (Vigneswaran vd., 2021).

Venu ve arkadaşları, %20 biyodizel, %80 dizel yakıtından oluşan B20 karışım yakıtına nano boyutta 10, 20, 30 ppm dozajlarında Zr_2O_3 katkı maddelerinden ekleyerek, motorda test etmişlerdir. Zr_2O_3 nanopartiküllerin eklenmesiyle, özgül yakıt tüketimi gibi performans göstergelerinin azaldığını, bunun yanında; efektif ısı verim, ısı salınım oranı, silindir basıncı değerlerinin iyileştiğini ve HC, CO, NO_x gibi emisyon özelliklerinin marjinal olarak azaldığını görmüşlerdir. B20 karışım yakıtına, Zr_2O_3 nano katkı maddelerinin eklenmesinin, yakıt damlacıklarının buharlaşmasını ve atomizasyonunu iyileştirdiğini görmekle beraber viskozite, yoğunluk, ısı değer gibi yakıt özelliklerinde iyileşmeye neden olduğunu görmüşlerdir. B20 karışım yakıtına 20 ppm Zr_2O_3 eklenmesinin; B20 karışımına göre %7,9 daha fazla efektif ısı verime ve %4,9 daha az özgül yakıt tüketimine neden olduğunu görmüşlerdir. CO, HC, is ve NO_x emisyonları ise, %100 motor yük koşulunda B20'den, sırasıyla %11,4, %5,9, %6,9 ve %9,6 daha az olduğunu görmüşlerdir. 20 ppm Zr_2O_3 eklenmiş B20 karışım yakıtının, en iyi

gelişmiş performans, yanma ve emisyon özellikleri gösterdiği kanısına varmışlardır (Venu vd., 2024).

Dizel yakıtı, kanoladan üretilen biyodizel ve yakıt katkı maddelerinden kobalt oksit nanopartikülü hakkında bilgi edinebilmek için kapsamı oldukça geniş bir araştırma yapabilmek mümkündür.

1.2 Dizel Motoru Çalışması ve Yakıtları

Rudolf Diesel 1892 yılında, kendi adıyla özdeşleşen motorun patentini yayınlamıştır. Bu motorda, sıkıştırma sürecinde ısınan havanın içerisine yakıtın enjekte edilmesi ile yanma gerçekleşmektedir. Mevcut motorların veriminden bu motorun verimi, yaklaşık iki kat daha fazla olmuştur. Yüksek sıkıştırma oranı ve daha fazla genişleme süresi sayesinde, bu motorda daha verimli yanma sağlanırken, motor vuruntusu olmadan bunu başarabilmesi de bu motora ilgi duyulmasını sağlamıştır. 1905 yılından itibaren, ağır ticari taşıtlar ve gemilerde kullanımı başta olmak üzere, Rudolf Diesel'in geliştirdiği bu motorun kullanımı giderek yaygınlaşmıştır.

Dizel motorların %54'e kadar çıkabilen, nispeten daha yüksek yanma verimleri cazip olmaktadır. Bu verim, otto çevrimine göre çalışan buji ateşlemeli benzinli (SI) motorlarda ortalama %34 civarındadır. Dizel motorlarında verimin daha yüksek olmasında, daha yüksek sıkıştırma oranı ve düşük pompalama kayıplarının payı olmaktadır.

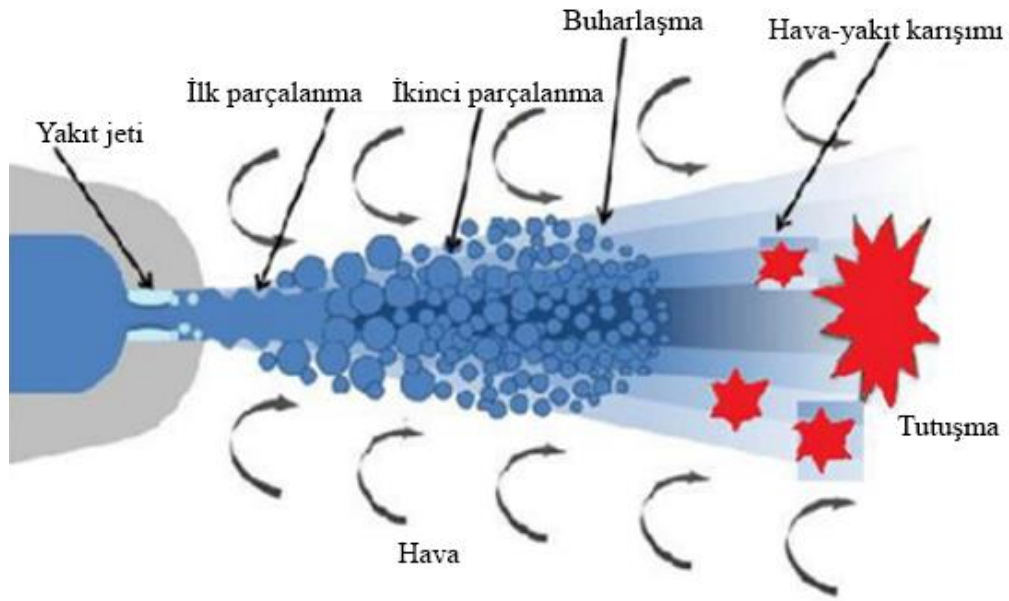
Dizel motorlarda, hava-yakıt karışımı; daima heterojen bir karışım olarak, silindir içerisinde oluşmaktadır. Dizel motorlarında, sıkıştırma strokunda, sadece hava sıkıştırılmaktadır ve yakıt püskürtüldüğü zaman, tutuşmanın gerçekleşmesi için 12:1 ile 24:1 aralığında değişen, yüksek sıkıştırma oranları kullanılmaktadır. Dizel motorlarında, silindir içerisindeki hava miktarı daima, stokiyometrik hava miktarından fazladır ve hava fazlalık katsayısı (HFK) 1,4 ile 3,4 aralığında değişmektedir. Neticesinde; dizel motor, fakir karışımla çalışmaktadır.

Sıkıştırma strokunun sonuna doğru; enjektörden, yüksek basınçla silindirin içerisine yakıt püskürtülmektedir. Yakıt, püskürtme basıncının etkisi ile enjektör deliklerinden yüksek hızlarda, yakıt jetleri formunda çıkmaktadır.

Sıkıştırılmış havanın içerisinde, yakıt jetleri ilerlerken, sürtünmenin etkisi ile çok küçük yakıt zerreciklerine ayrılabilir. Yakıtın atomizasyonu olarak da bu süreç tabir edilebilmektedir. Sıkıştırma etkisi ile sıcaklığı yükseltilmiş

havadan, yakıt zerrecikleri ısı çekerek buharlaşmaktadır. En küçük damlacık çaplarına sahip yakıt zerrecikleri ile ilk buharlaşma başlamaktadır. Ancak, yakıt jetinin ortasındaki yakıt, iyi atomize olamadığı için, bu bölgedeki yakıt sonradan buharlaşmaktadır. Buharlaşan yakıt, hava ile karıştığında, hava-yakıt karışımını oluşturmaktadır. Silindir içerisindeki; girdap ve türbülansın dolaylı olarak oluşan hava hareketleri ile püskürtme basıncı, hava-yakıt karışımının oluşumunda oldukça etkilidir.

Tutuşma, hava fazlalık katsayısının (HFK) 0,56 ile 1,25 aralığında olduğu bölgelerde başlayabilmektedir. İlk tutuşma genellikle, birden çok stokiyometrik veya stokiyometrik koşullara yakın olarak, yakıtça biraz zengin karışım bölgelerinde, eş zamanlı olarak başlamaktadır. Şekil 1.1’de püskürtülen yakıtın tutuşmaya kadar olan hareketleri tasvir edilmektedir.

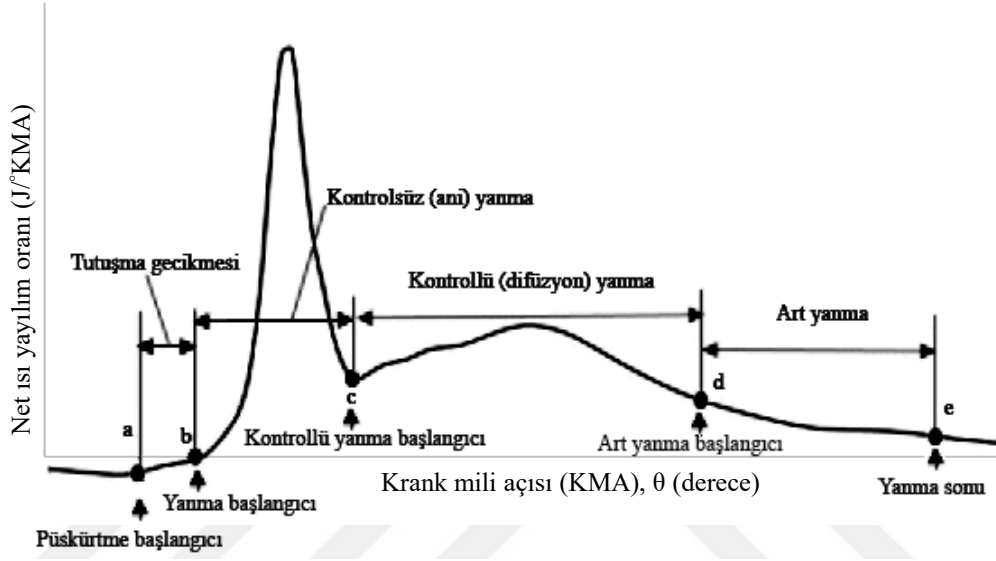


Şekil 1.1. Püskürtülen yakıtın tutuşmaya kadar olan süre içerisinde hareketleri
(Çakmak, 2021)

Yakıtın üzerindeki fiziksel süreçler ve ilk tutuşmanın sağlandığı ön kimyasal tepkimelerden sonra yanma gelişerek, yanma periyotları ile devam etmektedir ve yanmayla beraber; açığa çıkan ısı ve emisyonlar ile sona ermektedir (Çakmak, 2021; Ejder, 2007).

1.2.1 Dizel Motorlarda Yanma Periyotları

Dizel motorlarında; tutuşma gecikmesi, kontrolsüz (ani) yanma, kontrollü (difüzyon) yanma ve art yanma olmak üzere dört yanma periyodundan oluşan bir süreç bulunmaktadır. Şekil 1.2’de krank mili açısına göre net ısı yayılım eğrisi üzerinde yanma periyotları gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Krank mili açısına göre net ısı yayılımı eğrisi üzerinde yanma periyotları (Çakmak, 2021)

1.2.1.1 Tutuşma Gecikmesi Periyodu

Yanma odasına püskürtülen yakıt, tutuşma gecikmesi periyodunda, hava ile karışarak buharlaşmaktadır. Püskürtme başlangıcından, ilk alev çekirdeğinin meydana geldiği yani, ani basınç artışının görüldüğü ana kadarki periyot, tutuşma gecikmesi olarak adlandırılmaktadır. Tutuşma gecikmesi periyodunda, yakıtın hazırlanması için gerekli olan fiziksel ve kimyasal işlemler meydana gelmektedir. Sıkıştırma zamanında; basıncı ve sıcaklığı yükseltilmiş hava ile yanma odasına püskürtülen yakıtın basıncı farklı olmakla birlikte sıcaklık yönünden de aralarında fark bulunmaktadır. Isının yakıtı doğru akışını, yakıtın buharlaşması sırasında bu sıcaklık farkı sağlamaktadır. Bu transfer esnasında; çekilen ısı, silindir içerisindeki sıcaklık ve basınç artışını bir miktar yavaşlatmaktadır (Yeşilyurt, 2017).

1.2.1.2 Kontrolsüz Yanma Periyodu

Bu periyot, ön karışımli yanma periyodu olarak da tabir edilebilmektedir (Çakmak, 2021). Tutuşma gecikmesi periyodunca, silindire püskürtülen yakıt, buharlaşmaktadır. Bu periyotta; yakıt zerrelere, daha küçük parçacıklara ayrılıp, hava ile daha ideal karışım oluşturmaktadır. Yanma odasına giren yakıtın kısmen yanmasından dolayı basınç ve sıcaklıkta ani bir yükseliş olmaktadır. Yakıt püskürtme işlemi, bu noktada devam edebileceği gibi daha önce de kesilebilmektedir. Bu bölgedeki basınç artış oranında; tutuşma gecikmesi periyodu, püskürtme oranı, atomizasyon kalitesi ve püskürtülen yakıt miktarı etkili olmaktadır.

Dizel motorlar, normal koşullar altında çalışırken; ortalama basınç artışı, 3 ile 5 bar/krank mili açısı ($^{\circ}$ KMA) aralığındaki değerlerde olmalıdır. Bu aralığın üzerindeki basınç artış oranı, dizel motorda vuruntuya sebep olmaktadır (Yeşilyurt, 2017).

1.2.1.3 Kontrollü Yanma Periyodu

Kumandalı yanma periyodu da denilen kontrollü (difüzyon) yanma periyodu sırasıyla, tutuşma gecikmesi ve kontrolsüz yanma periyodunun ardından başlamaktadır. Kontrolsüz yanma periyodunun bittiği ve azami basınçla yanmanın hemen hemen tamamlandığı periyodu kapsamaktadır. Yanma davranışında, yakıtın buharlaşma hızı ve yakıt buharının hava ile karışma hızı belirleyici olmaktadır. Genişleme (yanma) stroku boyunca, silindir içerisindeki karışım hızla soğumaktadır ve sonucunda, kimyasal tepkime hızlarında önemli düşüşe neden olmaktadır. Tepkime hızlarının önemi olmamaktadır (Yılbaşı, 2022).

1.2.1.4 Art Yanma Periyodu

Piston alt ölü noktaya doğru genişleme (yanma) zamanında giderken silindir içerisinde kalan yakıtın oksijen bulmasıyla yandığı periyoda art yanma denilmektedir. Kontrollü yanma periyodunun sona ererken eriştiği azami sıcaklığın hemen ardından art yanma başlamaktadır ve egzoz supabı açılmadan bitmektedir. Hava-yakıt karışımının zengin olması etkeninden ve bazı nedenlerden de kaynaklı olarak yanma sonrası silindir içerisinde yanmamış olarak kalan yakıtlar art yanma periyodunun uzamasına neden olabilmekle birlikte egzoz gazlarının sıcaklığını da artırabilmektedir (Yılbaşı, 2022).

1.2.2 Dizel Motorlarında Yanmaya Etki Eden Parametreler

Bir dizel motorun yanma sistemi tasarımında, yanmayı etkileyen; püskürtme avansı, motor devri, yakıt-hava oranı, sıkıştırma oranı, giriş basıncı, soğutucu akışkan ve emme havası giriş sıcaklığı, püskürtülen yakıt miktarı, yakıt özellikleri, motor büyüklüğü, aşırı doldurma, püskürtme karakteristikleri, girdap hareketleri ve egzoz gazının yanma odasında kalan yüzdesi gibi parametreler göz önünde bulundurulmalıdır (Yılbaş, 2022).

1.2.2.1 Dizel Motorlarında Yanmaya Fiziksel Olarak Etki Eden Parametreler

Motor devriyle beraber motor hızı, hava hareketleri, türbülans ve motor tasarımı, motor büyüklüğü, yanma odası tipleri gibi etkenler, yanmada fiziksel olarak etkilimaktadır (Deviren, 2023).

1.2.2.1.1 Motor Devri

Düşük motor devirlerinde, tutuşma gecikmesi periyodu boyunca daha az yakıt birikeceğinden dolayı, basınç artış hızı ve miktarı düşük olmaktadır (Solak, 2013). Motor devrinin artması ile, krank mili açısı cinsinden tutuşma gecikmesi artmaktadır. Fakat, geçen zaman, saniye cinsinden azalmaktadır. Yüksek devirlerde, dizel motoru daha sert çalışmaktadır. Yanma koşulları, devir sayısı arttıkça iyileşmektedir. Ancak, yanma olayı için ayrılan süre azalmaktadır. Yanmanın tamamlanabilmesi için bu durumda, avansın artırılması gerekmektedir (Yeşilyurt, 2017).

1.2.2.1.2 Girdap Hareketleri

Yakıt tüketiminin yükselmesinde ve kirletici emisyonların oluşumunda, silindir içerisine; hava akışı, püskürtme ve yanmanın döngüsel değişimleri neden olmaktadır. Hava akış varyasyonları, hava ile yakıt arasındaki ısı ve kütle transferinin süreçlerinde büyük değişkenliklere yol açabilmektedir. Bunun sonucunda da yanma süreci bozulabilmektedir. Bundan dolayı, girdap ve yuvarlanma hareketi ile, verimi yükselmiş hava akışının silindire girmesi istenmektedir.

Girdap hareketlerinin güçlü olması, çevrimden çevrime değişimleri verimli bir şekilde azaltırken, hava-yakıt karışımının yanma stabilitesini de artırabilmektedir. Girdap akışı, piston hareketinin ekseni etrafında dönen hava

hareketinden oluşmaktadır. Girdap hareketlerinin oluşturulmasıyla, hacimsel verimde biraz azalma olmaktadır (Yılbaşı, 2022).

1.2.2.1.3 Motor Büyüklüğü

Atalet kuvvetlerinin koyduğu sınırlamalardan dolayı büyük motorlarda yüksek devirlere çıkılamamaktadır. Düşük motor devirlerinde ise, aynı tutuşma gecikmesi süresine karşılık gelen gecikme açısı ve bu süre zarfında püskürtülen yakıt miktarı daha az olacağından dolayı büyük motorlarda yanma olayının kontrolü daha kolay olmaktadır.

Soğutma yüzeyi/silindir hacmi oranı, büyük dizel motorlarda küçük olup, bu onlara avantaj sağlamaktadır. Motorun çalışması sırasında cidarlar daha sıcak olmaktadır. Tutuşma gecikmesi süresi de böylelikle kısalmaktadır. Büyük dizel motorların tasarımı, diğer dizel motorlara göre bu nedenlerden dolayı daha büyük olarak yapılmaktadır (Yeşilyurt, 2017). Ayrıca, yanma odası tiplerinin de fiziksel olarak yanmaya etkileri olmaktadır (Deviren, 2023).

1.2.2.2 Dizel Motorlarında Yanmaya Kimyasal Olarak Etki Eden Parametreler

Kimyasal tepkimelerin başlamasından soğuk alevin oluşumuna kadar geçen süreçte etki eden parametrelerdir (Deviren, 2023).

1.2.2.2.1 Püskürtme Avansı

Püskürtme avansı, dizel motorların performans ve egzoz emisyonlarını etkileyen ana parametrelerden biridir. Tutuşma gecikmesine, azami basıncın oluşma yerine ve basıncın artma hızına; bunlarla beraber yanma periyoduna da doğrudan etki eden parametredir (Şen, 2012).

1.2.2.2.2 Hava-Yakıt Oranı

Dizel motorlarında yakıt, silindire sıvı olarak püskürtülmektedir ve silindir içerisinde buharlaşmaktadır. Fakat, silindir içerisindeki hava-yakıt karışımındaki oranlar, buharlaşmanın bölgesel durumuna bağlı olarak homojen dağılım gösterememektedirler. Hava-yakıt karışımlarındaki hava ile yakıtın oranlarında; sadece havanın bulunduğu noktalardan, sadece buharlaşmamış yakıt damlacığı bulunan noktalara kadar değişiklikler olabilmektedir. Bundan dolayı; buharlaşan yakıt miktarı, püskürtülen yakıt miktarından daha önemli olmaktadır.

Hava ile yakıt oranları, karışımda nerede en uygunsa, yanma o noktalardan başlamaktadır. Bundan dolayı, tutuşma gecikmesine hava ile yakıt oranının doğrudan etkisi yoktur. Buna karşın, hava ile yakıt oranının azalması, dolaylı olarak da olsa tutuşma gecikmesinin artmasına neden olabilmektedir. Fakir karışımlarda; açığa çıkan yanma ısısından ve buna bağlı olarak silindir cidarı sıcaklığının düşük olmasından da kaynaklı olarak, tutuşma gecikmesinin süresi haliyle artmaktadır.

Hava ile yakıt oranının en önemli etkisi, emisyonlarda görülmektedir. Motor, tam yükte iken, hava ile yakıt oranının ayarlanması sırasında duman sınırı göz önüne alınmaktadır. Bu sınır değeri aşıldığı zaman, fazla olan yakıt ile havanın karışımı için yeterli zaman olamayacağından dolayı yakıtın büyük bir kısmı kısmen yanmış ya da yanmamış halde dışarı atılmaktadır. Dolayısıyla, duman emisyonu artmaktadır (Solak, 2013).

1.2.2.2.3 Sıkıştırma Oranı

Silindir içerisinde; sıkıştırma sonunda, basıncın ve sıcaklığın yükselmesinde, sıkıştırma oranının yüksek olması etkilidir. Sıkıştırma oranının yüksek olması halinde azami basınç, daha yüksek değerlere daha erken ulaşabilmektedir. Fakat bu durum, krank-biyel mekanizmasının, azami basıncın artışına daha dayanıklı olmasını gerektirmektedir. Bunun yanında; mekanik verimi, kompresyon kaçaklarının artmasını ve motorun ilk harekete geçişinin zorlaşmasını da etkilemektedir.

Direkt püskürtmeli dizel motorlarında, azot oksit emisyonu oluşumunu etkileyen en önemli parametrelerden biri aynı zamanda, sıkıştırma oranıdır. Püskürtme avansı sabitken, sıkıştırma oranının azaltılması, tutuşma gecikmesini artırmaktadır. Tutuşma gecikmesi periyodunun uzaması ise, püskürtülen yakıt miktarını artıracığından dolayı, silindir içerisindeki azami sıcaklığın yükselmesine neden olmaktadır ve buna bağlı olarak da azot oksit emisyonu oluşumunu artırmaktadır. Sıkıştırma oranı artarken, tutuşma gecikmesi periyodu azalacağı için azot oksit emisyonu oluşumu azalmaktadır. Ancak, bu seferde sürtünme işi artacağından dolayı çevrim verimine olumsuz etki etmektedir.

Sıkıştırma oranının artması, yanma odası içerisinde hava akımının azalmasına ve hava-yakıt karışımının formasyonunda kötüleşmeye sebep olabilmektedir. Kötüleşen hava-yakıt karışımı ise, yandığında, egzozda duman miktarının artmasına neden olmaktadır (Şen, 2012).

1.2.2.2.4Giriş Basıncı

Tutuşma gecikmesi, giriş basınç değeriindeki artış ile azalmaktadır. Temelde bu azalış, sıcaklık artışı nedeni ile gerçekleşmektedir. Giriş basıncının artması ile, beraberinde emme havası miktarında da artış olmaktadır. Bundan dolayı, silindir içerisinde sıkışan havanın üzerine daha fazla yakıt püskürtüldüğünde; azami basınç ve dolayısıyla motor gücü de artabilmektedir (Yılbaşı, 2022).

1.2.2.2.5Soğutucu Akışkan ve Emme Havası Giriş Sıcaklığı

Soğutucu akışkan ve emme havası giriş sıcaklıklarının artmasıyla beraber tutuşma gecikmesi azalmaktadır. Silindir içerisindeki sıcaklığın yüksek olması; yakıtın püskürtülmesinin sonrasında, emilen hava miktarının azalmasına ve azami gücün düşük olmasına neden olmaktadır.

Emme havası sıcaklığının artırılması, havanın yoğunluğunun düşmesine neden olabilmektedir. Bu durumda, motorun gücü ve volümetrik (hacimsel) verimi düşeceği için bunun yapılması önerilmemektedir (Yeşilyurt, 2017).

1.2.2.2.6Püskürtülen Yakıt Miktarı

Dizel motorlarda, silindir içerisine alınan havanın oranı, yakıtın oranından fazla olmaktadır. Silindir içerisindeki havaya püskürtülen yakıt miktarı arttıkça, tutuşma gecikmesi periyodu uzamaktadır. Dizel motorlarda püskürtülen yakıt miktarı arttıkça, silindir içerisindeki hava-yakıt karışımı da yakıt yönünden zenginleşmektedir fakat, yanma verimi kötüleşebilmektedir (Şen, 2012).

1.2.2.2.7Yakıt Özellikleri

Yakıt bileşiminde bulunan hidrokarbonlar hem tek olarak hem de grup olarak yanma olayına, özellikle de tutuşma gecikmesine büyük olarak etki etmektedir. Yakıttaki parafinik hidrokarbonların miktarı arttıkça, yakıtın setan sayısı da artmaktadır.

Tutuşma gecikmesinin azalmasında ve motorun daha yumuşak çalışmasında, yakıtın setan sayısı özelliğindeki artışın olması halinde, bunun etkisi olabilmektedir. Gizli buharlaşma ısısı, uçuculuk, viskozite ve yüzey gerilimi gibi özellikler, yakıtın buharlaşabilme kabiliyetiyle beraber tutuşma gecikmesini etkileyen, yakıtın diğer özellikleridir (Yeşilyurt, 2017).

1.2.2.2.8Aşırı Doldurma

Dizel motorlarda aşırı doldurma, giriş basıncını ve giriş sıcaklığını artırıcı yönde etki etmektedir. Hem giriş basıncı hem de giriş sıcaklığı, tutuşma gecikmesini azaltıcı yönde etki etmektedir. Bundan dolayı; düşük basınç, artış hızı ve azami basıncın giriş basıncına oranı bakımından, dizel motorlar aşırı doldurulduğu zaman daha olumlu sonuçlar vermektedirler (Solak, 2013).

1.2.2.2.9Püskürtme Karakteristikleri

Püskürtülen yakıt taneciklerinin çok ince olması, silindir içerisinde buharlaşmanın daha kolay ve ateşlerin de daha düşük olmasını beraberinde getireceğinden dolayı buharlaşma, dizel motorlarda enjektör çıkışından hemen sonra olmaktadır. Silindir duvarlarına yakın bölgelerde bulunan bir miktar hava, bundan dolayı kullanılamamaktadır.

Yakıt tanecikleri iri olduğunda ise, yüksek buharlaşma hızlarında bile buharlaşma çok uzun sürmektedir. Buharlaşma hızının düşük olması, tutuşma gecikmesi periyodunun daha uzun olmasına, dizel motorun gücünün ve veriminin önemli miktarda azalmasına neden olabilmektedir.

Motorda yüksek devirlere çıkıldığında, buharlaşma için yeterli zaman bulunamamaktadır. Bunun sonrasında, silindir içerisinde karbon kalıntıları oluşabilmekle birlikte bu durum, egzoz gazlarında is miktarının artışını tetikleyebilmektedir (Yeşilyurt, 2017).

1.2.2.2.10Egzoz Gazının Yanma Odasında Kalan Yüzdesi

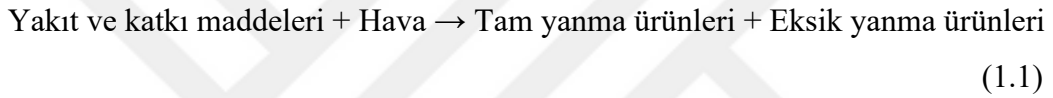
Tutuşma gecikmesini artıran parametrelerden biri de yanma sonunda, silindir içerisinde kalan egzoz gazlarının yüzdesidir. Özellikle, iki zamanlı motorların silindirleri içerisinde kalan egzoz gazlarının yüzdesi yüksek olduğundan dolayı, tutuşma gecikmesi bu motorlarda daha fazla olmaktadır ve bu motorlar daha sert olarak çalışmaktadır (Yeşilyurt, 2017).

1.2.3 Dizel Motorlarda Kullanılan Yakıtların Yanmasından Sonra Oluşan Emisyonlar

Hava kirleticilerinin çoğunun; insan sağlığı ve doğal çevre üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Temel hava kirletici kaynaklar arasında egzoz emisyonları da bulunmaktadır (Yılbaşı, 2022). Bu durumda, yakıtı temelde karbon (C) ve hidrojen (H) içeren tüm içten yanmalı motorlarda olduğu gibi dizel

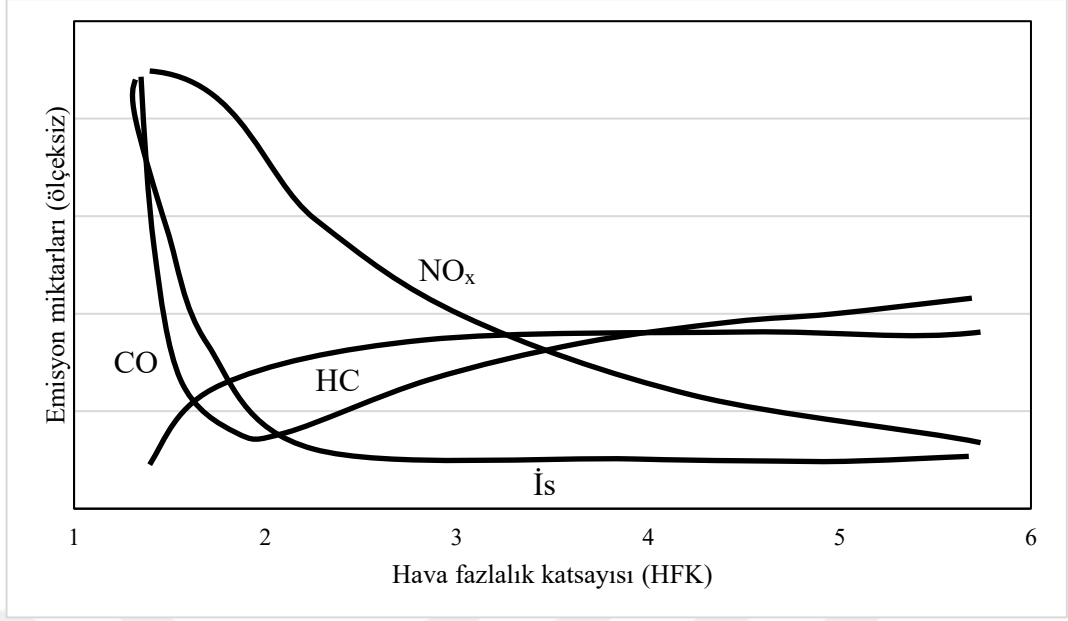
motorlarda da yanmaya katılan yakıt, havada bulunan oksijen ile hem tam hem de kısmen tepkimeye girerek; hidrokarbon, karbon monoksit, karbondioksit, azot oksit, kükürt oksit, partikül madde (PM), aldehitler ve çeşitli emisyonlar oluşturabilmektedir (Çakmak, 2021; Çelik, 2015; Keskin, 2005; Yaşar, 2016). Hatta çalışmalarda, yanma sonucunda 600'ün üzerinde ürün açığa çıkabildiği görülmüştür (Keskin, 2005).

İdealde, tam yanma gerçekleşmesi ve yanma sonu ürünleri arasında eksik yanma ürünlerinin bulunmaması gerekmektedir. Fakat gerçekte, karbondioksit ve su (H₂O) gibi kararlı ve zehirlenme etkisi olmayan tam yanma ürünleri ile beraber zehirleyici, kirletici etkileri bulunan eksik yanma ürünleri de açığa çıkmaktadır. Yanma tepkimesine giren ve çıkan ürünler, basitçe gösterimi (1.1) numaralı eşitlikte olduğu gibidir.



Salınan egzoz emisyonları; düzenli ve düzensiz emisyonlar olarak iki grupta incelenebilmektedir. Düzenli emisyonlar, emisyon standartları ile taşıt tipine göre sınırlandırılan emisyonlardır. Düzensiz emisyonlar ise, yanma sırasında oluşan egzoz gazlarıyla birlikte atmosfere salınan formaldehit, benzen gibi uçucu organik bileşikler ile aromatik hidrokarbon ve polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH) esaslı emisyonlar olarak, son derece toksik etkilere sahip kanserojenlerdir. Fakat, egzoz gazı içerisindeki düzensiz emisyonların miktarları, diğer kirleticilere göre düşük olduğundan dolayı yasal düzenlemeler ile miktarları sınırlandırılmamaktadır. Emisyonları ayrıca, gaz emisyonlar ve partikül madde (PM) emisyonları olarak da iki farklı biçimde ele almak mümkündür (Çakmak, 2021).

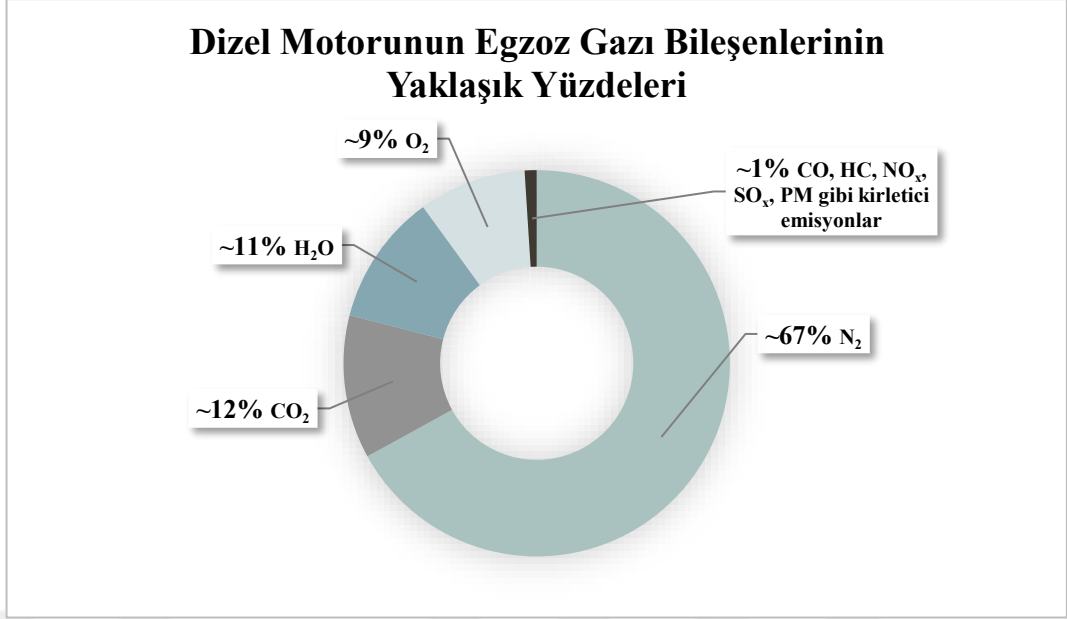
Teorik olarak; yanma için hava fazlalık katsayısı (HFK) 1'e eşit olduğu zaman, 1 kg yakıtı neredeyse 15 kg havanın eşlik etmesi gerekmektedir. Bir dizel motorunda, iyi bir yanmanın olabilmesi için, yakıtın en az 1,5 ile 2 katı kadar hava miktarının silindire alınmış olması gerekmektedir. Şekil 1.3'te dizel motorlarda genel olarak hava fazlalık katsayısının (HFK); azot oksit, hidrokarbon (HC), karbon monoksit, is gibi emisyonlarla ilişki diyagramı yer almaktadır.



Şekil 1.3. Dizel motorlarda genel olarak HFK ile emisyonlar arasındaki ilişki diyagramı (Emiroğlu, 2012)

Gerçek hava-yakıt oranı ile gerçekleşen yanma değerinin, teorik hava-yakıt oranı ile bulunan yanma değerine göre büyük olması söz konusu iken, buna rağmen, silindir içerisindeki yakıt damlacıklarının çevresinde yeteri kadar hava bulunamayabilmektedir.

Dizel motorundan çıkan egzoz gazı bileşenlerinden özellikle yaklaşık %1'lik kısım var ki özellikle bu kısım CO, HC, NO_x, SO_x, PM gibi kirletici emisyonlardan oluşmaktadır. Dizel motorundan çıkan egzoz gazı bileşenlerinin yüzdeleri Şekil 1.4'te gösterilmektedir.



Şekil 1.4. Dizel motorundan çıkan egzoz gazı bileşenlerinin yaklaşık yüzdeleri
(Çakmak, 2021)

1.2.4 Dizel Yakıtı

Ham petroller, rafinerilerde damıtılmaktadırlar. Başka bir deyişle, distilasyondan geçirilmektedirler. Petrolün ana ürünlerini ve yan ürünlerini karıştırma görevini yerine getiren rafineriler, çeşitli oranlarda; benzin, dizel yakıtı ve diğer petrol ürünlerini, uygun özelliklerde sağlamak ve pazar ihtiyaçlarını karşılamak üzere çalışmaktadırlar.

Rafinerilerin ilk damıtma üniteleri atmosferik basınçta çalışmakta olup, parametreleri genelde azami dağıtım sağlamak üzere ayarlanmış olmaktadır. Rafinerilerden elde edilen ürünlerin akışkan kalitesi ve miktarı, ham petrolün kimyasal bileşimine bağlı olarak değişebilmektedir.

Rafineriler, pazardaki genel ürün taleplerinin haricinde, özel marketler için farklı oranlarda; benzin, gaz ve ara ürün yakıtlar da üretilebilmektedirler. Downstream (aşağı akış) denilen değişim işlemleriyle üretim şekli, market ihtiyaçlarını gidermede rafineriler için dengeleyici bir unsur olabilmektedir. Isı, basınç ya da katalizörler devreye sokularak büyük moleküller, daha küçük moleküllere bu işlemler ile parçalanabilmektedirler. Birçok rafinerinin, hidrokarbonların istenmeyen ağır kısımlarının kırılarak, daha hafif hidrokarbonlara dönüştüğü; vakumda damıtma, ısıl kraking (parçalanma), katalitik kraking ve

Parafinli (alkan), naftensel (sikloalkan) ve aromatik hidrokarbonlar gibi, farklı hidrokarbon tiplerinden oluşarak, kompleks yapı biçiminde, ham petrollerden; setan sayısı, enerji içeriği, buharlaşma noktası, kükürt içeriği gibi farklı özelliklere sahip dizel yakıtlar elde edilebilmektedir (Ejder, 2007; Şahin, 2022).

Dizel yakıtlarında; tutuşabilir olma, setan sayısı değerinin yüksek olması, yağlayıcılık, düşük kükürt içeriği gibi özellikler aranmaktadır. Molekül zincirleri, benzinin molekül zincirinden daha uzun oldukları için tutuşmaları daha zor olmaktadır (Şahin, 2022).

Dizel yakıtın genel özellikleri Tablo 1.1’de gösterilmektedir.

Tablo 1.1. ASTM D975’e göre dizel yakıtın özellikleri (Tillem, 2005)

Yakıt Özelliği	Değer
Kinematik viskozite, 40 °C, mm ² /s	1,9-4,1
Yoğunluk, 15 °C, kg/m ³	0,85
Su ve tortu miktarı, % kütlece, maks.	0,05
Toplam kükürt, % kütlece, maks.	0,05
Alevlenme noktası, °C, min.	52
Bulutlanma noktası, °C	(-15)-5
Setan sayısı	40-55
Kül, % kütlece	0,01

Kaldırılan DIN-51601 standardının haricinde, geçerli olan EN 590 standardına göre dizel yakıt standartları Tablo 1.2’de gösterilmektedir.

Tablo 1.2. EN 590 dizel yakıt standartları (Beytekin, 2019; Yılbaş, 2022)

Özellik	En Az Sınır	En Çok Sınır	Deney Yöntemi
Setan sayısı	51	-	EN ISO 5165
Setan indeksi	46	-	EN ISO 4264
Yoğunluk, 15 °C, kg/m ³	820	845	EN ISO 12185, EN ISO 3675
Polisiklik aromatik hidrokarbonlar, % kütlece	-	8	EN 12916
Kükürt, mg/kg	-	10	EN ISO 20846, EN ISO 20884
Mangan, mg/L	-	2	EN 16576

Tablo 1.2. (devam). EN 590 dizel yakıt standartları (Beytekin, 2019; Yılbaş, 2022)

Özellik	En Az Sınır	En Çok Sınır	Deney Yöntemi
Parlama noktası, °C	55	-	EN ISO 2719
Karbon kalıntısı, %10 damıtma kalıntısında, % kütlesel	-	0,3	EN ISO 10370
Kül, % kütlesel	-	0,01	EN ISO 6245
Su, mg/kg	-	200	EN ISO 12937
Toplam kirlilik, mg/kg	-	24	EN 12662
Soğuk filtre tıkanma noktası, °C	-	+5 (Yaz) -15 (Kış)	EN 116
Bakır şerit korozyonu, 50 °C, 3 saat, derece	-	1	EN ISO 2160
Oksidasyon kararlılığı, 110 °C, g/m ³ Saat	- 20	25 -	EN 12205 EN 15751
Yağlama özelliği, 60 °C, düzeltilmiş aşınma hızı, µ	-	460	EN ISO 12156-1
Kinematik viskozite, 40 °C, mm ² /s	2	4,5	EN ISO 3104
Aromatik hidrokarbonlar, % kütlesel	-	8	EN 12916
250 °C'de elde edilen damıtma, % hacimsel	-	65	EN ISO 3405
350 °C'de elde edilen damıtma, % hacimsel	85	-	EN ISO 3405
%95'in hacimce elde edildiği sıcaklık, °C	-	360	EN ISO 3405
Yağ asidi metil ester, % hacimsel	-	7	EN 14078

Dizel motorlarındaki yakıt püskürtme sistemlerinin uzun ömürlü olmalarının ve dizel motorlarında iyi bir yanma sağlayabilmelerinin mümkünlüğü, kullanılan yakıtın cinsiyle ve durumuyla çok yakından alakalıdır. Dizel yakıtlarında bu nedenle bazı özellikler aranmaktadır. Bu özellikleri fiziksel ve kimyasal özellikler olarak iki şekilde ayrılabilir. Bu özellikler, dizel yakıtı,

yanma odasına enjekte edildiğinde, motorun performansına ve emisyon değerlerine etki etmektedir (Ejder, 2007).

1.2.4.1 Dizel Yakıtının Fiziksel Özellikleri

1.2.4.1.1 Viskozite

Sıvıların akmaya karşı göstermiş oldukları dirence viskozite denilmektedir. Sıvıların akıcılığı, sayısal olarak viskozite terimi ile ifade edilebilmektedir. Ayrıca, farklı birimlerle de ifade edilebilmektedir (Beyaz, 2022). Viskoziteden; dinamik ve kinematik olarak iki şekilde bahsedilebilmektedir.

Dinamik viskozite, herhangi bir sıvıya uygulanan kayma gerilmesinin, kayma hızına oranıdır. Dinamik viskozite, dinamik viskozite katsayısı ya da sadece viskozite ismiyle de geçebilmektedir.

Kinematik viskozite ise, herhangi bir akışkanın, yer çekimi etkisinde, akma eğilimine karşı gösterdiği iç dirence denilmektedir (Beytekin, 2019). Kinematik viskozite aynı zamanda dinamik viskozitenin, yoğunluğa oranına eşittir. Kinematik viskozitenin birimi santistok (cSt) olup, $1 \text{ cSt} = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$ 'dir ve ASTM D88'e göre 40 °C'de ölçülebilmektedir (Afşar, 2015). Viskozite ölçümü için farklı araçlar kullanılsa da bu ölçümlerden en sık tercih edileni saybolt viskozimetresidir (Beytekin, 2019).

Viskozite, daima ölçüldüğü sıcaklıkla ifade edilmektedir. Çünkü, sıvılar ısıtıldıkça, daha akıcı olmaktadır ve incelmektedirler. Isınan bir sıvının viskozitesi ise düşmektedir (Beyaz, 2022). Örneğin; dizel motorlarda kullanılan yakıtların viskoziteleri 40 °C'de 35 ile 70 s.u.s. (saybolt universal saniye) birimi arasında değişebilmektedir (Özdemir, 2011).

Viskoziteyle ilgili başka bir birimde, motorlarda kullanılacak yakıtların viskoziteleri 50 °C'de 1,5 ile 5 mm²/s, buna mukabil olarak 1,5 ile 5 Engler derecesi aralığında olması gerekmektedir. Dizelin 40 °C'de ölçülen viskozitesi ise 2 ile 4,5 cSt aralığına karşılık gelmektedir (Dinçbaş, 2007; Nişancı, 2007). Viskoziteleri, bu aralığın üzerinde olan yakıtlar, 40 ile 100 °C arasında ısıtılarak kullanılmaktadırlar (Söyler, 2011).

Viskozite, enjekte edilen yakıtın özelliklerini ve dolayısıyla silindirdeki yanmayı doğrudan etkileyen bir özelliktir. Viskozitenin düşük olması, borudaki akış direncini azaltmakta, bu durum, ayrıca, enjektörlerdeki yakıt damlacıklarına da

tesir ederek çaplarını azaltmaktadır. Bu durumda, dizel motorlardaki yanma karakteristiği iyileşirken, kurum oluşumları ise en az olmaktadır. Ancak, viskozitenin çok düşük olması, yakıt sistemindeki sızıntıyı artırmaktadır.

Viskozitenin alt ve üst limitlerinin aşılması, yakıt pompası ve enjektörlerde tribolojik sorunlara davetiye çıkarabilmektedir (Uyar, 2024). Yakıt viskozitesinin yüksek olması durumunda ise, motorda başka sıkıntılar da baş gösterebilmektedir.

Yakıt enjektöründen, yakıt tanecikleri iri olarak püskürtüldüğünde: silindir içerisinde iyi atomize olamamakta ve iyi bir yanma gerçekleşmemektedir (Beyaz, 2022). Ayrıca, yakıtın viskozitesinin yüksek olması, soğuk havalarda yakıtın püskürtülmesinde sorunlara neden olarak yanma olayının veriminin düşmesine, yanmamış hidrokarbon miktarının ise artmasına neden olabilmektedir (Tan, 2022). Standartlarda kinematik viskozitenin deney yöntemleri D445, EN ISO 3104'tür.

1.2.4.1.2Yoğunluk

Yoğunluk, birim hacimdeki ağırlığa eşit bir özelliktir. Yakıtın yapısı, yakıtın karbon ve hidrojen miktarı, yakıtın parçalanması ve de yakıtın tutuşma kabiliyeti hakkında yakıtın yoğunluk özelliği, ipucu verebilmektedir.

Elde edildiği ham petrolün cinsine göre yakıtın yoğunluğu değişebilmektedir. Farklı birimlerle ifade edilebilen bir özelliktir. EN 590 standartlarına göre dizel yakıtlarının yoğunlukları 15 °C sıcaklığında iken 820 ile 845 kg/m³ arasında olmalıdır (Uyar, 2013).

Yakıtların molekülleri içindeki hidrojen miktarı arttıkça, özgül kütleleri genelde azalmaktadır (İnal, 2017). Yoğunluk, özellikle; setan sayısı, aromatik içerik, viskozite ve distilasyon karakteristikleri gibi değişkenlerle ilişkili bir özellik olarak anlam bulabilmektedir (Albayrak, 2014).

Daha fazla karbon taşıyan yakıtların yoğunlukları genel olarak büyük olmakla birlikte daha büyük ısı enerjisine sahip olabilmeleri de olasıdır.

Yakıt yoğunluğunun, partikül ve NO_x emisyon değerleri için en önemli faktörlerden biri olduğu bilinmektedir. Geçiş şartlarında yapılan deneylerde özellikle, bu etki daha net olarak görülmektedir.

Yakıt yoğunluğunun fiziksel etkisi detaylı olarak incelenildiğinde, daha yüksek yoğunluktaki dizel yakıtının, daha fazla miktarda yakıtın püskürtülmesine neden olduğu ve buna bağlı olarak da yanma süreci içerisindeki dinamik zamanlamayı değiştirebildiği görülmüştür (Ejder, 2007).

Yakıt yoğunluğunda meydana gelen değişimler, silindir içerisine gönderilen yakıt miktarını doğrudan etkileyebilmektedir. Viskoziteyle birlikte yakıtların yanma ısısını, yakıt tüketimini ve yakıt püskürtme karakteristiklerini etkileyen önemli iki özellikten birisidir (Opuz, 2022).

Yanma odasına enjekte edilen yakıt miktarı fazla olduğunda, zengin karışıma neden olarak yanma odası cidar sıcaklığının artmasına, dolayısıyla da tutuşma gecikmesi süresinin azalmasına neden olabilmektedir. Püskürtülen yakıt miktarı, püskürtme hızının değil de püskürtme süresinin değişmesiyle, kısa tutuşma gecikmesi süresince daha az olmaktadır (Ejder, 2007).

Dizel motorlarında, silindire gönderilen yakıt yoğunluğunun, motordaki güç artışı ile ilgisi doğrudan olmaktadır. Motora tam gaz verildiğinde, motordan elde edilen güç en fazla olmaktadır. Ancak, tam gaz verildiğinde, arzu edilen homojen bir karışım sağlanamadığı için yanma verimi düşmektedir ve yanmamış hidrokarbon miktarı artarak is emisyonu değerlerinde artışa sebep olmaktadır ki, bu da egzoz dumanının miktarının artmasına sebep olarak sisli bir görüntünün oluşmasına neden olabilmektedir (Ejder, 2007; Tan, 2022). Yoğunluğun deney yöntemleri EN ISO 12185, EN ISO 3675'tir.

1.2.4.1.3 Uçuculuk Noktası

Sıvıların, genel olarak sıvı halden gaz haline geçme sıcaklığı, uçuculuk noktası olarak nitelendirilmektedir (Ejder, 2007). Uçuculuk özelliği, o yakıtın kimyasal kompozisyonu hakkında da bilgi verebilmektedir (Keskin, 2005).

Dizel yakıtının uçuculuğu, damıtım sıcaklığının %90'ı ile ifade edilmektedir. Öyle ki; bir dizel yakıtı, damıtım sıcaklığına kadar ısıtılırsa, %90 oranında buhar haline geçebilmelidir (Ejder, 2007). Yanmadan önce uygun hava-yakıt karışımının sağlanabilmesi ve yanmanın verimli olması açısından bir sıvı yakıtın buharlaşma kolaylığı önem taşımaktadır (Tural, 2023).

Uçuculuk kabiliyeti yüksek olan yakıtlar özellikle, küçük dizel motorlarında; egzoz sıcaklığını, yakıt tüketimini ve dumanı azaltmaktadır, emisyon değerlerini ise düşürmektedir.

Dizel yakıtların uçuculuk özelliklerini standart bir aparat üzerinde, kontrollü ısıtmayla, yakıttan arka arkaya alınan numunelerden parçaların arıtıldığı sıcaklık değeri ifade etmektedir. Yakıt örneği damıtma aparatına yerleştirilerek ısıtılmaktadır. Sıcaklık yükseldikçe oluşan buhar yoğunlaştırıldıktan sonra

akışkanın ilk hacminin yüzdeleriyle derecelendirilmiş bir silindirde toplanmaktadır. Damıtma sırasında; ilk kaynama noktası, son nokta ya da son kaynama noktası, yoğunlaştırılmış sıvı yüzdesi, uçucu olmayan içerik yüzdesi gibi bilgiler kaydedilmektedir. ASTM D86, uçuculuk özelliklerinin belirlenmesinde en çok kullanılan yöntemlerden biridir.

Yakıtın damıtma ya da kaynama aralığı, yakıtın kimyasal bileşimine bağlı olmaktadır. Bu nedenle; akışkanlık, parlama noktası, kendiliğinden tutuşma sıcaklığı, setan sayısı ve yoğunluk gibi yakıt özelliklerini de etkilemektedir (Ejder, 2007).

Soğuk hava koşullarında, motorun ilk hareketini kolaylaştırması ve yanma sonucunda oluşan is emisyonunun miktarı bakımından uçuculuk, önemli bir özellik olarak öne çıkmaktadır (Çengelci, 2011). Standartlardaki D86 ve EN ISO 3405 deney yöntemlerine göre distilasyon değerleri belirlenebilmektedir.

1.2.4.1.4Parlama Noktası

Parlama noktası, yanıcı bir akışkanın, bir kıvılcımla tutuşarak; hava-buhar karışımını oluşturabilecek kadar buhar yayabildiği sıcaklığı ifade etmektedir. Parlama noktası, ASTM D93 ya da EN ISO 2719 gibi standart test yöntemleri kullanılarak, standartlaşmış bir aparatta ölçülmektedir.

Yakıtların parlama noktasını tespit edebilmek için yakıtlar, içerisinde termometre olan bir kaba konmaktadır ve alttan ısıtılmaktadır. Her 5 °C'lik sıcaklık artışında bir, yakıtın üzerine alev tutulmaktadır ve geri çekilmektedir. Yakıt belli bir sıcaklığa geldiğinde, yakıtın üst kısmında parlama olmaktadır ve sonra sönmektedir. Fakat, devamlı bir yanma olmamaktadır. Bu sıcaklık, yakıt içindeki ürünlerin buharlaşmaya başladığı sıcaklık derecesini ifade etmektedir (Ejder, 2007). İşlemler sırasındaki parlama yüzeyi, yakıt yüzeyinin yanıp sönme durumunu gösterdiği anda oluşmaktadır (Beyaz, 2022).

Yakıtın parlama noktası, motor performansı açısından önem arz etmemektedir. Parlama noktasındaki değişiklikler, yakıtın kendiliğinden tutuşma sıcaklığını ya da diğer yanma özelliklerini de etkilememektedir (Ejder, 2007).

Parlama noktasının, dizel yakıtlarında, depolama ve yangını önleme bakımından ehemmiyeti büyüktür. Emniyet için genel olarak, 65 ile 150 °C arasında olmalı ve 36 °C'nin altına düşmemelidir.

Parlama noktası, en önce, yakıtların güvenli kullanılabilmesi adına önemlidir. Parlama noktası eğer çok düşükse daha fazla yangın tehlikesi arz etmektedir. Bu nedenle, parlama noktasının en düşük sınırları, zaruri olarak; hükümet acenteleri ve sigorta şirketlerince belirlenmektedir. Otomotivler için; dizel yakıtlarının parlama noktalarının minimum değerleri ABD’de 38 °C iken bazı Avrupa ülkelerinde 56 °C’ye kadar değişmektedir (Ejder, 2007).

Parlama noktası ile yanma noktası arasındaki farklılıklar; parlama noktasının, bir maddenin tutuşmasının başladığı en düşük sıcaklık olması iken yanma noktasının ise, içten yanmalı motorda, iş zamanının başlaması ile yakıtın kısa bir süre yanmaya devam ettiği en düşük sıcaklık olmasıdır (Beyaz, 2022). Parlama noktası, D93 ve EN ISO 2719 deney yöntemlerine göre tespit edilebilmektedir.

1.2.4.1.5 Donma Noktası

Donma noktası, bir bakıma, yakıtın soğuk hava koşullarında kullanılabilme kabiliyetidir (Ejder, 2007). Dizel yakıtının donma sıcaklığı, ortalama olarak -10 ile -15 °C arasındadır (Beyaz, 2022).

Dizel yakıtı içerisinde, yüksek oranda parafin bulunmaktadır. Buna bağlı olarak, yakıt soğutulduğunda, yakıt içerisindeki parafinler, wax (mum) kristalleri şeklinde görünmeye başlarlar. İlk wax kristallerinin, yakıt içerisinde gözlemlenmeye başladığı en düşük sıcaklık, bulutlanma noktasıdır. Yakıt soğutulmaya devam edildiğinde, yakıtın hala akmaya devam edebildiği en düşük sıcaklık ise, akma noktasıdır (Afşar, 2015). Akma noktası, akma eyleminin sona erdiği sıcaklıktır (Uyar, 2024). Yakıtın bulutlanma noktası ise, yakıtın akma noktasının yaklaşık olarak 4,5 ile 5,5 °C sıcaklık aralığında üzerindedir (Ergen, 2006). Birbirlerinden farklı özellikler olarak hem birbirleriyle hem de donma noktası ile karıştırılmamalıdır.

Belli bir sıcaklık değerine kadar soğuyan yakıt molekülleri, kristalleşmektedirler ve sıcaklık daha fazla düştüğünde de donmaktadırlar. Kristalleşmiş yakıt ise, yakıt sistemini tıkayarak, yakıtın akışına engel olmaktadır. Bu nedenle, yakıtların donma noktası, bölgenin dış hava sıcaklığı değerinden 5 ile 10 °C arasında daha düşük olmalıdır (Ejder, 2007). Bu hususla ilgili, yakıta eklenecek muhtelif katkı maddeleri, yakıtın donma sıcaklığının düşürülmesine yardımcı olabilir (Uyar, 2024).

1.2.4.1.6 Su ve Tortu Miktarı

Yakıtın temizliğiyle alakalı önemli bir özelliktir (Şen, 2012). Yakıt içerisindeki su ve tortu, yakıt pompası ve enjektörlerde, aşınmalara ve paslanmaya yol açabilmektedir (Ejder, 2007). Yakıtın içerisindeki su miktarının, normalden fazla bulunması, yakıtın yanmasını olumsuz olarak etkilemektedir.

Tortu miktarı ise, enjeksiyon sisteminde birikerek tortulaşmaya ve filtrelerin tıkanmasına neden olabilmektedir (Reşitoğlu, 2010). Tortu; kum, küçük taş parçacıkları, toprak veya karbon kalıntısı şeklinde kendini gösterilebilmektedir. Artık yağ birikintisi veya yağların içerisindeki hidrokarbonların oksijenle tepkimeye girmesi de tortu oluşumuna sebep olabilmektedir.

Yakıtın içerisindeki tortu miktarının artması, yanmayı olumsuz etkileyen bir özellik olduğundan, bu durum, silindir içerisindeki tortu miktarını da artırarak, motor aksamlarında da aşınmaların meydana gelmesine neden olabilmektedir (Beytekin, 2019).

Motor parçalarında oluşabilecek zararların asgari seviyede olabilmesi için yakıtlar, araçlarda, gözenekli filtrelerden bir veya iki defa süzüldükten sonra pompa ve enjektörlere gönderilmelidir (Tan, 2022).

EN 590 standartlarına göre; dizel yakıtı için su ve tortu miktarı 200 mg/kg değerini aşmamalıdır (Reşitoğlu, 2010). Başka bir ifadeyle, yakıtın içerisindeki su ve tortu miktarının %0,5'ten fazla olmaması gerekmektedir (Ejder, 2007).

Yanacak yakıt içerisinde, su ve tortunun olması, mümkün mertebe istenmemektedir. Çünkü, yakıtın içerisindeki su ve tortu miktarı arttıkça, yanma olayı da olumsuz etkilenmektedir. Bu da ısı verimin düşmesine de neden olabilmektedir (Beytekin, 2019). Su miktarı, standartlarda D2709 ve EN ISO 12937'ye göre tespit edilebilmektedir.

1.2.4.1.7 Buharlaşma Noktası

Dizel motorlarında, ilk hareket için, düşük sıcaklıklarda buharlaşabilen yakıtlar tercih edilmelidir (Beytekin, 2019).

Bir yakıtın arıtılmış özelliklerinden, buharlaşma noktası etkilenebilmektedir (Ejder, 2007). Arıtma yöntemlerinden etkilenebilen yakıtın buharlaşma özelliği, yakıtın buharlaşması arttıkça, yakıtın kendi kendine tutuşabilme özelliği kötüleşeceğinden dolayı, motorda kullanımı halinde, yanma sırasında is oluşum miktarının artması olağan olmaktadır (Beytekin, 2019). Bu yüzden, Kanada gibi

kışları çok soğuk geçen bir ülkede buharlaşma noktası, 315 °C ile sınırlıyken, tropikal bölgelerde bu sıcaklık, 379 °C'ye kadar yükselebilmektedir (Ejder, 2007).

1.2.4.1.8Düşük Sıcaklık Davranışı

Dizel yakıtların çoğu, önemli oranda parafinli bileşene sahiptir. Düşük sıcaklıklarda, parafin kristallerinin (wax (mum)) oluşturduğu çökelti, yakıt filtresinin tıkanmasına ve yakıt beslemesinin kesilmesine yol açabilmektedir.

Yakıtın özelliklerine bağlı olarak parafin çökmesi 0 °C'de gerçekleşebileceği gibi daha erken sıcaklıklarda da başlayabilmektedir. Bu nedenle, kışın, dizel motorlarda kullanılacak dizel yakıtların özel olarak seçilmesi ya da işlem görmesi gerekmektedir.

Dizel yakıtların düşük sıcaklıktaki davranışlarını belirlemek için; ASTM D2500'e göre bulutlanma noktası, ASTM D97'ye göre akma noktası, EN 116:1981'e göre yakıtın filtrede tıkanma yaptığı akışkan sıcaklığının değeri olan filtre tıkanma noktası gibi, bazı özelliklerin tespiti için bu standartların yöntemleri kullanılmaktadır.

Rafinerilerde, yakıtlara genellikle akışkanlıklarını artırıcı maddeler eklenmektedir. Bu maddeler, parafin çökelmelerini engelleyemiyorlarsa da parafin kristallerinin büyümelerini kısıtlayabilmektedirler. Bu sayede, kristaller, filtrelerin deliklerinden geçebilecek kadar küçük kalabilmektedirler. Süzme işlemi böylelikle düşük sıcaklıklarda da gerçekleştirilebilmektedir.

Düşük sıcaklık direnci özelliği, parafin kristallerinin çökmesini önleyici katkı maddeleriyle daha da yükseltilebilmektedir.

Piyasada mevcut olan kışlık dizel yakıtlar, -22 °C'den başlayan sıcaklıklar için düşük sıcaklık direncini garanti edebilecek düzeyde üretilmektedir.

Düşük sıcaklık direncini yükseltmek için başka iki yol, filtreyi ısıtmak ve dizel yakıtı petrol ürünleri eklemekten geçmektedir. Dizel yakıtı düzenli benzin ilavesi, çökelmeyi geciktirebilir. Ancak, benzinin setan sayısı çok düşük olduğundan dizel yakıtının tutuşma kalitesini azaltabilmektedir ve parlama noktasını önemli oranda düşürebilmektedir (Ejder, 2007).

1.2.4.2 Dizel Yakıtının Kimyasal Özellikleri

1.2.4.2.1 Ateşleme Noktası

Dizel yakıtların, motor silindiri içerisindeki koşullarda, kendi kendine ateş alma kabiliyetini, ateşleme noktası belirlemektedir.

Ateşleme noktası iyi olan yakıtlar, düşük sıcaklıklarda yanabilmektedirler. Bu yakıtlarla; motor çabuk çalışmaktadır, az duman yapmaktadır ve çalışma esnasında vuruntu az olmaktadır.

Yakıtlarda ateşleme noktası; setan sayısı ve dizel endeksi ile ilişkili bir özelliktir (Ejder, 2007).

1.2.4.2.2 Kükürt Miktarı

Kükürt, ham petrolün içerisinde doğal halde bulunabilmektedir.

Dizel yakıtı için kükürt miktarı, rafineri işlemleri sürecinde kabul edilebilir seviyelere çekilebilmektedir. Dizel yakıtı içerisindeki kükürt miktarı, is emisyonlarının oluşumunu kolaylaştıran bir özellik olarak; taşıt emisyon kontrol ekipmanlarının performanslarını da etkileyebilmektedir.

Kükürt miktarı, dolaylı olarak yakıt içerisindeki CO, HC ve NO_x emisyonlarını da az da olsa etkileyebilmektedir. Kükürt içeriği 500 ppm'e kadar olan dizel yakıtları, genellikle kükürtlü yakıt olarak tanımlanmaktadır. 50 ppm ve daha az kükürt içeriğine sahip dizel yakıtları ise, düşük kükürtlü olarak tanımlanmaktadır.

Kükürtsüz yakıt tanımı ise; 10 ppm'den daha az kükürt içeriğine sahip yakıtları ifade etmektedir.

Ham petrolün damıtılması esnasında yakıt içerisine karışan kükürt, motorda, yanma zamanında, oksijenle birleşerek kükürt dioksit (SO₂) veya biraz daha oksijen bulması halinde kükürt trioksit (SO₃) emisyonlarını oluşturabilmektedir. Bu gazlardan; SO₂ pek tehlikeli değilse de SO₃ gazı, yanma artıklarından olan su buharı molekülü H₂O ile birleşerek sülfürik asit (H₂SO₄) oluşturabilmektedir. (1.2) numaralı eşitlik ile, sülfürik asit kimyasal oluşum tepkimesi gösterilmektedir.



Çok şiddetli bir aşındırıcı olan sülfirik asit; motor parçalarının, kısa zamanda aşınmasına neden olabilmektedir (Ejder, 2007). Sülfirik asit, silindir cidarı ile segmanların mekanik aşınmalarını hızlandıran bir asittir (Reşitoğlu, 2010). Bu asidin, motor içinde ve egzoz sisteminde yoğunlaşması, aşınmalara (korozyonlara) neden olabilmektedir. Ayrıca, kükürdün neden olduğu SO₂ emisyonları ve H₂SO₄ hem doğaya hem insan sağlığına zararlı bileşiklerdir (Tillem, 2005).

Tüm bunlardan dolayı, yakıt içerisinde kükürt oranının az olması istenmektedir. Fakat, maliyeti artırabileceğinden dolayı, %1'e kadar olmak kaydıyla, yakıt içerisinde kükürt miktarına müsaade edilebilmektedir (Ejder, 2007). Kükürt miktarı, ASTM 129' da ve IP 3362 ye göre, motor hızına bağlı olarak, yüksek hızlı motorlarda %1'den fazla olmamalıdır (Dinçbaş, 2007). EN 590 standartlarına göre de dizel yakıtı içerisinde bulunan kükürt miktarı, 50 mg/kg'ı aşmamalıdır (Reşitoğlu, 2010). Deney yöntemleri D129, D2622, EN ISO 20846, EN ISO 20884'tür.

1.2.4.2.3Kül Miktarı

Yanma sonunda, yakıtın bıraktığı, yanmayan artıklar, kül miktarını belirlemektedir. Karbon ve hidrojen bileşiklerinden oluşan yakıtların, idealde, hiç kül bırakmamaları beklenmektedir.

Küller, iki farklı formda bulunabilmektedirler. Yanma olayı sonunda, motorda, zımpara tozu misali, aşındırıcı (korozif) etki yapabilen küllerin oluşumunda, yakıt içerisinde, yabancı madde olarak bulunan madeni tuzların etkisi olabilmektedir (Ejder, 2007). Bunlar, küllerin, katı parçacıkları olarak bilinen halidir. Diğer türlü ise küller; küçük katı parçacıklardan, yağ ya da yakıtın içerisinde bulunan, suda çözünabilir metalik bileşiklerden oluşmaktadır. Bu metalik bileşiklere, metalik sabunlar da denilebilmektedir.

Katı parçacıklar; yakıt pompası, enjektörler, segmanlar ve pistonların aşınmasına neden olabildiği gibi, motor parçaları üzerinde birikintilere (depozitlere) de neden olabilmektedir. Çözünmüş haldeki metalik sabunlar da yanma sonunda, motor parçaları üzerinde birikintiye neden olabilmektedirler.

Kül miktarı, yanmış yakıt örneğinin, ağırlığına göre yüzde olarak belirlenmektedir (Keskin, 2005; Reşitoğlu, 2010). Yakıtın kül bırakma oranının %0,01'den fazla olmamasına dikkat edilmelidir (Ejder, 2007). EN 590 standardının,

dizel yakıtı için, müsaade ettiği azami kül miktarı, kütlece %0,01'dir (Reşitoğlu, 2010).

Yanma sonucu meydana gelen artıklar, segman yuvaları ve supap tablası saplarında birikmektedirler. Bu açıdan bakıldığında, dizel yakıtlarının en önemli sorunlarından birisi, fazlaca karbon ve kül içermeleridir.

Setan sayısı, belli bir değere kadar, yanma olayını iyileştirmek suretiyle, yanma sonundaki artık miktarlarını azaltma konusunda yardımcı olabilmektedir. Ancak, bu değerden sonra, is miktarının artması yönünde, yani olumsuz etki etmeye başlamaktadır. Bu yüzden, herhangi bir maddenin, konvansiyonel dizel yakıtı ilavesi olarak kabul edilebilmesinden önce, yakıtın bu özellikleri dikkate alınmalıdır (Söyler, 2011). Kül ile ilgili deney yöntemleri D48, EN ISO 6245'tir.

1.2.4.2.4 Karbon Artıkları

Yakıtın, havasız bir ortamda ısıtılması sonucunda, yakıttan arda kalan karbon miktarı, karbon artıkları olarak geçmektedir (Ejder, 2007). Yakıt içerisindeki karbon miktarının fazla olması, yanma sonunda, silindir içerisinde karbon birikintilerinin oluşmasına neden olabilmektedir (Beytekin, 2019). Ayrıca, yakıtın yanmasını zorlaştırabilmektedir (Maden, 2016)

Dizel yakıtlarındaki karbon artıklarının miktarlarının fazla olması, motorda, yanmanın gerçekleşmesi sırasında, bu artıkların tamamının yakılmasını zorlaştırabilmekte ve bir kısmını yakamayarak egzozda is oluşumuna neden olabilmektedir. Böyle bir durumda, bu artıklar, enjektör deliklerini tıkayarak onların işlevsiz hale gelmesine neden olabilmektedirler (Tan, 2022). Bu durum, ayrıca, yanma odasında sıcak noktalar oluşturarak ve parçaların ısı transferini zorlaştırarak; korozyon, aşırı ısınma ve çatlama gibi problemleri ortaya çıkarabilmektedir. Bu özellik ile ilgili deney yöntemleri D5224 ve EN ISO 10370'tir.

1.2.4.2.5 Setan İndisi (Dizel İndeksi)

Dizel yakıtının, tutuşma kalitesinin görüntülenmesinde ve kontrolünde, setan indisi sıklıkla kullanılmaktadır.

Yakıt kalitesini kontrol etmek ve katkı maddeleriyle setan sayısı gelişiminin sınırlarını belirlemek üzere; setan indisi, ek bir test olarak, dizel yakıtının özellikleri arasında yerini almıştır. Örneğin; EN 590:1993 standardının, otomotivlere yönelik

dizel yakıtı için belirttiği maksimum setan sayısı 49 iken minimum setan indisi ise 46'dır (Ejder, 2007). Tablo 1.3'te, setan indisi değerleri ile setan sayısı değerlerinin birbirlerine göre karşılıkları gösterilmektedir.

Tablo 1.3. Setan indisleri ile setan sayılarının birbirlerine karşılık gelen değerleri
(Çelebi, 2017)

Setan İndisi	Setan Sayısı
0	16
5	20
10	24
15	28
20	30
25	34
30	37
35	40
40	43
45	46
50	50
55	53
60	56
65	59
70	62
80	65
85	68
90	71
95	75
100	78

ASTM D613 gereğince; kooperatif yakıt araştırma (CFR) motoru yöntemiyle belirlenen setan sayısının doğruluğu, bu yöntem ile, düşük olmasının yanı sıra, uğraştırıcı ve meşakkatli olmaktadır. Bu yöntem, kesinlikle uygun bir test motor standı kullanmayı gerektirmektedir. Setan sayısını bu şekilde bulmak zahmetli ve zor olduğu için pratik olarak, dizel indeksi parametresi de kullanılabilir. Dizel indeksinin sayısal değeri, (1.3) ve (1.4) numaralı eşitliklerde olduğu gibi, iki farklı eşitlik ile de hesaplanabilmektedir (Beyaz, 2022; Özdemir, 2011).

$$\text{Dizel İndeks} = \frac{\text{API Gravite (60 °F)} \times \text{Anilin Noktası (°F)}}{100} \quad (1.3)$$

$$\text{Dizel indeks} = 454,74 - 1641,416 \times D + 774,74 \times D^2 - 0,554 \times T_{50} + 7,803 \times [\log_{10}(T_{50})] \quad (1.4)$$

D: 15°C'deki yakıtın yoğunluğu

T₅₀: Yakıtın %50'sinin damıtıldığı sıcaklık

Anilin noktası, eşit hacimde, anilin ve numunenin en düşük kritik çözünme sıcaklığıdır. Anilinin kimyasal formül gösterimi C_nH_{2n+2} biçiminde olarak, aromatik hidrokarbonları daima, fakat parafinikleri sadece sıcakta eritebilen eritgen bir maddedir.

Anilin maddesi, dizel yakıtı ile karıştırılarak ısıtılmaktadır. Sıcaklık altındayken dizel yakıtı, anilin sayesinde tamamen erimektedir. Fakat, erimiş halde bulunan karışım soğumaya bırakıldığında, parafinlerin yavaş yavaş ayrılmaya başladığı görülmektedir. İşte bu ayrışmanın olduğu ve sonuçlandığı sıvı içerisinde, iki ayrı tabakanın görüldüğü sıcaklığa, anilin noktası denilmektedir (Beytekin, 2019; Örs, 2016).

Dizel yakıtların, dizel indeks (setan indisi) sayısı yükseldikçe, yanma özelliklerinin iyileştikleri ve yanma verimlerinin arttıkları görülmüştür (Beyaz, 2022).

Dizel indeksi, dizel yakıtların, kendi kendine tutuşma süresiyle de alakalıdır (Tan, 2022). Ayrıca, dizel indeksi sayısının yükselmesi, yakıtın tutuşma gecikmesini düşürebileceği için, motorun çalışması sırasında, vuruntuların azaldığı da gözlenebilmektedir (Beyaz, 2022). Dizel indeks değerinin 50'nin üzerinde olması halinde, yakıt daha iyi yanma karakteristikleri gösterebildiği için, dizel indeks değerinin, bu değerin üzerinde olması istenmektedir (Opuz, 2022). Setan indisinin deney yöntemleri D976, EN ISO 4264'tür.

1.2.4.2.6 Setan Sayısı

Dizel yakıtının en önemli özelliklerinden biri de setan sayısıdır. Sıkıştırma zamanı sonunda, basıncı ve sıcaklığı artmış olan havanın içerisine püskürtülen dizel

yakıtının, kendi kendine tutuşabilme kabiliyetini gösteren bir ölçü niteliğinin karşılığı olarak, kendini göstermektedir (Söyler, 2011).

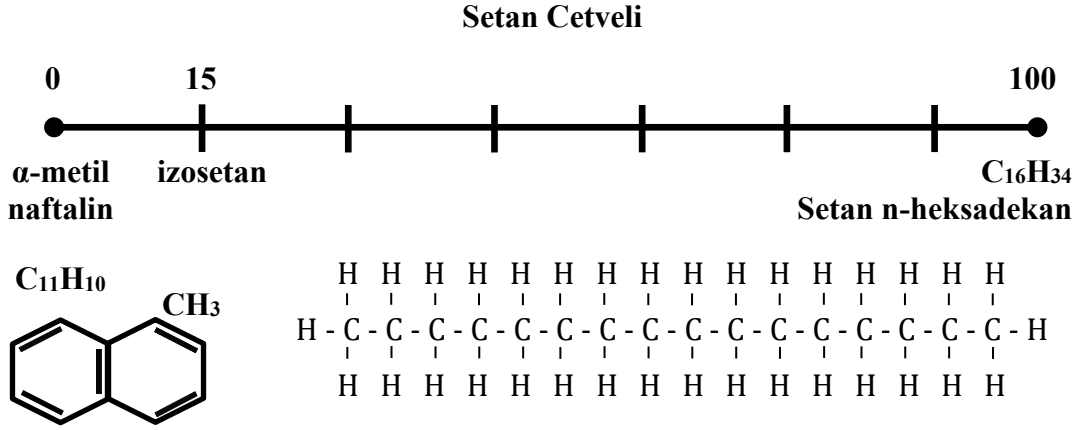
Setan sayısı, dizel yakıtının ateşleme kalitesini, yani tutuşma eğilimini ifade etmektedir (Ejder, 2007). Dizel motorlarında, hava-yakıt buharı karışımının; sıkıştırma sonunda, kendi kendine tutuşabilmesi için, dizel yakıtlarının tutuşma eğilimlerinin, benzinin aksine yüksek olması istenmektedir (Söyler, 2011).

Bu noktada, dizel yakıtındaki setan sayısı ile benzinli yakıtın oktan sayısının özellikleri, birbirine tamamen zıttır. Öyle ki, benzinde, oktan sayısı yükseldikçe, kendi kendine tutuşma kabiliyeti azalırken; dizel yakıtın setan sayısı yükseldikçe, kendi kendine tutuşma kabiliyeti artmaktadır (Ejder, 2007). Dizelin tutuşma eğiliminin düşük, yani tutuşma gecikmesi periyodunun daha fazla olması durumunda, yanma için ayrılabilen krank mili açısı aralığı azalmaktadır. Ayrıca, tutuşma gecikmesi süresinde, yanma odasında biriken ve ani olarak yanan yakıt miktarı da artacağından dolayı mekanik zorlamalara neden olan yüksek basınçlar ortaya çıkabilmektedir (Söyler, 2011). Bu durum, dizel vuruntusunun, bir ortaya çıkış şeklini göstermektedir (Tillem, 2005).

Setan sayısının artması, dizel motorlarda, yanma prosesinin en önemli kısmını oluşturan tutuşma gecikmesinin süresini kısaltmaktadır ve dolayısıyla, ani yanma öncesinde, yanma odası içerisinde biriken yakıt miktarını da azaltmaktadır. Bu ise, ani yanma safhasında, basınç artış hızının azalmasına neden olmaktadır (Uyar, 2013). Beraberinde, emisyon değerlerine de etki etmektedir.

Setan sayısının çok yüksek olması, tutuşma gecikmesini azaltırken, enjektörlere çok yakın yerde, yanma başlangıcının başlayabilmesi ile enjektörlerin tıkanmasına sebep olabilmektedir (Tillem, 2005).

Yakıtın tutuşma hızı ve yanma kalitesiyle alakalı, setan sayılarının bulunduğu, setan cetveli de vardır (Tural, 2023). Setan cetvelinde, çok yüksek tutuşma kalitesine sahip n-setan ($n-C_{16}H_{34}$) hidrokarbonunun setan sayısı 100 olarak kabul edilmiştir. Referans olarak kullanılan izosetan (heptametilnonan) hidrokarbonunun setan sayısı ise 15 olarak belirtilmiştir. Şekil 1.7’de setan cetveli gösterilmektedir.



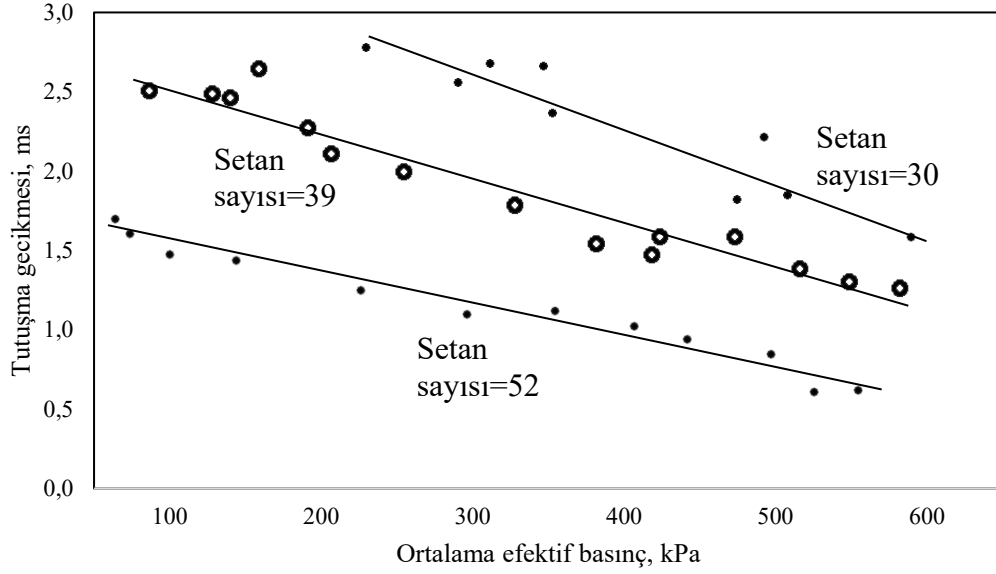
Şekil 1.7. Setan cetveli (Tural, 2023)

Bir yakıtın setan sayısının, tutuşma kalitesiyle ilişkili olup olmadığı, standart bir motor testinde, referans bir yakıtın baz alınıp karşılaştırılmasıyla bulunmaktadır. En çok kullanılan yöntem, ASTM D613 olarak da bilinen, CFR setan motorudur. Burada, yakıtın tutuşma kalitesi, referans olarak belirlenen, setan ve heptametilnonan karışımına eşit olduğu anda, (1.5) numaralı eşitlik ile setan sayısı hesaplanabilmektedir.

$$\text{Setan sayısı} = \%n\text{-setan} + 0,15 (\% \text{ heptametilnonan}) \quad (1.5)$$

Dizel yakıtların minimum setan sayısı, ABD’de 40, Japonya ve Almanya’da ise 45’tir. Modern motorların sessiz ve düşük partikül emisyon koşulları altında optimum olarak çalışabilmeleri için, 50 civarındaki daha yüksek setan sayılarına bile ihtiyaç duyulmaktadır.

Yüksek parafin oranları, yakıtta, setan sayısını yükseltici etkenlerdir. Kraming (parçalanma) uygulanmış yakıtın bileşenleri arasından, aromatik tipinin oranlarının yüksek olması ise, yakıtın tutuşma kalitesini ve setan sayısını düşürebilmektedir (Özdemir, 2011). Setan sayısının, tutuşma gecikmesine etkisi Şekil 1.8’de yer almaktadır.



Şekil 1.8. Yakıtın setan sayısının tutuşma gecikmesine etkisi (Uyumaz, 2009)

Setan sayısı, yakıt katkı maddeleriyle de yükseltilebilmektedir. %0,05 ile %0,20 oranında ya da daha fazla oranda kullanılan 2-etileksil nitrat (2-EHN), iyi performans gösterdiğinden ve maliyeti düşük olduğundan, evrensel olarak, setan sayısı arttırıcı madde haline gelmiştir. Literatürde, setan sayısı artışının, 2-EHN yüzdesine göre hesaplanmasını sağlayan bağıntılar da mevcuttur (Özdemir, 2011). EN ISO 5165 deney yöntemi de setan sayısı ile ilgilidir.

1.2.4.2.7 Aromatik Yüzdesi

Hidrokarbonlar içerisinde, yoğunluğu en fazla olan grup, aromatiklerdir. Dolayısıyla, birim hacim başına düşen en yüksek alt ısı değere sahip olduklarından isli yanarlar.

Yanma odasına püskürtülen yakıtın, aromatik yüzdesinin fazla olması durumunda, yanma sonucu oluşan karbon birikintileri çok miktarda olabileceği için özellikle supap sapı ve tablalarında, enjektörlerin püskürtme uçlarında kurum oluşturarak, yanma odası hacminin azalmasına sebep olabilmektedir.

Artıklar, yanma odası içerisinde çok fazla miktarda biriktiğinde ise, yanma verimi azalarak, performans değerlerinde azalma meydana gelebilmektedir. Bu sebeple, özellikle jet yakıtlarında, aromatik ağırlığının %25'ten fazla bulunmaları istenmez.

Dizel yakıtları içerisindeki aromatik bileşenlerin oranlarının düşük olması, hidrokarbon emisyon değerlerinin düşük olmasına katkıda bulunabilmektedir (Ejder, 2007). D1319 ve EN 12916 deney yöntemleridir.

1.2.5 Biyodizel

Alternatif yakıt olarak üzerinde çalışmalar sürdürülen yakıtlardan biri de biyodizeldir. İçten yanmalı motorlarda hem petrole dayalı yakıt tüketimini hem de egzoz gazlarındaki zararlı maddeleri azaltmak için bu gerekli olmaktadır (Altınsoy, 2007).

Biyo kelimesi, geleneksel petrol türevli dizel yakıtlarına göre yenilenebilir ve biyolojik kaynaklı olduğunu, dizel kelimesi ise; sıkıştırma ile yanma sağlayan dizel motorlarında kullanılabilir olduğunu belirtmek üzere bu iki kelime, yan yana gelerek biyodizel birleşik kelimesiyle kendine özgü alternatif yakıt isminin karşılığına denk gelmektedir (Fedai, 2006; Mert, 2020). Biyodizel kavramı; biyomotorin, yeşil enerji ya da halk deyiimiyle yağ mazotu isimleriyle de anılmaktadır (Altınsoy, 2007).

Yağların yakıt özelliklerinin iyileştirilmeleri sonucunda biyodizel elde edilmektedir (Karabulut, 2015). Biyodizel yakıtı; bitkisel, hayvansal, yosun (alg) ve atık yağlardan, aslında türlü biyolojik kökenli yağlardan, bir katalizör eşliğinde, kısa zincirli bir alkol ile tepkime (reaksiyon) sonucunda, yağ asidi esterlerinden oluşmaktadır. Tepkimelerde sıklıkla metil alkol (metanol) kullanıldığı için yağ asidi metil esterleri (YAME ya da YME) olarak da bilinmektedirler (Altınsoy, 2007; Şimşek, 2016). ASTM tarafından onaylanan biyodizelin tanımında ise; bitkisel veya hayvansal yağlar gibi, yenilenebilir lipit (organik yağ) kaynaklarda türeyen, uzun zincirli serbest yağ asitlerinin mono alkali esteri olarak olduğu yer almaktadır (Deniz, 2013; Fedai, 2006).

Biyodizel, ilk başlarda, ticari amaçlı kullanılmak istenen gliserinin üretiminde ortaya çıkan bir yan ürün iken, yakıt olma kabiliyetinin keşfedilmesiyle, zamanla ana ürün yerini almıştır (Sümer, 2017). Petrodizel gibi birçok alanda kullanılabilir.

Biyodizel üretimi için kullanılan ham maddeler, dört farklı nesil olarak sınıflandırılabilir.

- Birinci nesil biyodizeller, yenilebilir ham maddelerden üretilmektedirler. Fıstık çeşitleri, fındık, ceviz çeşitleri, mısır, zeytin, palm, hardal, soya

fasulyesi, turp, ayçiçeği, kolza tohumu ve benzerleri bu ham maddelerden sayılabilmektedir.

- İkinci nesil biyodizeller, yenmeyen ham maddelerden üretilmektedirler. Aleutites fordii, babassu ağacı, calophyllum inophyllum, thevetia peruviana, cerbera odollam, crambe abyssinica, nicotiana tabacum, jatropha curcus, jojoba, karanja, ipek pamuk ağacı, don yağı, nagchampa, neem, kauçuk tohumu bu ham maddelerden sayılanlar arasındadır.
- Üçüncü nesil biyodizeller; hayvansal yağlardan, mikroalglerden (yosun) ve atık yağlardan üretilmektedirler. Bu nesil biyodizellere ham madde olarak; biyokütle pirolizi ürünleri, botruococcus braunii, chlorella vulgaris yosunu, dunaliella salina yosunu, kirli yağ, atık yemeklik yağ sayılanlara dahildir.
- Dördüncü nesil biyodizelleri; fotobiyolojik solar yakıtlar, elektro yakıtlar ve sentetik hücreler oluşturur. Solar yakıtlar, biyodizel üretiminde kullanılan ham maddelerin solar enerjileri kullanılarak üretilmektedirler (Aydın, 2022).

Biyodizel, saf halde bir yakıt olarak kullanılabildiği gibi, dizel yakıtıyla belli oranlarda karıştırılarak da kullanılabilmektedir (Karabulut, 2015). Saf biyodizel, petrol ürünü içermemektedir. Fakat, her oranda petrol esaslı dizel yakıtı ile karıştırılarak da kullanılabilmektedir (Bakan, 2019). Örneğin; saf olarak bulunduğu, B100 olarak isimlendirilirken, %20 biyodizel ve %80 dizel yakıtı içeren bir karışım olarak bulunduğu B20 olarak isimlendirilmektedir. Biyodizel ile petrodizelden oluşan karışım yakıtları, içeriğindeki biyodizel miktarının, karışım miktarına göre yüzdesel oranından ismini almaktadır (Alptekin, 2013).

Biyodizel, büyük oranda, üretildiği ham maddenin özelliklerini yansıtmaktadır (Şimşek, 2016). Biyodizelin kimyasal yapısı, dizel yakıtına benzemese de işlevsel olarak dizel yakıtı ile benzer özelliklere sahiptir. Petrol içermemektedirler ve çevreyi, petrol türevi yakıtlara göre daha az kirletmektedirler. Kullanımı için, motorun yapısına göre, motor üzerinde ya hiç ya da fazla bir değişiklik yapılmasına gerek kalmayan bir yakıt türüdür (Deniz, 2013).

Yenilenebilir kaynaklardan üretilen biyodizel, biyolojik olarak, doğada çözünebilir olması ve düşük karbon döngüsüne sahip olması nedeniyle cazip bir yakıttır (Özbilgi, 2018). Şekil 1.9’da biyodizelin enerji döngüsü gösterilmektedir.



Şekil 1.9. Biyodizelin enerji döngüsü (Şahin, 2019)

Üretilen çoğu biyodizel, endüstriyel gıda üreticilerinin ve büyük restoranların atık bitkisel yağları kullanılarak üretilmektedir. Yağlı tohum bitkilerinden yağ elde etmenin maliyeti, atık yağların maliyetinden çok daha yüksek olduğu için, atık yağlar biyodizel üretiminde daha çok tercih edilmektedir ve atık yağlardan üretilen biyodizel miktarı çok daha fazla olmaktadır (İlhan, 2019). Fakat, gelecekte daha çok biyodizel talebini karşılamada, yüksek yağ verimleri ve daha uygun maliyetleri sebebiyle yosunlar öne çıkacak gibi durmaktadır (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2021).

Biyodizel, soğuk iklim koşullarında, dikkat edildiği takdirde, bir yıldan fazla süre boyunca depolanabilmektedir. Petrodizelin depolandığı tanklar ve ortamlar, biyodizel depolamak için de kullanılabilir. Uzun süre boyunca depolanmış biyodizelin kullanımından önce pH değerinin ve özgül ağırlığının 0,9'u aşmış aşmadığının kontrolü önemlidir. Biyodizelin hava ile temasının en aza indirilmesine dikkat edilmelidir. Biyodizel, nemli ve ılık bir yerde depolanacak ise, biyodizel tanklarına, depodaki mikroorganizmaları yok etmekte kullanılan biyosit adlı katkı maddesi eklenmelidir (Altınsoy, 2007).

1.2.5.1 Biyodizelin Tarihsel Gelişimi

Biyolojik yakıtlar konusunda adımlar, tarihin akışı içerisinde, politik ve ekonomik değişimsel faktörlere bağlı olarak atılmıştır. 1970'li yıllarda, petrol

sektörünün darboğaza girmesiyle, biyodizele yönelim daha çok artmış, dizel yakıtı alternatif olarak daha çok ilgi uyandırmıştır.

1800'lü yıllardan beri, bitkisel yağlara transesterifikasyon yöntemi uygulanagelmektedir (Alçelik, 2017). Tarihte, yağların transesterifikasyonu, ilk olarak, 1853'te, E. Duffy ve J. Patrick tarafından yapılmıştır (Aslan, 2019). Başlangıçta, ticari amaçla, gliserin elde etmek için uygulanan bir yöntemdi. Asıl hedef, gliserin üretmek olduğundan dolayı, organik yağlardan transesterifikasyon yöntemiyle elde edilen, genellikle metil veya etil esterler olarak ortaya çıkan ürünlerin biyodizel yakıtı olabilecek potansiyeli bilinmiyordu. Bu esterler keşfedilene kadar, yan ürün olarak görülüyordu.

Biyodizelin asıl hikayesi, 19. yüzyıl sonlarında, 1898 yılında, Rudolf Diesel'in, yer fıstığı yağını dizel motorunda yakıt olarak denemesi ve Paris Dünya Fuarı'nda tanıtmasıyla başlamıştır. Rudolf Diesel, bu tanıtımı yaptıktan yaklaşık 15 sene sonra; bitkisel yağların yakıt olarak kullanılmasının, ülkelerin tarımına olumlu yönde bir katkı sağlayacağını ve bu açıklamayı yaptığı dönem için, bitkisel yağların yakıt olarak kullanılması, petrol ve kömür katranı kadar değer görmese de gelecekte, bitkisel yağların en az petrol ve kömür katranı kadar revaçta olacağını daha o dönemde belirtmiştir.

Biyolojik yakıtların, ulaşım sektöründe önemli bir yeri olacağı düşüncesini benimseyen tek kişi Rudolf Diesel de olmamıştır. Henry Ford da 1908 yılından sonra tasarladığı otomobillerin, etanol yakıtına uyumlu olmasını göz ardı etmemiştir.

Rudolf Diesel ve Henry Ford gibi dizel motoru üreticileri, biyolojik yakıtların geleceğini çok önceden fark etmelerine rağmen, ekonomik ve politik şartların, o dönemlerdeki savaşların etkilerinden dolayı, bu sektöre gereken ilgiyi zamanında gösterememişlerdir.

Dizel motorları üzerindeki benzer deneysel çalışmalar, St. Petersburg'da, bitkisel ve hayvansal yağlar kullanılarak devam edegelmiştir. Motorlarda kullanılması için lazım olan yağlar, çoğunlukla Afrika'da, sömürge altındaki yerlerden temin edilmiştir.

Bitkisel yağları, Birinci Dünya Savaşı esnasında, acil durumlarda, bazı ülkeler yakıt olarak kullanmıştır. Yine Birinci Dünya Savaşı'nın yaşandığı yıllarda, "İkiz Yakıt" projesi dahilinde, Amerika Birleşik Devletleri'nin Ohio State

Üniversitesi'nde, pamuk ve mısır yağlarının, dizel yakıtı ile karıştırılarak kullanılması yönünde çalışmalar yapılmıştır (Alçelik, 2017).

Türkiye'de, alternatif yakıt konusu, Cumhuriyet'in ilk yıllarında gündeme gelmiştir. 1930'lu yılların Türkiye'sinde; yakıtların ithal yolu ile sağlanmaması, ülkenin ham madde kaynaklarından biyoyakıt elde edilmesi ve kullanılması, bundan faydalanılması öngörülmüş olsa da süreç içerisinde, İkinci Dünya Savaşı'nın yaşanması, ardından Dünya üzerinde ham petrol üretiminin artması ve fiyatların düşmesi, konunun ilgi görmemesine neden olmuştur (Çakmak, 2021; Oğuz, 2004).

Biyodizel adını ilk defa literatürüne alan kuruluş, 1992 yılında, Amerika Ulusal Soy Dizel Geliştirme Kuruluşu'dur. Fakat, çok daha önceki yıllarda, bitkisel yağların yakıt olarak kullanılabilmesi için, içeriğinde bulunan gliserinin uzaklaştırılması adına yapılan akademik çalışmalar öncesinden beri süregelen devam etmiş olup, ismi biyodizel olan, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen yakıt için ilk patent, 31 Ağustos 1937 tarihinde, Belçika'da bulunan Brüksel Üniversitesi tarafından G.Chavanne'ye verilmiştir (Alçelik, 2017).

Biyodizel, ilk olarak, Güney Afrika'da, İkinci Dünya Savaşı öncesinde, büyük ve güçlü motorların çalıştırılması için yakıt olarak kullanılmıştır. Fosil yakıtlardan, petrol türevi dizel yakıtı, o zamanlar hem ekonomik hem de uzun yıllar boyunca temin edilebilir olması nedeniyle, motorların tasarımı ve üretimi, sürekli bu yakıtla uyumlu olacak biçimde süregelenmiştir. Belirli zaman aralıklarında ortaya çıkan petrol krizleri, bitkisel yağların, yakıt olarak kullanılmasının ihtiyacını ortaya çıkarıp gündem oluştursa da konuyla ilgili yoğun ilmi çalışmalar asıl, 1970'lerde yaşanan petrol krizleriyle başlamıştır.

Buna sebep olarak, Orta Doğu bölgesinde bulunan petrolün azalması ve buna istinaden petrol fiyatlarındaki öngörülemeyen artışlar, 1973 ve 1978 yıllarındaki krizlerin kaynağı olarak gösterilebilmektedir. 1978'den, 1996'ya kadar, ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı, "Sucul Türler" programı kapsamında, biyodizel kaynağı olarak, alglerin kullanılmasını denemiştir (Aslan, 2019).

Bununla birlikte, 1970'lerin sonundaki krizin ardından 1980'lerde, dizel araçlarda, alternatif yakıt olarak kullanılabilecek bitkisel yağların viskozitelerinin, sorunlara neden olduğu ortaya çıkmıştır. Viskoziteyle alakalı sorunlar, yağların

metil alkolle tepkimeye sokularak metil estere, yani biyodizele dönüştürülmesiyle çözülmüştür (Alçelik, 2017).

1980’li yıllara gelindiğinde, bitkisel yağların, petrol kökenli yakıtlara alternatif yakıt olma konusu artık, ciddi şekilde düşünölmeye başlanmıştır. Kuzey Afrika’da, zamanında uygulanan yağ ambargosundan dolayı, çalışmaların kapsamı genişletilmiştir. Bitkisel yağların yakıt olma konusu bir konferansta, ilk kez, 1982 yılında, Kuzey Dakota’daki uluslararası konferansta tartışılmıştır (Fedai, 2006).

ABD’de, bitkisel yağlar üzerinde yoğunlaşan alternatif yakıt çalışmaları, 1980’li yıllardan itibaren; John Dere, International Harvester, Caterpillar ve Perkins gibi motor imalatçıları üzerinden devam etmiştir. 1990’lı yıllarda ortaya çıkan Körfez Savaşı’nın tesiriyle petrol fiyatlarındaki artış, biyodizel üretimini tekrar gündeme getirmiştir.

1997 yılında, Kyoto Protokolü’nün imzalanması ile birlikte, gelecek yıllarda, biyoyakıtların kullanımına yönelik, kitlelerde ilginin arttığı görölmeye başlanmıştır. Biyodizel ve etanol gibi biyoyakıtların önü böylece, daha da açılmaya başlamıştır. Motorlu araçlarda, Rudolf Diesel ve Henry Ford gibi insanların anlatmak istedikleri beklentiler, gerçeğe dönüşmeye başlamıştır.

Avrupa’nın nüfus ve ekonomisi açısından büyük ve önemli iki ölkelerinden olan Almanya ve Fransa’nın önderliğinde, biyodizele dair bir piyasa oluşturılmaya başlanmış ve biyodizel üretimi sürekli olarak arttırılmıştır (Alçelik, 2017).

1982 yılında, Avusturya’da yapılan araştırmalarda, kolza yağından elde edilen biyodizelin iyi bir alternatif yakıt olabileceği ortaya konulunca, 2000 yılına kadar hem dizel yakıtına karşılık alternatif biyodizel üretilebilmesi hem de kendi talebini karşılayacak miktarda bitkisel yağ elde edilebilmesi öngörölerek, ölkenin tarımsal fazlası, kolza ve ayçiçeği ekimi yönüne çevrilmiştir (Oğuz, 2004).

2000’li yıllarda, petrol fiyatlarının tekrar yükselmesi, çevreci hassasiyetin güçlenmesi ve kırsal bölgelerin kalkındırılması gibi faktörlerin de etkisiyle birlikte biyodizel sektörü büyüme trendine geçmiştir.

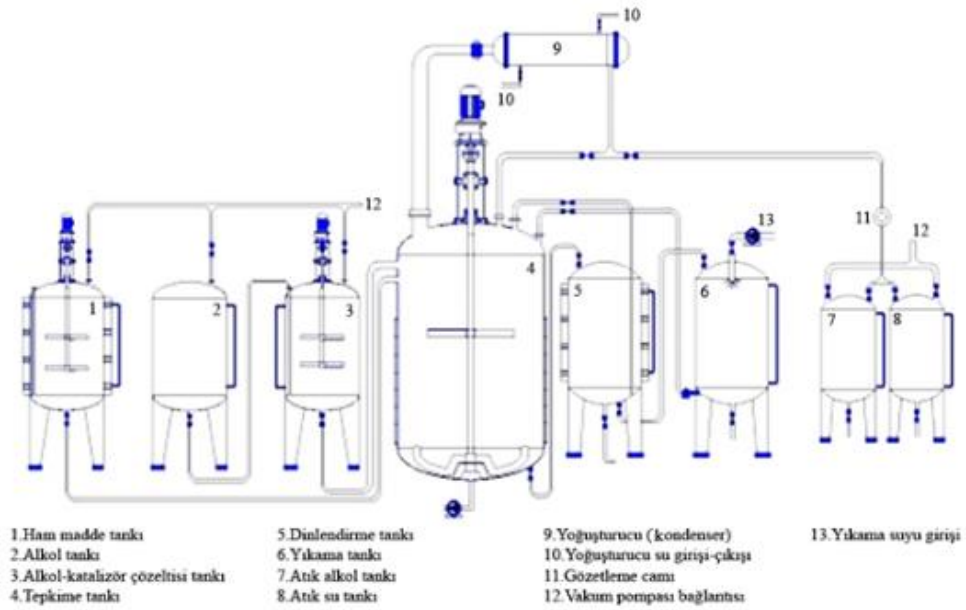
İtalya’da endüstriyel amaçlı üretimi yapılan kolza, soya ve ayçiçek yağlarının metil esterleri, ilk biyoyakıtlardır. Bu biyoyakıtlar, Diesel-bi ismi altında üretilmiştir. 1991 yılı itibarıyla, İsviçre’nin Zürih şehrinde, belediye otobüslerinde bu biyoyakıtlar kullanılmıştır ve geliştirilen bu yakıtların, çevre kirliliğine tesir potansiyeli için emisyon testleri yapılmıştır (Alçelik, 2017).

Çek Cumhuriyeti'nde, 2003 yılına kadar, 176 adet biyodizel dolum istasyonu açılmıştır. Skoda firması; dizel motorlu Skoda Felicia 1.9 D ve Skoda Octavia otomobillerini, biyodizel deposu adapte ederek üretmiş ve piyasaya böyle sunmuştur (Oğuz, 2004).

Dünya'da biyodizel piyasası, giderek büyümeye devam etmektedir. Biyodizel üretimindeki artışın nedenleri arasında; küresel iklim değişiklikleri, havanın ve suyun kalitesinin düşmesi ve de insan sağlığının etkilenmesi sayılabilmektedir (Alçelik, 2017).

1.2.5.2 Bitkisel Yağlardan Biyodizel Üretimi

Bitkisel yağlardan üretilen biyodizeller, birinci ve ikinci nesil biyodizellerden olmaktadır (Aydın, 2022). Biyodizel üretimi için, bitkisel yağlar, yağlı tohum bitkilerinden elde edilmektedir. Biyokütle potansiyeli bulunan bu yaygın organik yağların, alkol ve katalizör eşliğinde tepkimeye girmesi ile yakıt olma özellikleri iyileştirilerek biyodizel elde edilmektedir (Sarıkoc, 2019). Şekil 1.10'da bir pilot biyodizel üretim tesisinin şematik görünüşü yer almaktadır.



Şekil 1.10. Bir pilot biyodizel üretim tesisinin şematik görünüşü (Alptekin, 2013)

Bazı tarım ürünlerinin; meyve, çekirdek ve tohumlarının işlenmesi sonucunda bitkisel yağlar elde edilmektedir. Bu yağların kimyasal yapıları, petrol

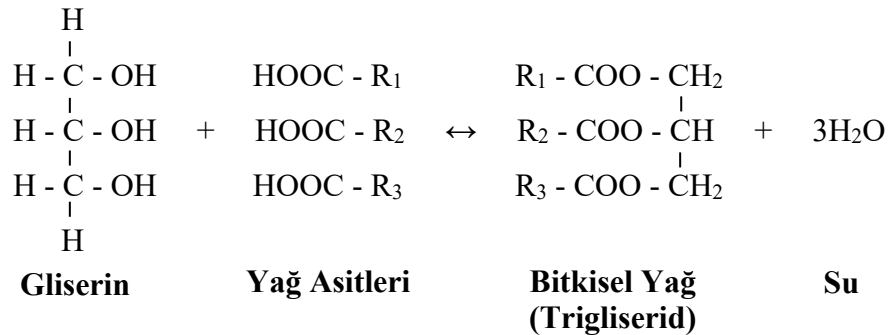
esaslı yağlardan farklıdır (Balcı, 2017). Tablo 1.4’te bazı bitkisel yağların, element bileşenlerinin, dizel yakıtıyla karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 1.4. Bazı bitkisel yağların element bileşenleri ve dizel yakıtıyla karşılaştırılması (Oğuz, 2004)

Bitkisel Yağlar	Birim	Karbon, C	Hidrojen, H	Oksijen, O	Kükürt, S
Ayçiçek	%	77,6	11,7	11,1	-
Kanola	%	77,7	12	10,9	-
Soya	%	77,8	11,8	10,7	-
Petrodizel	%	86	13	0,4	0,3

Bitkisel yağları asıl oluşturan yapılar, %95’ten fazla bulunan trigliseridlerdir. Trigliseridler dışında az miktarda, monogliserid ve digliserid de bulunmaktadır. Mono, di ve tri ön adları, gliseriddeki yağ asidi sayısını belirten 1, 2 ve 3 rakamlarını ifade etmektedir.

Her trigliserid (triasilgliserol), üç yağ asidi ile bir gliserinin (gliserol (triol)) tepkimesinden oluşan esterdir. Ester, bir asit grubu ile bir alkol grubunun birlikte bulunduğu kimyasal bir zincir yapısıdır. Gliserol (triol (gliserin)) ise, her biri farklı bir karbon atomuna bağlı üç hidroksil grubundan oluşan, polihidrik bir alkoldür. Bitkisel yağlardaki trigliseridlerin dallanmış zincirleri, genellikle farklı uzunluklarda olmaktadır. Şekil 1.11’de bitkisel yağın ana maddesi olan trigliseridin sentezi gösterilmektedir.



Şekil 1.11. Bitkisel yağ sentezinin kimyasal gösterimi (Deniz, 2013)

Bitkisel yağların içerisindeki serbest yağ asidi oranı, %1 ile %5 aralığında değişebilmektedir. Bitkisel yağlarda bulunan serbest yağ asitleri, genel olarak stearik, palmitik, linoleik ve linolenik asitlerdir.

Yağ asitlerinin birbirine göre farklılıkları ve gliserol ile bağlanış şekilleri, yağın özelliğini belirleyici faktörlerden olmaktadır (Akay, 2017; Balcı, 2017; Deniz, 2013; Gürkan, 2019; Örnek, 2007).

Bitkisel yağlarla dizel yakıtı arasında, yoğunluk ve ısı değeri yönünden fazla bir fark bulunmamaktadır. Ancak, yağın cinsine göre; bitkisel yağların viskoziteleri, dizel yakıtının viskozitesinden 11 ile 18 kat aralığında, daha yüksek olabilmektedir. (Ela, 2009). Bitkisel yağların, motorlarda, doğrudan yakıt olarak kullanılmaları halinde yaşanan en temel sorunlarından biri tam da bu yüksek viskoziteleri sebebiyledir. Tablo 1.5'te bazı bitkisel yağlar ile karşılaştırma amaçlı dizel yakıtının fiziksel ve kimyasal özellikleri yer almaktadır.

Tablo 1.5. Bazı bitkisel yağlar ile karşılaştırma amaçlı dizel yakıtının fiziksel ve kimyasal özellikleri (Keskin, 2005)

Özellikler	Aspir	Ayçiçeği	Kanola	Pamuk	Soya	Petrodizel
Viskozite, mm ² /s, 40 °C	31,3	33,9	37	33,5	32,6	2,7
Setan sayısı	41,3	37,1	37,6	41,8	37,9	47
Kalori değeri, kJ/kg	39519	39575	39709	39468	39623	45343
Parlama noktası, °C	260	274	246	234	254	52
Yoğunluk, kg/L	0,9144	0,9161	0,9115	0,9148	0,9138	0,84
Karbon kalıntısı, % kütleli	0,25	0,23	0,3	0,24	0,27	<0,35
Kükürt, % kütleli	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	<0,01
Akma noktası, °C	-6,7	-15	-31,7	-15	-12,2	-33
Sabunlaşma değeri, 40 °C	190,23	191,70	197,07	207,71	220,78	-

Bitkisel yağların; yüksek viskozite, karbon içeriği, kaynama noktası sıcaklığı ve yoğunluk gibi bazı özelliklerinin değerleri nedeniyle, dizel motorlarında, doğrudan yakıt olarak kullanılmaları halinde, yakıt püskürtme karakteristiklerini, dolayısı ile; yanma, motor performansı ve egzoz emisyonlarını olumsuz yönde etkileyebildikleri görülmüştür. Yanma sırasında, iyi atomize

olamazlarken, egzoz dumanının ise yoğunluğunu artırmaktadırlar. Ayrıca, soğukta akış özelliklerinin (bulutlanma noktası, akma noktası, soğukta filtre tıkanma noktası) kötü olması; yakıt hattı, filtre ve enjektörlerin tıkanmasına neden olabilmekte ve soğuk iklimlerde, yakıt olarak kullanılmasına engel olabilmektedir. Viskozitelerinin ve kaynama noktası sıcaklıklarının yüksek olması, motorun soğukta ilk hareketini zorlaştırmaya ve motorda vuruntulara, motor yağlama yağının kirlenmesine (hava-yakıt karışımındaki bitkisel yağların, kartere kaçarak, içerisindeki çoklu doymamış yağ asitlerinin polimerleşmesiyle, motor yağlama yağının viskozitesini ve yoğunluğunu artırması, seyreltmesi ve jelleşmeye neden olması gibi durumlar), piston segmanlarında yapışmalara (sakızlaşmaya), piston yüzeyinde ve silindir duvarında kurum birikintilerinin oluşarak silindir yüzeyinin daha fazla aşınmasına neden olabilmektedir.

Dizel motorlarında; yakıt ön ısıtması, püskürtme avansı ve basıncının değiştirilmesi gibi bazı değişiklikler yapılarak kısa vadede, dizel motorlarında bitkisel yağlar, yakıt olarak kullanılabilir. Fakat, yakıt olarak kullanıldıklarında, bitkisel yağlar bozulabilmektedir. Üstelik, ısı değerlerinin, dizel yakıtına göre daha az olmasından dolayı, özgül yakıt sarfiyatının artmasına ve motor momentinde bir miktar düşüşe neden olabilmektedir. Bitkisel yağların uzun vadede, motorlarda herhangi bir teknik soruna neden olmadan kullanılabilmesi için, yağların yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir (Balcı, 2017; Çakmak, 2021; Nayir, 2018).

Biyodizel üretiminin çoğu; soya fasulyesi, kolza tohumu, aspir ve palm yağı gibi, bitkisel yağların yakıt özellikleri iyileştirilerek yapılmaktadır. Bitkisel yağların, biyodizel üretimindeki payı büyüktür. Biyodizel üretimi için, bitkisel yağlar arasından çokça tercih edilen yağın çeşidi; yağı çıkartılan tohumun bulunduğu coğrafyaya, o coğrafyanın iklim şartlarına, ekonomik durumuna ve yağın yakıt potansiyeline göre farklılık gösterebilmektedir (Aslan, 2019; Yılbaşı, 2022).

1.2.5.3 Yağ Asitleri

Yağ asitleri, 4 ile 24 aralığında çift karbon atomu sayısına sahip, düz yapıda karbon atomu zincirinden ve karboksil grubundan meydana gelen organik asitler olarak ifade edilmektedir (Elarslan, 2022). Yağın bileşenlerinden olan gliserol, yağ bitkilerinin hepsinde aynı formda bulunurken, yağın diğer bileşenleri olan yağ

asitleri, türlere özgü farklı karakteristikler göstermektedir (Aslan, 2019). Yağ asitlerini birbirinden ayırt eden; içerdiği karbon sayısı, çift bağ sayısı ve zincir üzerindeki yeridir. Eğer yağ asitleri, diğer bileşiklerle bağ oluşturamazsa, serbest yağ asidi (SYA) olarak kalmaktadırlar (Elarslan, 2022; Gürkan, 2019).

Biyodizel üretimi için yağ kaynakları; serbest yağ asidi içeriği %1,5'dan küçükse rafine yağlar, %1,5 ile %15 aralığında olduğunda düşük derecede serbest yağ asidi içeren yağlar, %15 den fazla olduğunda yüksek derecede serbest yağ asidi içeren yağlar olarak, üç başlık altında değerlendirilebilmektedir. Bunlardan, soya veya kanola gibi yağlı tohum bitkilerinin yağları, rafine yağlardır (İşler, 2007).

Yağın, fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemede, yağ asitlerinin dağılımı ve konumu baskın rol oynamaktadır. Aynı şekilde, yağın kullanım alanını belirlemede, yağ asitlerinin kompozisyonu etkindir (Aslan, 2019).

Biyodizel üretiminde kullanılacak ham maddenin yağ asidi içerikleri, biyodizelin yakıt özellikleri hakkında ön bilgi vermektedir (Aslan, 2019).

Yağ asitlerinin genel formülü $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$ şeklindedir.

Yağlar; aynı cins yağ asitlerinden oluşmuş ise basit trigliserid, farklı cins yağ asitlerinden oluşmuş ise karışık trigliserid olarak adlandırılmaktadır (Keskin, 2005).

Pek çok yakıt özelliği (yoğunluk, viskozite, setan sayısı, oksidasyon kararlılığı, parlama noktası ve soğuk filtre tıkanma noktası gibi), alkol bileşenlerinin ve yağ asitlerinin yapısı ile değişkenlik gösterebilmektedir. Yağ asitlerinin zincir uzunlukları, çift bağların oluşumu ve dal zincirlerinin özellikleri, bunda çok etkilidir. Örneğin; biyodizelin, yağ asidi zincir uzunluğu ile ısı değeri artış gösterebilirken, soğuk akış özellikleri ise kötüleşebilmektedir (Aslan, 2019).

Yağ asitleri, bağ şekillerine göre; doymuş yağ asitleri ve doymamış yağ asitleri olmak üzere, iki ana gruba ayrılmaktadır. Doymamış yağ asitleri de kendi içerisinde tekli ve çoklu doymamış yağ asitleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Doymuş yağ asitleri, oda sıcaklığında, büyük oranda, katı haldedirler. Doymamış yağ asitleri, oda sıcaklığında sıvı haldedirler (Aslan, 2019; Keskin, 2005).

Karbon sayıları 6'dan fazla olan yağ asitleri, metallerle tuz oluşturmaktadırlar. Bu tuzlara, sabun adı verilmektedir. Potasyum ve sodyum sabunları suda erirken, diğer metallerden elde edilen tuzlar genelde eriyememektedirler ve arındırıcı görevi yapamamaktadırlar. Potasyumdan elde edilen sabunlar (tuz), sodyum sabunlarına göre daha çabuk erimektedirler ve daha

yumuşak olmaktadırlar. Doymuş yağ asitlerinden elde edilen tuzlar, doymamış yağ asitlerinden elde edilen tuzlara göre su ve alkolde daha az erimektedirler.

Yapısında bulunan etilen bağı ile doymamış yağ asitleri kolaylıkla, hidrojenle kimyasal tepkimeye sokularak doyurulabilmektedir. Doymamış yağ asidi, doymuş hale gelebilmekte veya çift bağ oksidasyonu yardımı ile açılarak yeni ürünlere dönüşebilmektedir. Doymamış yağ asitlerinde, çift bağlara oksijen girmesi ve molekülerin oksijenle oksitlenmeleri sonucu farklı gruplar oluşabilmektedir. Bu olaya oto oksidasyon denilmektedir (Akay, 2017).

Yağın toplam doymamışlığıyla ilgili iyot sayısı, yağın özelliğine ve çift bağ sayısına göre değişebilmektedir. Yağlar, iyot sayısına göre; 100'den küçük olduğunda kurumayan, 100 ile 130 aralığında olduğunda yarı kuruyan ve 130'dan büyük olduğunda kuruyan yağlar olarak, üç grupta değerlendirilebilmektedirler. Fakat, bu gruplandırma ile yağlar arasındaki farklılıklar ortaya konamamaktadır.

Yağlarda, yağ asidi zincirindeki doymamış bağlara oksijen atomunun yerleşmesi, kurumaya neden olmaktadır. İyot sayısı da yağ asidi zincirlerinde, doymamış yağlara bağlanan iyot miktarını mg olarak belirtmektedir. Yağlarda doymamışlık miktarı ve kuruma oranı, iyot sayısı arttıkça artmaktadır. Palm yağı, kurumayan yağlara örnek olarak verilebilirken, yarı kuruyan yağlara pamuk, kanola, ayçiçek yağı; kuruyan yağlara ise, aspir yağı örnek olarak verilebilmektedir (Yeşilyurt, 2017).

1.2.5.4 Kanola ve Yağı

Kolza, lahana ve yağ şalgamının, tabii olarak melezlenmesi sonucu, meydana gelmiş bir türdür (Yiğit, 2009). Kolza bitkisi, çiçekli bitkiler kategorisinde, çift çeneklilere dahil olup, Brassicae familyasından farklı kromozom sayılarına sahip olması nedeniyle, çeşitli formlarda bulunabilen Brassica Napus L.'nin bir üyesidir (İşler, 2007). Kolza, yağında insan sağlığına zararlı erüsik asiti, küspesinde hayvan sağlığına zararlı glukosinolatı bulundurmaktadır. Bu maddeler, canlı sağlığına zararlı maddelerdir (Örnek, 2007; Yağız, 2019). Kanola, kolzanın zararlı maddelerinden dolayı ıslah etme amacıyla, genetik modifikasyonlar sonucunda elde edilmiş bir çeşididir (İşler, 2007). Böylelikle, bu maddeler içerisinde özellikle erüsik asit düzeyi, yüzde sıfıra kadar inerek sağlık açısından zarar teşkili, kanolada bulunmamaktadır. Ana vatanı Kanada olan bu bitki, ismini; Canadian oil low acid kelimelerinin baş harflerinden alarak, Türkçe'de kanola

olarak kendine yer edinmiştir. İçeriğindeki yağ asidi miktarı, kolzaya göre daha düşüktür (Sümer, 2017). Kanolanın tohumlarında %40 ile %45 arasında ham yağ bulunabilirken, geri kalanında küspe içeren yağlı tohum bitkisidir (Örnek, 2007; Şahin, 2019).

Hektar başına, 1000 kg'dan fazla olabilen yağ verimi ile dünya yağ piyasasında, ticari açıdan kanola yağı, önemli bir yere sahiptir (Solak, 2013). Direkt olarak rafine edilebilen kanolanın yapılması gereken zatk giderme işlemleri; su, buhar veya su ve asit kombinasyonları ile kolay halde gerçekleştirilebilmektedir. Yüksek fosfolipit ve serbest yağ asidi içeriği nedeniyle, kanolanın rafine edilmesi önemlidir. Kanolanın bileşiminde bulunan tokoferol ise, doğal antioksidan görevi yaparak raf ömrünü uzattığı gibi, proses ve depolama işlemlerinde de oksidasyonu önleyebilmektedir. Fakat, klorofil ve feofitin çokça bulunduğu kanoladan, kaliteli yağ elde edebilmek için uzaklaştırılmaları gerekmektedir (İşler, 2007).

Kanola yağının bileşimi, yer fıstığı yağı ve zeytin yağı bileşimlerine benzerdir (İşler, 2007). Kanola, bitkisel yağ kaynağı olarak bugün Dünya'da, soyadan sonra en fazla üretilen değerli yağ bitkisidir (Akbin, 2012).

Kanola yağının 25 °C sıcaklıkta; refraktif indeks sayısı 1,470 ile 1,474 arasında, titre sıcaklığı 11,5 °C ile 15 °C aralığında ve sabunlaşma sayısı ise 170 ile 180 arasında değerlerdedir (İşler, 2007). Kolza bitkilerinden olduğu düşünülürse, 5,349 değerinde doğal oksidatif kararlılığa sahip olduğu görülmektedir (Eryılmaz, 2009). %58 oranında tekli doymamış, %36 oranında çoklu doymamış ve %6 oranında doymuş zincire ve oleik asite sahip olması nedeniyle, oksitlenme direnci yüksek olmakla birlikte, düşük sıcaklık performansına sahip, yüksek nitelikli bir biyodizel ham maddesidir (Ela, 2009). Dünya genelinde, biyodizel üretiminde kullanılan ham maddelerin büyük bir bölümünde, kanola kullanılmaktadır (Solak, 2013). Kanolanın, biyodizel ham maddesi olarak tercih edilme nedenlerinin başında ise; yağ içeriği yüksek iken, doymuş yağ içeriğinin düşük olması ve yüzden fazla bulunabilen iyot sayısı gelmektedir (İşler, 2007). İyot sayısına göre, kanola yağı değerlendirildiğinde, yarı kuruyan yağ olarak belirtilebilmektedir (Yeşilyurt, 2017).

Biyodizel üreticileri; soya fasulyesi gibi az yağ içeren tohumlar yerine, yağ içeriği yüksek kanolayı daha çok tercih edebilmektedir. Doymuş yağ oranının düşük olması, soğuk havalarda olan performansla ilişkili olabilmektedir. Bu durumda, performansın belirlenmesinde bulanıklık noktası önemli olabilmektedir. Kanolanın içerdiği doymuş yağ asidi oranının %6 gibi az bir oranda

olması, kanoladan elde edilen biyodizelin, bulanıklık noktasının -3 °C civarında olmasını sağlamaktadır. Kanolanın sahip olduğu düşük iyot sayısı, oksidatif stabilite (kararlılık) açısından kanolaya avantaj sağlamaktadır. Yapılan testler sonucunda kanoladan üretilen biyodizelin 21 günde %99,6'sının ayrıştığı görülmüştür. Bunun yanında, kanolanın 238 °C sıcaklığa kadar yağlayıcı özelliğini koruyabildiği ve hacimce %1 kanola biyodizelinin petrodizele ilavesi sonucu, petrodizel yakıtının yağlama özelliğinde %60 oranında artış olduğu tespit edilmiştir (Ela, 2009; İşler, 2007).

1.2.5.5 Bitki Tohumlarından Yağ Elde Etme Yöntemleri

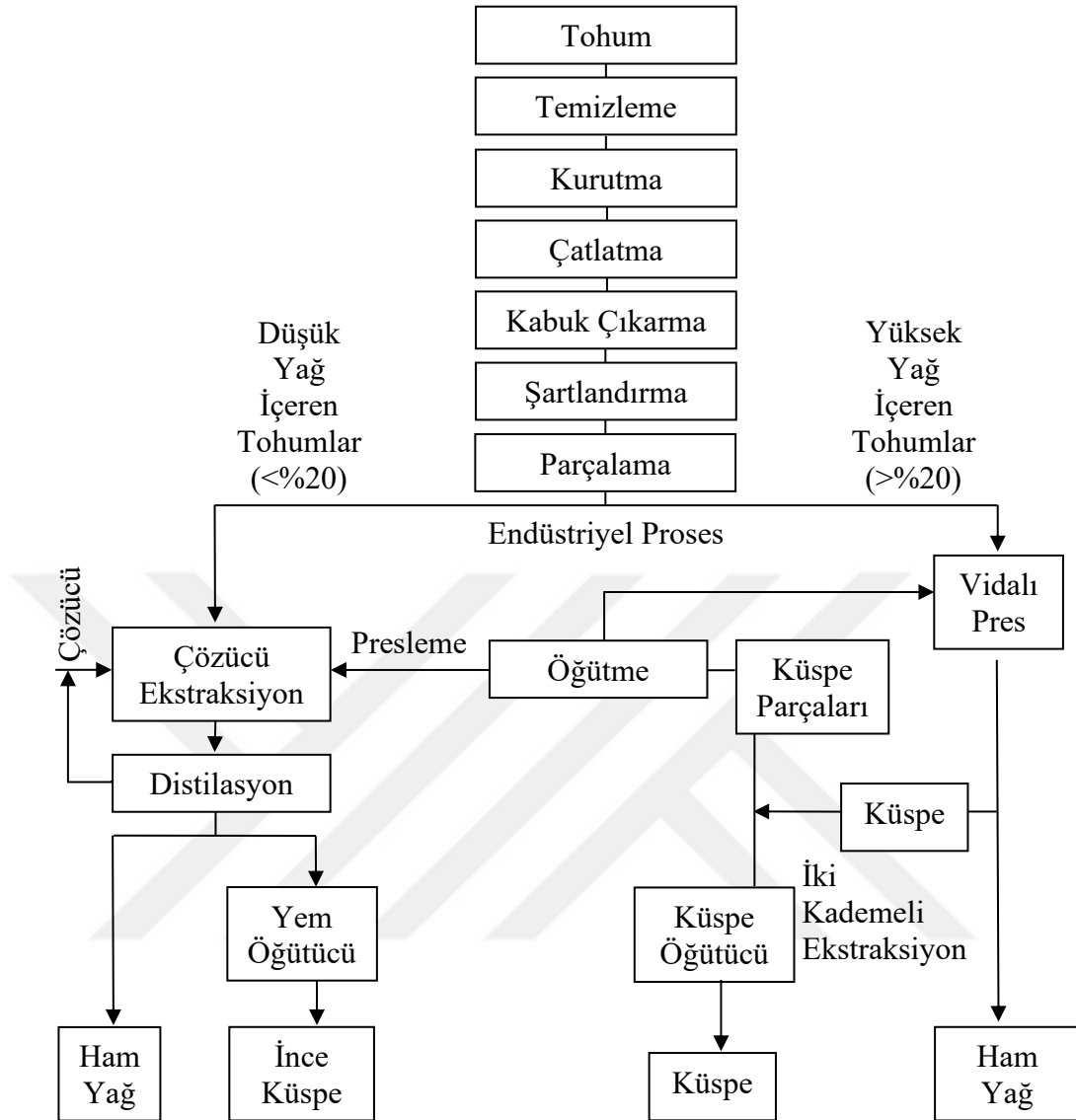
Bitkisel yağ üretiminde kullanılan bitki tohumlarında bulunan yağ miktarları; iklim koşullarına, tarımsal tekniklere ve özellikle tohumların sahip oldukları niteliklere göre değişebilmektedir (Yeşilyurt, 2017).

Yağ çıkarma işlemi, yağlı tohumların hasadı ile bu yağların biyodizele dönüştürülmesi arasındaki çok önemli bir adımdır. Yağın, bitki tohumlarından ekonomik ve verimli bir şekilde çıkarılması önemli bir süreçtir.

Bitkisel ham maddelerden yağ elde edilmesi, presleme (katı-sıvı ekstraksiyonu) ve solvent ekstraksiyonu olmak üzere iki temel yönetime dayanmaktadır. Bir de süperkritik sıvı ekstraksiyon yöntemi bulunmaktadır. Fakat, mekanik ve termal ön işlemler, bu işlemlerden önce gelmektedirler ve bu işlemler, kullanılan yöntemin performansının artmasına katkıda bulunmaktadır. Yağ endüstrisinde, ham yağ üretimi için; tohum tipine ve operasyonun ölçeğine bağlı olarak çeşitli proses adımları ve teknikleri kullanılmaktadır (Oğuz, 2004; Yılbaşı, 2022).

Modern yağ endüstrisinde, solvent ekstraksiyonundan önce düşük basınçlı sürekli preslerde sıkma yapılarak yağın önemli bir kısmı alınmaktadır. Bu amaçla, düşük basınçlı özel sürekli presler kullanılabildiği gibi normal sürekli presler de daha az basınçlı sıkma yapmak suretiyle uygulanabilmektedir (Yeşilyurt, 2017).

Yağlı tohumlar ham yağa işlenmeden önce temizleme, tohumun nemlendirilmesi, kabuk kırma ve ayırma, pulcuk haline getirme ve kavurma gibi ön işlemlerden geçirilmektedir (Oğuz, 2004). Şekil 1.12'de yağ çıkarmadan önceki proseslerin akış şeması bulunmaktadır.



Şekil 1.12. Bitkisel tohumlardan yağ elde edilmesine dair akış şeması (Oğuz, 2004)

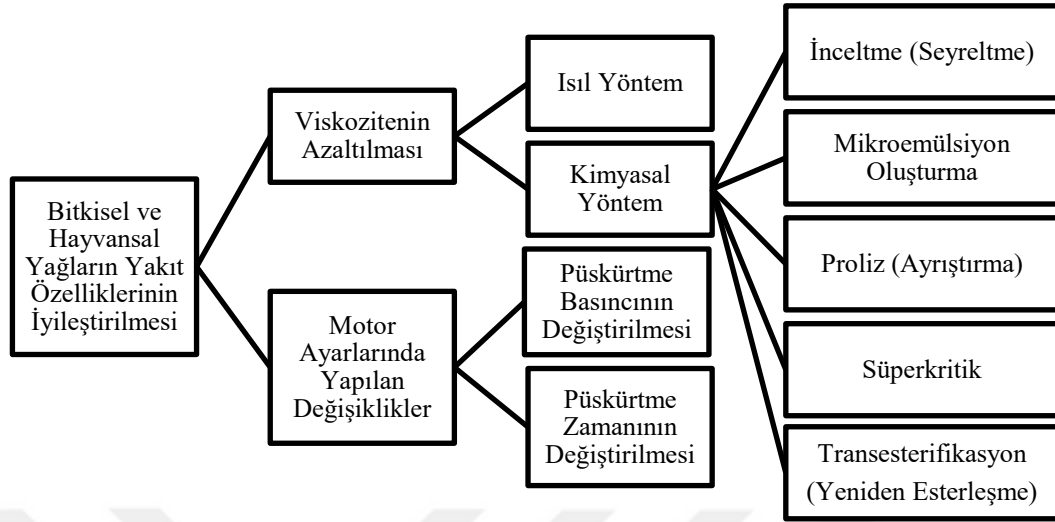
1.2.5.6 Bitkisel Yağların Yakıt Özelliklerini İyileştirme Yöntemleri

Bitkisel yağların, saf olarak direkt püskürtmeli motorlarda kullanılmaları elverişli değildir. Kullanıldıkları takdirde; düşük setan sayıları, düşük parlama noktası, bünyelerindeki doğal sakızlar, düşük uçuculukları, barındırdıkları doymamış hidrokarbon zincirlerinin reaktivitesi gibi nedenlerden dolayı hem ilk harekette hem de soğuk havada çalıştırma zorlukları, vuruntular, aşırı motor aşınmaları ve polimerizasyon nedeniyle motor yağlama yağının bozulması gibi sorunlar doğurabilmektedirler. Bunların dışında, kısa vade içerisinde yağ

bozulmakta ve uzun vade de motorun ilgili kısımlarında kalıntılar oluşabilmektedir. Oluşan kalıntılar; enjektörler, yanma odası, piston ve supaplarda meydana geldiğinde, motorda güç kaybı ve arızalara neden olabilmektedir. Kalıntıların oluşmasının esas nedeni ise bitkisel yağların viskozitesinin ve karbon içeriğinin, petrodizel ve bitkisel yağ esterine (biyodizele) göre daha yüksek olmasındandır. Ek olarak, serbest yağ asidi (SYA) içeriği gibi nedenler de kullanımlarını önemli ölçüde sınırlandırmaktadır. Fakat, bitkisel yağların, dizel yakıtı alternatifi olarak değerlendirilebilmesi için, öncelikle yüksek viskozite problemlerinin çözülmesi gerekmektedir.

Bitkisel yağların, viskozitelerinin azaltılarak yakıt özelliklerinin iyileştirilmesinde, yani biyodizel elde edilmesinde birçok yöntem ve teknoloji kullanımlarına rağmen; kendilerine has olumlu ve olumsuz yanları ile, ısı ve kimyasal yöntem olmak üzere iki yöntem uygulanabilmektedir. Uygulanan yöntemleri hatta, katalizörlü ve katalizörsüz olarak iki ayrı şekilde de değerlendirebilmek mümkündür. Fakat, genelde katalizörlü gerçekleşen adımlar ele alınmaktadır. Kimyasal yöntemler kendi içerisinde; seyreltme (inceltme), mikroemülsiyon, proliz (ısı parçalanma), süperkritik ve transesterifikasyon (yeniden esterleştirme) olmak üzere beş yönteme ayrılabilir. Uygulanabilen bu yöntemler arasından en uygun olan ve en çok tercih edilen yöntem, transesterifikasyon yöntemidir (Balcı, 2017; Yılbaşı, 2022).

Şekil 1.13'te bitkisel yağların yakıt özelliklerinin iyileştirilmesine dair akış şeması verilmektedir.



Şekil 1.13. Bitkisel yağların yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi (Şimşek, 2016)

1.2.5.6.1 Transesterifikasyon Yöntemi

Bitkisel yağların yakıt özelliklerinin iyileştirilerek biyodizel üretimi için en yaygın olan yöntem transesterifikasyondur (Keskin, 2005). Kesikli, yarı kesikli ve sürekli olmak üzere farklı üretim teknikleri uygulanabilmektedir (Nişancı, 2007). Kimyasal olarak, petrodizele benzeyen yağlardan biyodizel üretmek için en uygun yöntem olabilmektedir (Aslan, 2019).

Transesterifikasyon işlemi ile esterlerden, yeni ester oluşumları gerçekleşmektedir (Aslan, 2019). Esterleşme süreci, yavaş ve kendiliğinden gerçekleşen bir süreçtir. Esterleşmenin hızı, ısı veya hidrojen iyonuna bağlı olabilmektedir (Akay, 2017).

Organik kimyada ise bu yöntem, esterlerin alkoksi grubunun, bir başka alkol ile yer değiştirmesini ifade etmektedir. Yağlardaki trigliseridler parçalanarak, içindeki gliserol ile tepkimede kullanılan alkoldeki alkil radikali, transesterifikasyonla yer değiştirmektedir. Yani; gliserol esaslı triester, alkil esaslı monoestere dönüşmektedir. Tepkime sonucunda oranlar kabaca; moleküler ağırlıkta üçte bir, viskozite de sekizde bir azalabilmektedir (Topcu, 2008).

Transesterifikasyon, birkaç ardışık ve geri dönüşümlü tepkimeden oluşmaktadır. Trigliseridler; kademeli olarak digliseridlere, monogliseridlere ve son olarak gliserole dönüştürülmektedir. Her aşamada bir mol ester serbest

bırakılmaktadır. Tepkime sonunda yağ asidi esterleri oluşumu, bitkisel yağların yakıt özelliklerinin iyileştirilmesiyle biyodizeli oluşturmaktadır (Aslan, 2019).

Transesterifikasyon sürecini etkileyen en önemli parametreler; katalizör türü ve miktarı, alkol türü ve alkol-yag molar oranı, tepkime sıcaklığı ve tepkime süresidir. Ürün verimliliği ve maliyeti için bu parametrelerin birbirleriyle uyumu ve optimizasyonları önem taşımaktadır (Aslan, 2019; Yılbaşı, 2022).

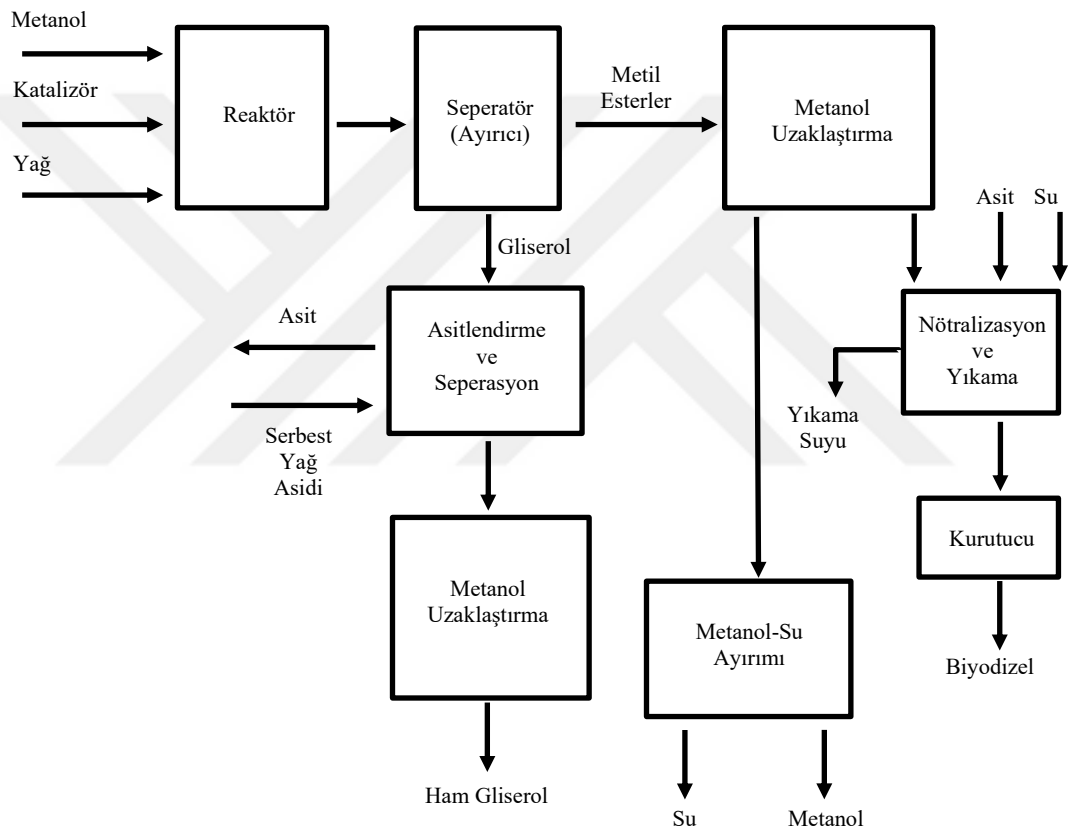
Katalizörler; homojen, heterojen ve enzimatik (biyokatalizör) katalizörler olmak üzere, üç gruba ayrılabilir (Yılbaşı, 2022). Homojenlik ve heterojenlik üzerinden asit ve baz (alkali) olarak ayırım yapılabilirken; asitlik ve alkalilik (bazlık) üzerinden de homojenlik ve heterojenlik ayırımı yapılabilir (Yaşar, 2016). En yaygın bilinen katalizör çeşitleri; alkali metal hidroksitleri (NaOH, KOH vb.), alkoksitler (CH_3ONa , CH_3OK vb.) ve karbonatlardır (Aslan, 2019; Topcu, 2008).

Transesterifikasyon tepkimesi tamamlandıktan sonra, iki ana ürün olarak; biyodizel ve gliserol ortaya çıkmaktadır. Biyodizel ve gliserolün birbirinden ayrışması için 6 ile 10 saat civarında dinlendirme işlemine tabii tutulması gerekmektedir. Dinlendirme işleminin süresi, kullanılan biyodizelin, üretim proseslerine bağlı olarak, daha uzun veya daha kısa sürelerde tamamlanabilmektedir ve dinlendirme yapılan hazneden alta çöken gliserol, kolayca alınabilmektedir. Modern sistemlerde, dinlendirme yapılmadan biyodizel ile gliserolün ayrıştırılması, separatör (ayırıştırıcı) yardımı ile mümkün olabilmektedir.

Gliserol ve biyodizel fazları birbirinden ayrıldıktan sonra, her iki ürün içerisinde de metanol kalabilmektedir. Biyodizel içerisindeki alkolün uzaklaştırılabilmesi için, vakumla evaporasyon işlemi uygulanmaktadır. Sıcaklığın ise, tepkime sıcaklığında olması önerilmektedir. Bu aşamada, nötralizasyon işlemine gerek duyulabilmektedir.

Biyodizeli, gliserolden ayırma işleminden sonra, biyodizel içerisinde kalan; katalizör, sabun, gliseridler ve safsızlıklar, biyodizelden uzaklaştırılmak amacıyla yıkama işleminden geçirilmektedir. Yıkama işleminde, günümüzde iki yöntem kullanılmakta olup, bunlar; sulu yıkama ve kuru yıkamadır. Sulu yıkama, saf veya yumuşak su ile uygulanmakta iken kuru yıkama, magnesol ile yapılmaktadır. Sulu yıkamalarda, yıkama suyu alındıktan sonra, biyodizelin kurutulması gerekmektedir. Biyodizel içerisinde arta kalan su ve alkol ise, vakumla evaporasyon işlemine maruz

bırakılarak uzaklaştırılmaktadır. Kuru yıkama işlemi ise, yüksek sıcaklık altındayken vakum tanklarda yapıldığından, arta kalan su ve alkolün uzaklaştırılması için tekrar kurutma işlemi yapılmamaktadır. Son aşamada, kurutma yapılan (sulu yıkama) veya yapılmayan (kuru yıkama) biyodizel, filtre edilerek kullanıma hazır hale getirilmektedir ve uygun koşullardaki depolama tanklarında muhafaza edilmektedir (Balcı, 2017). Şekil 1.14'te metil alkol (metanol) kullanılarak transesterifikasyon yönteminin kullanıldığı biyodizelin üretim şeması yer almaktadır.



Şekil 1.14. Biyodizelin metanol kullanılarak transesterifikasyonla üretim şeması (Yaşar, 2016)

1.2.5.7 Biyodizel Kullanımının Avantajları ve Dezavantajları

Biyodizel, petrodizel göz önüne alındığında, ona göre avantajlarını ve dezavantajlarını birlikte barındırabilen bir alternatif yakıttır. Tablo 1.6'da biyodizel ve petrodizelin özelliklerinin karşılaştırılması bulunmaktadır.

Tablo 1.6. Biyodizel ve petrodizel özelliklerinin karşılaştırılması (Şimşek, 2016)

Özellikler	Petrodizel	Biyodizel
Setan sayısı	44-49	51-62
Yağlayıcılık	Çok düşük	Oldukça iyi
Biyolojik ayrışabilirlik	Zayıf	Kolayca ayrışabilir
Toksik	Yüksek toksik	Gerçekte toksik değil
Oksijen	Çok düşük	%11'den fazla oksijen
Aromatikler	%18-22	Aromatik içermemekte
Kükürt	%0,05	Yok
Parlama noktası	51,6667 °C	148,89-204,444 °C
Dökülme zararı	Yüksek	Yok
Malzeme uyuşabilirliği	Kauçuk hariç doğal malzemelerde etkili değil	Malzemeler ile az uyuşabilir
Taşınması	Tehlikeli	Zarar vermeden ve patlama riski olmadan taşınabilir
Isıl değeri	Biyodizele göre daha yüksek	Petrodizelden %2-3 daha düşük
Temin kaynağı	Yenilenemez	Yenilenebilir
Temini	Sınırlı	Çok geniş
Enerji teminatı	Ulusal ve ithalat karışımı	Ulusal ham materyal
Alternatif yakıt	Hayır	Evet

Emisyon sonuçları ve insan sağlığına olası etkileri eksiksiz olarak yayınlanmış ve Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı'na (U.S Enviromental Protection Agency-EPA) gönderilmiş ilk ve tek alternatif yakıt, biyodizeldir. EPA'nın yakıt ya da yakıt katkı maddelerine sertifika verdiği bu program, çok sıkı emisyon programları içermektedir (Altınsoy, 2007).

Biyodizelin avantajlarını maddeler halinde sıralayabilmek mümkündür.

- Yenilenebilir, ülkelerin kendi yerel imkanlarıyla üretilebilen alternatif enerji kaynağıdır (Yaşar, 2016). Bir ülkenin ithal petrole olan bağımlılığının azaltılabilmesine ve ulusal enerji güvenliğinin artırılabilmesine, biyodizele ham madde olabilecek kaynakların iyi değerlendirilebilmesi durumunda olumlu katkı sağlanabilmektedir (Deviren, 2023).
- Savaş zamanlarında ve zorunlu durumlarda stratejik yakıt olarak değerlendirilebilmektedir.
- Ulaşım sistemleri dışında ısıtma sistemleri ve jeneratörlerde de biyodizel, kullanıma uygun bir yakıttır.

- Ev tipi ya da sanayi tipi biyodizelin üretiminde aşırı zorluk yoktur (Şimşek, 2016).
- Biyodizelin üretiminde hasat edilen ürünlerin kullanılabilir olması, tarımsal üretime olumlu yönünde etki edebilmektedir (Deviren, 2023). Ülkelerde, özellikle enerji tarımı kültürünün yaygınlaşmasını sağlayabilmektedir (Altınsoy, 2007). Bunun yanında, kırsal kesimin sosyo-ekonomik yapısının iyileşmesine, yerel iş imkânlarının artmasına, imalat sanayisinin gelişmesine, doğal enerji kaynaklarının ve çevrenin korunmasına katkı sağlayabilmektedir (Yaşar, 2016).
- Biyodizel, üretim maliyeti yüksek olan bir yakıt olmasına rağmen üretim maliyetini düşüren unsurlar arasında, biyodizel üretimi sırasında elde edilen gliserin ve bitkisel ham madde kaynaklarından üretilmişse, küspe gibi yan ürünlerin değerlendirilebilmesi vardır. Gliserin, kozmetik ve ilaç sanayi gibi alanlarda kullanılabiliriyken, küspe ise hayvan yemi olarak kullanılabilir. Ayrıca, saflaştırma sırasında elde edilen gübrenin de ekonomik değeri olduğundan, üretim maliyetini hafifletici katkısı vardır (Balcı, 2017; Kaya, 2006).
- Biyodizelin elde edilmesinde atık, kullanılmış yağların biyodizel yakıtı dönüştürülerek değerlendirilebilmesi hem ekonomik hem çevresel açıdan olumlu katkılar sunmaktadır.
- Biyodizel, saf olarak kullanılabildiği gibi her oranda dizel yakıtı ile karışım oluşturarak kullanılabilir (Dobrucalı, 2007).
- Herhangi bir toksik bir etki, biyodizelde bulunmamaktadır. Zehirleyici değildir. Biyodizel için öldürücü doz 17,4 g biyodizel/kg vücut ağırlığı iken, sofr tuzu için bu oran 1,75 g tuz/kg vücut ağırlığı olarak belirtilmektedir. Yani, sofr tuzu biyodizelden 10 kat daha fazla öldürücü etkiye sahiptir. İnsanlar üzerinde yapılan testlerde, biyodizelin elle temas etmesi halinde, ciltte %4'lük sabun çözeltisinden daha az toksik etki gösterdiği gözlemlenmiştir. Herhangi bir toksik etki biyodizelde olmamasına karşın, dizel-biyodizel yakıt karışımlarının kullanımında dizel yakıtı için zorunlu olan standart koşulların (havalandırma sistemi, göz koruyucular vb.) sağlanması gerekmektedir. Ayrıca, biyodizelin suda yaşayan canlılara karşı da herhangi bir toksik etkisi yoktur. Buna karşın, 1 litre (L) ham petrol, 1 milyon litre suya toksik etkide bulunabilmektedir (Yeşilyurt, 2017).

- Biyodizel, organik olduğundan dolayı doğada kolay ve hızlı bir şekilde parçalanarak bozunabilmektedir (ayrışabilmektedir) ve 10000 mg/L'ye kadar herhangi bir mikrobiyolojik etki de gösterememektedir. Biyodizelin doğada bozunabilme özelliği şekere benzetilebilmektedir. Özellikle, Avrupa ülkelerinin hassas tarım arazilerinde, deniz kenarlarında ve orman arazilerinde biyodizelin biyobozunabilir olmasının, kullanımının zorunlu hale getirilmesinde payı vardır. Yapılan testlere göre, kanoladan elde edilmiş biyodizelin 21 günde %99,6'sının ayrıştığı görülmüştür (Yaşar, 2016; Yeşilyurt, 2017). Aynı şartlarda dizel yakıtı ise; %40 gibi daha düşük bir oranda ayrışırken, geri kalan %60'lık kısım yıllar boyunca bozunmamaktadır (Altınsoy, 2007).
- Mevcut dizel motorlu araçlarda biyodizel, yakıt olarak kullanılabilmesi için, motor konstrüksiyonunda herhangi bir değişiklik veya ekleme yapılmasına gerek olmadan kullanılabilir. Dizel motor teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak, dizel motorlu araç sayısı da artmaktadır. Biyodizelin, diğer alternatif yakıtlarda (hidrojen, LPG, CNG vb.) olduğu gibi araç üzerindeki sistemlerde değişiklik olmadan kullanılabilir olması cezbedicidir (Yaşar, 2016).
- Biyodizel, dizel yakıtından daha iyi yağlayıcılık özelliğine sahiptir ve bu da motorun daha rahat çalışmasını sağlaması bakımından olumlu bir etkidir. Bütün dizel motorlar, özel bir dizayn olan enjeksiyon sistemi ile çalışmaktadırlar. Buradaki hareket eden iç parçaların yağlanması, yakıt sayesinde olmaktadır (Öztürk, 2007). Hatta, düşük sülfürlü dizel yakıtlara biyodizel ilave edildiğinde, azalan yağlayıcılığı artırmak mümkün olabilmektedir (Balcı, 2017).
- İnsan sağlığı açısından, petrodizele göre biyodizel kullanımı, daha az zarar vericidir. Gen mutasyonu üzerinde biyodizelin, dizel yakıtına göre etkisi daha azdır. Dizel yakıt yandığında, havaya kanser gibi hastalıklara yol açabilen toksikler karışırken; B100 yakıtında bu %90'a, B20 yakıtında ise %20 ile %40 arasına kadar daha az olabilmektedir (Altınsoy, 2007; Dobrucalı, 2007).
- Biyodizelin, petrodizel ile karşılaştırıldığında, atmosferde karbondioksit (CO₂) birikimine ve bunun sonucunda da sera etkisine neden olmayan bir yakıt türü olduğunu söylemek mümkündür. Çünkü, biyodizelin yanması sonucu oluşan karbondioksitin, biyodizelin elde edildiği ham madde kaynakları

arasından, bitkiler tarafından fotosentez tepkimelerinde kullanılabilir olması, doğaya oksijen (O₂) üretilmesine katkı sağlayabilmektedir (Yaşar, 2016). Böylece, doğadaki karbon döngüsü için risk teşkil etmiş olmamaktadır (Dobrucalı, 2007). Bunlarda, biyokütlenin çeşitli enerji formlarına dönüşebilmesinin etkisi vardır (Çengelci, 2011).

- Biyodizel kullanımında, karbonmonoksit (CO) emisyonu %50, partikül madde (PM) %30 azalmaktadır. Kükürt oranı, petrodizele göre daha az olduğundan dolayı biyodizel kullanımıyla asit yağmurlarının ana nedeni olan egzoz emisyonundaki kükürt oksit (SO_x) ve sülfatlar (SO₄²⁻) tamamen ortadan kalkmaktadır. Yine insan sağlığı üzerine önemli bir tehdit olan aldehit bileşikler, petrodizele göre %30, yerleşim alanları üzerinde duman oluşumuna neden olan hidrokarbon emisyonları ise %95 oranında azalmaktadır. Aromatik bileşenlerin de egzoz emisyonları (PAH, NPAH) azalmaktadır (Altınsoy, 2007; Şimşek, 2016). Dünya’da ve Türkiye’de Biyodizelin Durumu

Uluslararası Enerji Ajansı’na (IEA) göre, 2030’a kadar küresel enerji tüketiminin daha da artacağı öngörülmektedir. Bu nedenle, bilim insanları; her yerde bulunması kolay, çevreyle uyumlu, teknolojik olarak uygulanabilir ve temiz alternatif yakıtları araştırmaktadırlar. 1992’deki Enerji Politikası Hareketi’ne (EPACT, US) göre, aralarında biyoyakıtlardan biyodizelin de bulunduğu enerji kaynaklarının gelecekte; küresel ısınmayı, fosil yakıtların tüketimini ve egzoz emisyonlarını azaltacak başlıca alternatif yakıtlar olacağı belirtilmektedir (Sarıkoç, 2019).

Ülkeler arasında, biyodizel konusundaki gelişmeler birbirine paralel olarak seyretmekle birlikte, birçok ülkenin özel sektör temsilcilerinin, üretim sürecine sunduğu yatırımlar sayesinde sektör büyümeye başlamıştır.

1.2.5.8 Yakıt Katkı Maddeleri

Yakıt katkı maddeleri; dizel yakıtı, biyodizel ve karışımlarının viskozitesi, akma noktası, kristal büyümesi, yağlayıcılık, stabilite (denge), setan sayısı, parlama noktası, tutuşma sıcaklığı ve tutuşma gecikmeleri gibi özelliklerini genel olarak iyileştirebilmektedirler. Bu durum; motorun performans, emisyon ve yanma karakteristiklerinin iyileştirilmesine yardımcı olabilmektedir. Ayrıca; temizlik, yanmanın iyileştirilmesi, emisyonların azaltılması, soğuk hava performansının

artırılması, sürtünmelerin azaltılması, yakıt depolama stabilizasyonu gibi yararlar, katkı maddeleri sayesinde sağlanabilmektedir (Güruf, 2024; Yılbaşı, 2022). Daha bunun yanında, katkı maddeleri birçok yarar sağlayabilmektedir. Fakat katkı maddeleri, ilave edildikleri yakıtın bazı özelliklerini olumlu yönde etkileyebilirken bazı özelliklerini de olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Çelik, 2015). Örneğin; setan sayısı geliştirici katkı maddeleri, katkısız biyodizel ile karşılaştırıldığında NO_x ve partikül madde (PM) emisyonları ile özgül yakıt tüketimini iyileştirebiliyorken, diğer yandan karbon monoksit ve hidrokarbon emisyonlarında artışa neden olabilmektedir (Güruf, 2024; Yılbaşı, 2022). Ayrıca, her katkı maddesi, her türlü yakıtla iyi sonuçlar veremeyebilmektedir. Yakıtlara en uygun katkı maddesinin seçilebilmesi, bu bakımdan önemlidir.

Petrol ürünlerinde kullanılan katkı maddeleri, genellikle petrol bazlı ham maddelerden elde edilmektedir. Katkı maddelerinin; tür ve yapıları, ne kadar gerektiği, kullanılacağı ürünlere göre değişkenlik gösterebilmektedir (Çelik, 2015).

Biyodizelin ulaşım sektöründe yaygınlaşması, bazı sorunlara bağlı olarak kısıtlanabilmektedir. Bu sorunlar; biyodizelin zayıf atomizasyonu, yüksek yoğunluğu, soğuk akış özelliğinin zayıf olması, daha yüksek NO_x emisyonları, özgül yakıt tüketiminin daha israfli olması, oksidasyon kararlılığının zayıf olması, piston segmanının sıkışması ve soğuk çalıştırmada yaşanan zorluklar gibi eksikliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu eksiklikleri giderebilmek için, biyodizel ve karışım yakıtlarına olduğu gibi, dizel yakıtlarına da yönelik katkı maddelerine ilgi, giderek daha fazla artmaktadır (Aydın, 2022). Biyodizelde olduğu gibi, tüm yakıtlar için katkı maddelerinin maliyetleri, onların yaygınlaşmalarında ve ticarileşmelerinde asıl belirleyici etken olabilmektedir (Yılbaşı, 2022).

Yakıt katkı maddeleri; organik ve inorganik olarak iki şekilde ele alındığında, doğal veya sentetik yollar ile üretilen organik yakıt katkı maddelerinden, oksijenatörler haricindeki diğer bütün yakıt katkı maddeleri, yakıtı koruma, depolama ve temizleme işlemleri için kullanılabilmektedir ve yanma verimine herhangi bir katkıları da bulunmamaktadır. İnorganik yakıt katkı maddeleri ise, doğal mineraller veya sentetik kimyasallardan oluşmakta olup, karbon içermemektedirler. Bu katkı maddeleri, yakıtın performansını artırmak, motorun korunmasını sağlayarak ömrünü uzatmak ve emisyonlarını azaltarak çevreyi temiz tutmak gibi amaçlar için kullanılabilmektedirler (Güruf, 2024). Geriye kalan inorganik katkı maddelerinden; yakıt dökme önleyici katkı maddeleri,

yakıt renklendirici katkı maddeleri ve korozyon önleyici (anti-korozif) katkı maddeleri ise, yakıt depolama ve motor ömrünü uzatma gibi işlemler için kullanılabilirler.

Yakıt katkı maddeleri, fonksiyonlarına göre sınıflandırıldığında; vuruntu önleyiciler, korozyon önleyiciler, stabilizatörler, emülsifierler, buzlanmayı önleyen yakıt katkı maddeleri, setan artırıcı katkı maddeleri ve biyolojik yakıt katkı maddeleri olarak ayrılabilirler.

Yakıt katkı maddelerinden setan sayısı artırıcılar, enjektör temizleyiciler, yağlayıcılar ve is önleyici katkı maddeleri, motor performansına etkileyen katkı maddeleri iken; köpük, is önleyiciler, düşük sıcaklık düzenleyiciler, sürtünme düşürücü katkı maddeleri, yakıtın kullanma kalitesini artıran katkı maddeleridir.

Oksidasyon inhibitörleri, stabilizatörler, metal deaktivatörleri ve dağıtıcılar, yakıt kararlılığına (stabilite) katkı sağlarken; emisyon önleyiciler, korozyon inhibitörleri, kirlilik kontrolüne katkı sağlamaktadır.

Setan sayısı artırıcı katkı maddeleri ile, daha kısa tutuşma süreleri elde edilerek, beraberinde yanma özelliğinin düzeltilmesi, yanma gürültüsü ve is oluşumunun azaltılması sağlanabilmektedir. Bunların yararları, motor tasarımına, çalışma şekillerine göre değişebilmektedir. Nitriller, peroksitler, nitratlar, aldehitler ve tetra-azoller gibi, setan iyileştirici olarak üzerine araştırmalar yapılmış bileşikler mevcuttur (Aydın, 2022; Çelik, 2015).

Akma noktası düşürücü katkı maddeleri, parafinik (wax (mum) yapılı) bileşikler içeren hidrokarbon karışımlarının düşük sıcaklıklarda akışkanlıklarını sağlamak veya iyileştirmek amacıyla kullanılan katkı maddeleridir.

Korozyon önleyici ve aşırı yük (veya aşırı basınç) katkı maddeleri, yağlama yağlarına etki ederek, yüzeyler arasında oluşturduğu yağlayıcı film tabakasının (sınır yağlama) direncini artırarak kopmasını, dolayısıyla, yüzeylerin birbirleriyle temas etmelerini önlemek için ilave edilen katkı maddeleridir.

Buzlanmayı önleyen katkı maddeleri, yakıttan ayrılacak çok az miktarda suyun donma noktasını düşürerek, yakıt yollarında oluşabilecek buzlanmayı önleyebilmektedirler. Bu amaçla kullanılan yakıt katkı maddeleri, organik olarak düşük moleküler ağırlığa sahip alkollerden oluşmaktadır ve yakıtta çözünme özelliklerine sahiptirler.

Biyolojik oluşumları önleyici yakıt katkı maddelerinin kullanım amacı, yakıt tankının tabanındaki bakteri ve mantar oluşumlarını önlemektir. Bu

organizmalar, yakıt tabanına çöken suda yaşamaktadırlar. Bunlar, yakıt kanallarında, yakıtın akışını engelleyen birikintilere neden olabilmektedirler. Ilık ortam koşulları, bu organizmaların gelişimlerini destekleyici etkindir. Yakıt tankının dibindeki suyun devamlı olarak süzülmesi, bakterilerden kaynaklı riskleri azaltabilse de bu her zaman mümkün olamamaktadır. Bor bileşikleri, aminler, iminler gibi hem organik hem inorganik olabilen maddeler, biyolojik oluşumları önleyici katkı maddeleri olarak sayılabilmektedirler. Bu katkı maddelerinin kullanılmasında görülebilecek problem, bakterinin direnç kazanması sonucunda kullanılan katkı maddesi cinsinin, zaman geçtikçe değiştirilmesi gerektiğidir (Altınsoy, 2007).

Düşük sıcaklık düzenleyiciler, soğuk havalarda veya düşük sıcaklıklarda viskozlaşmayı önlemek için kullanılan katkı maddeleridir. Yakıtın akma noktasını düşürmekte ve soğukta akışkanlığını korumasını sağlayabilmektedirler. Akışkanların sıcaklık farkından fazla etkilenmemesi için viskozite düzenleyici katkı maddeleri kullanılabilir (Altınsoy, 2007; Çelik, 2015). Viskoziteden başka ayrıca, soğuk akış özellikleri, yani yüksek bulutlanma noktası, soğuk filtre tıkanma noktası, akma noktası, düşük sıcaklıklarda yakıtın akış davranışının temsilcileridir. Aslında, soğuk akış özellikleri biyodizel için en önemli eksikliklerdendir. Soğuk akış özellikleri zayıf olduğunda, özellikle biyodizel oranının yüksek olduğu karışım yakıtları, motor operasyonları için soğuk çalıştırma sorunlarını doğurabilmektedir. Soğuk akış iyileştirici katkı maddeleri, kristal büyümesini önleyebilmek ve yakıtın genel kristalleşme davranışını iyileştirebilmek için, bu eksikliğin üstesinden gelebilmek adına bir strateji olarak kabul edilmiştir. Soğuk akış iyileştiricilerinin, biyodizel karışım yakıtlarının düşük sıcaklık performansını önemli ölçüde artırabileceği bildirilmiştir (Aydın, 2022). Melan-stiren esterler, polimetakrilat, etilen vinilasetat gibi organik maddeler, biyodizelin soğukta akış özelliklerini artırıcı katkı maddeleri olmuştur. Belçika'daki VJTO (Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek) araştırma enstitüsünde, hindistan cevizi yağı metil esterinin %20 oranında kolza tohumu metil esterine katılması ile, kritik soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığının -15 °C'ye kadar düştüğü gözlemlenmiştir (Altınsoy, 2007).

Bazı yakıtlardaki kokular daha kalıcı olduğu için, bu kokuların etkisini azaltabilmeye yönelik de katkı maddeleri kullanılabilir (Altınsoy, 2007).

Yakıt katkı maddeleri, kimyasal yapılarına göre sınıflandırıldığında ise; metal bazlı katkı maddeleri, oksijen içerikli katkı (oksijenatör) maddeleri, nanopartikül katkı maddeleri, antioksidan katkı maddeleri gibi sınıflandırılabilirler (Aydın, 2022).

Metal bazlı katkı maddeleri, inorganik katkı maddeleri olup, metal bazlı katkılar; yakıtın yanma özelliklerini iyileştirebilmektedirler ve böylelikle, motor performansını artırmak için kullanılabilirler. Kullanımlarıyla, daha az yakıt tüketimi ve daha düşük emisyon sağlayabilmektedirler. Seryum (Ce), seryum demir (Ce-Fe), platinyum (Pt), platinyum-seryum (Pt-Ce), demir (Fe), mangan (Mn), baryum (Br), kalsiyum (Ca) ve bakır (Cu), metal bazlı katkı maddelerine örnek olarak verilebilmektedir. Bu katkı maddelerinin olumlu etkileri, genellikle iki farklı mekanizma yolu üzerinden, kurum oksidasyonunun artırılmasını sağlamakla ilişkilidir. Birincisi, hidroksil radikallerinin oluşumuna yol açan su molekülleri ile tepkimeye girerek ve mevcut isi oksitleyerek olmaktadır. İkincisi, kurumda bulunan karbon atomlarının oksidasyonu için gereken sıcaklığı düşürmede katalizör görevi görerek sağlayabilmektedir (Aydın, 2022; Çelik, 2015).

Oksijen içerikli katkı (oksijenatör) maddeleri, molekül yapısında bir ya da daha fazla oksijen atomu bulunduran organik maddelerdir. Değişik alkoller, eterler, esterler ve karbonatlardan meydana gelmektedirler. Metanol ve etanol gibi alkoller, oksijen içerikli katkı maddelerindendir. Ayrıca, biyodizelin üretimi için transesterifikasyon tepkimesinde yan ürün olarak çıkan gliserinin ihtiyaç fazlası, kimyasal dönüşümlerle etere dönüştürülerek, oksijenli yakıt katkısı olarak kullanımı mümkün olabilmektedir. Oksijenli katkı maddeleri, dizel yakıtı ve biyodizellerin, yakıt ve karışım yakıtlarında kullanıldıklarında, bunların önemli özelliklerini (viskozite, parlama noktası, düşük sıcaklık özellikleri uçuculuk, setan sayısı ve ısı değeri gibi) etkileyebilmektedirler (Aydın, 2022; Çakmak, 2021).

Yakıt istikrarsızlığının, dolayısıyla görünümünün ve yanma özelliklerinin bozulmasının ana nedeni olan yakıt oksidasyonu, antioksidanların uygulanmasıyla önlenmektedir. Antioksidanların vazifesi ise, serbest radikal oluşumunu önleyerek veya yavaşlatarak yakıt stabilitesini artırabilmektir. Çok sayıda çalışmada, yakıtta biyodizel eklenmesinin, NO_x emisyonlarının artmasına neden olduğu iddia edilmektedir. Buna mukabil olarak antioksidanlar, sahip olduğu fazla oksijeni emme özelliği ile NO_x emisyonlarını azaltabilmek için birkaç araştırma çalışmasında kullanılmıştır. Bazı biyodizel oksidasyon ürünlerinin, motor

bileşenlerine potansiyel zarar olan kostik karboksilik asitler olduğu da belirtilmektedir. Bu da antioksidanların uygulanmasının önemini güçlendirebilmektedir. Oksidasyonların, antioksidanların uygulanması ile tamamen önlenemeyeceği dikkate alınarak asıl önemli olanın, depolama süresince yakıtın bozulma oranını azaltabilmek olduğudur. Bütillenmiş hidroksil anizol (BHA), bütıl hidroksil tolüen (BHT), pirogallol (PL), difenilamin (DPA), tert-bütılhidroksikinon (TBHQ) ve propil-gallat (PG) gibi organik olan çeşitli antioksidanlar kullanılabilmektedir (Aydın, 2022).

Yakıt veya yakıt karışımına; motor performansının iyileştirilmesi ve emisyonların azaltılması, nano boyuttaki partiküller (parçacıklar) eklenerek de amaçlanabilmektedir. Nano yakıt katkı maddeleri, nano boyuttaki parçacıkların, yani nanopartiküllerin kullanıldığı maddeler olarak tanımlanabilmektedir (Güruf, 2024).

Biyodizel üretiminde, maliyet kalemlerinin dağılımlarını sırası ile; ham madde %76,6, bakım ve tamir %4, kimyasallar %12,6, kullanılan enerji %2,7, işçilik %2,5, amortisman giderleri ise %7,6 oranlarında maliyet oluşturmaktadır. Buradan, biyodizel üretiminde ham madde maliyetinin, biyodizel üretim maliyetinin en büyük oranını oluşturduğu açıkça görülmektedir. Bu nedenle, biyodizel üretiminin sürdürülebilir ve ucuz ham madde kaynaklarından yapılması çok önemlidir. İşte bu noktada, gıda olarak tüketilmeyen ve suya karıştığına, canlı hayatını olumsuz etkileyerek çevre sorunlarına neden olan atık kızartma yağları, en ucuz ham madde kaynağı olarak öne çıkmaktadır (Sarikoç, 2019).

1.2.5.8.1 Nanopartikül Katkı Maddeleri

Nano sözcüğü, Yunanca'da cüce manasındaki kelimedenden türeyegelmektedir. Bir insan saç teline çapı, yaklaşık olarak 100.000 nanometre ölçeğinde olduğu kabul edildiğinde nano kavramının, çok küçük bir birimi ifade ettiği daha iyi anlaşılacaktır. O halde, nanoteknolojinin; atom ve moleküllerin çok küçük boyutlara indirgenmesi, yeni bir yapı haline getirilebilme teknolojisi olduğu düşünülebilir.

Malzemeler, büyük boyutlardan ziyade nano ölçekte, değişken özellikler ve durumlar sergileyebilmektedirler. Nano malzemeler; güçlü, hafif veya değişken ısı iletim özelliklerine sahip olabilmektedirler. Partikül boyutunun incelenmesiyle, birim

kütle için yüzey alanının artışı sayesinde, nanopartikülün reaktivite niteliği artacaktır (Uyar, 2024).

Nanopartiküller, gelişen nanoteknolojinin ürünlerinden biridir. Nanopartiküller, diğer malzemelere göre çok farklı ve üstün özelliklere sahip oldukları için bu nedenle, birçok alanda olduğu gibi otomotiv alanında da kullanılabilmektedirler. Nanopartiküllerin üstün özellikleri, partiküllerin nano boyutlarda olmalarından ve farklı yüzey yapılarından kaynaklanmaktadır. Daha açık bir ifadeyle, nanopartiküllerin benzersiz özelliklerinin nedenlerinin; büyük yüzey/hacim oranı, gelişmiş mekanik dayanım, yüzey atomlarının farklı karakteristikleri ve kuantum boyut etkilerine bağlı oldukları düşünülmektedir.

Nanopartiküller, değişik geometrik şekillerde ve 1 ile 100 nm boyutlarında olabilmektedir. Nanopartiküller; morfolojik özelliklerine, boyutlarına, partikül şekline ve malzemesine göre sınıflandırılabilirler. Nanopartiküller, çekirdek-kabuk, çubuk, silindirik, spiral, sandviç, boşluklu, küresel, çok yüzeyli gibi farklı morfolojilere sahip olabilmektedirler.

Nanopartiküller, malzemesine göre; karbon esaslı, organik, inorganik ve hibrit (kompozit) şeklinde gruplandırılabilirler. Karbon esaslı nanopartiküller, tamamen uzun zincirli bağlarla birbirine bağlanan karbon atomlarından oluşmaktadır ve küresel, konik veya bal peteği yapılarında olmaları gibi, ayırt edici morfolojik özelliklere sahip olabilmektedir.

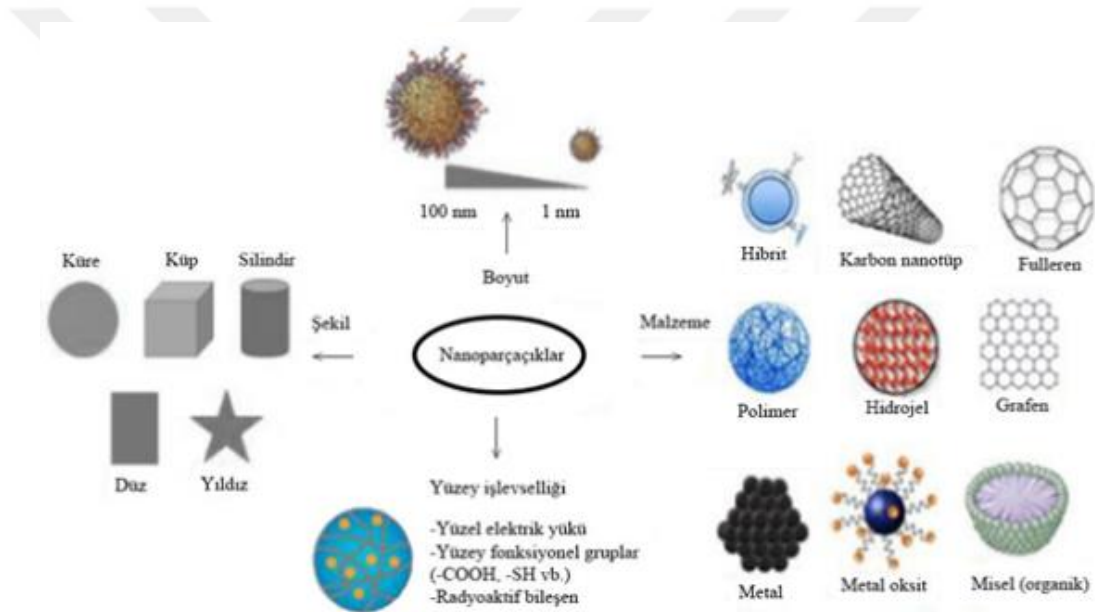
Karbon nano tüpler; grafen, fulleren (60 karbon atomundan oluşan bir molekül), karbon siyahı ve karbon fiberler, karbon esaslı nanopartiküllerdir.

Organik nanopartiküller toksik olmamakla birlikte biyobozunurdurlar. İnorganik nanopartiküller ise karbondan oluşmayan partiküllerdir.

Metal ve metal oksit nanopartikülleri, inorganik nanopartiküller sınıfında yer almaktadırlar. Metal esaslı nanopartiküller, büyük hacimli metal malzemelere göre istisnai özelliklere sahip olabilmektedirler. Alüminyum (Al), bakır (Cu), kobalt (Co), demir (Fe), gümüş (Ag), altın (Au) ve çinko (Zn), yaygın olarak kullanılan metal nanopartiküllerdir. Metal oksit nanopartikülleri, metal nanopartiküllere göre daha reaktif ve verimlidir. Örneğin; demir oksit (Fe_2O_3) nanopartikülleri, demir (Fe) nanopartiküllerine göre daha reaktif niteliktedir. Uygulamada; alüminyum oksit (Al_2O_3), seryum oksit (CeO_2), silikon dioksit (SiO_2), titanyum dioksit (TiO_2), çinko oksit (ZnO) ve demir oksit (Fe_2O_3), en çok kullanılan metal oksit nanopartiküllerdir. Metal oksit nanopartiküllerin, kimyasal

tepkimelerde katalizör etkisi göstermesi ve yakıtların termofiziksel özelliklerini geliştirmesi nedeniyle, yakıt katkısı olarak kullanılması, avantajlar sunabilmektedir.

Hibrit nanopartiküller, farklı fonksiyonlara sahip en az iki nanopartikülün birleştirilmesi ile meydana gelen ve genellikle, çekirdek-kabuk morfolojisine sahip nanopartiküllerdir. Ayrıca, metal nanopartiküllerin oksitlenmesini önleyebilmek, termal özelliklerini geliştirebilmek ve yakıt içerisinde nanopartiküllerin stabilitesini (kararlılığını) artırabilmek için metal esaslı nanopartiküller karbonla kaplanarak, karbon kaplı metal kompozit nanopartiküller elde edilebilmektedir. Şekil 1.15'te nanopartiküllerin farklı niteliklerine göre sınıflandırılması yer almaktadır.



Şekil 1.15. Nanoparçacıkların farklı niteliklerine göre sınıflandırılması (Çakmak, 2021)

Nanopartiküller; kimyasal sentez, biyolojik sentez ve fiziksel yöntemlerle üretilmektedirler. Nanopartiküllerin üretiminde kullanılan tüm yöntemler, yukarıdan aşağıya (top down) ve aşağıdan yukarıya (bottom up) üretim yaklaşımları olarak gruplandırılabilir. Yukarıdan aşağıya üretim yaklaşımında hacimsel malzemeler, mekanik ve/veya kimyasal işlemler ile nano boyutlara küçültülmektedir. Örneğin; püskürtme, elektro patlama, mekanik aşındırma ve öğütme teknikleri, bu yaklaşım içerisine girmektedirler. Aşağıdan yukarıya üretim yaklaşımında ise atomik veya moleküler boyuttaki yapılar, kimyasal tepkimelerle

büyütülerek parçacık haline getirilebilmektedir. Örneğin; gaz yoğunlaştırma tekniği, kimyasal buhar yoğunlaştırma, lazer pirolizi, sol jel, plazma veya alev spreyi sentezi gibi yöntemler aşağıdan yukarıya üretim yaklaşımları arasında yer almaktadır. Yukarıdan aşağıya nanopartikül üretim teknikleri arasında mekanik öğütme, farklı çeşitlerde nanopartikül üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bilyeli öğütme işleminde, öğütülen malzemenin plastik deformasyonu, nanopartikülün şeklini; malzemenin gevrekliği de nanopartikül boyutunu etkilemektedir. Öğütme sırasında, soğuk kaynak nedeniyle de nanopartiküllerin boyutu artabilmektedir.

Nanopartiküller, birçok alanda olduğu gibi, otomotiv alanında da kullanılabilmektedir. Mevcut dizel motor teknolojisi ve emisyon kontrol sistemleri ile; azot oksit (NO_x) ve partikül madde (PM) emisyonları eş zamanlı olarak azaltılabilesine rağmen bu sistemlerin, yeni emisyon standartlarının karşılanmasında yetersiz kalacağı ve bu nedenle, ek kontrol yöntemlerinin kullanılmasının kaçınılmaz olduğu gerçektir. Yakıt katkıları ile yakıt bileşiminin değiştirilmesi, diğer emisyon kontrol yöntemlerine göre daha basit ve etkili bir yöntem olduğu için, yeni emisyon kontrol yöntemi olarak, nano yakıt katkılarının kullanımı, araştırmacıların ilgisini çekmektedir ve nano yakıt katkıları konusunda yapılan araştırmalar, artarak devam etmektedir. Nano yakıt katkıları, yakıt özelliklerini geliştirmek, yanmayı iyileştirmek ve bu sayede motor performansını artırmak, beraberinde egzoz emisyonlarını düşürmek amacıyla yakıtlara çok düşük oranlarda ilave edilebilmektedir. Yakıta eklenen nano yakıt katkıları; yakıtın viskozite, termal iletkenlik, distilasyon (damıtma) karakteristiği gibi fiziksel özelliklerini geliştirebilmektedir. Ayrıca, tutuşma gecikmesini kısaltabilmekte ve yanma sırasında katalitik etki oluşturarak yanmanın verimini artırabilmektedir.

Nanopartiküllerin üstün özelliklerinin nedeni ile, kullanım alanları genişleyerek yeni uygulama alanlarından biri de yakıt katkıları olmak olmuştur. Nanopartiküller; yakıtların termofiziksel özelliklerini geliştirmek, motor performansını artırmak ve kirletici egzoz emisyonlarını azaltmak amacıyla kullanılabilmektedir. Nanopartiküllerin çok düşük miktarlarda yakıta eklenmesi (örneğin; 1 kg yakıt için 20 ile 150 mg aralığında nanopartikül katkısı), bu etkilerin oluşturulması için yeterli olmaktadır. Nanopartiküller, yakıtlara; mekanik ve ultrasonik karıştırma yöntemleri ile eklenerek, nanopartikül katkılı yakıtlar elde edilebilmektedir ve bu yakıtlara nano yakıt denilmektedir. Yakıta eklenen

nanopartiküller; elektriksel etkiler, kimyasal bağ etkileri, yer çekimi etkisi veya dış etkilerle zamanla bir araya gelme, birleşme, topaklaşma ve çökelme davranışları sergileyebilmektedirler. Bu durum, yakıt stabilitesi için istenmeyen bir durumdur. Nanopartiküllerin çökelme hızını yavaşlatmak veya engellemek için, nano yakıtlar hazırlanırken; sürfaktan (yüzey aktif madde) veya solvent (çözücü) maddeler kullanılabilir. Çözücü maddeler, nanopartiküllerin yakıt içerisinde çözünmesi amacıyla kullanılabilir. Sürfaktan maddeler ise, karışım oluşturulduktan sonra yakıtın stabilitesini (kararlılık) artırmak için kullanılabilir. Nano yakıtın stabilitesini artırmak için tercih edilen bir diğer yöntem de karışımın pH değerini ayarlamaktır.

Nanopartiküller, yakıt katkısı olarak kullanıldığında, birçok avantajı olabilmekle birlikte, yüksek ısı iletkenlikleri sayesinde; yakıtın ısı iletkenliğini, dolayısıyla yakıt molekülleri ile gazlar arasındaki ısı transferini artırarak tutuşma gecikmesini kısalttığı, çalışmalarda görülmüştür. Nanopartiküllerin, yanma odasında; alev bölgesinden radyasyonla gerçekleşen ısı geçişini absorbe ederek yakıt damlacıklarının daha hızlı buharlaşabilmesini ve yanma hızının artmasını sağlayabilmektedir.

Nanopartikül bileşimindeki oksijen, yanma için ilave oksijen sağlayabilmektedir ve böylece; hidrokarbon, karbonmonoksit ve is emisyonlarını azaltabilmektedir.

Nanopartiküller, nano yapılarından dolayı yüksek yüzey-hacim oranına sahiptirler. Bu özellik, yanma odasında hava ve yakıt molekülleri için daha fazla temas alanı oluşturarak karışımın homojenliğini artırmaktadır. Homojen karışımın yanması durumunda yanma verimi artmakta ve kirletici egzoz emisyonları azalmaktadır.

Nanopartiküller, yüksek kimyasal aktiviteleri nedeniyle yanma sırasında katalitik etki oluşturabilmektedir ve yanmanın iyileşmesini sağlayabilmektedir. Kimyasal tepkimelerin, aktivasyon enerjisini düşürerek, yanmanın daha düşük sıcaklıkta gerçekleşmesini sağlayabilmektedir. Nanopartiküller, yakıtın ısı iletkenliğini ve dolayısıyla, yanma odasında gerçekleşen ısı ve kütle transferini artırarak yakıtın tutuşmasını kolaylaştırabilmektedir.

Metal oksit nanopartikülleri ve özellikle seryum oksit (Ce_2O_3) nanopartikülleri, yanma sırasında karbonmonoksit ve hidrokarbon ürünlerini

oksitlemek için oksijen sağlayabiliyorken, aynı zamanda azot oksit emisyonlarını azota (N_2) indirgeyerek, azot oksit oluşumunu azaltabilmektedir.

Nanopartiküller, tutuşma gecikmesini kısaltabildikleri için yanma hızını ve yanma verimini artırabilmektedirler. Bu durum, özgül yakıt tüketiminde düşüşe, motor performansında ise artışa neden olabilmektedir.

Metal nanopartiküller, yanma ortamındaki su ile tepkimeye girerek hidroksil (OH) radikali ve hidrojen (H_2) açığa çıkarabilmektedir. OH radikalleri, is emisyonlarının oksitlenmesinde etkilidir. Açığa çıkan hidrojen gazı, yanmaya dahil olabilmek, motor performansını artırabilmektedir. Metal nanopartiküller, aynı zamanda, karbonun oksitlenme sıcaklığını düşürebilmektedir. Böylece, daha verimli bir yanma gerçekleşerek, is ve hidrokarbon emisyonları azalabilmektedir.

Nanopartiküller, su-yakıt emülsiyon yakıtlarının yanması sırasında meydana gelen ve ikinci bir atomizasyona yol açabilen mikro patlamaların oluşumunu tetikleyebilmektedir. Mikro patlamalar, daha iyi hava-yakıt karışımı sağlayabilmektedir ve tutuşma gecikmesini kısaltabilmektedir. Yani nanopartiküller, su-yakıt emülsiyon yakıtlarının performanslarını artırabilmektedirler.

Nanopartiküller, püskürtme esnasında yakıt damlacığının momentumunu artırarak, yakıt jetinin nüfus derinliğini artırabilmektedirler ve silindir içerisinde, daha homojen hava-yakıt karışımının sağlanmasına yardımcı olabilmektedirler.

Nanopartiküllerin, yanma odası duvarındaki karbon birikintilerinin yanmasını kolaylaştırabilmeleri, karbon birikintilerinin azalmasını sağlayabilmektedir.

Nanopartiküllerin birçok olumlu katkısı olabilirken; olumsuz yanları ve ortaya çıkardıkları sorunlar da bulunabilmektedir. Mesela; nanopartiküllerin potansiyel faydalarından yararlanabilmek için, nano yakıtların kararlı olması gerekmektedir. Nanopartiküllerin yakıt içerisindeki kararlılıklarının düşük olması yani, nanopartiküllerin yakıt içinde süspansiyon halinde kalamayarak çökme eğilimine girmesi, uygulamalarda karşılaşılan en önemli sorundur. Nanopartiküllerin, uzun vadede kararlılıklarının iyi olması gerekmektedir. Nanopartiküllerin, güçlü Van der Waals etkileşimleri ve zayıf elektrostatik itici kuvvetleri nedeni ile; parçacıkların bir araya gelerek, büyük parçacıkların oluşumuna (kümelenmeye) ve yer çekimi etkisiyle, zamanla bu parçacıkların çökmesine neden olabilmektedirler. Nanopartiküllerin, yakıt içerisindeki

kararlılığı; nanopartikül tipine ve boyutuna, yakıt türüne ve kullanılan yakıt hazırlama tekniğine bağlı olabilmektedir. Örneğin; nanopartikül boyutu küçüldükçe, süspansiyon kalitesi artmaktadır veya mekanik homojenizasyon yerine, ultrasonik homojenizasyon kullanıldığında, daha kararlı nano yakıt elde edilmektedir. Ultrasonik karıştırma ile yakıtın pH değerinin ayarlanması ve sürfaktan madde kullanımı, en çok tercih edilen yöntemlerdir. Süspansiyon kalitesini artırmak için genelde iki yöntem birlikte kullanılmaktadır.

Sürfaktan maddeler (yüzey aktif maddeler), yakıtın yüzey gerilimini azaltarak, yakıt molekülleri ile nanoparçacıklar arasında bir bağlantı oluşturmaktadır ve böylece, yakıt molekülleri ile nanoparçacıklar arasında süreklilik sağlanmaktadır. Yüksek kararlılık sağlayan Span 80 (sorbitan monooleate), Tween 80 (Polioksietilen Sorbitan Monooleate), sodyum dodesil sülfat, polivinilpirolidon (PVP), Triton X-100 (iyonik olmayan) ve oleik asit, nano yakıtların hazırlanmasında en çok kullanılan sürfaktan maddelerdir ve genellikle, kütlece %0,1 oranında kullanılmaktadırlar. Ayrıca; nano yakıtın kararlılığı, yakıtın pH değeri, çeşitli asidik ve bazik maddeler ile değiştirilerek artırılabilir. Nano yakıtlar için en iyi süspansiyon kalitesi; 3,5 ile 10,5 pH değeri aralığında elde edilebilmektedir.

Nano yakıtların süspansiyon kalitesi; zeta potansiyel ölçümü, sedimentasyon testi, santrifügasyon testi (santrifüj etme), SEM, TEM, UV spektrometresi ve dinamik ışık saçınım spektrometresi (DLS) gibi, en çok kullanılan tekniklerle belirlenmektedir (Çakmak, 2021).

1.2.5.8.2 Nanopartikül Katkısı Olarak Kobalt Oksit

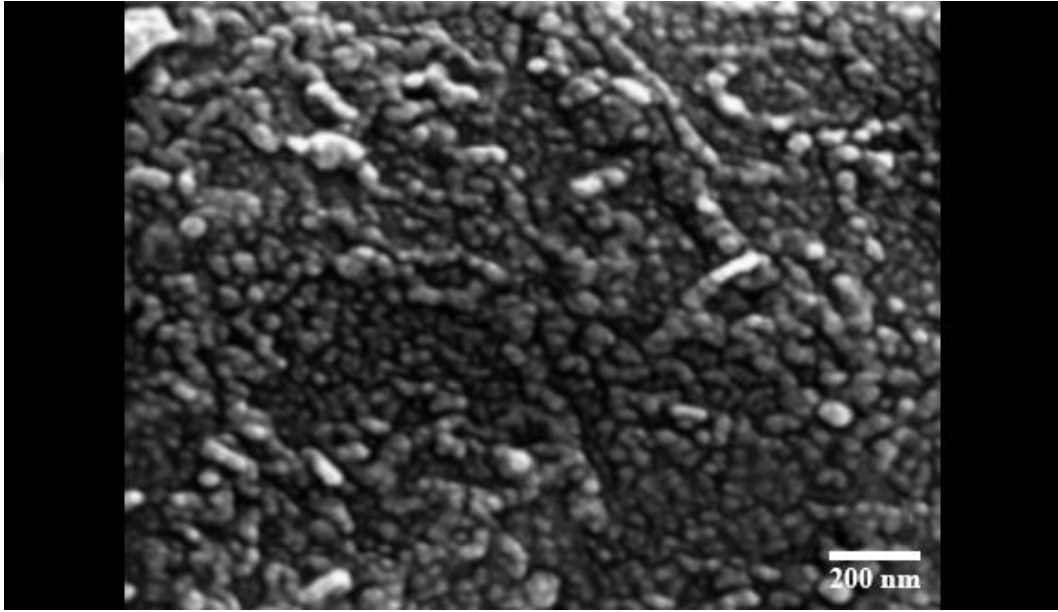
Ultramafik tür ve mafik (magnezyum ve demir bakımından zengin kayaç ve silikat mineralleri için kullanılan magnezyum ve ferrik sözcüklerinin birleşiminin kısaltılması) türdeki volkanik kayaçlarda, kobalt elementi bulunabilmektedir. Çeşitli kristal yapılara sahip olan kobalt, altıgen kapalı paket (hcp) fazı, yüzey merkezli kübik (fcc) fazı ve epsilon fazı olmak üzere, farklı kristalografik yapılara sahip üç yarı kararlı fazdan dolayı en önemli ferromanyetiklerden biridir.

Kobalt oksit, siyah toz formundaki geçiş metal oksitlerinden biridir. Suda çözünmemektedir.

Kobalt oksitin birçok canlıda ve en önemlisi insanlarda toksik etki gösterdiği ve zehirlenmelere neden olabildiği, bir gerçektir (Ordu, 2022).

Kobalt oksit (Co_3O_4) nanopartikül tozu, Co (II) ve Co (III)'ün karma, değerlikli bir bileşimidir. Nitrik asit içinde çözünebilmektedir. Her zaman nemi emebilmektedir. Ancak, su bileşiklerini üretememektedir. 1200 °C'nin üzerinde ısıtıldığında, alt kobalt oksitlere parçalanabilmektedir. Katalitik aktivatör özelliği bulunmaktadır (George vd., 2015).

Şekil 1.16'da Kobalt oksit nanopartikülünün alan emisyonlu taramalı elektron mikroskopundaki (FE-SEM) görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 1.16. Kobalt oksit nanopartikülünün alan emisyonlu taramalı elektron mikroskopundaki görüntüsü (Jahani vd., 2020)

Kobalt oksit nanopartikülü, yakıt katkı maddesi olarak, bazı metal oksit nanopartiküllerine göre daha iyi oksijen (O_2) tamponu görevi görebilmektedir. Böylece, oksijen (O) atomları, daha temiz bir yanma elde edebilmek için, yanma tepkimesini hafifletebilmektedir. Yanma sırasında sıcaklık arttıkça, aktif oksijen atomlarının hareketliliği buna bağlı olarak artabilmektedir ve karbonmonoksitin oksidasyonu daha kolay hale gelebilmektedir. Kobalt oksit üzerindeki kafes oksijeni, aktif oksijenden daha aktiftir, yanma aktivitesini artırıcıdır ve karbondioksit oluşumuna yardımcı olabilmektedir (George vd., 2015).

2. MATERİYAL ve YÖNTEM

Nanopartikül katkılı hem dizel yakıtının hem dizel-biyodizel karışım yakıtının hazırlanmasına dair bilgilere ve bu test yakıtlarının özelliklerine, bu bölümde yer verilmektedir. Deneyde kullanılan materyaller ve bu materyallerin özellikleriyle beraber deneyle ilgili bilgiler, yine bu bölümde yer almaktadır.

Deney çalışmasında, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi'nin Mühendislik Fakültesi'ndeki Motor Laboratuvarı'nın imkanlarından faydalanılmıştır ve deney çalışmasının tüm aşamaları, burada gerçekleştirilmiştir.

2.1 Deneyde Kullanılan Materyaller

Deney çalışmasında kullanılan malzemeler ve ekipmanlar, bu kısımda bulunmaktadır.

2.1.1 Yakıt Numuneleri

2.1.1.1 Dizel Yakıtı

Deneyde, referans olarak ve nanopartikül katkılı olarak, dizel motorunda test edilmek üzere; Petrol Ofisi A.Ş. akaryakıt istasyonundan ticari dizel yakıtı temin edilmiştir. Şekil 2.1'de deneylerde kullanılmak üzere temin edilmiş dizel yakıtının görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 2.1. Deneyde kullanılmak üzere temin edilmiş dizel yakıtı

2.1.1.2 Kanola B20 Karışım Yakıtı

Deneyisel çalışmalar için kullanılan kanola biyodizelinden kütlece %20 oranında, dizel yakıtından da %80 oranında homojen karıştırılarak oluşan B20 karışım yakıtının görüntüsü Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.2. Kanola B20 yakıt karışımı

2.1.1.3 Kobalt Oksit Nanopartikül Katkı Maddesi

Deneyde kullanılmak üzere, nanopartikül katkılı yakıtların hazırlanabilmesi için Nanografi firmasından kobalt oksit nanopartikülü temin edilmiştir. Temin edilen kobalt oksit nanopartikülün Şekil 2.3'te görüntüsü, Tablo 2.1'de ise ürün bilgilerine, teknik ve element analizi özelliklerine yer verilmektedir.



Şekil 2.3. Kobalt oksit nanopartikülü

Tablo 2.1. Kobalt oksit nanopartikülünün ürün bilgileri ve özellikleri

Ürün Bilgileri					
Nanopartikül adı		Kobalt oksit			
Ürün numarası		NG04SO0702			
Formül		Co ₃ O ₄			
Teknik Özellikleri					
Saflık, %		99,5			
Renk		Koyu kahverengi			
Ortalama parçacık boyutu, nm		8 – 28			
Özgül yüzey alanı, m ² /g		55 – 155			
Ürün Bilgileri					
Gerçek yoğunluk, g/cm ³		6,2			
Analiz Belgesi					
İçerilen elementlerin analizi, %	Kalsiyum (Ca)	Nikel (Ni)	Demir (Fe)	Bakır (Cu)	Kurşun (Pb)
	0,003	0,005	0,001	0,002	0,001

2.1.2 Yakıt Numuneleri Hazırlanırken Kullanılan Cihazlar

2.1.2.1 Hassas Terazı

Şekil 2.4'te bulunan 0,0001 gram hassasiyetindeki PA214C model Ohaus-Pioneer marka hassas terazi aracılığıyla nanopartikülü katkısının miktarı belirlenmiştir.



Şekil 2.4. 0,0001 gram hassasiyetinde PA214C model Ohaus Pioneer marka hassas terazi

Şekil 2.5'te ise biraz daha düşük olarak 0,01 gram hassasiyetinde PA4102 model Ohaus-Pioneer marka hassas terazi aracılığıyla referans olarak kullanılacak saf dizel yakıtının numunesi ile nanopartikül ilave edilmeden önceki aynı dizel yakıtından başka bir numunenin ve kanola B20 karışım yakıt numunesinin miktarları belirlenmiştir.



Şekil 2.5. 0,01 gram hassasiyetinde PA4102 model Ohaus Pioneer marka hassas terazi

2.1.2.2 Manyetik Karıştırıcı

Nanopartikül katkılı test yakıtlarının ilk karışım işlemlerini gerçekleştirmek için kullanılan hız hassasiyeti $\pm\%2$ olan ve sıcaklık ayarı yapılabilen ısıtıcıya sahip, 100 ile 1400 dev/dk aralıklarında çalışabilen MR Hei-Tec model Heidolph marka manyetik karıştırıcı Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6. MR Hei-Tec model Heidolph marka manyetik karıştırıcı

2.1.2.3 Ultrasonik Karıştırıcı

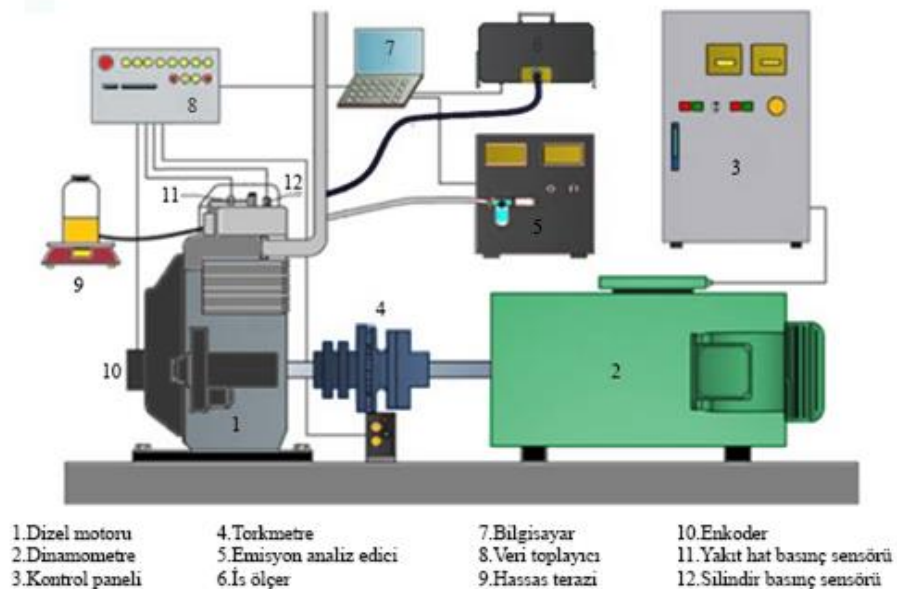
Şekil 2.7’de, sıcaklık ve süre ayarı bulunan standart model Isolab marka ultrasonik karıştırıcı görülmektedir. Yakıt karışımı hazırlamanın son aşamasında, nanopartikül katkılı test yakıtlarının homojen olarak karışımı için ultrasonik karıştırıcı kullanılmıştır.



Şekil 2.7. Standart model Isolab marka ultrasonik karıştırıcı

2.1.3 Deney Düzeneği ve Ekipmanları

Test yakıtlarının motor deneylerinin gerçekleştirildiği, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Motor Laboratuvarı'nda bulunan motor deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 2.8'de, motor deney düzeneğinin gerçek görüntüsü ise Şekil 2.9'da görülmektedir.



Şekil 2.8. Deney düzeneğinin şematik görünümü



Şekil 2.9. Deney düzeneği

2.1.3.1 Dizel Motoru

Hazırlanan test yakıtları, Lombardini marka, dört zamanlı, doğal emişli, tek silindirli, direkt enjeksiyonlu, hava soğutmalı olan 15 LD 350 model dizel motorunda test edilmiştir. Deneylerde kullanılan bu dizel motorunun görüntüsü Şekil 2.10’da verilmiştir.



Şekil 2.10. Lombardini marka 15 LD 350 model dizel motoru

Test motorunun fabrika üretimi teknik özellikleri Tablo 2.2’de yer almaktadır.

Tablo 2.2. Lombardini 15 LD 350 dizel motorun fabrika üretimi teknik özellikleri

Model	Lombardini 15 LD 350
Azami güç	5,5 kW, 3600 dev/dk
Azami tork	16,6 Nm, 2400 dev/dk
Çap × kurs	82 mm × 66mm
Silindir hacmi	349 cm ³
Sıkıştırma oranı	20,3:1
Enjeksiyon pompa tipi	QLC (kendinden emişli santrifüj) tipi
Enjektör memesi	0,22 × 4 delik × 160°
Enjektör iğnesi kalkma basıncı	207 bar
Yakıt püskürtme avansı, °KMA	20 ÜÖNÖ
Emme supabı açık/kapalı, °KMA	10 ÜÖNÖ/42 AÖNS

2.1.3.2 Kuvvet ve Yük Ölçüm Cihazı

Deney düzeneğinde kullanılan dizel motorun çıkışından sonra, 3000 dev/dk dönme hızına kadar çalışabilen ve gücü 15 kW olan Şekil 2.11’deki Kemsan marka dinamometre, motor yükünü ayarlamak ve kuvveti ölçebilmek için

konumlandırılmıştır. Bu dinamometre, elektriksel indüksiyon işlemi ile frenleme sağlayabilmektedir.



Şekil 2.11. Deney düzeneğinde motor yükünü ve frenlemeyi ayarlayan Kemsan marka dinamometre

2.1.3.3 Tork Ölçüm Cihazı

Deney düzeneğinde; 20 Nm ile 200 Nm tork sınırları arasında ölçüm yapabilen, motor miline flanşla montajı mümkün olan, stator ve rotordan oluşan Şekil 2.12'deki 4550 A modeli ile Kistler marka tork ölçüm ünitesi kullanılmıştır.



Şekil 2.12. 4550 A modeli ile Kistler marka tork ölçüm ünitesi

2.1.3.4 Silindir Basınç Ölçüm Cihazı

Deney düzeneğinde, silindir basınç değerlerini ölçmek amacıyla Şekil 2.13'teki markası Kistler olan A3 6052C modeli ile piezoelektrik basınç sensörü ve 5064 modeli ile şarj amplifikatörü (yükselticisi) kullanılmıştır.



Şekil 2.13. Kistler marka A3 6052C modeli ile silindir basıncını ölçen piezoelektrik basınç sensörü ve 5064 modeli ile sensörü desteklemek için şarj amplifikatörü

2.1.3.5 Yakıt Hat Basınç Ölçüm Cihazı

Deney düzeneğinde, yakıt hattı basıncını ölçmek için Şekil 2.14’te markası Kistler olan 4065B model piezorezistif sensör ile 4665 model amplifikatör (yükseltici) kullanılmıştır.



Şekil 2.14. Kistler marka 4065B modeli ile yakıt hattı basıncını ölçen piezorezistif sensör ve 4665 model amplifikatör

Püskürtme başlangıçlarının gerçekleştiği yerler, yakıt hat basınç değerleri ile tayin edilerek bulunmuştur.

2.1.3.6 Enkoder Cihazı

Deney düzeneğinde, ağırlığı, amplifikatörü (yükselticisi) olmadan 390 gram ve 0,1 derecelik krank açısı hassasiyetinde olan Şekil 2.15'teki 2614B model Kistler marka enkoder (optik krank açısı kodlayıcı), krank miline monte edilmiştir.



Şekil 2.15. Kistler marka 2614B model enkoder cihazı

Bu enkoder aracılığıyla motor devri belirlenirken, krank mili açısı ve ÜÖN (üst ölü nokta) değerlerin tespiti yapılmıştır.

2.1.3.7 Egzoz Emisyonları Ölçüm Cihazları

Deneylerde, egzoz emisyonları için iki farklı cihaz kullanılmıştır.

Şekil 2.16'daki Mexa-584L model Horiba marka egzoz emisyon ölçüm cihazı ile CO, HC ve NO_x egzoz emisyonları ölçülmüştür.



Şekil 2.16. Mexa-584L model Horiba marka egzoz emisyon cihazı

Dizel motor is emisyonlarını ölçmek için ise, Şekil 2.17’de görülen Mobydic marka is ölçüm cihazı kullanılmıştır.



Şekil 2.17. Mobydic marka is ölçüm cihazı

2.1.3.8 Veri Toplama Cihazı

Deney düzeneğinde bulunan sensörlerden elde edilen veriler, Şekil 2.18'deki Kistler KiBox cihazı ile kaydedilerek bu verilerin analizi yapılmaktadır.



Şekil 2.18. Kistler KiBox veri toplama cihazı

2.1.3.9 Bilgisayar

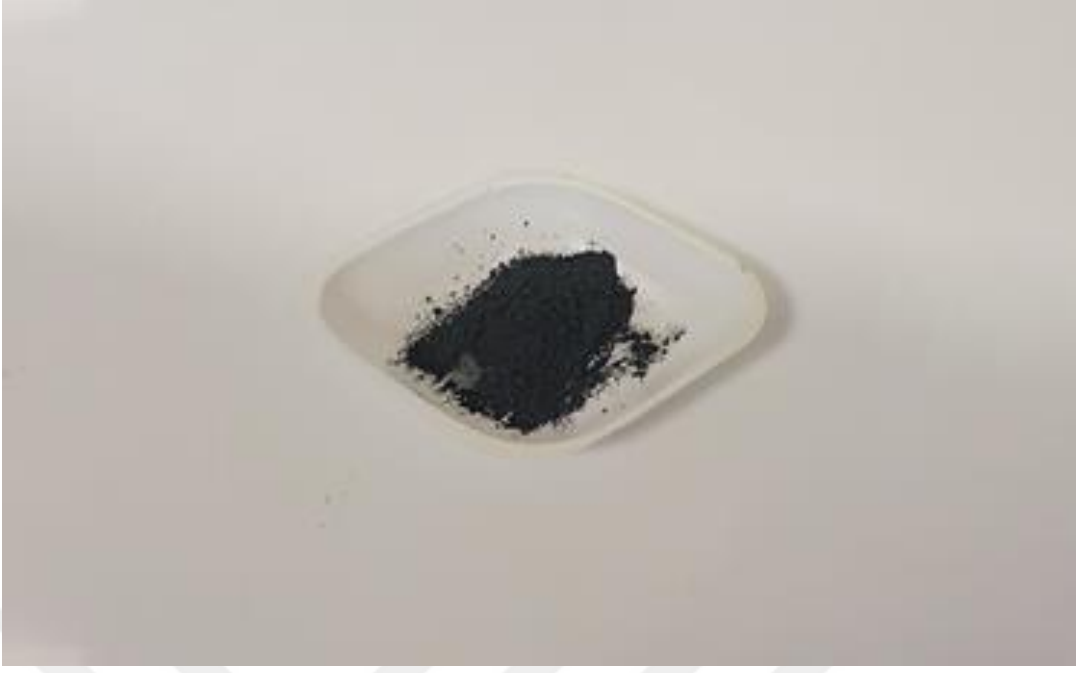
Cihazların birbirleri ile eş zamanlı çalışması ve kontrolün sağlanması ve verilerin depolanarak işlenmesi için bilgisayar kullanılmıştır.

2.2 Deneyin Yöntemi

Deney aşamalarının gerçekleştirilmesinde ve hesaplamalarda izlenen yöntemler bu kısımda bulunmaktadır.

2.2.1 Yakıt Numunelerinin Hazırlanışı

Kobalt oksit nanopartikül tozları, Şekil 2.19'da görüldüğü gibi, her iki test yakıtı için de 100 ppm dozajında olacak şekilde hassas terazi aracılığıyla ölçülmüştür.



Şekil 2.19. Ölçülen kobalt oksit nanopartikül tozu

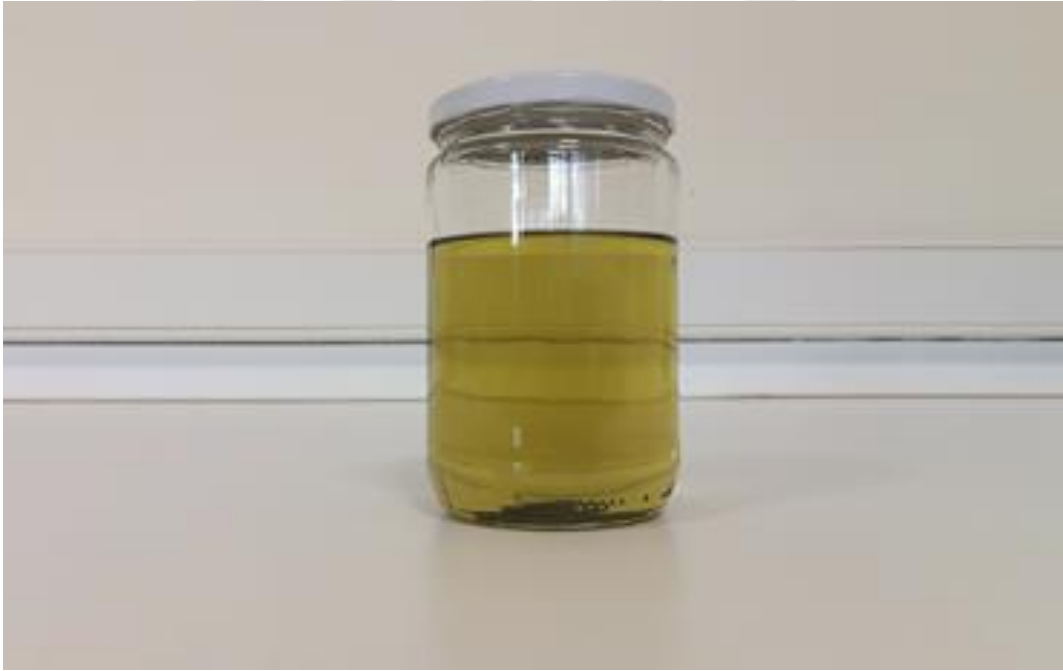
Deneylerde referans olarak kullanılacak saf dizel yakıt numunesi, hassas terazi aracılığıyla tartılarak net 700 gram olarak belirlenmiştir ve içerisinde 100 ppm olacak şekilde ölçülen kobalt oksit nanopartikülü tozu yakıt içerisine ilave edilmiştir. Kanola B20 karışım yakıtının içerisine de yine aynı şekilde 100 ppm olacak şekilde ölçülen kobalt oksit nanopartikül tozu ilave edilmiştir.

Kobalt oksit nanopartikülü tozlarının test yakıtları ile iyice karışması için ilk aşamada, test yakıtları numunelerinin her biri; 30 °C sıcaklıkta, 450 dev/dk dönme hızında ve 5 dakikalık süre içerisinde manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır.

Kobalt oksit nanopartikülü tozlarının test yakıtlarına eklenmesi için son aşamada ise; test yakıtları numunelerinin her biri, 30 °C sıcaklıkta, 60 dakikalık süre boyunca ultrasonik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Böylelikle, kobalt oksit nanopartikülü tozlarının test yakıtları içerisinde homojen olarak karışmaları sağlanmıştır. Karışım işlemleri tamamlanan kobalt oksit nanopartikülü katkılı hem dizel yakıtının hem de B20 karışım yakıtının görüntüleri, Şekil 2.20 ve Şekil 2.21’de sırasıyla görülmektedir.



Şekil 2.20. Kobalt oksit nanopartikülü tozu eklenmiş dizel yakıtı numunesi



Şekil 2.21. Kobalt oksit nanopartikülü tozu eklenmiş B20 karışım yakıtı numunesi

Deneyde kullanılan yakıt numunelerinin isimleri, türleri ve açıklamaları Tablo 2.3'te görülmektedir. Yakıt numunelerin yakıt özellikleri ise Tablo 2.4'te görülmektedir.

Tablo 2.3. Deneyde kullanılan yakıt numunelerinin adlandırılması

Yakıt Numunesinin İsmi	Açıklama	Yakıt Numunesinin Türü
B0	Saf dizel yakıt	Referans yakıtı
B0Co100	100 ppm Co_3O_4 nanopartiküllü katkılı dizel yakıtı	Test yakıtı
B20Co100	100 ppm Co_3O_4 nanopartiküllü katkılı dizel-biyodizel karışım yakıtı	Test yakıtı

Tablo 2.4. Deneyde kullanılan yakıtların özellikleri

Yakıt Numunesinin İsmi	Setan Sayısı	Yoğunluk, kg/m^3	Isıl Değer, MJ/kg	Viskozite, mm^2/s
B0	58,8	831,5	43,2	2,4
B0Co100	60,6	832,5	44,4	2,47
B20Co100	59,9	841,9	42,9	2,81

2.2.2 Yakıt Numunelerinin Test Edilmesi

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi'nin Mühendislik Fakültesi'ndeki Motor Laboratuvarı'nda bulunan deney düzeneğinde testlere başlamadan önce dizel motorun yağlama yağı ve yakıt filtreleri değiştirilmiştir ve deney düzeneğindeki tüm ölçüm cihazlarının kalibrasyonları yapılmıştır. Ardından, çalıştırılan dizel motorunun, ilk 20 dakika boyunca çalışma kararlılığına ulaşması beklenmiştir. Sırasıyla, B0 yakıt numunesi, B0Co100 yakıt numunesi ve B20Co100 yakıt numunesinin testleri gerçekleştirilmiştir. Her bir yakıt numunesinin testinden önce, bir önceki deneyden kalan yakıtın tamamen boşaldığından emin oluncaya kadar motor çalışmaya devam ettirilmiştir.

Motor deneyleri üç farklı motor yüklerinde (3 Nm, 6 Nm, 9 Nm) ve her yük için üç farklı motor devrinde (1800 dev/dk, 2400 dev/dk, 3000 dev/dk) gerçekleştirilmiştir.

Deney çalışması sırasında yakıt tüketimi hassas terazi tarafından ölçülmüştür.

Deney çalışması boyunca, veri toplama cihazı aracılığıyla elde edilen veriler, 100 çevrim ortalamaları kullanılarak yeniden hesaplanmıştır ve bilgisayara

kaydedilmiştir. Yine egzoz emisyon cihazı yardımıyla emisyon verileri bilgisayara kaydedilmiştir.

2.2.3 Ölçülen ve Hesaplanan Parametreler

Test edilen yakıt numunelerinin, dizel motoru üzerindeki; yanma, motor performansı ve egzoz emisyon karakteristiklerini belirleyebilmek için testler sırasında ölçülenlerle birlikte efektif güç (fren gücü), özgül yakıt tüketimi, efektif ısı verim gibi motor performans parametrelerinin, net ısı salınım oranı gibi yanma parametrelerinin hesaplanması gerekmektedir.

2.2.3.1 Motor Torku

Motor torku verileri, deney düzeneğinde yer alan tork ölçüm cihazı ve veri toplama cihazı aracılığıyla bilgisayarda doğrudan okunarak kaydedilmiştir. Efektif gücün bulunmasında kullanılmıştır.

2.2.3.2 Efektif Güç

Gerçek güç, faydalı güç, fren gücü gibi diğer adlarla da bilinmektedir. Motorun krank mili ucundan ölçülmektedir (Tural, 2023).

Efektif güç, (2.1) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$P_e = \omega \times M_t \times 10^{-3} \quad (2.1)$$

P_e : Efektif güç (kW)

ω : Açısal hız (rad/s)

M_t : Motor torku (Nm)

Ayrıca, açısal hız (ω), (2.2) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\omega = \frac{2 \times \pi \times n}{60} \quad (2.2)$$

n : Motor devri (dev/dk)

π : Pi sayısı

Bu durumda, (2.1) numaralı eşitlikteki efektif güç (P_e); (2.2) numaralı eşitlikteki açısal hızın (ω) karşılığı olarak (2.1) numaralı eşitlikte yerine konulduğunda, (2.3) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır (Ulutürk, 2020).

$$P_e = \frac{2 \times \pi \times n}{60} \times M_t \times 10^{-3} \quad (2.3)$$

Deneyde, deney düzeneğinde yer alan enkoder cihazından motor devri (n), tork ölçüm cihazından ise motor torku (M_t) ile alakalı veriler, veri toplama cihazı aracılığıyla bilgisayara kaydedilmiştir.

2.2.3.3 Özgül Yakıt Tüketimi

Motorun birim enerji için harcadığı yakıt miktarına özgül yakıt tüketimi denilmektedir.

Her bir deney aşamasında, kütleli olarak tüketilen yakıt miktarı, hassas terazi kullanılarak ölçülmüştür.

Özgül yakıt tüketimi ise (2.4) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır (Tural, 2023; Ulutürk, 2020).

$$b_e = \frac{B}{P_e} \times 1000 \quad (2.4)$$

b_e : Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)

B : Yakıt tüketimi (kg/h)

2.2.3.4 Efektif Isıl Verim

Motorun efektif gücünün, yakıtın tamamen yanması sonucunda motora giren enerjiye oranı ısı verimi vermektedir. Yakıtın yanma kabiliyetiyle alakalı olmakla birlikte yakıt enerjisinin ne kadarının mekanik enerjiye dönüştüğünü göstermektedir.

Efektif ısı verim, (2.5) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır (Tural, 2023; Ulutürk, 2020).

$$\eta_t = \frac{P_e}{B \times H_u} \times 3600 \quad (2.5)$$

η_t : Efektif ısı verim (%)

H_u : Yakıtın alt ısı değeri (kJ/kg)

2.2.3.5 Net Isı Salınım Oranı

Yanma aşamaları hakkında net ısı salınım oranı önemli bilgiler vermektedir (Tural, 2023).

Silindir basıncıyla ilgili enkoder aracılığıyla elde edilen krank açısı bilgileri incelenerek önemli bilgiler bulunabilmektedir. Net ısı salınım oranının hesaplanmasında, silindir basınç sensörü ve veri toplama cihazı aracılığıyla bilgisayara kaydedilen silindir basıncı verileri kullanılmaktadır.

Dizel motorlar için önemli olan tutuşma gecikmesinin hesaplanmasında, yanma başlangıcının belirlenebilmesi için ısı salınımı verilerinden yararlanılmaktadır. Tutuşma gecikmesinin hesaplanmasında yakıt hat basıncı cihazı ve veri toplama cihazı aracılığıyla bilgisayara kaydedilen yakıt hat basıncı verileri kullanılmaktadır. Bu veriler yakıt enjeksiyonunun başlangıcının tespitinde kullanılmaktadır. Yakıt püskürtmesinin başladığı an ile yanmanın başladığı an arası, krank açısı cinsinden tutuşma gecikmesi olarak tespit edilmektedir (İnal, 2020).

Net ısı salınım oranı, termodinamiğin 1. kanununca tek boyutlu bir yanma analiz yöntemine göre (2.6) numaralı eşitlikteki gibi hesaplanabilmektedir. Fakat bunun için; hava-yakıt karışımının ideal gaz olduğu, yanma işlemi boyunca dolguda değişim olmadığı, üretilen enerjinin aynı zamanda silindirlere etkiyen enerji olduğu kabul edilmelidir (Çakmak, 2021; Özer, 2015).

$$\frac{dQ_{net}}{d\theta} = \frac{k}{k-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k-1} V \frac{dP}{d\theta} \quad (2.6)$$

$\frac{dQ_{net}}{d\theta}$: Krank mili açısına göre net ısı salınımının değişimi (J/°KMA)

k: Özgül ısıların oranı (genelde 1,30 ile 1,35 aralığında alınmaktadır)

P: Basınç (Pa)

V: Hacim (m³)

Θ : Krank mili açısı (°KMA)



3. BULGULAR

Deneyisel olarak yapılan çalışmada; 100 ppm kobalt oksit nanopartikülü katkılı hem dizel yakıtının hem kanola biyodizel karışım yakıtının 1800, 2400, 3000 dev/dk'da ve her bir motor devri için 3, 6, 9 Nm motor yükleri seviyelerinde yapılan testlerden elde edilen verilere bakılarak, ilk test edilen saf dizel yakıtı göre yanma, motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkileri bu bölümde incelenmiştir.

3.1 Yanma Karakteristikleri

Deneyin yönteminde belirli olarak ölçülen ve hesaplanan parametreler; dizel motorun yanma karakteristikleri ve yanmaya dair etkenler ile olan ilişkilerini anlayabilmek bakımından önemlidir. Tablo 3.1'de motor devirleri ve yüklerine göre; tutuşma gecikmesi, püskürtme başlangıcı, yanma başlangıcı, yanma sonu ve yanma süresi verileri bulunmaktadır.

Tablo 3.1. Yakıt numunelerinin motor devirleri ve yüklerine göre püskürtme ve yanma verileri

Motor Devri, dev/dk	Motor Yüğü, Nm	Yakıt Numunesi	Püskürtme Başlangıcı, °KMA	Tutuşma Gecikmesi, °KMA	Yanma Başlangıcı, °KMA	Yanma Sonu, °KMA	Yanma Süresi, °KMA
1800	3	B0	-11,7	10,9	-0,8	22,3	23,1
		B0Co100	-11,2	9,5	-1,7	21,7	23,3
		B20Co100	-10,9	8,7	-2,2	21,6	23,8
	6	B0	-11,2	10,5	-0,7	24,5	25,2
		B0Co100	-11,2	9,9	-1,3	24,2	25,5
		B20Co100	-11,1	9,4	-1,7	24,7	26,3
	9	B0	-11,9	11,2	-0,7	28,3	29,0
		B0Co100	-11,4	10,7	-0,7	27,5	28,2
		B20Co100	-11,2	9,8	-1,4	28,2	29,6
2400	3	B0	-10,6	12,7	2,1	22,9	20,9
		B0Co100	-10,3	11,8	1,5	23,4	21,9
		B20Co100	-10,2	11,4	1,2	23,3	22,1
	6	B0	-9,9	12,5	2,6	26,2	23,6
		B0Co100	-9,4	11,2	1,8	26,4	24,6
		B20Co100	-9,3	10,8	1,5	26,5	25,0
	9	B0	-9,8	12,0	2,2	28,8	26,5
		B0Co100	-9,7	11,7	2,0	29,1	27,1
		B20Co100	-9,6	11,1	1,5	29,5	27,9

Tablo 3.1. (devam). Yakıt numunelerinin motor devirleri ve yüklerine göre püskürtme ve yanma verileri

Motor Devri, dev/dk	Motor Yüğü, Nm	Yakıt Numunesi	Püskürtme Başlangıcı, °KMA	Tutuşma Gecikmesi, °KMA	Yanma Başlangıcı, °KMA	Yanma Sonu, °KMA	Yanma Süresi, °KMA
3000	3	B0	-9,8	15,1	5,3	28,2	22,9
		B0Co100	-9,7	14,6	4,9	25,6	20,7
		B20Co100	-9,6	13,4	3,8	24,4	20,6
	6	B0	-7,3	12,1	4,8	27,3	22,5
		B0Co100	-6,9	11,7	4,8	28,2	23,4
		B20Co100	-6,7	11,0	4,3	28,1	23,8
	9	B0	-8,3	13,5	5,2	30,8	25,6
		B0Co100	-8,1	12,8	4,7	31,1	26,4
		B20Co100	-8	12,4	4,4	32,0	27,6

Püskürtme başlangıcı; viskozite, yoğunluk, sıkıştırılabilirlik gibi fiziksel olan yakıt özelliklerine bağlıdır (Emiroğlu vd., 2018a). Yakıtların viskoziteleri yüksek, sıkıştırılabilirlikleri düşük olduğunda atomizasyonları zayıflamaktadır ve püskürtme başlangıçları daha erken °KMA değerlerinde başlayabilmektedir (Şen vd., 2018).

Püskürtme başlangıçlarında, aynı motor devirlerindeyken 3 Nm'den 9 Nm'ye olan genel değişimlerde; 1800 dev/dk için B0 yakıt numunesinde %1,7 ile en az azalış olurken, 2400 dev/dk için %7,5 artış ile yine B0 yakıt numunesi en yüksektir ve 3000 dev/dk için B20Co100 yakıt numunesi %16,7 artış ile en yüksek olmuştur. B20Co100 yakıt numunesinin püskürtme başlangıçları, diğer yakıt numunelerinden daha erken gerçekleşmiştir.

Yakıtın enjekte edildiği andan, yanmanın başladığı ana kadar geçen süre, tutuşma gecikmesidir. Yakıt özelliklerindeki değişimler, yakıt püskürtme başlangıcını etkilediği için dolaylı olarak tutuşma gecikmesini de etkilemektedir.

Tutuşma gecikmelerinde, aynı motor devirlerindeyken 3 Nm'den 9 Nm'ye kadar olan genel değişimlerde; 1800 dev/dk için B20Co100 yakıt numunesi %12,6 artış ile en yüksek olurken, 2400 dev/dk için B0Co100 yakıt numunesi %0,9 ile en az azalışa sahip olmuştur ve 3000 dev/dk için ise %7,5 ile B20Co100 yakıt numunesinde azalış en az olmuştur.

Yakıtın setan sayısı, viskozitesi ve oksijen içeriği ile değişen yanma başlangıcı, dizel motorun yanma, motor performansı ve egzoz emisyon karakteristiklerini önemli derecede etkilemektedir (Şen vd., 2018).

Yanma başlangıçlarında, aynı motor yüklerindeyken 1800 dev/dk'dan 3000 dev/dk'ya olan genel artışlarda; 3 Nm için B0Co100 yakıt numunesi %388,2 artış ile en yüksek olurken, 6 Nm için B0 yakıt numunesi %785,7 artış ile en yüksektir ve 9 Nm için ise B0 yakıt numunesi %842,9 artışla en yüksek olmuştur. Aynı motor devirlerinde, 3 Nm'den 9 Nm'ye kadar olan genel değişimlerde; 1800 dev/dk için B0Co100 yakıt numunesi %58,8 artış ile en yüksek olurken, 2400 dev/dk için B0Co100 yakıt numunesi %33,3 artış ile yine en yüksektir ve 3000 dev/dk için ise %15,5 artış ile B20Co100 en yüksek olmuştur.

Yanma sonları, yanma süresini belirlemektedir.

Yanma sonlarında, aynı motor yüklerindeyken 1800 dev/dk'dan 3000 dev/dk'ya olan genel artışlarda; 3 Nm için B0 yakıt numunesi %26,5 artış ile en yüksek olurken, 6 Nm için B0Co100 yakıt numunesi %16,5 artış ile en yüksektir ve 9 Nm için ise B20Co100 yakıt numunesindeki %13,5'lik artış en yüksek olmuştur. Aynı motor devirlerinde, 3 Nm'den 9 Nm'ye kadar olan genel değişimlerde; 1800 dev/dk için B20Co100 yakıt numunesi %30,6 artış ile en yüksek olurken, 2400 dev/dk için B20Co100 yakıt numunesi %26,6 ile en yüksektir ve 3000 dev/dk için ise yine B20Co100 yakıt numunesinde %31,1 ile en yüksek olmuştur.

Yanma başlangıcı ile yanma sonu arasında geçen süre, yanma süresidir. Motor yüklerinin artması, daha fazla yakıt enjeksiyonuna neden olduğu için genelde yanma sürelerini uzatmaktadır (Emiroğlu vd., 2018c). Motor devirlerinin artması ise yanma süresini, yanma başlangıcının üst ölü nokta civarında gerçekleşmesinden dolayı kısaltmaktadır (Şen vd., 2018).

Yanma sürelerinde, aynı motor yüklerindeyken 1800 dev/dk'dan 3000 dev/dk'ya olan genel azalışlarda; 3 Nm için B0 numunesinde %0,9 ile en az azalış olurken, 6 Nm için B0Co100 yakıt numunesi %8,2 ile en az azalıştır ve 9 Nm için ise B0Co100 yakıt numunesi yine %6,4'lük azalış ile en az azalışa sahip olmuştur. Aynı motor devirlerindeyken 3 Nm'den 9 Nm'ye kadar olan genel artışlarda; 1800 dev/dk için B0 yakıt numunesinde %25,5 artış ile en yüksek olurken, 2400 dev/dk için B0 yakıt numunesi %26,8 ile en yüksektir ve 3000 dev/dk için ise B20Co100 yakıt numunesinde %34 ile en yüksek olmuştur.

Tablo 3.2'de yakıt numunelerinin motor devirleri ve yüklerine göre maksimum silindir basıncı, maksimum ısı salınım oranı ve egzoz sıcaklığına ait veriler bulunmaktadır.

Tablo 3.2. Yakıt numunelerinin motor devirleri ve yüklerine göre maksimum silindir basıncı, maksimum ısı salınım oranı ve egzoz sıcaklığı verileri

Motor Devri, dev/dk	Motor Yüğü, Nm	Yakıt Numunesi	Maksimum Silindir Basıncı Yeri, °KMA	Maksimum Silindir Basıncı, bar	Maksimum Isı Salınım Oranı, J/°KMA	Egzoz Sıcaklığı, °C
1800	3	B0	5,6	53	25	161
		B0Co100	4,9	52	24	172
		B20Co100	4,3	53	22	192
	6	B0	6,6	57	24	209
		B0Co100	5,5	57	23	222
		B20Co100	5	56	22	224
	9	B0	6,6	63	23	260
		B0Co100	6,6	62	24	240
		B20Co100	5,8	62	20	261
2400	3	B0	6,2	52	31	175
		B0Co100	5,5	52	30	185
		B20Co100	5,1	51	28	190
	6	B0	6,4	55	31	223
		B0Co100	5,6	54	28	234
		B20Co100	6,1	54	27	245
	9	B0	6,8	58	27	308
		B0Co100	6,8	59	25	295
		B20Co100	6,3	58	25	302
3000	3	B0	9,3	49	38	185
		B0Co100	9,2	49	36	178
		B20Co100	8,7	49	35	208
	6	B0	9,3	52	35	257
		B0Co100	9,4	52	33	253
		B20Co100	8,7	52	31	257
	9	B0	9,6	55	31	301
		B0Co100	9,1	55	29	299
		B20Co100	8,7	55	28	308

Uzun tutuşma gecikmelerinde biriken yakıtın ani yanması, maksimum silindir basıncını artıran etkidir. Maksimum silindir basıncı, yanma sürelerini etkilemektedir (Emiroğlu vd., 2018c).

Birbirlerine karşılık gelen maksimum silindir basıncı ve yerlerinde, aynı motor yüklerindeyken 1800 dev/dk'dan 3000 dev/dk'ya olan genel değişimlerde; 3 Nm için, maksimum silindir basıncında, B0Co100 yakıt numunesinde %5,8 azalış ile en az azalma olurken maksimum silindir basıncı yerindeki değişiminde %87,8 artma olmaktadır. 6 Nm için, maksimum silindir basıncında, B20Co100 yakıt numunesinde %7,1 azalış ile en az azalma olurken maksimum silindir basıncı

yerindeki değişiminde %74 artma olmaktadır. 9 Nm için, maksimum silindir basıncında B0Co100 ve B20Co100 yakıt numunelerinde %11,3 azalış ile en az azalma olurken maksimum silindir basınç yerindeki değişiminde B0Co100 için %37,9 artma, B20Co100 için %50 artma olmaktadır. Genel olarak, B20Co100 yakıt numunesinin maksimum silindir basınç yerleri, diğer yakıt numunelerinden daha erken gerçekleşmiştir.

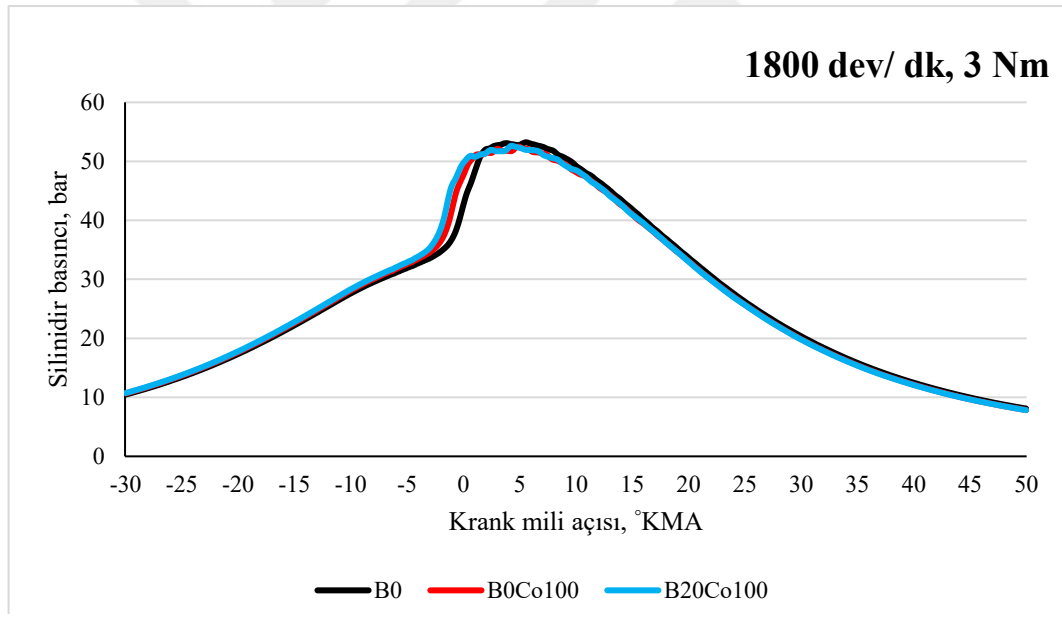
Maksimum ısı salınım oranında, aynı motor yüklerindeyken 1800 dev/dk'dan 3000 dev/dk'ya olan genel artışlarda; 3 Nm için B20Co100 yakıt numunesinde %59,1 ile en fazla artış olurken, 6 Nm için saf dizel yakıtı olan B0 numunesi %45,8 ile en fazla artmıştır ve 9 Nm için ise B20Co100 yakıt numunesi yine %40 ile en fazla artmıştır. Aynı motor devirlerindeyken 3 Nm'den 9 Nm'ye kadar olan genel değişimlerde; 1800 dev/dk için B0 yakıt numunesinde hiç azalma olmadığından en yüksek, 2400 dev/dk için B20Co100 yakıt numunesi %10,7 azalış ile en yüksektir ve 3000 dev/dk için ise B0 yakıt numunesi %18,4 azalış ile en yüksek olmuştur. Genel olarak, maksimum ısı salınım oranı en düşük olan yakıt numunesi B20Co100 olmuştur.

Egzoz sıcaklığı; bir yakıtın, ısı enerjisinin bir göstergesidir. Egzoz sıcaklığının yüksek olması; geç gerçekleşen yanmanın, egzozun sıcaklığında artışa neden olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum, yakıttan elde edilen ısı enerjisinin, faydalı işe dönüşme oranının, yani efektif olarak ısı verimin düşük olduğunun da göstergesidir. Ayrıca, özgül yakıt tüketiminde ve azot oksit emisyonlarında egzoz sıcaklıkları artışa neden olabilmektedir. Buradan; egzoz sıcaklığının, motor performansı ve egzoz emisyon karakteristiklerine etki ettiği anlaşılmaktadır (Emiroğlu vd., 2018c). Egzoz sıcaklığı, egzoz stroku ile daha çok ilişkilidir.

Aynı motor yüklerinde, 1800 dev/dk'dan 3000 dev/dk'ya olan genel artışlarda; 3 Nm için B0 yakıt numunesinde %14,9 ile en fazla artış olurken, 6 Nm için B0 yakıt numunesi %22,9 ile en fazla artmıştır ve 9 Nm için ise B0Co100 numunesi %24,6 ile en fazla artmıştır. Aynı motor devirlerinde, 3 Nm'den 9 Nm'ye kadar olan genel değişimlerde; 1800 dev/dk için B0 yakıt numunesi %61,5 artış ile en yüksek, 2400 dev/dk için, yine B0 yakıt numunesi %76 artış ile en yüksektir ve 3000 dev/dk için ise B0Co100 yakıt numunesi %67,9 artış ile en yüksek olmuştur. Egzoz sıcaklıkları, bütün motor devirleri ve yüklerinde genel olarak, B20Co100 yakıt numunesinde daha fazla olmuştur.

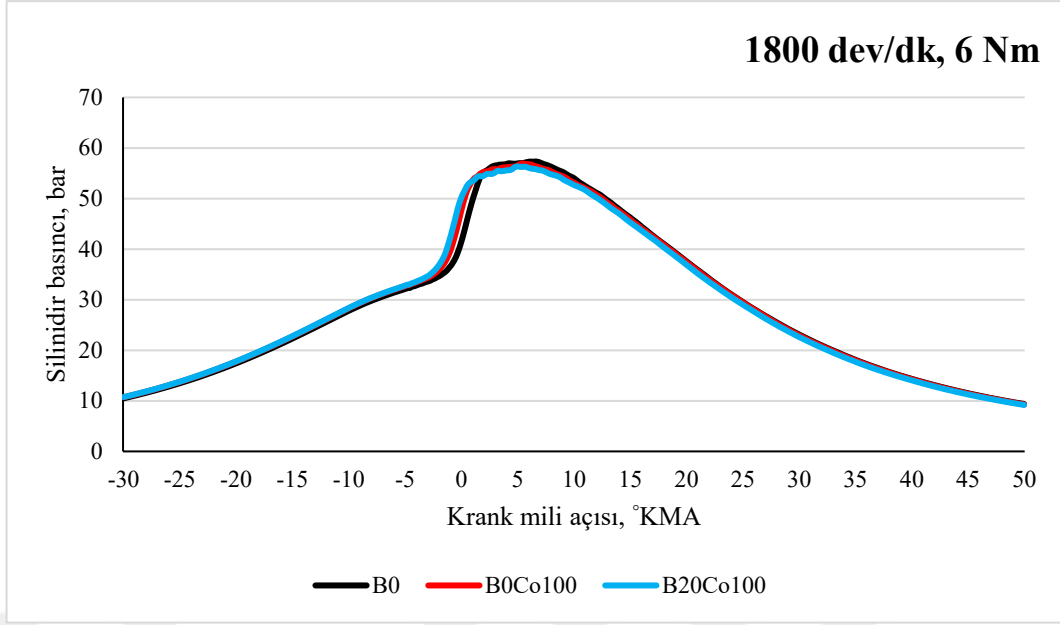
Yakıt enjeksiyon zamanlamasındaki değişimler, silindir basıncı ve net ısı salınım oranındaki değişimleri etkilemektedir. 100 ppm kobalt oksit nanopartikül katkısı, yakıt numunelerinin fiziksel özelliklerinden viskozite ve yoğunluğu, kimyasal özelliklerinden setan sayısı ve ısı değeri artırmıştır. Yanma karakteristiklerinden; motor performansı ve egzoz emisyon karakteristiklerini etkileyen, silindir basıncı ve net ısı salınım oranı, yakıtın ısı değeriinden etkilenmektedir (Emiroğlu vd., 2018b). Silindir basıncının, krank mili açısına göre değişiminin yer aldığı grafikler, sıkıştırma stroku ile daha çok ilişkiliyken; net ısı salınım oranının krank mili açısına göre değişiminin yer aldığı grafikler, genişleme (yanma) stroku ile daha çok ilişkilidir.

Şekil 3.1’den, Şekil 3.9’a kadar, deneyde kullanılan yakıt numunelerinin; artan motor devirleri ve motor yüklerine göre, krank mili açılara bağlı olarak silindir basınç eğrileri grafiklerde yer almaktadır.



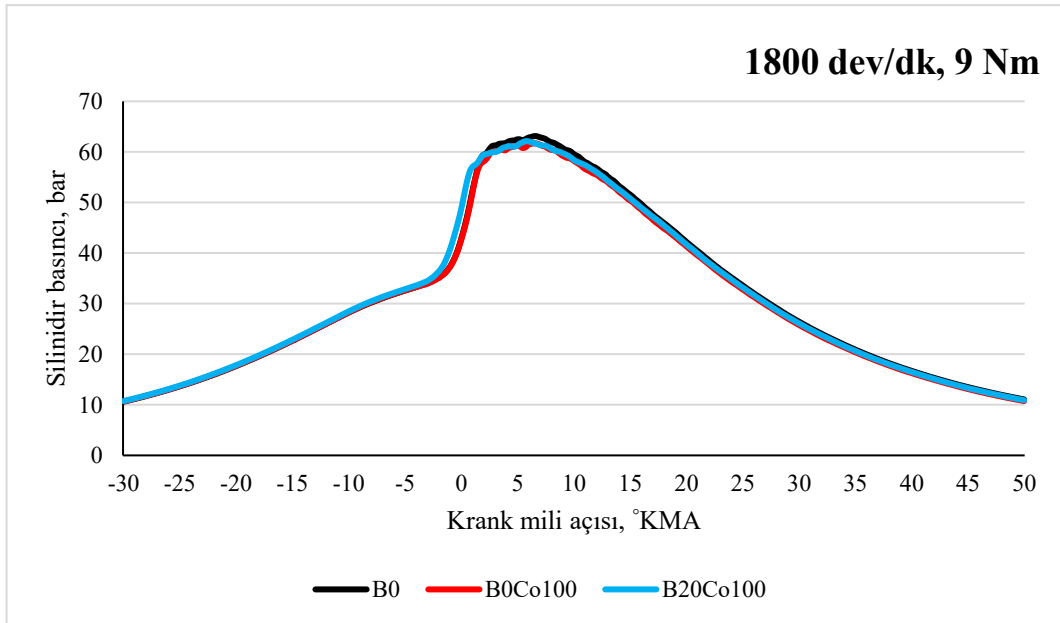
Şekil 3.1. 1800 dev/dk ve 3 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı silindir basınçlarının değişimi

Şekil 3.1’de, açık bir şekilde B20Co100 yakıt numunesinin yanma başlangıcı en erken gerçekleşmektedir.



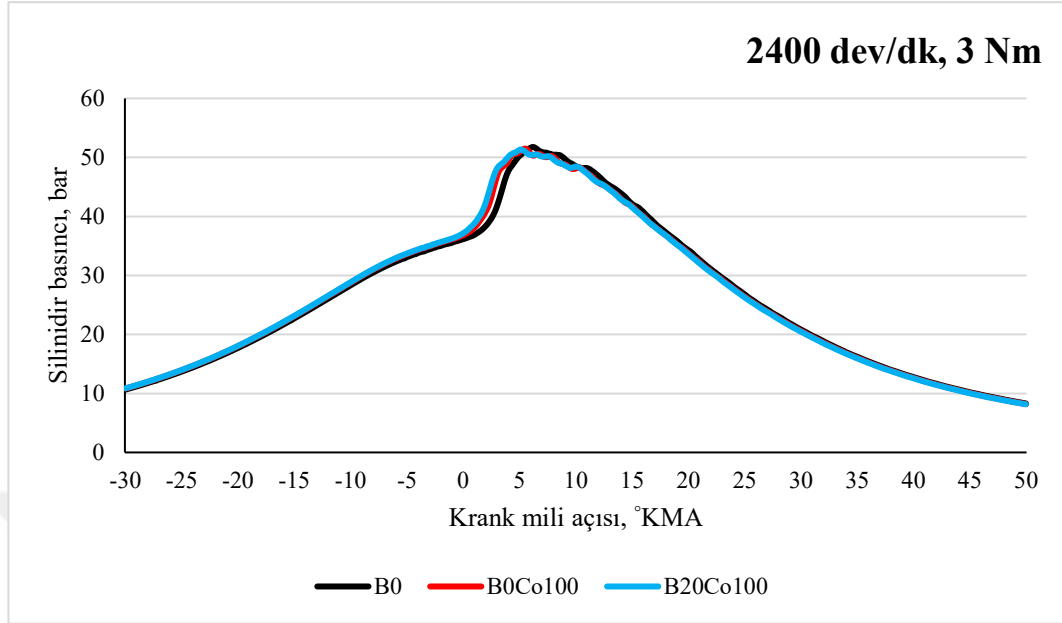
Şekil 3.2. 1800 dev/dk ve 6 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı silindir basınçlarının değişimi

Şekil 3.2’de, maksimum silindir basıncına karşılık gelen maksimum silindir basıncı yeri, en geç B0 yakıt numunesinde gerçekleşmiştir.

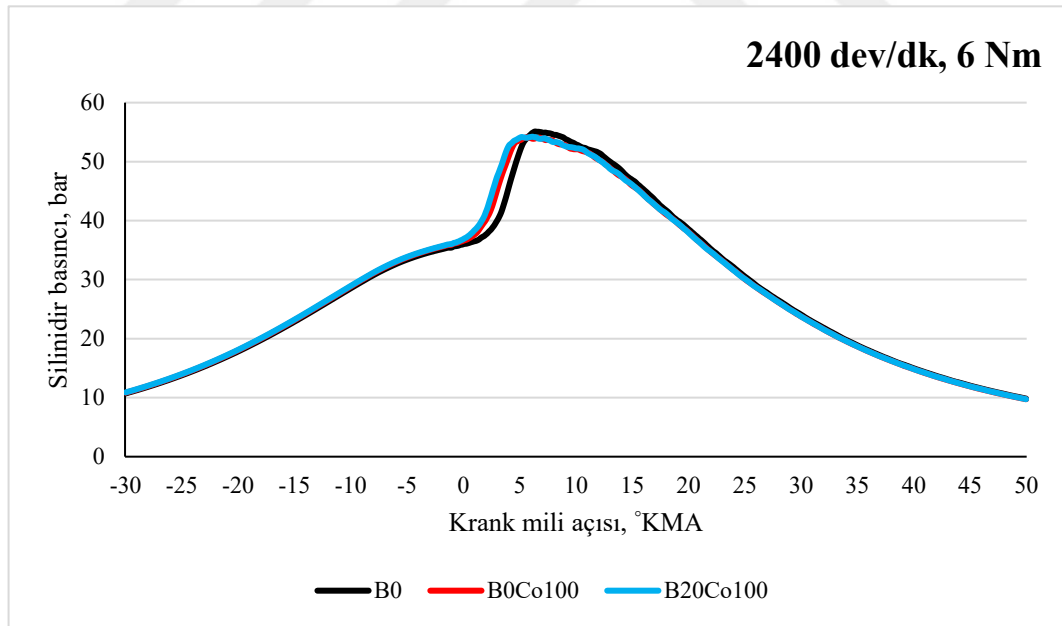


Şekil 3.3. 1800 dev/dk ve 9 Nm yükte yakıt numunelerinin KMA değerlerine bağlı silindir basınçlarının değişimi

Şekil 3.3'te, yanma süresi en kısa süren B0Co100 yakıt numunesidir.

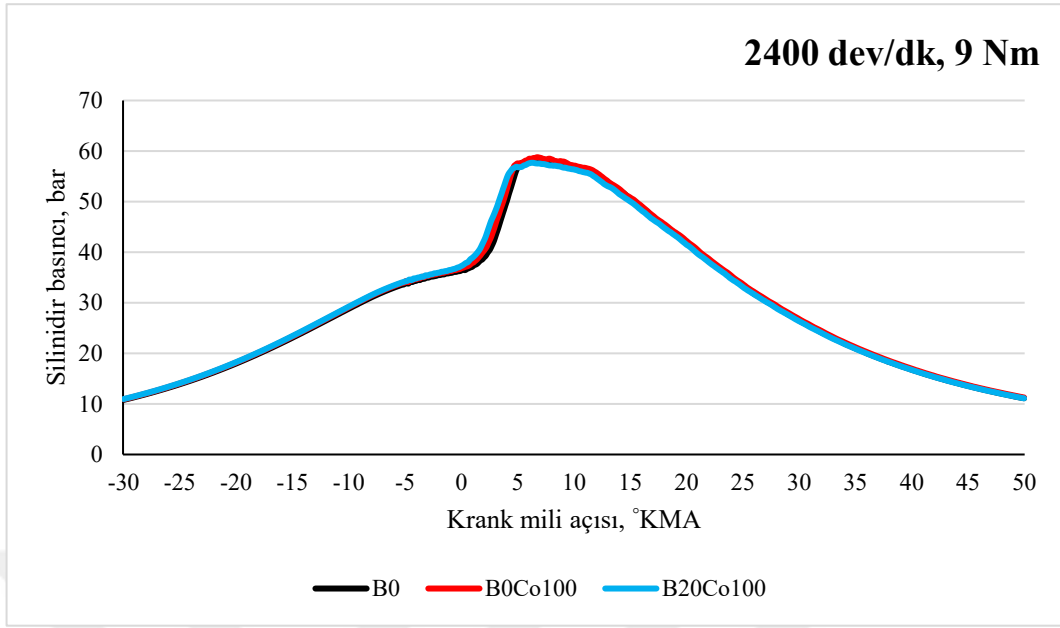


Şekil 3.4. 2400 dev/dk ve 3 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı silindir basınçlarının değişimi



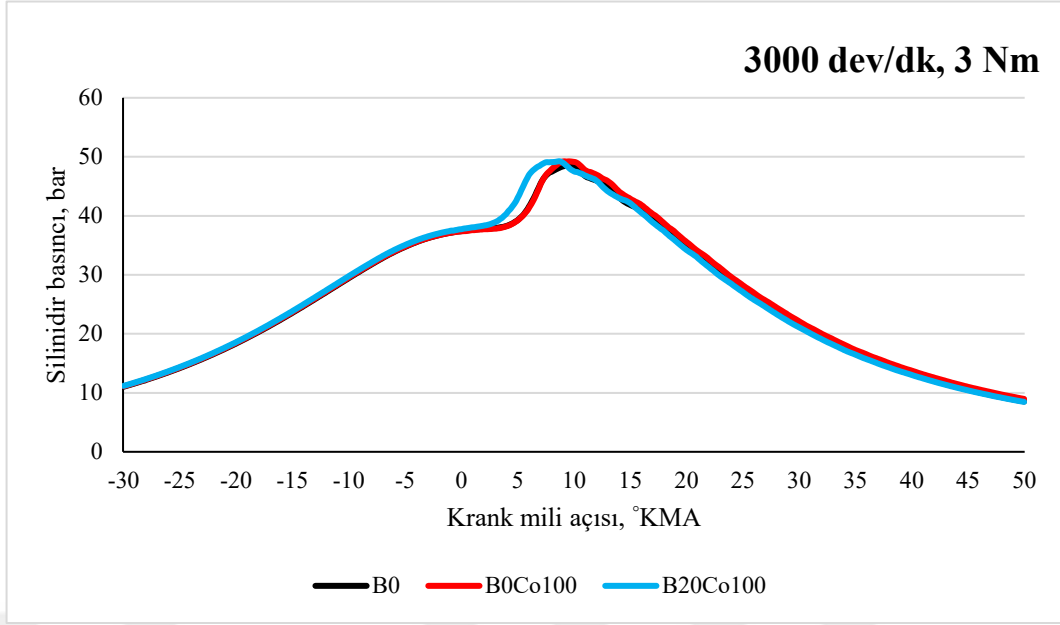
Şekil 3.5. 2400 dev/dk ve 6 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı silindir basınçlarının değişimi

Şekil 3.5'te, silindir basıncındaki ani artışın en geç B0 yakıt numunesinde gerçekleştiği görülmektedir.



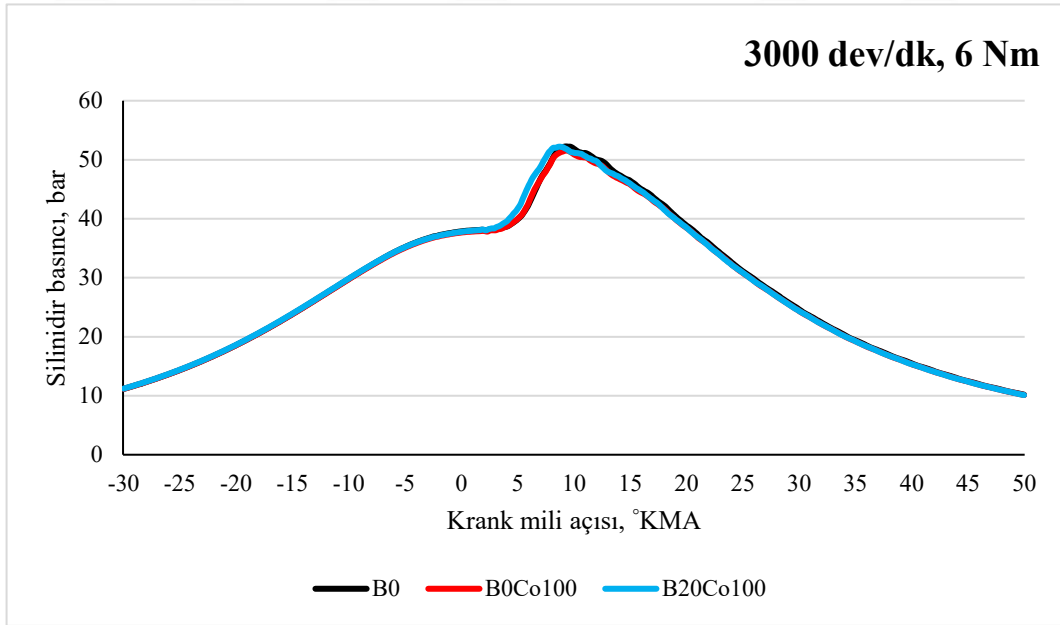
Şekil 3.6. 2400 dev/dk ve 9 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı silindir basınçlarının değişimi

Şekil 3.6’da, silindir basınçlarının değişimlerinin zirve noktasında B0Co100 yakıt numunesi bulunmaktadır.



Şekil 3.7. 3000 dev/dk ve 3 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı silindir basınçlarının değişimi

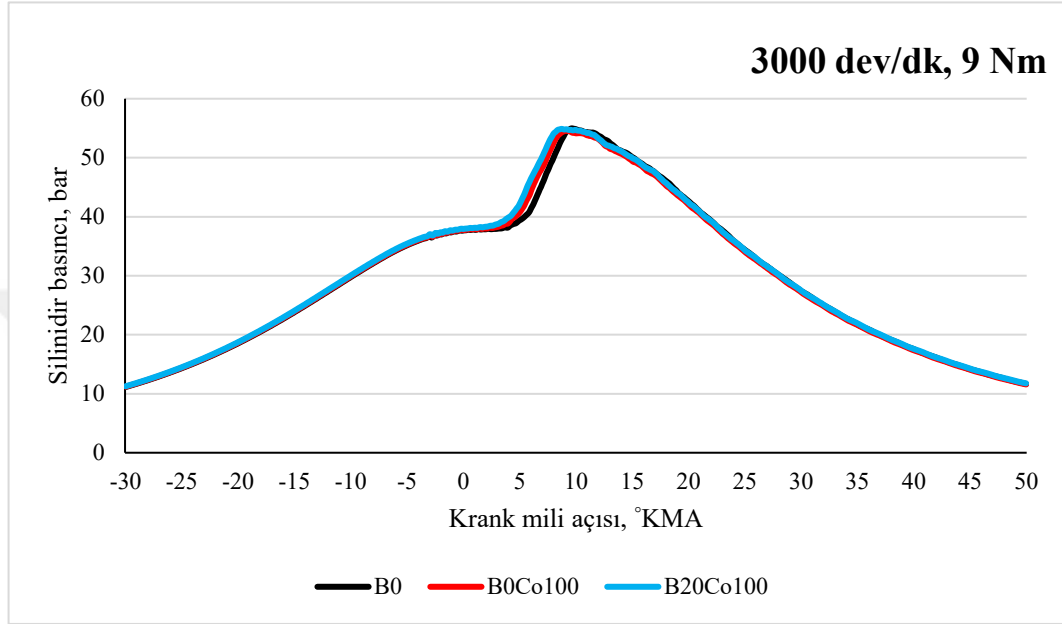
Şekil 3.7’de, silindir basınçları değişimindeki ani artışın en erken B20Co100 yakıt numunesinde gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 3.8. 3000 dev/dk ve 6 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı silindir basınçlarının değişimi

Şekil 3.8’de, sıkıştırma stroku sonunda, 0 °KMA değerine karşılık gelen üst ölü noktada, silindir basıncı en yüksek yakıt numunesinin B0 olduğu görülmektedir.

Şekil 3.9’da kontrollü yanma periyotlarının, en uzun B20Co100 yakıt numunesinde, arkasından B0Co100 ve en son B0 yakıt numunesinde olduğu görülmektedir.

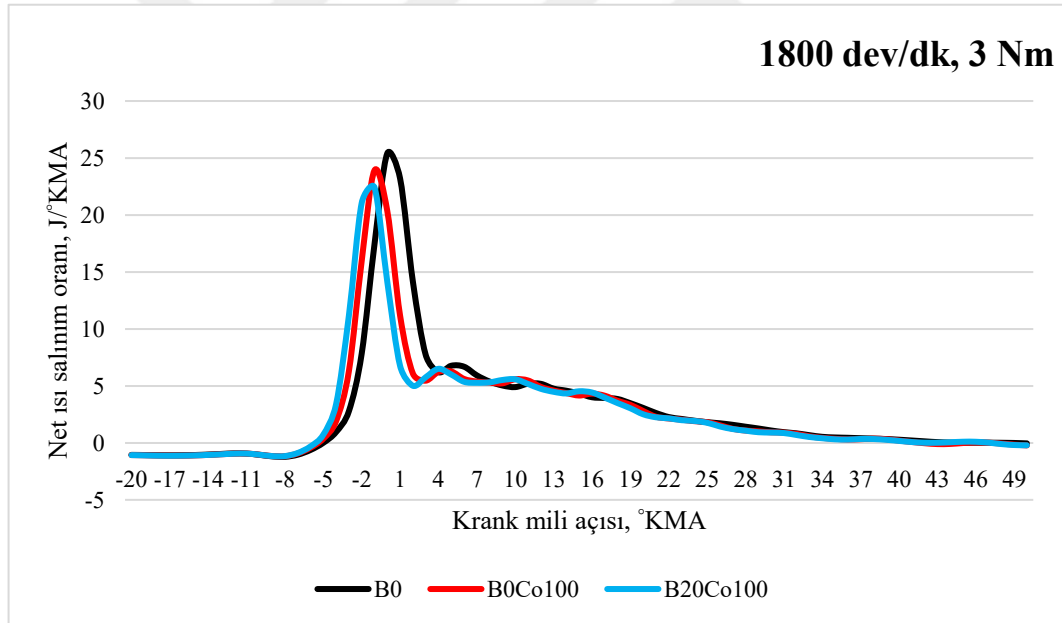


Şekil 3.9. 3000 dev/dk ve 9 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı silindir basınçlarının değişimi

Şekil 3.1’den, Şekil 3.9’a kadar olan grafiklerin tümü göz önüne alındığında, tüm yakıt numuneleri için motor yükü aynıyken, motor devri arttıkça genel olarak; tutuşma gecikmesi periyotlarının uzadığı, art yanmaların fazlaştığı, ani yanma periyotlarının başlangıçlarına karşılık gelen °KMA değerlerinin daha sonraya ötelendiği, silindir basınçlarının değişimlerdeki ani artışların boylarının kısaldığı, silindir basınçlarının değişimlerdeki zirve noktalarının düştüğü, kontrollü yanma periyotlarının daraldığı ve yanma sürelerinin kısaldığı saptanmaktadır. Ayrıca, silindir basınçların değişimlerdeki zirve noktalarında, B0 yerini B20Co100 yakıt numunesine bırakmaktadır. Motor devri aynıyken, motor yükü arttıkça genel olarak; ani yanma periyotlarının başlangıçlarına karşılık gelen °KMA değerlerinde yakıtların birbirlerini yakaladıkları, silindir basınçlarının değişimlerdeki ani artışların boylarının uzadığı, silindir basınçlarının değişimlerdeki zirve noktalarının yükseldiği, kontrollü yanma periyotlarının daraldığı ve yanma sürelerinin arttığı tespit edilmiştir.

Tutuşma gecikmesi sırasında silindirde biriken yakıtın buharlaşmasından dolayı negatif bir ısı salınımı olmaktadır, fakat yanma sırasında bu eğilim sonra pozitifte dönmektedir ve yakıtın yanma başlangıcı ile ani yanma periyodunda maksimum ısı salınım oranına ulaşmaktadır. Net ısı salınım oranı, yanmanın daha iyi anlaşılabilmesi için çok yararlı bir yanma karakteristiğidir. Net ısı salınım oranının analizi sayesinde yanma başlangıcı, yanma sonu kolayca tespit edilebilmektedir ve böylece yanma süresi de kaydedilebilmektedir. Silindir basıncında olduğu gibi net ısı salınım oranı da yakıtın kimyasal ve fiziksel özelliklerinden direkt etkilenmektedir (Emiroğlu vd., 2018c; Şen vd., 2018).

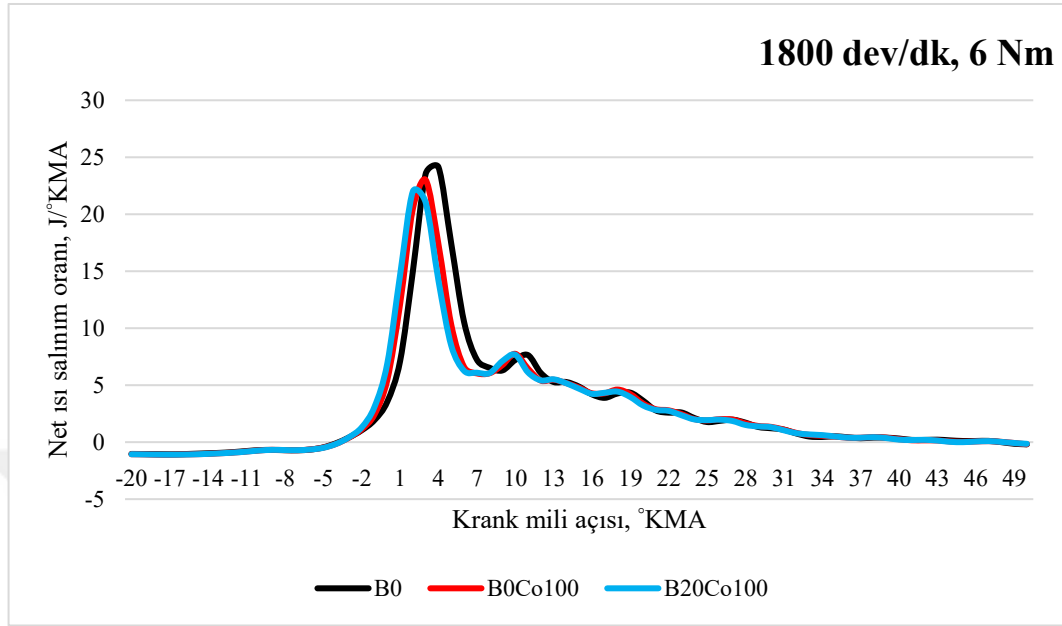
Şekil 3.10'dan, Şekil 3.18'e kadar, deneyde kullanılan yakıt numunelerinin; artan motor devirleri ve yüklere göre, krank mili açılara bağlı olarak net ısı salınım oranlarının değişimlerinden ortaya çıkan grafiklerdeki eğriler yer almaktadır.



Şekil 3.10. 1800 dev/dk ve 3 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı net ısı salınım oranlarının değişimi

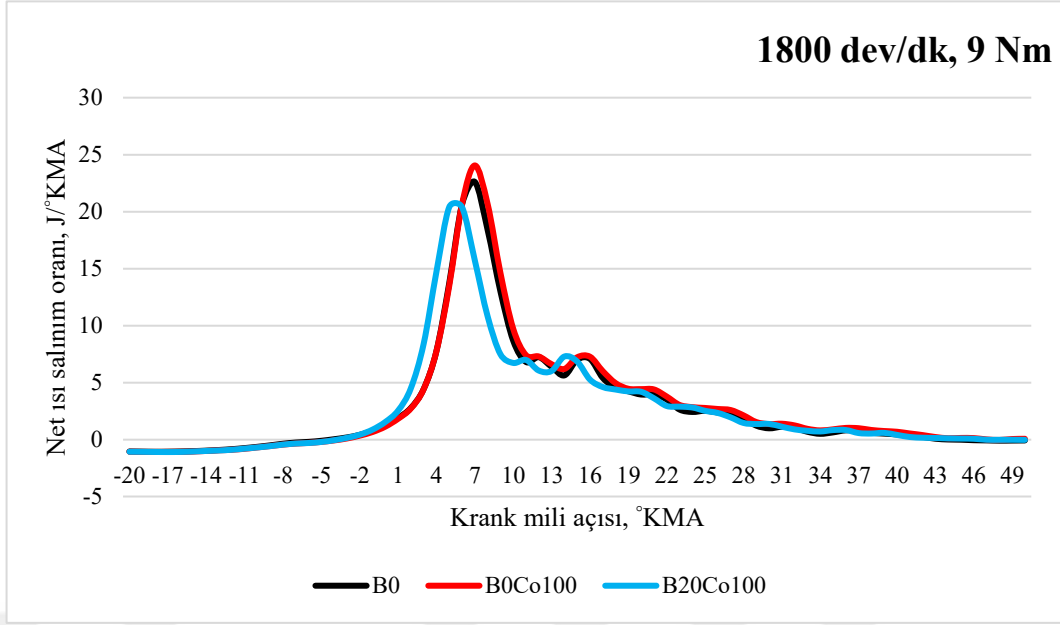
Şekil 3.10'da -20 ile -6 °KMA değerleri aralığı içerisinde, tüm yakıt numunelerinin buharlaşmaları sırasında negatif ısı salınımlarına bağlı olarak, grafikteki eğrilerde hafif aşağı yönlü eğilimlerin olduğu görülmektedir. Yanma başlangıçları ile sonrasında pozitifte geçerek, yukarı yönlü olarak ani artışlarla eğriler, maksimum ısı salınım oranı noktalarına doğru tırmanışa geçmişlerdir. Şekil

3.1’de, yanma başlangıcı en erken gerçekleşen B20Co100 yakıtının Şekil 3.10’da da buharlaşma başlangıcının en erken gerçekleştiği görülmektedir.



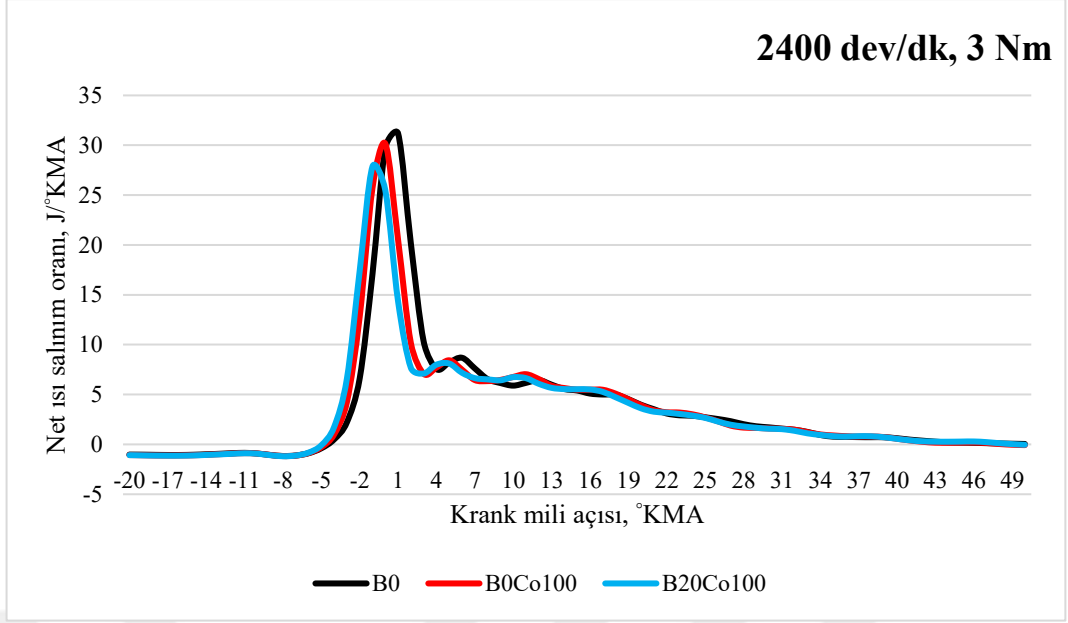
Şekil 3.11. 1800 dev/dk ve 6 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı net ısı salınım oranlarının değişimi

Şekil 3.11’de, Şekil 3.10’a göre, tüm yakıt numuneleri için tutuşma gecikmesi periyotlarının uzadığı ve en uzun süren yakıt numunesinin B0 olduğu görülürken, en az sürenin ise B20Co100 olduğu görülmüştür. Şekil 3.2’de maksimum silindir basınç yeri en geç gerçekleşen B0 yakıt numunesinin maksimum ısı salınım oranı da Şekil 3.11’de en geç gerçekleşirken, en erken gerçekleşen ise B20Co100 yakıt numunesidir.

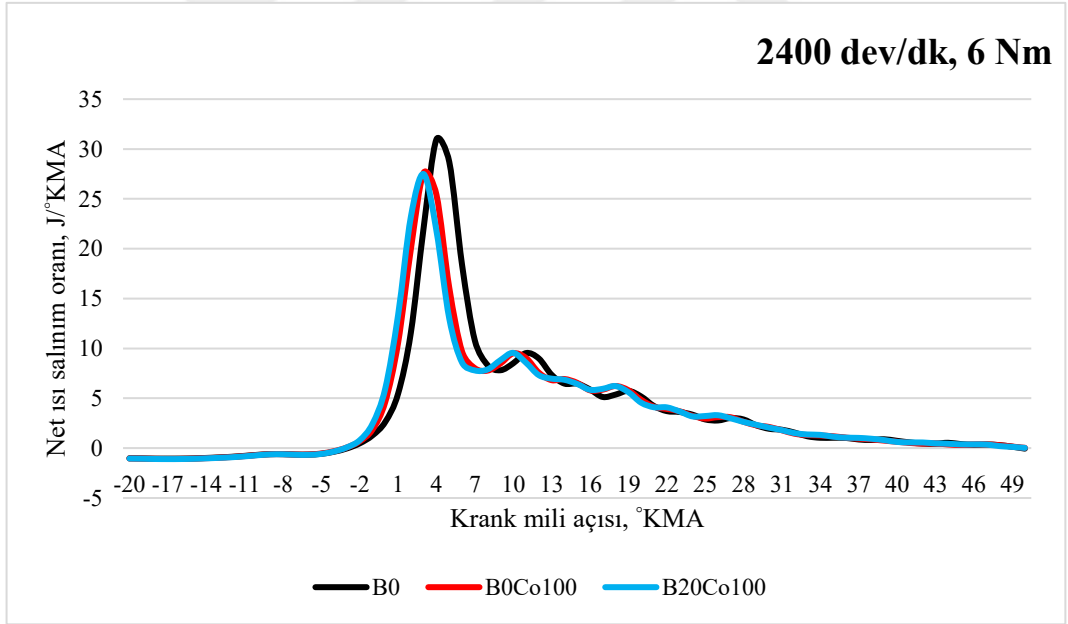


Şekil 3.12. 1800 dev/dk ve 9 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı net ısı salınım oranlarının değişimi

Şekil 3.3'te, yanma süresi en kısa gerçekleşen B0Co100 yakıt numunesinin Şekil 3.12'de de krank mili açısına göre net ısı salınım oranlarının değişiminde en yüksek maksimum ısı salınım oranını gerçekleştirdiği görülmektedir ve ayrıca, kaydedilen en düşük egzoz sıcaklığı değerine sahiptir.



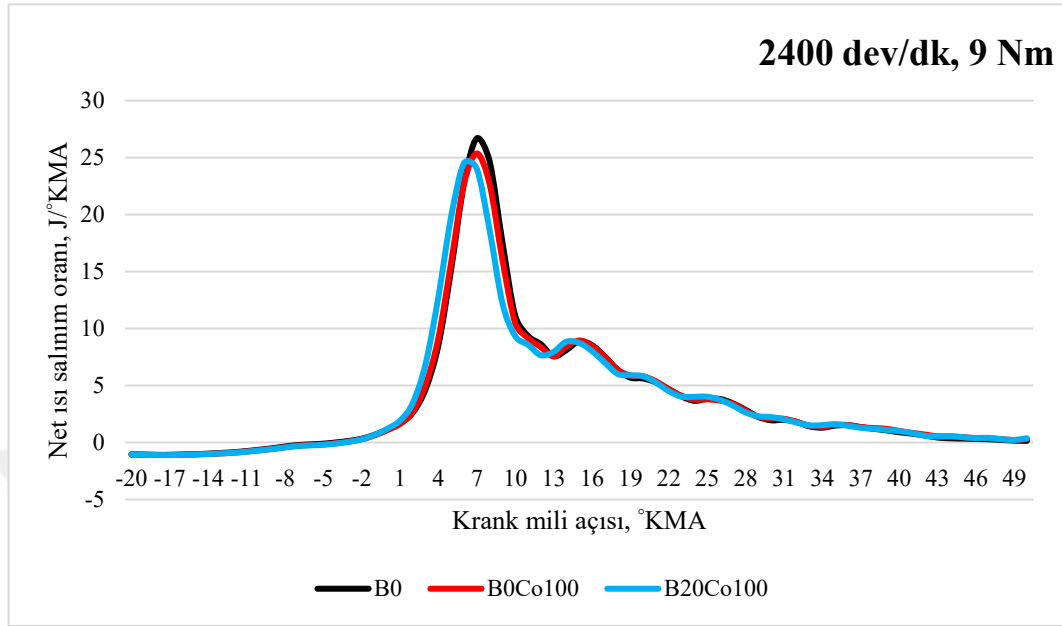
Şekil 3.13. 2400 dev/dk ve 3 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı net ısı salınım oranlarının değişimi



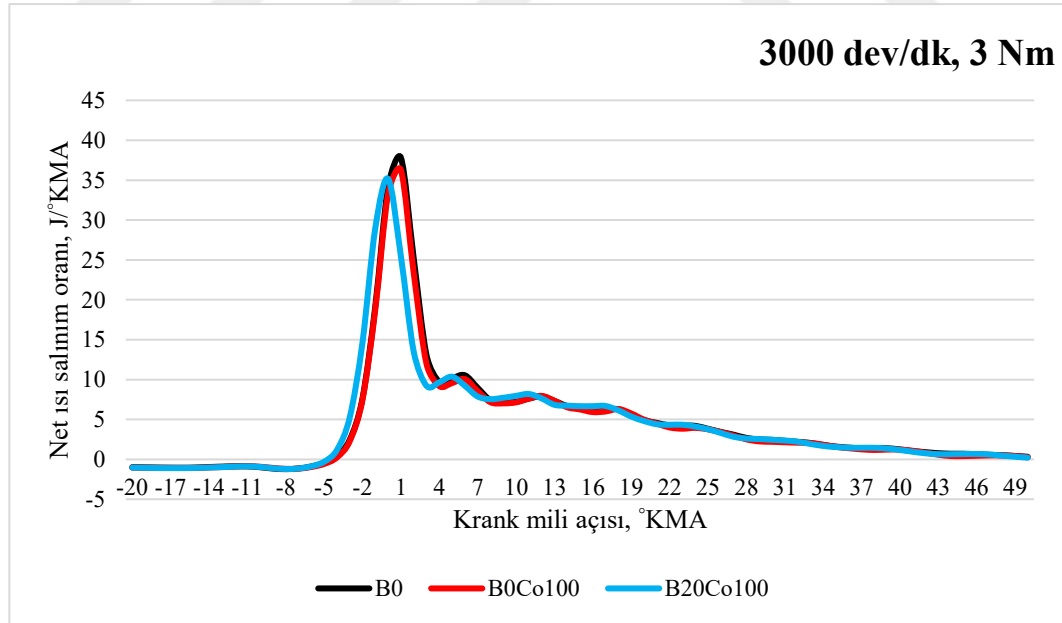
Şekil 3.14. 2400 dev/dk ve 6 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı net ısı salınım oranlarının değişimi

Şekil 3.5'te, Şekil 3.4'e göre, tüm yakıt numunelerinin silindir basınçlarının değişimlerindeki ani artışların ve maksimum silindir basınçlarının yükselmeleri göz önüne alınarak, tüm bunların etkisi olarak düşünüldüğünde Şekil 3.14'te, tüm yakıt numunelerinin, kontrollü yanma periyotlarında, 7 ile 12 °KMA aralığı içerisinde

Şekil 3.13'e göre artan bir tepe dalgası yaptıkları görülmektedir. Bu tepe dalgası en geç B0, en erken B20Co100 yakıt numunelerinde gerçekleşmiştir.

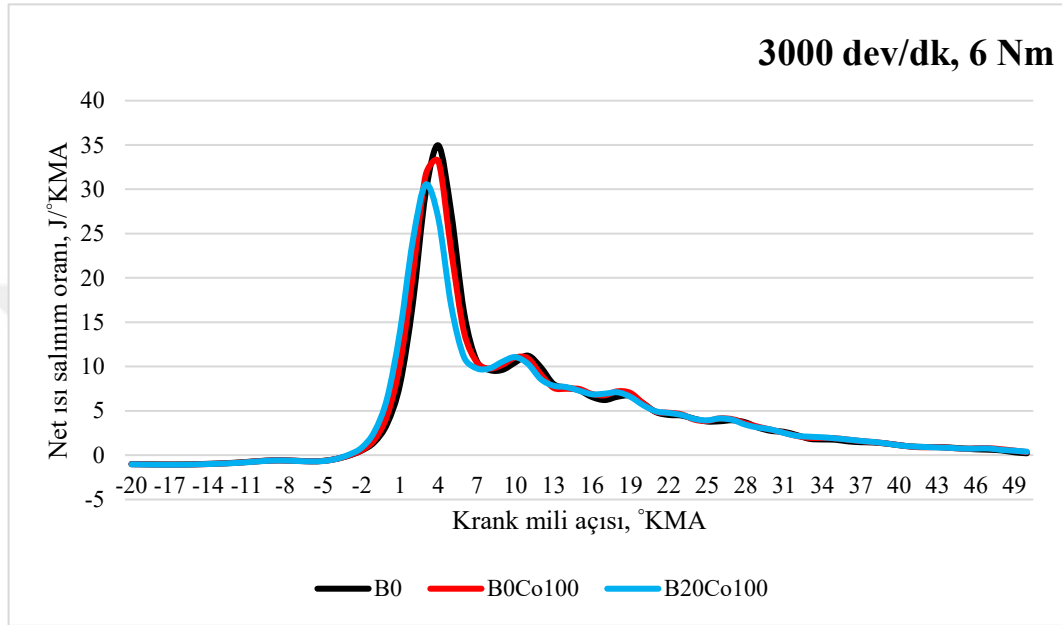


Şekil 3.15. 2400 dev/dk ve 9 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı net ısı salınım oranlarının değişimi



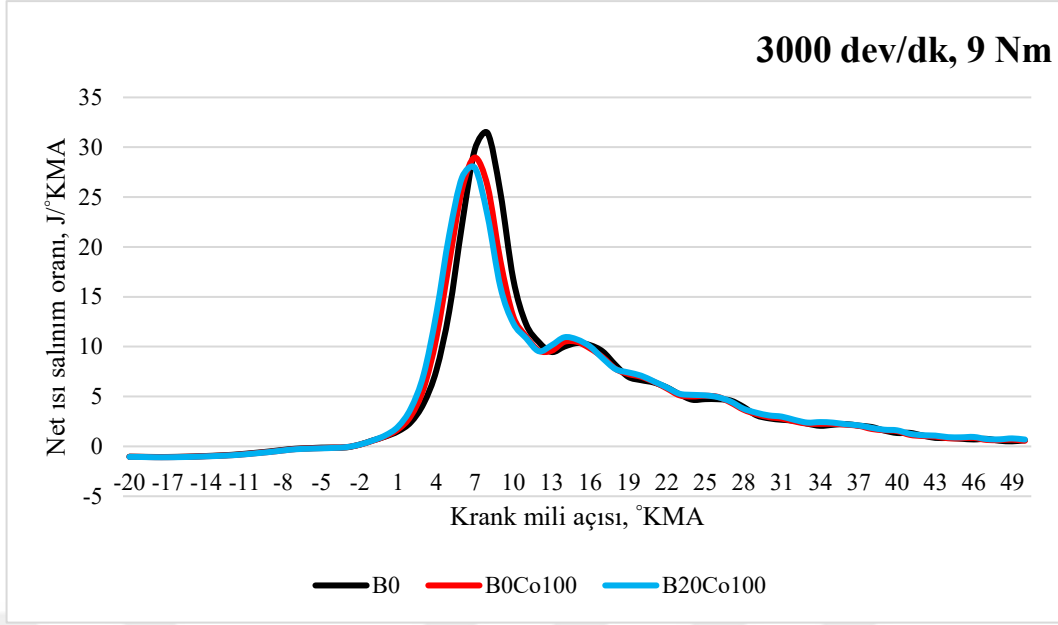
Şekil 3.16. 3000 dev/dk ve 3 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı net ısı salınım oranlarının değişimi

Şekil 3.7’de, tüm yakıt numunelerinin silindir basınçlarının değişimlerindeki ani artışları arasından en erken gerçekleşen B20Co100 yakıt numunesinin Şekil 3.16’da da buharlaşmasının ve yanma başlangıcının, diğer yakıt numunelerinden daha erken gerçekleştiği ve art yanma periyodunun daha düzgün olduğu görülmektedir.



Şekil 3.17. 3000 dev/dk ve 6 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı net ısı salınım oranlarının değişimi

Şekil 3.8’de, üst ölü noktaya karşılık gelen 0 °KMA değerinde silindir basıncı en yüksek olan B0 yakıt numunesinin Şekil 3.17’de, ani yanma periyodunu daha geç tamamladığı; setan sayıları ve oksijen içerikleri daha yüksek olan B20Co100 yakıt numunesinin en erken olmak üzere B0Co100 ile beraber, B0 yakıt numunesinden daha erken tamamladığı görülmektedir.



Şekil 3.18. 3000 dev/dk ve 9 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı net ısı salınım oranlarının değişimi

3000 dev/dk ve 9 Nm’de maksimum ısı salınım oranının en yüksek B0, en düşük B20Co100 yakıt numunesinde gerçekleştiği Tablo 3.2’de yer alırken Şekil 3.18’deki grafikte de görülmektedir.

Şekil 3.10’dan, Şekil 3.18’e kadar olan grafiklerin tümü göz önüne alındığında tüm yakıt numuneleri için, motor yükü aynıyken motor devri arttıkça; püskürtme ve yanma başlangıçlarında biraz gecikmelerin olduğu, tutuşma gecikmesi periyotlarının biraz uzadığı, ani yanmanın gerçekleştiği °KMA değerlerinin, ani yanma periyotlarının ve ani silindir basıncı artışı başlangıçlarına karşılık gelen °KMA değerlerinin biraz daha gecikmeli olarak gerçekleştiği, maksimum ısı salınım oranlarının yükseldiği, maksimum ısı salınım oranlarındaki gecikme farklarının biraz daha kapandığı, maksimum ısı salınım oranı ile ani silindir basıncı artışı başlangıcı arasındaki farkın biraz azaldığı, yanma sonu ve kontrollü yanma periyotlarının biraz daha sonraya geciktiği, art yanmaların arttığı bulunmaktadır.

Genel olarak, net ısı salınım oranlarının zirve noktalarında B0, en düşük gerçekleşen maksimum noktalarında B20Co100 yakıt numunesi olmuştur.

Motor devri aynıyken motor yükü arttıkça; püskürtme ve yanma başlangıçlarında biraz gecikmelerin olduğu, ani yanmanın gerçekleştiği °KMA değerlerinin ve ani silindir basıncı artışı başlangıçlarına karşılık gelen °KMA

değerlerinin biraz daha geciktiği, ani yanma periyotlarının uzadığı, maksimum ısı salınım oranlarında azalma eğilimi olduğu, maksimum ısı salınım oranı ile ani silindir basıncı artışı başlangıcı arasındaki farkın biraz azaldığı, yanma sonu ve kontrollü yanma periyotlarının biraz daha gecikerek gerçekleştiği, art yanmaların arttığı ortaya konmaktadır.

Genel olarak, net ısı salınım oranlarının zirve noktalarında B0, en düşük gerçekleşen maksimum ısı salınım oranlarında B20Co100 yakıt numunesi bulunmaktadır.

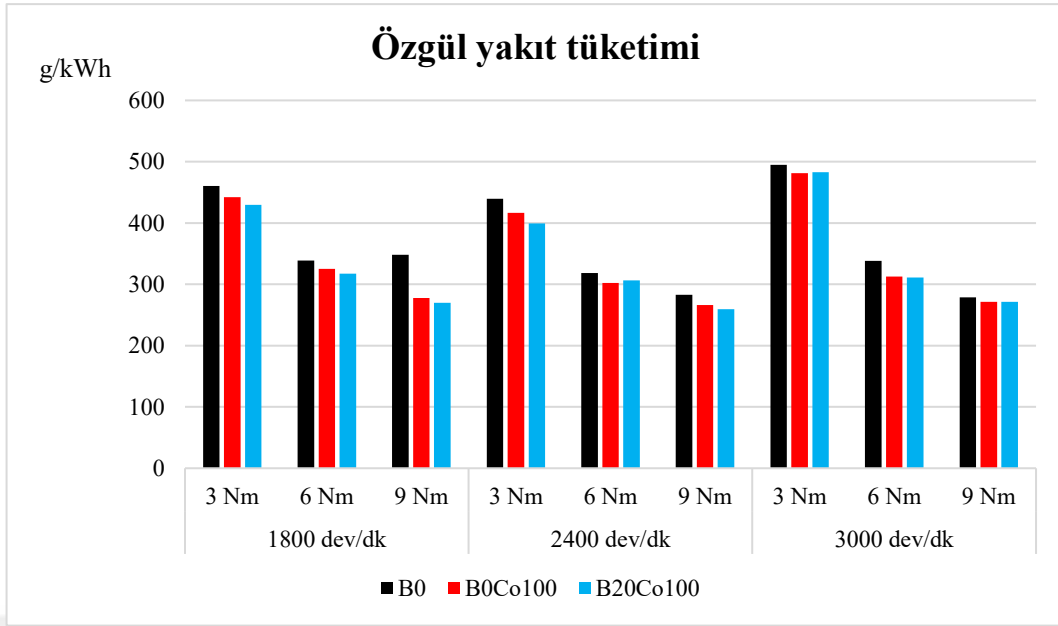
Artan yakıt miktarı ile ani yanma periyotları daha uzun sürmektedir.

Maksimum silindir basınçları, maksimum ısı salınım oranlarının olduğu tepe noktalarından sonraki biraz azalmanın olduğu yerlere karşılık gelen °KMA değerlerinde meydana gelmektedir. Yani, maksimum silindir basınç yerleri, maksimum ısı salınım oranlarının gerçekleştiği °KMA değerlerinden daha geç gerçekleşmiştir. İstisna olarak; 9 Nm motor yükü altında, 1800 ve 2400 dev/dk motor devirlerindeki grafiklerde pek öyle olmadığı görülmektedir.

3.2 Motor Performans Karakteristikleri

Yanma karakteristikleri, motor performans karakteristiklerine etki etmektedir. Yanma karakteristiklerinin optimal gerçekleşmesi, motor performans karakteristiklerinin daha iyi gerçekleşmesini sağlayacaktır.

Motor performansı karakteristiklerinin daha iyi gerçekleşmesi, bulunduğu sistemde fiilen olumlu fayda sağlayacaktır. Ortaya çıkan motor performans parametreleri doğru incelendiğinde, sistemde gerçekleşen faydalar ve kayıplar yönlerinden bilgilendirici olacaktır. Bunun için, özgül yakıt tüketimleri ve efektif ısı verimlerinin incelenmesi önemlidir. Şekil 3.19'daki grafikte, değişen motor devirleri ve yüklerine göre, tüm yakıt numunelerinin özgül yakıt tüketimleri bulunmaktadır.



Şekil 3.19. Değişen motor devirleri ve yüklerine göre tüm yakıt numunelerinin özgül yakıt tüketimleri

Yakıtlarda viskozitenin yüksek olması, özgül yakıt tüketimlerini artırmasına karşın; yoğunluk, ısıl değer ve oksijen içeriği değerlerinin yüksek olması ise özgül yakıt tüketimlerini azaltmaktadır (Şen vd., 2018; Yeşilyurt, 2017).

Şekil 3.19’da da görüleceği üzere, tüm motor yükleri ve devirlerinde genel olarak; en düşük özgül yakıt tüketimine sahip olan yakıt numunesi B20Co100 olurken, en yüksek özgül yakıt tüketimine B0 yakıt numunesi sahip olmuştur. B20Co100, viskozite değeri en yüksek, ısıl değeri en düşük olmasına rağmen yoğunluk ve oksijen içeriği en yüksek yakıt numunesidir.

Özgül yakıt tüketiminin zirvesi, 3 Nm yük altında 3000 dev/dk’dayken 495 g/kWh ile B0 yakıt numunesinde gerçekleşirken; en dip, 9 Nm yük altında 2400 dev/dk’dayken 259,5 g/kWh ile B20Co100 yakıt numunesinde gerçekleşmiştir.

Genelin dışında, orta devir ve yük ile yüksek devir ve düşük yükte B0Co100 yakıt numunesi en düşük özgül yakıt tüketimine sahip olmuştur.

3 Nm motor yükü altında motor devirleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %4,5 azalış, ikinci ara değişiminde %12,6 artış, genel değişiminde %7,5 artış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %5,8 azalış, ikinci ara değişiminde %15,6 artış, genel değişiminde %8,9 artış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %7,10 azalış, ikinci ara değişiminde %21 artış,

genel değişiminde %12,4 artış gerçekleşmiştir. Olumlu değişimler en çok B20Co100 yakıt numunesinde gerçekleşmiştir.

6 Nm motor yükü altında motor devirleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %6 azalış, ikinci ara değişiminde %6,2 artış, genel değişiminde %0,2 azalış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %7,1 azalış, ikinci ara değişiminde %3,3 artış, genel değişiminde %4 azalış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %3,5 azalma, ikinci ara değişiminde %1,5 artış, genel değişiminde %2,1 azalış gerçekleşmiştir.

9 Nm motor yükü altında motor devirleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %18,7 azalış, ikinci ara değişiminde %1,6 azalış, genel değişiminde %20 azalış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %4,2 azalış, ikinci ara değişiminde %2,1 artış, genel değişiminde %2,2 azalış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %3,9 azalış, ikinci ara değişiminde %4,7 artış, genel değişiminde %0,6 artış gerçekleşmiştir.

Tüm motor yüklerine bakıldığında, yakıt numunelerinin genel olarak en düşük özgül yakıt tüketimleri, özellikle kobalt oksit nanopartikül katkılı yakıt numunelerinde daha net fark edilerek, 2400 dev/dk orta motor devrinde gerçekleşmiştir.

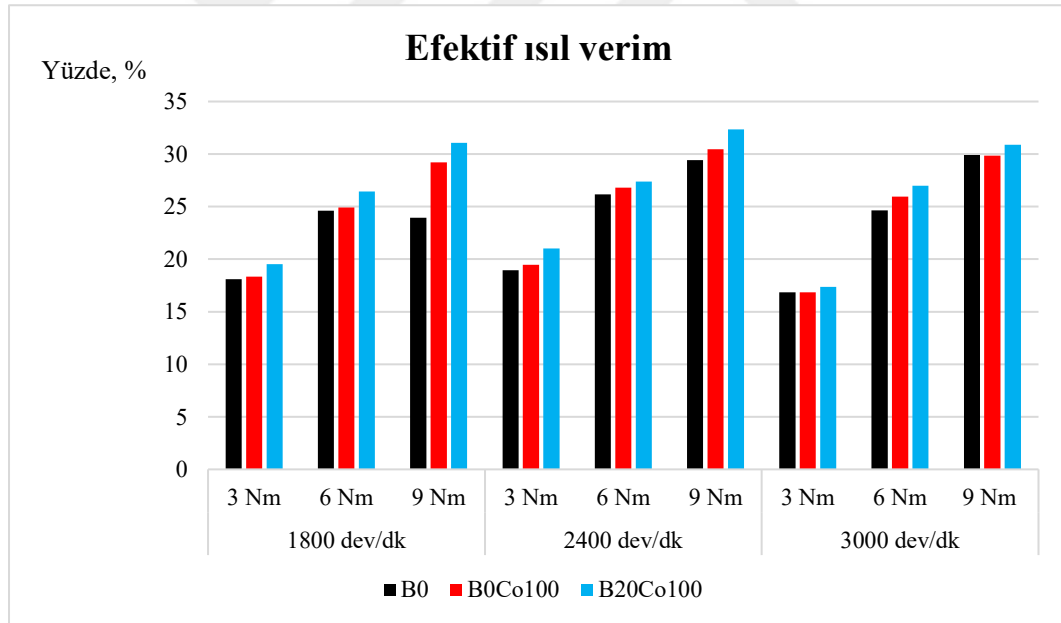
1800 dev/dk motor devrinde, motor yükleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %26,5 azalış, ikinci ara değişiminde %2,7 artış, genel değişiminde %24,5 azalış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %26,4 azalış, ikinci ara değişiminde %14,7 azalış, genel değişiminde %37,2 azalış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %26,1 azalış, ikinci ara değişiminde %15 azalış, genel değişiminde %37,2 azalış gerçekleşmiştir. En fazla olumlu değişimler B20Co100 yakıt numunesinde gerçekleşmiştir. Sadece, 6 Nm'den 9 Nm motor yüküne geçerken ki ikinci ara değişimde B0 yakıt numunesinin özgül yakıt tüketimi artmıştır.

2400 dev/dk motor devrinde, motor yükleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %27,6 azalış, ikinci ara değişiminde %11,1 azalış, genel değişiminde %35,6 azalış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %27,4 azalış, ikinci ara değişiminde %12 azalış, genel değişiminde %36,1 azalış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %23,3 azalış, ikinci ara değişiminde %15,3 azalış, genel değişiminde %35,1 azalış gerçekleşmiştir. Tüm yakıt numunelerinde olumlu değişimler gerçekleşmiştir.

3000 dev/dk motor devrinde, motor yükleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %31,8 azalış, ikinci ara değişiminde %17,6 azalış, genel değişiminde %43,8 azalış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %35 azalış, ikinci ara değişiminde %13,1 azalış, genel değişiminde %43,5 azalış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %35,6 azalış, ikinci ara değişiminde %12,7 azalış, genel değişiminde %43,7 azalış gerçekleşmiştir. Tüm yakıt numunelerinde olumlu değişimler gerçekleşmiştir. Özgül yakıt tüketimleri, birbirlerine en yakın 9 Nm motor yükü altındayken gerçekleşmiştir.

Tüm motor devirlerine bakıldığında, yakıt numunelerinin genel olarak en düşük özgül yakıt tüketimleri, özellikle kobalt oksit nanopartikül katkılı yakıt numunelerinde daha net fark edilerek, 9 Nm motor yükü altındayken gerçekleşmiştir.

Şekil 3.20’de, değişen motor devirleri ve yüklerine göre, tüm yakıt numunelerinin efektif ısı verimleri bulunmaktadır.



Şekil 3.20. Değişen motor devirleri ve yüklerine göre tüm yakıt numunelerinin efektif ısı verimleri

Yakıtlarda; oksijen içeriğinin yüksek, tutuşma gecikmesi ve yanma süresinin kısa, ısı değeri ve dolayısıyla maksimum ısı salınım değerinin daha yüksek olması, efektif ısı verimi artırmaktadır (Emiroğlu vd., 2018b; Şen vd., 2018).

Şekil 3.20’de de görüleceği üzere, tüm motor yükleri ve devirlerinde genel olarak; en yüksek efektif ısı verim B20Co100 yakıt numunesinde olurken, en düşük efektif ısı verim B0 yakıt numunesinde olmuştur. B20Co100, ısı değeri ve genel olarak gerçekleşen maksimum ısı salınım değerleri en düşük yakıt numunesi olmasına karşın, oksijen içeriği en yüksek yakıt numunesidir. Ayrıca, genel olarak; püskürtme başlangıcı en geç, tutuşma gecikmesi en kısa, tutuşana kadar biriken yakıt miktarı en az, yanma başlangıcı en erken yakıt numunesidir.

Efektif ısı verimin zirvesi, 9 Nm yük altında 2400 dev/dk’dayken %32,3 ile B20Co100 yakıt numunesinde gerçekleşirken; en dip, 3 Nm yük altında 3000 dev/dk’dayken %16,8 ile B0 yakıt numunesinde gerçekleşmiştir.

Genelin dışında, yüksek devir ve yükte, yanma odalarına gönderilen yakıt miktarları fazla iken, B0Co100 yakıt numunesi en düşük efektif ısı verime sahip olmuştur ki burada da B0Co100 yakıt numunesi en yüksek ısı değere sahip ve oksijen içeriği, saf dizel yakıtı olan B0 yakıt numunesinden daha yüksek olmasına rağmen, maksimum ısı salınım oranında daha düşük değere sahip olması onu bu devir ve yükte efektif ısı verimi en düşük konuma getirmiş olabilir.

3000 dev/dk ve 9 Nm yükte, tüm yakıt numunelerinin maksimum basınç değerleri aynı iken, kaydedilen en düşük egzoz sıcaklığı değerinin B0Co100 yakıt numunesinde olması zaten, en düşük efektif ısı verimi meydana getirecek yanma ortamının silindirde, B0Co100 yakıt numunesi kullanılıyorken geliştiğini gösteriyor olabilir.

3 Nm motor yükü altında motor devirleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %4,7 artış, ikinci ara değişiminde %11,2 azalış, genel değişiminde %7 azalış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %6,2 artış, ikinci ara değişiminde %13,5 azalış, genel değişiminde %8,1 azalış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %7,6 artış, ikinci ara değişiminde %17,3 azalış, genel değişiminde %11 azalış gerçekleşmiştir. En iyi olumlu değişimler, tüm yakıt numunelerinde motor devri 1800 dev/dk’dan 2400 dev/dk’ya yükseldiğinde olmuştur.

6 Nm motor yükü altında motor devirleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %6,4 artış, ikinci ara değişiminde %5,8 azalış, genel değişiminde %0,2 artış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %7,6 artış, ikinci ara değişiminde %3,2 azalış, genel değişiminde %4,1 artış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %3,6 artış, ikinci ara değişiminde %1,5 azalış,

genel değişiminde %2,1 artış gerçekleşmiştir. B0Co100, ilk ara ve genel değişimde en fazla olumlu değişim gösteren yakıt numunesidir.

9 Nm motor yükü altında motor devirleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %22,9 artış, ikinci ara değişiminde %1,7 artış, genel değişiminde %25 artış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %4,3 artış, ikinci ara değişiminde %2 azalış, genel değişiminde %2,2 artış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %4 artış, ikinci ara değişiminde %4,5 azalış, genel değişiminde %0,6 azalış gerçekleşmiştir. B0 yakıt numunesi, en fazla olumlu değişimler gösteren yakıt numunesi olmuştur.

Tüm motor yüklerine bakıldığında, yakıt numunelerinin genel olarak en yüksek efektif ısı verimleri, 2400 dev/dk orta motor devrinde gerçekleşmiştir.

1800 dev/dk motor devrinde, motor yükleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %36,4 artış, ikinci ara değişiminde %2,7 azalış, genel değişiminde %32,5 artış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %35,7 artış, ikinci ara değişiminde %17,2 artış, genel değişiminde %59,1 artış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %35,3 artış, ikinci ara değişiminde %17,7 artış, genel değişiminde %59,3 artış gerçekleşmiştir. En fazla olumlu değişimler B20Co100 yakıt numunesinde gerçekleşmiştir. Sadece, 6 Nm'den 9 Nm motor yüküne geçerken ki ikinci ara değişimde B0 yakıt numunesinin efektif ısı verimi azalmıştır.

2400 dev/dk motor devrinde, motor yükleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %38 artış, ikinci ara değişiminde %12,4 artış, genel değişiminde %55,4 artış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %37,8 artış, ikinci ara değişiminde %13,8 artış, genel değişiminde %56,4 artış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %30,5 artış, ikinci ara değişiminde %18,1 artış, genel değişiminde %54 artış gerçekleşmiştir. Tüm yakıt numunelerinde olumlu değişimler gerçekleşmiştir.

3000 dev/dk motor devrinde, motor yükleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %46,5 artış, ikinci ara değişiminde %21,3 artış, genel değişiminde %77,6 artış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %54,1 artış, ikinci ara değişiminde %15 artış, genel değişiminde %77 artış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %55,6 artış, ikinci ara değişiminde %14,5 artış, genel değişiminde %78 artış gerçekleşmiştir. Tüm yakıt numunelerinde

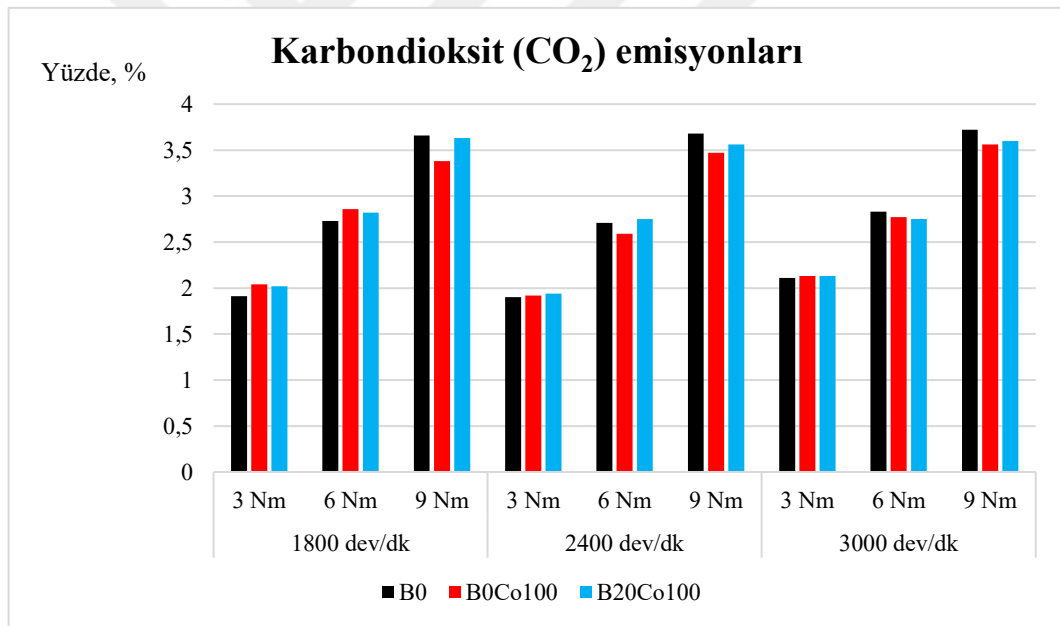
olumlu değişimler gerçekleşmiştir. Efektif ısı verimleri, birbirlerine en yakın 3 Nm motor yükü altındayken gerçekleşmiştir.

Tüm motor devirlerine bakıldığında, yakıt numunelerinin genel olarak en yüksek efektif ısı verimleri, 9 Nm motor yükü altındayken gerçekleşmiştir.

3.3 Egzoz Emisyon Karakteristikleri

Dizel motorlarda, yanma karakteristiklerinin optimal gerçekleşmesiyle motor performans karakteristiklerinin daha iyi gerçekleşmesinin yanında egzoz emisyon karakteristiklerine de daha olumlu yansımaktadır.

Karbondioksit emisyonu, iyi yanma gerçekleştiğinin göstergesi olarak tam yanma ürünü, kararlı bileşik yapısındaki düzensiz emisyondur. Şekil 3.21’de, değişen motor devirleri ve yüklerine göre tüm yakıt numunelerinin gerçekleşen karbondioksit emisyonlarının yüzdeleri yer almaktadır.



Şekil 3.21. Değişen motor devirleri ve yüklerine göre tüm yakıt numunelerinin karbondioksit emisyonlarının yüzdeleri

Şekil 3.21’de de görüleceğİ üzere, tüm motor yükleri ve devirlerinde çoğunlukla; en yüksek karbondioksit emisyonları B20Co100 yakıt numunesinde gerçekleşirken, en düşük karbondioksit emisyonları B0Co100 yakıt numunesinde gerçekleşmiştir. Karbondioksit emisyonunun zirvesi, 9 Nm yük altında 3000 dev/dk’dayken %3,72 ile B0 yakıt numunesinde gerçekleşirken; en dibi, 3 Nm yük

altında 2400 dev/dk'dayken %1,9 ile yine B0 yakıt numunesinde gerçekleşmiştir. Literatürde benzer sonuçlara rastlanılmaktadır.

3 Nm motor yükü altında motor devirleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %0,5 azalış, ikinci ara değişiminde %11 artış, genel değişiminde %10,5 artış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %6,9 azalış, ikinci ara değişiminde %10,9 artış, genel değişiminde %4,4 artış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %3,9 azalış, ikinci ara değişiminde %9,8 artış, genel değişiminde %5,4 artış gerçekleşmiştir. En iyi olumlu değişimler, tüm yakıt numunelerinde, motor devri 1800 dev/dk'dan 2400 dev/dk'ya yükseldiğinde gerçekleşmiştir. Çünkü, bu ara değişimde, tüm yakıt numunelerinin karbondioksit emisyonları azalmıştır.

6 Nm motor yükü altında motor devirleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %0,7 azalış, ikinci ara değişiminde %4,4 artış, genel değişiminde %3,7 artış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %9,4 azalış, ikinci ara değişiminde %6,9 artış, genel değişiminde %3,1 azalış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %2,5 azalış, ikinci ara değişimi yok, genel değişiminde %2,5 artış gerçekleşmiştir. B0, genel değişimde olumsuz değişim gösteren tek yakıt numunesidir.

9 Nm motor yükü altında motor devirleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %0,5 artış, ikinci ara değişiminde %1,1 artış, genel değişiminde %1,6 artış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %2,7 artış, ikinci ara değişiminde %2,6 artış, genel değişiminde %5,3 artış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %1,9 azalış, ikinci ara değişiminde %1,1 artış, genel değişiminde %0,8 azalış gerçekleşmiştir. B0Co100 yakıt numunesi, karbondioksit emisyonlarının değişimlerinde en fazla artış gösteren yakıt numunesi olmuştur.

Tüm motor yüklerine bakıldığında, artan motor devirlerine göre, yakıt numunelerinin karbondioksit emisyonlarının dağılımları değişkenlik göstermektedir.

1800 dev/dk motor devrinde, motor yükleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %42,9 artış, ikinci ara değişiminde %34,1 artış, genel değişiminde %91,6 artış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %40,2 artış, ikinci ara değişiminde %18,2 artış, genel değişiminde %65,7 artış, B20Co100

yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %39,6 artış, ikinci ara değişiminde %28,7 artış, genel değişiminde %79,7 artış gerçekleşmiştir

2400 dev/dk motor devrinde, motor yükleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %42,6 artış, ikinci ara değişiminde %35,8 artış, genel değişiminde %93,7 artış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %34,9 artış, ikinci ara değişiminde %34 artış, genel değişiminde %80,7 artış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %41,7 artış, ikinci ara değişiminde %29,4 artış, genel değişiminde %83,5 artış gerçekleşmiştir.

3000 dev/dk motor devrinde, motor yükleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %34,1 artış, ikinci ara değişiminde %31,4 artış, genel değişiminde %76,3 artış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %30 artış, ikinci ara değişiminde %28,5 artış, genel değişiminde %67,1 artış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %29,1 artış, ikinci ara değişiminde %30,9 artış, genel değişiminde %69 artış gerçekleşmiştir.

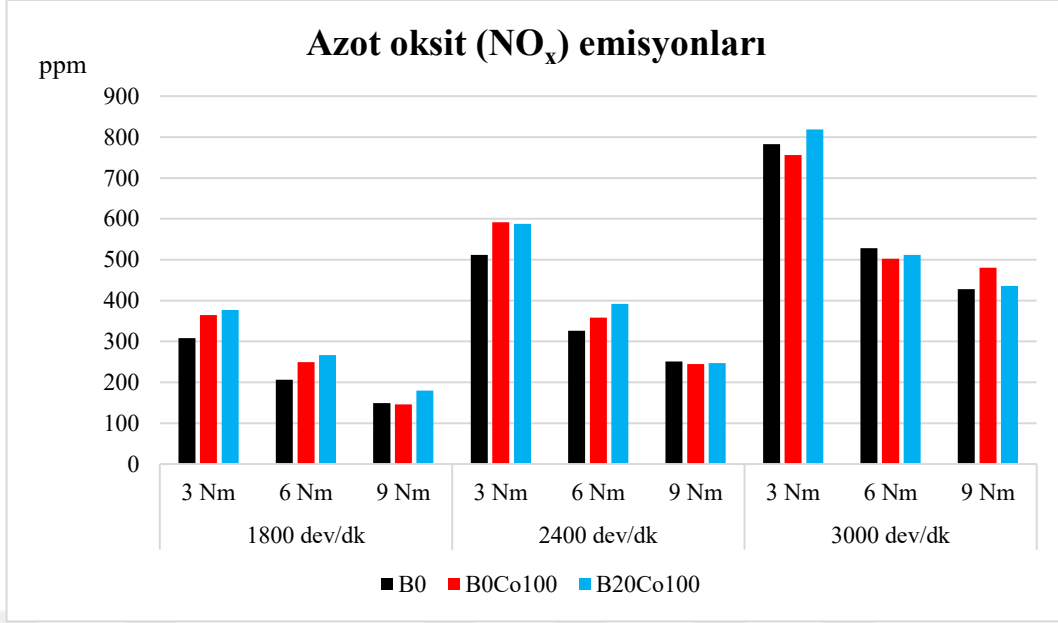
Tüm motor devirlerine bakıldığında, yakıt numunelerinin genel olarak en yüksek karbondioksit emisyonları, 9 Nm motor yükü altındayken gerçekleşmiştir.

Biyodizel karışım yakıtlarının, karbona hidrojen oranının daha düşük olması nedeniyle, dizel yakıta göre daha düşük karbondioksit emisyonuna sahip olduğu literatürde yer alan bulgular arasındadır. Bu, aynı zamanda, oksijen içeriği nedeniyle biyodizelin verimli yanmasının bir göstergesidir.

Yanma sırasında oksijenin az olması, daha fazla karbonlu oksit bileşikleri içeren emisyonlara neden olduğu yine literatürdeki bulgulardandır.

Çoğunlukla olmak üzere; orta ve yüksek yüklerde B20Co100 yakıt numunesinin karbondioksit emisyon oranlarının en düşük olmalarını gösteren Şekil 3.21, literatürdeki benzer çalışmalarla örtüşen bir grafik ortaya çıkmıştır (Aydın vd., 2022; Şen vd., 2018).

Oksijen içeriğinin, viskozitenin ve yoğunluğun yüksek, setan sayısının düşük, tutuşma gecikmesinin kısa, egzoz sıcaklığının bağlı olduğu silindir içerisindeki yanma sıcaklığının yüksek olması halinde ve bununla birlikte, hızlı yanan yakıtların azot oksit emisyonlarının fazla gerçekleştiği, literatürdeki bulgular arasındadır (Emiroğlu vd., 2018c; Şen vd., 2018). Şekil 3.22’de, değişen motor devirleri ve yüklerine göre, tüm yakıt numunelerinin gerçekleşen azot oksit emisyonlarının miktarları bulunmaktadır.



Şekil 3.22. Değişen motor devirleri ve yüklerine göre tüm yakıt numunelerinin azot oksit emisyon miktarları

Şekil 3.22’de de görüleceği üzere, tüm motor yükleri ve devirlerinde çoğunlukla; en yüksek azot oksit emisyonları B20Co100 yakıt numunesinde gerçekleşirken, en düşük azot oksit emisyonları B0 yakıt numunesinde gerçekleşmiştir. Azot oksit emisyonunun zirvesi, 3 Nm yük altında 3000 dev/dk’dayken 818,4 ppm ile B20Co100 yakıt numunesinde gerçekleşirken; en dibi, 9 Nm yük altında 1800 dev/dk’dayken 146,2 ppm ile B0Co100 yakıt numunesinde gerçekleşmiştir. Literatürde benzer sonuçlara rastlanılmaktadır.

3 Nm motor yükü altında motor devirleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %66,2 artış, ikinci ara değişiminde %53 artış, genel değişiminde %154,5 artış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %62,5 artış, ikinci ara değişiminde %27,9 artış, genel değişiminde %107,7 artış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %56 artış, ikinci ara değişiminde %39,3 artış, genel değişiminde %118 artış gerçekleşmiştir.

6 Nm motor yükü altında motor devirleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %58,7 artış, ikinci ara değişiminde %62 artış, genel değişiminde %156,3 artış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %43,7 artış, ikinci ara değişiminde %40,1 artış, genel değişiminde %101,3 artış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %47,3 artış, ikinci ara değişiminde 30,6 artış,

genel değişiminde %92,2 artış gerçekleşmiştir. B0, genel değişimde olumsuz değişim gösteren tek yakıt numunesidir.

9 Nm motor yükü altında motor devirleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %68,5 artış, ikinci ara değişiminde %70,5 artış, genel değişiminde %187,25 artış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %67,1 artış, ikinci ara değişiminde %96,6 artış, genel değişiminde %228,6 artış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %37,3 artış, ikinci ara değişiminde %76,4 artış, genel değişiminde %142,2 artış gerçekleşmiştir. B0Co100 yakıt numunesi, azot oksit emisyonlarının değişiminde en fazla artış gösteren yakıt numunesi olmuştur.

Tüm motor yüklerine bakıldığında, artan motor devirlerine göre yakıt numunelerinin azot oksit emisyonları artış göstermiştir.

1800 dev/dk motor devrinde, motor yükleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %33,1 azalış, ikinci ara değişiminde %27,7 azalış, genel değişiminde %51,6 azalış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %31,6 azalış, ikinci ara değişiminde %41,4 azalış, genel değişiminde %59,8 azalış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %29,3 azalış, ikinci ara değişiminde %32,4 azalış, genel değişiminde %52,2 azalış gerçekleşmiştir.

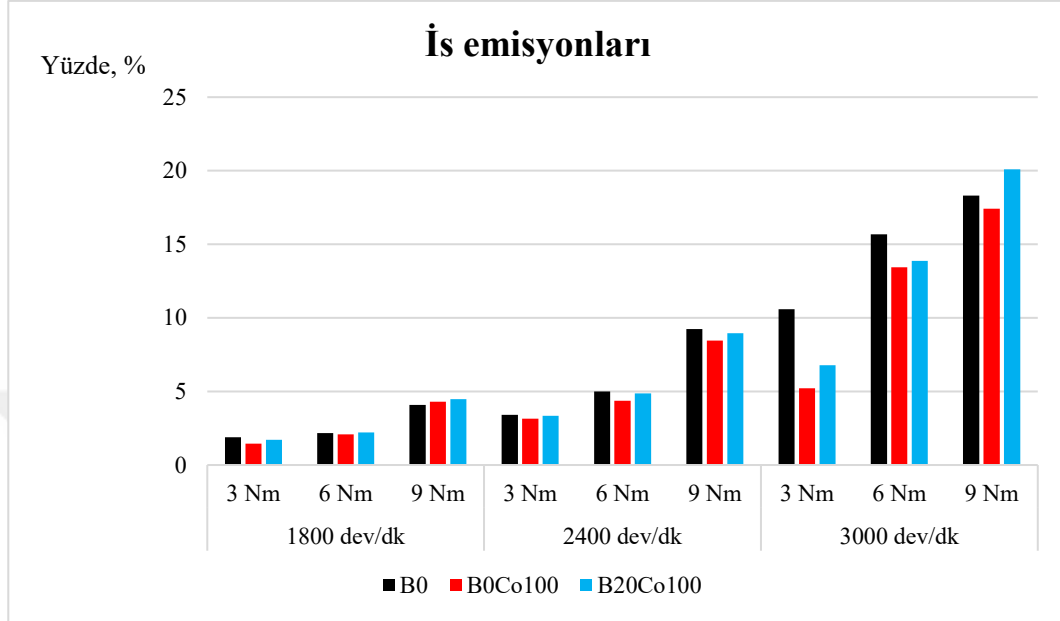
2400 dev/dk motor devrinde, motor yükleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %36,3 azalış, ikinci ara değişiminde %23 azalış, genel değişiminde %51 azalış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %39,4 azalış, ikinci ara değişiminde %31,8 azalış, genel değişiminde %58,7 azalış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %33,3 azalış, ikinci ara değişiminde %37 azalış, genel değişiminde %58 azalış gerçekleşmiştir.

3000 dev/dk motor devrinde, motor yükleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %32,6 azalış, ikinci ara değişiminde %18,9 azalış, genel değişiminde %45,3 azalış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %33,6 azalış, ikinci ara değişiminde %4,3 azalış, genel değişiminde %36,5 azalış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %37,4 azalış, ikinci ara değişiminde %14,8 azalış, genel değişiminde %46,7 azalış gerçekleşmiştir.

Tüm motor devirlerine bakıldığında, artan motor yüklerine göre yakıt numunelerinin azot oksit emisyonları düşüş göstermektedir.

İs emisyonları, yanma başlangıcından önce püskürtülen yakıt miktarı ile alakalıdır. Oksijen yetersizliği, is emisyonlarını artırıcı etkindir. Yakıtların viskozitelerinin ve yoğunluklarının yüksek olması da yakıt atomizasyonunu

kötüleştirdiği için is emisyonlarını artırabilmektedir (Aydın, 2022; Emiroğlu vd., 2018b). Şekil 3.23'te, değişen motor devirleri ve yüklerine göre tüm yakıt numunelerinin is emisyonlarının yüzdeleri bulunmaktadır.



Şekil 3.23. Değişen motor devirleri ve yüklerine göre tüm yakıt numunelerinin is emisyonlarının yüzdeleri

Şekil 3.23'te görüleceği üzere, tüm motor yükleri ve devirlerinde çoğunlukla; en yüksek is emisyonları B0 yakıt numunesinde gerçekleşirken, en düşük is emisyonları B0Co100 yakıt numunesinde gerçekleşmiştir. İs emisyonunun zirvesi, 9 Nm yük altında 3000 dev/dk'dayken %20,1 ile B20Co100 yakıt numunesinde gerçekleşirken; en dibi, 3 Nm yük altında 1800 dev/dk'dayken %1,45 ile B0Co100 yakıt numunesinde gerçekleşmiştir. Literatürde benzer sonuçlara rastlanılmaktadır.

3 Nm motor yükü altında motor devirleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %80,4 artış, ikinci ara değişiminde %210,6 artış, genel değişiminde %460,3 artış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %117,9 artış, ikinci ara değişiminde %65,2 artış, genel değişiminde %260,7 artış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %94,2 artış, ikinci ara değişiminde %103,3 artış, genel değişiminde %294,8 artış gerçekleşmiştir.

6 Nm motor yükü altında motor devirleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %131,5 artış, ikinci ara değişiminde %213,4 artış, genel

değişiminde %625,5 artış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %110,1 artış, ikinci ara değişiminde %207,2 artış, genel değişiminde %545,7 artış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %119,9 artış, ikinci ara değişiminde %185,7 artış, genel değişiminde %527,1 artış gerçekleşmiştir. B0, yakıt numuneleri arasından is emisyonları değişimlerindeki artışları en fazla olan yakıt numunesidir.

9 Nm motor yükü altında motor devirleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %126,2 artış, ikinci ara değişiminde %98,5 artış, genel değişiminde %348 artış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %96,1 artış, ikinci ara değişiminde %106,3 artış, genel değişiminde %304,9 artış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %100 artış, ikinci ara değişiminde %124,4 artış, genel değişiminde %348,7 artış gerçekleşmiştir.

Tüm motor yüklerine bakıldığında, artan motor devirlerine göre yakıt numunelerinin is emisyon yüzdeleri artış göstermiştir.

1800 dev/dk motor devrinde, motor yükleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %14,3 artış, ikinci ara değişiminde %88,9 artış, genel değişiminde %115,9 artış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %43,4 artış, ikinci ara değişiminde %107,2 artış, genel değişiminde %128 artış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %28,5 artış, ikinci ara değişiminde %102,7 artış, genel değişiminde %160,5 artış gerçekleşmiştir.

2400 dev/dk motor devrinde, motor yükleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %46,6 artış, ikinci ara değişiminde %84,6 artış, genel değişiminde %170,7 artış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %38,3 artış, ikinci ara değişiminde %93,5 artış, genel değişiminde %167,4 artış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %45,5 artış, ikinci ara değişiminde %84,4 artış, genel değişiminde %168,1 artış gerçekleşmiştir.

3000 dev/dk motor devrinde, motor yükleri arttıkça; B0 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %47,9 artış, ikinci ara değişiminde %16,9 artış, genel değişiminde %73 artış, B0Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %157,3 artış, ikinci ara değişiminde %29,8 artış, genel değişiminde %233,9 artış, B20Co100 yakıt numunesinin ilk ara değişiminde %104,4 artış, ikinci ara değişiminde %44,9 artış, genel değişiminde %195,9 artış gerçekleşmiştir.

Tüm motor devirlerine bakıldığında, artan motor yüklerine göre yakıt numunelerinin is emisyonları artış göstermektedir.

Yakıtlara nanopartikül ilavesinin, is oluşumunu azalttığı bilinmektedir (Al-Kheraif vd., 2021). Bazı nanopartikül katkılarının ilave edildiği yakıt numunelerinin, püskürtüldüklerinde hava ile karışımları, oksijenin daha zenginleşmesinden dolayı kurum partiküllerinin daha fazla oksitlenmesine ve böylece tam yanmanın artmasına yararı olması, literatürde geçen bulgulardandır (Aydın vd., 2022). Şekil 3.23'te de literatürdeki bulgulara benzer olarak, kobalt oksit nanopartikül katkılı yakıt numunelerinin, yüksek yükler haricinde, genel olarak is emisyonları, saf dizel yakıtı olan B0 yakıt numunesinden daha düşük gerçekleşmiştir.



4. TARTIŞMA

Dizel motorlar üzerinde petrodizel ve biyodizel yakıtların, katkı maddeleriyle geliştirilmesi arayışları; çevreyi daha az kirletici ve tasarruflu olması ve performanslarının yükselmesi umularak yapılmaktadır. Ender sayıdaki deneysel çalışmada kobalt oksit nanopartikül katkılı yakıtların test edildiği görüldüğü için bu çalışmada, kobalt oksit nanopartikülüyle birlikte kanola biyodizeli de yakıt numunelerinde dizel motorunda test edilmeden önce; nanopartikül doz miktarlarının optimum ve test koşullarının ideal olduğu ve testler sonrasında yanma, motor performans ve egzoz emisyon karakteristikleri için olumlu sonuçlar vereceği öngörülmüştür.

Bilimsel ve objektifliğin gerektirdikleriyle bu çalışma, bulgulara bakılarak diğer çalışmalara ve gelecekte gerçekleştirilebilecek çalışmalara göre bu bölümde tartışılacaktır.

Nanopartikül katkılarının artan doz miktarları ile birlikte; CeO_2 ve TiO_2 gibi nanopartikül katkı maddeleri için yakıtların viskozitesini ve yoğunluğunu azaltırken, Co_3O_4 nanopartikül katkı maddesinin ise yakıtlarda viskoziteyi ve yoğunluğu artırdığına literatürde rastlanılmaktadır. Yakıtların ısı değerlerinin ise artan doz miktarları ile birlikte CeO_2 ve TiO_2 nanopartikül katkı maddelerinin artırdığına, Co_3O_4 nanopartikül katkı maddesinin ise azalttığına rastlanılmaktadır. Bu çalışmada ise sabit doz miktarındaki 100 ppm Co_3O_4 nanopartikül katkısının saf dizel yakıtı eklendiğinde yine viskoziteyi ve yoğunluğu ve literatürdeki bazı çalışmalardan farklı olarak ısı değeri artırdığı görülmüştür (Çelik vd., 2022).

Çalışmalar arasından 100 ppm doz miktarındaki TiO_2 nanopartikül katkılı biyodizel karışım yakıtının en uygun olduğunun görülmesi, bu çalışmada doz miktarının belirlenmesine ilham olmuştur (Karthikeyan vd., 2020).

Kanola biyodizelinin, soya yağından üretilen biyodizel kadar setan sayısı ve viskozite gibi özellikleri iyi değildir. Fakat, biyodizeller arasından iyi akışkanlık göstermesi ile öne çıkmaktadır.

Nanopartiküllerdeki oksijenler, yanmaya dahil olabilirlerken yanmayan kısımlar filtre edilmediği takdirde katı parçacıklar olarak egzozu karışarak atmosfere salınmaktadırlar. Kobalt oksit nanopartikül katkıları için de durum böyledir.

Çalışmalarda en çok kullanılan CeO_2 , TiO_2 ve Al_2O_3 gibi nanopartikül katkılarına alternatif olarak Co_3O_4 nanopartikül katkısı yakıtlarda; yakıt özellikleri, yanma, motor performans ve egzoz emisyon karakteristikleri açısından genel olarak onlar kadar iyi sonuçlar vermese de yanma stabilitesi sağlamaktadır.

4.1 Yanma Karakteristikleri

Setan sayısı ve viskozitesi daha düşük olan saf dizel yakıtının, diğer yakıt numunelerinden daha uzun süren tutuşma gecikmesi boyunca daha fazla yakıt birikimiyle maksimum ısı salınım oranlarında genelde zirvede yer almasına benzer olarak literatürde rastlanılmaktadır (Emiroğlu vd., 2018a; Emiroğlu vd., 2018c; Şen vd., 2018).

Motor devri arttıkça; yanma başlangıçlarının, 0°KMA değerini geçerek gecikmeli vaziyette, genişleme strokuna doğru sarktıkları için maksimum silindir basınç değerlerinin tüm yakıt numunelerinde düştüğü anlaşılmıştır (Keskin vd., 2020). Tüm yakıt numunelerinde genel olarak, daha uzun süren tutuşma gecikmelerinde, silindirde biriken yakıtların yanma başlangıçlarının üst ölü noktadan sonrasına sarkmalarıyla, ani yanma periyotlarına, yanma (genişleme) strokundayken başlamaları; yanmaların daha kısa yanma sürelerinde, daha yüksek silindir sıcaklıklarında gerçekleşmelerinden dolayı maksimum ısı salınım oranlarının artmasına böyle bakıldığında açıklık getirilebilmektedir (Şen vd., 2018). Saf dizel yakıtın, maksimum ısı salınım oranlarında genelde yine zirvede bulunması, artan motor yüklerindeki aynı nedenle değerlendirilmektedir.

Motor yükü arttıkça, silindire enjekte edilen yakıt miktarı da arttığı için maksimum silindir basıncı değerlerinin de gecikmeli olarak tüm yakıt numuneleri için arttığı düşünülmektedir.

Silindir basınçlarının ve net ısı salınım oranlarının çok yüksek olması, dizel motorlarda; azot oksit emisyonlarını artırmaya, mekanik zorlanmalara ve vuruntuya sebep olurken, çok düşük olması da motor performans karakteristiklerinin zayıf olmasına neden olmaktadır. Bu yüzden, bu yanma karakteristiklerinin her ikisinin de dengeli olması daha iyi olacaktır.

Kobalt oksit nanopartikül katkısının, püskürtme başlangıcını daha erkene çekme etkisinden bahsedilebilir. Viskozite artırıcı etkisi, tutuşma gecikmesi için olumsuz etken olsa da diğer taraftan setan sayısını artırma ve oksijen içeriğini yükseltmesi sayesinde tutuşma gecikmesini azaltıcı etkisi olmaktadır. Aynı

nanopartikül katkılı biyodizel karışım yakıtının, dizel yakıta göre tutuşma gecikmesi daha kısa sürmüştür (Emiroğlu vd., 2018b). Literatürdeki bulgular arasında yakıtların setan sayısının ve oksijen içeriğinin yüksek olmasının, tutuşma gecikmesinde azalmaya yol açtığı mevcuttur (Emiroğlu, 2018).

Kobalt oksit nanopartikül katkısının, yanma başlangıcına ait °KMA değerlerini genel olarak daha erkene çekme etkisi olurken en erken değerler, aynı nanopartikül katkılı biyodizel karışım yakıtında olmuştur. Yanma sonlarını genel olarak daha geç °KMA değerlerinde gerçekleştirmiştir. Genel olarak, °KMA değerlerine göre yanma süresini uzattığı ve farklı motor devirleri ve yüklerine göre en uzun yanma sürelerine yine genel olarak aynı nanopartikül katkılı biyodizel karışım yakıtı sahip olmuştur.

Yüksek motor devri ve yükünde, kobalt oksit nanopartikül katkılı yakıtların maksimum silindir basınç değerlerindeki genel değişimleri, saf dizel yakıttan daha fazla olmamıştır.

Kobalt oksit nanopartikül katkısı, motor yüklerinin ve devirlerinin artmasıyla maksimum silindir basınç yerlerinin daha erken gerçekleşmesine neden olmuştur. Maksimum silindir basınçlarında, yakıt numuneleri arasında pek bir fark olmamıştır. Başka çalışmalarda maksimum silindir basınçları arasında farkların olduğu görülmektedir (George vd., 2015; Karthikeyan vd., 2014). Fakat, artan motor devirleri, maksimum silindir basınçlarını düşürürken ve maksimum ısı salınım oranlarını artırırken; artan motor yükleri ise maksimum silindir basınçlarını artırırken maksimum ısı salınım oranlarını düşürme eğiliminde olmuştur.

Literatürde çok fazla kobalt oksit nanopartikülü ile çalışma olmasa da bu çalışmadaki yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı silindir basınçlarının değişimlerinin gerek kobalt oksit gerek diğer metal oksit nanopartikül ilaveli yakıtların dizel motorlarındaki benzer test çalışmaları ile benzer eğilimde olduğu gözlemlenmektedir (Banapurmath vd., 2014; Lenin vd., 2022).

Silindir basınçlarındaki değişim grafiklerinde çoğunlukla; B20Co100 en erken olmak üzere B0Co100 ile beraber maksimum silindir basınçlarının, B0 yakıt numunesinin maksimum silindir basınçlarından daha erken gerçekleşmeleri; püskürtme ve yanma başlangıçlarını daha erkene çeken etken olarak kobalt oksit nanopartikül katkısından dolayıdır.

Şekil 3.4'te yer alan 2400 dev/dk ve 3 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı silindir basınçlarının değişimi grafiğine bakılarak B0Co100 ve

B20Co100 yakıt numunelerinde genişleme strokundayken art yanmalar olmuş olabilir. Şekil 3.13'te yer alan 2400 dev/dk ve 3 Nm yükte yakıt numunelerinin °KMA değerlerine bağlı net ısı salınım oranlarının değişimi grafiğine bakılarak genişleme strokunun sonlarına doğru tüm yakıt numuneleri için görülen düzensiz dalgalanmalar da art yanmaların tesiriyle gelişmiş olabilir.

Motor devirleri aynı iken, artan motor yükleri ile yakıtların egzoz sıcaklıkları da beraberinde artmaktadır. Motor yükleri aynı iken, artan motor devirlerinde ise yakıtların genel olarak egzoz sıcaklıkları yine artmaktadır.

Egzoz sıcaklıklarının, bütün motor devirleri ve yüklerinde genel olarak, B20Co100 yakıt numunesinde daha fazla olmasında, tutuşma gecikmelerinin daha kısa olmalarından kaynaklandıklarına ve bunun da yakıt özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kanola biyodizel karışım yakıtının viskozitesi ve oksijen içeriği, saf dizel yakıtına göre yüksek olduğundan ve kobalt oksit nanopartikül katkısının da yakıtlarda setan sayısını ve yanma sırasındaki oksijen içeriğini artırıcı etkisiyle tutuşma gecikmesi periyodunu kısaltması ve zaten viskozitesi artmış olan yakıtın viskozitesini daha da artırıcı etkisiyle püskürtme başlangıcını da daha çok erkene çekmesi göz önüne alındığında, tüm bunların birleşimi olarak; yanma odasında çok fazla B20Co100 numunesinden yakıt birikimine olanak olmadığına ve maksimum silindir basınçlarının genel olarak zirvede yer alamadıklarına varılmıştır (Emiroğlu, 2018; Emiroğlu vd., 2018a).

Yakıtların buharlaşmaları sırasında görülen negatif ısı salınımı eğiliminin olduğu yerlerde buharlaşma başlangıçları, düşük yüklerde daha net görülmektedir. Literatürde, benzer çalışmalarda benzer bulgulara rastlanılmıştır (Emiroğlu vd., 2018c; Şen vd., 2018).

Setan sayısını ve oksijen içeriğini yakıt numunelerinde artıran ama viskoziteyi de artıran kobalt oksit nanopartikülü ile içeriğinde zaten oksijeni yüksek olan ama viskozitesi de yüksek olan kanola biyodizelinin bulundukları B20Co100 ve B0Co100 yakıt numunelerinde; püskürtme başlangıçlarının daha erken olmasına, tutuşma gecikmesi periyotlarını kısaltmaya ve süre boyunca biriken yakıt miktarlarının daha az olmalarına etki ettiği için; yakıt özelliklerine etkileri nedeniyle yanma karakteristiklerindeki etkilerinin temelde böyle olduklarına ulaşılmaktadır (Emiroğlu, 2018).

Net ısı salınım oranlarındaki değişim grafiklerinde genel olarak, en erken

B20Co100 yakıt numunesi olmak üzere B0Co100 ile beraber, B0 yakıt numunesine göre maksimum ısı salınım oranlarının daha erken gerçekleşmelerinde; püskürtme, yanma başlangıçlarının daha erken, tutuşma gecikmesi ve ani yanma periyotlarının daha kısa olmalarını sağlayan saf dizel yakıtla karıştırılan ürünlerin varlıklarına bağlanabilir (Şen vd., 2018).

4.2 Motor Performans Karakteristikleri

Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'deki özgül yakıt tüketimleri ve efektif ısı verimlerin grafikleri göz önünde bulundurulduğunda, yakıt numunelerinin özgül yakıt tüketimleri ile efektif ısı verimlerinin birbirleri ile zıt yönlü değiştiği görülmektedir.

Özgül yakıt tüketimi daha düşük olan yakıtların efektif ısı verimleri daha iyi olmaktadır. Efektif ısı verimin değeri; özgül yakıt tüketimi, ısı değer ve efektif güç değerleri ile değişim göstermektedir (Emiroğlu vd., 2018b).

Literatürdeki bulgular arasından; yüksek motor devirlerinde sürtünme ve pompalama kayıplarının artması, hacimsel verimin düşmesi, homojen hava-yakıt karışımı ve tam yanma için yanma süresinin yeterince elverişli olmaması nedeniyle özgül yakıt tüketiminin arttığı, düşük motor devirlerinde ise silindir içerisindeki türbülansın kötüleşmesi ve motorun hareketli parçalarındaki atalet kuvvetlerinin fazla olması nedeniyle özgül yakıt tüketiminin yine arttığı, lakin orta motor devirlerinde tam yanma için yanma süresinin daha elverişli, silindir içi türbülansın daha iyi ve hava-yakıt karışımının daha homojen olması nedeniyle özgül yakıt tüketiminin azaldığı göz önüne alındığında, özgül yakıt tüketimlerinin en iyi orta motor devrinde gerçekleşmesi şaşırtıcı olmamaktadır (Şen vd., 2018; Yeşilyurt, 2017).

Motor yükleri arttıkça, tüm yakıt numunelerinin egzoz sıcaklıkları artmış olarak kaydedildiğinden, daha öncesinde yanma sırasındaki silindir sıcaklıkları yükseldiği için daha iyi yanma ortamlarının oluşmuş olduğu ve elde edilen efektif güçler başına yakıt tüketimlerinin azaldığı göz önüne alındığında özgül yakıt tüketimlerinin düşmesi böyle açıklanabilir. Efektif ısı verimlerinin artması ise diğer çalışmalarla benzerlik göstermektedir. Yüksek motor yüklerinde, yakıtların özgül yakıt tüketimlerinin en düşük gerçekleşmesi başka araştırmacılar tarafından da paylaşılmıştır (Al-Kheraif vd., 2021; Fayad vd., 2021).

B0Co100, yine B0 yakıt numunesinden kobalt oksit nanopartikül katkısının

artırdığı yakıt özelliklerinin değerleri ile viskozitesi daha yüksek olsa bile yoğunluk, ısıl değer ve oksijen içeriğinin daha yüksek olmasına bağlı olarak daha düşük özgül yakıt tüketimine sahip olmuştur. Yani, kobalt oksit nanopartikülünün özgül yakıt tüketimini düşürmede ortalama %6,3 etkisi olmuştur. Ortalama %4,26 daha fazla efektif güç üretimi sağlamanın yanında ısıl değeri ve oksijen içeriği daha yüksek yakıt haline gelerek B20Co100 yakıt numunesinin ardından efektif ısıl verimi daha yüksek yakıt numunesi olmuştur. Efektif ısıl verimlerinin ortalama %25,9 ile en yüksek kobalt oksit nanopartikül katkılı biyodizel karışım (B20Co100) yakıtında olması, literatürde geçen bulgular ile örtüşmekte olduğunu gösteriyor (Karthikeyan vd., 2014).

Bu çalışmada genel olarak; yanma karakteristiklerinden maksimum basınç yerleri daha erken ve maksimum ısı salınım oranlarının daha düşük gerçekleştiği kobalt oksit nanopartikül katkılı biyodizel karışım yakıtının (B20Co100) motor performans karakteristiklerinden özgül yakıt tüketimi değerleri daha düşük ve efektif ısıl verimleri daha yüksek olmuştur. En belirgin olarak 2400 dev/dk ve 9 Nm'de; B20Co100 yakıt numunesinin 259,5 g/kWh en düşük özgül yakıt tüketimine ve %32,34 ile en yüksek efektif ısıl verime sahip olduğu görülmektedir.

4.3 Egzoz Emisyon Karakteristikleri

Karbondioksit emisyonunun zirvesinin %3,72 ile yüksek motor devri ve yükünde, en dibinin %1,9 ile orta motor devri ve düşük motor yükünde saf dizel yakıtında gerçekleşmesi bu çalışmada görülürken literatürde farklı sonuçlara rastlanılmaktadır.

Motor yükleri arttıkça tüm yakıt numunelerinin karbondioksit emisyonlarının artmasına literatürde benzer olarak rastlanıldığı gibi farklı olarak da rastlanılmaktadır (Bitire vd., 2022; Jayaraman vd., 2021; Karthikeyan vd., 2020).

Kobalt oksit nanopartikül katkısının, yakıt numunelerinin oksijen oranını artırıcı etkisiyle karbondioksit emisyonlarının azalmasında payı olduğu, B0Co100 yakıt numunesinin karbondioksit emisyonlarının, B0 yakıt numunesinin karbondioksit emisyonlarından çoğunlukla az gerçekleştiği göz önüne alınarak anlaşılabilmektedir.

Literatürde, aynı motor yüklerinin artan motor devirlerine göre azot oksit emisyon miktarlarının artış gösterdiğine rastlamak mümkündür (Aydın vd., 2022). Aynı şekilde, is emisyon yüzdelерinin artış gösterdiğine rastlamak mümkündür

(Aydın vd., 2022). Azot oksit emisyonlarıyla beraber is emisyonlarının kontrol edilmesi en zor iki emisyonlar olduğuna yine literatürde rastlanılmaktadır (Emiroğlu vd., 2018b).

İs emisyonlarının çokluğu ile doğru orantılı olarak yakıtın ne kadar iyi yanamadığı anlaşılmaktadır (Aydın, 2022; Emiroğlu vd., 2018b).

Kobalt oksit nanopartikül katkılı biyodizel karışım yakıtının oksijen içeriği diğer yakıt numunelerine göre daha yüksek olduğundan yanma sıcaklıklarının ve hatta aynı eğilimde egzoz sıcaklıklarının daha yüksek olarak gerçekleşmesi, yanma sıcaklıklarına bağlı olarak azot oksit emisyonlarının daha yüksek gerçekleşmesine neden olmaktadır. Literatürde buna benzer bulgular vardır (Emiroğlu vd., 2018c).



5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Yüksek motor devirlerinde tam yanmanın gerçekleşmesi, karakteristiklerden anlaşılacağı üzere zorlaşmıştır. Yakıtların buharlaşmaları ve atomizasyonları kötüleşmiştir.
- Yüksek motor yüklerinde artan yakıt miktarlarıyla birlikte hava-yakıt oranları azalmıştır.
- Motor devri ve motor yükü yüksek olduğunda art yanmalar artmıştır.
- Motor devri arttıkça genel olarak, püskürtme ve yanma başlangıçları daha gecikmiştir, tutuşma gecikmeleri artmıştır, maksimum silindir basınç yerleri daha gecikmiştir, maksimum silindir basınçları düşmüştür, maksimum ısı salınım oranları artmıştır ve yanma süreleri kısalmıştır. Ayrıca, dizel motorun çalışma hızının artmasıyla ısınmasının artmasına bağlı olarak azot oksit emisyonları artmıştır. Egzoz sıcaklıklarında ve is emisyonlarında da artış görülmüştür.
- Motor yükü arttıkça genel olarak, maksimum silindir basınç yerleri daha gecikmiştir, fakat maksimum silindir basınçları artmıştır, maksimum ısı salınım oranları ise azalma eğiliminde olmuştur ve yanma süreleri artmıştır. Enjekte edilen yakıt miktarının artışına bağlı olarak hava-yakıt oranı azalarak yanma kötüleşmiştir, egzoz sıcaklıkları, karbondioksit ve is emisyonları artmıştır, azot oksit emisyonları ise azalmıştır.
- Yoğunluğu az olan yakıtların püskürtme başlangıçları daha erken gerçekleşmiştir. Buna bağlı olarak, püskürtülen yakıt miktarları ve tutuşma gecikmeleri daha fazla olurken; dolaylı olarak maksimum silindir basınçları ve özgül yakıt tüketimleri daha fazla, efektif ısı verimleri ve azot oksit emisyonları daha düşük olmuştur.
- Özgül yakıt tüketimleri; yanma ortamı ve türbülans akış ortamı daha iyi, hava-yakıt karışımının homojenliği daha elverişli ve dizel motordaki performans kayıplarına yol açacak etkenlerin daha dengeli olması nedeniyle en düşük orta devir ve yüksek yükte dir. Efektif ısı verimleri, özgül yakıt tüketimlerine zıt olarak en yüksek yine orta devir ve yüksek yükte dir.
- B20Co100 yakıtı saf dizel yakıtı ile kıyaslandığında özgül yakıt tüketimleri ortalama %7,74 düşerken ve efektif ısı verimleri ortalama %9,62 artmıştır.

- Maksimum silindir basınçlarındaki artışlar, egzoz sıcaklıklarını artırıcı olarak etki etmiştir. Egzoz sıcaklıklarıyla birlikte azot oksit emisyonları artmıştır.
- Kanola biyodizeli ilavesi, dizel motora yağlayıcılık sağlamıştır ve daha yumuşak çalışmasını sağlamıştır. İyot sayısı ve doymamışlık ölçüsüne bağlı olarak setan sayısını düşürmüştür. Bununla birlikte, ısı değeri de düşürmüştür, yoğunluk ve viskoziteyi ise artırmıştır. Oksijen içeriğini de artırdığı için yanma ve sonrasında egzoz sıcaklığındaki artışları azot oksit emisyonlarındaki artışlar izlemiştir. Yoğunluğu artırmasıyla püskürtme başlangıcını daha geciktirmiştir. Yakıt özelliklerinden ısı değeri düşürdüğü için yanma başlangıcını daha erkene çekmiştir. Tutuşma gecikmesini azaltmıştır, maksimum basınç yerini daha erkene çekmiştir. Setan sayısı ve ısı değeri düşürdüğü için maksimum silindir basıncını düşürmekle birlikte maksimum ısı salınım oranını azaltmıştır ve yanma süresini artırmıştır. Özgül yakıt tüketimini azaltırken efektif ısı verimi artırmasında maksimum silindir basıncı ve maksimum ısı salınım oranını daha optimum hale getirmesinin etkisi olmuştur. Karbon miktarını yükselttiği ve setan sayısını düşürdüğü için is emisyonlarını artırmıştır. Orta yükte karbondioksit emisyonlarını düşürmüştür. Tüm bunlar, dizel yakıta kanola biyodizeli ilave edilmesiyle özellikle yanma ve motor performans karakteristiklerinde iyileşmeler olduğunu göstermiştir.
- Kobalt oksit nanopartikülünün yapısında aktif ve bol oksijen bulunmaktadır. Yakıt özelliklerinden; setan sayısı, yoğunluk, ısı değeri ve viskozite değerleri kobalt oksit nanopartikül katkısıyla artmıştır. Kobalt oksit nanopartikül katkısı genel olarak, yakıtların termofiziksel özelliklerini iyileştirmekle beraber silindir içerisindeki hava-yakıt karışımı içerisindeyken yakıt molekülleri ile gazlar arasındaki ısı geçişini artırarak tutuşma gecikmelerini azaltmıştır ve yanma hızlarını artırmıştır. Yakıt özelliklerinden, artırdığı yoğunluğa bağlı olarak püskürtme başlangıçlarını daha geciktirmiştir. Yakıtın setan sayısını artırarak yanma başlangıçlarını ve maksimum basınç yerlerini daha erkene çekmiştir. Yakıt özelliklerinden viskozite ve ısı değeri artırdığı için yanma süresini artırmıştır. Genel olarak yanma karakteristiklerini iyileştirmiştir. Kobalt oksit nanopartikül katkısının yanma tepkimelerinde katalitik aktivatör rolü bulunmaktadır. Bundan dolayı, efektif ısı verimleri artırırken özgül yakıt tüketimlerini azaltmıştır ve böylelikle motor performans karakteristiklerini de iyileştirmiştir. Tüm bunların neticesinde, dizel motorun performansını artmıştır.

- Kobalt oksit nanopartikül katkısı, is emisyonlarını ortalama %13,29 azaltmıştır, azot oksit emisyonlarının ise ortalama %7,18 artırmıştır. Dizel motorda devir ve yükler, orta ve yüksek olduklarında ve düşük devirdeyken yüksek yük olduğunda karbondioksit emisyonlarını azaltmıştır. Karbondioksit emisyonlarında ortalama %1,18 azalışa neden olmuştur.
- Kobalt oksit nanopartikülünün katkısının yakıt özellikleriyle beraber yanma, motor performans ve egzoz emisyon karakteristiklerinin tümünde iyileşmeye neden olması bekleniyordu. Fakat, motor performans karakteristikleri haricinde tümünde iyileşmeye neden olmamıştır.
- Kobalt oksit nanopartikül katkılı nano yakıtlarda ferromanyetikliğin etkisiyle süspansiyon kalitesi daha kolay bozulabilmektedir.
- Kobalt oksitin toksik etkisi bulunmakla birlikte sağlık ve çevreyi tehdit etmektedir.
- Nano yakıtların kullanımlarının verimli olmasında püskürtme sistemleri ve yanma odalarıyla uyumlu olması önemlidir.
- Gelişmelere bağlı olarak, gelecekte geleneksel ve alternatif yakıtların nano yakıtlara dönüşümleri çok daha başka ve daha farklı yerlerde olabilir, yakıt teknolojileri bugün olduğundan daha farklı noktalara gelebilir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlara bakıldığında sunulan öneriler aşağıda sıralanmıştır.

- Kobalt oksit nanopartikülü oksijence zengin ve yanma aktivitesini artırıcı olduğundan birlikte uyumla kullanılabilecek yanma karakteristikleri yüksek başka nanopartiküllerle birlikte yakıt katkı maddesi olarak kullanılabilir.
- Kobalt oksit nanopartikül katkısı özellikle biyodizel içeren yakıtlarla birlikte dizel motorlarda kullanıldığında motor ömrü açısından faydaları olabilir.
- Kobalt oksit nanopartikül katkısının optimum doz miktarı arayışında farklı doz miktarları ile testler gerçekleştirilebilir.
- Kanola biyodizeli dışında başka biyodizellerle birlikte kobalt oksit nanopartikülü test edilebilir. Biyodizel karışım yakıtlarının optimum olduğu oranı bulmak için farklı karışım oranları test edilebilir.
- Daha iyi sonuçların gözlemlenmesi beklenerek testler farklı koşullarda gerçekleştirilebilir.

- Kobalt oksit nanopartikülü, farklı deney yöntemleri, parametreler ve odak noktaları üzerine başka çalışmalarda kullanılabilir. Aynı şekilde bu kanola biyodizeli için de geçerlidir.
- Çalışmada kullanılan yakıtlar, dizel motorlara entegre sistemlerle veya dizel motorlarda yapılacak değişikliklerle test edilebilir.
- Yüksek motor devirleri ve yüklerinin olduğu koşullar gibi hava-yakıt oranının azaldığı durumlarda eksik yanmaların azaltılarak yanma kalitesinin artırılabilmesi için devreye giren kesicili aşırı doldurma sistemleri kullanılabilir.
- Kobalt oksit nanopartikül katkılı nano yakıtların buharlaşmaları daha hızlı gerçekleştiğinde; özgül yakıt tüketimi, egzoz sıcaklığı ve egzoz emisyon değerlerinin daha azalmaları mümkün olabilmeleriyle birlikte atmosfere salınımdan önce egzozdan bu katkı maddeleri filtre edilmelidir.
- Yüksek motor devirlerinde olduğu gibi yanma ve akabinde egzoz sıcaklıklarının yükselmesiyle artan azot oksit emisyonlarının azaltılmasında devreye giren egzoz gazı geri dönüşüm (EGR) sistemiyle katkı sağlanabilir.
- Kanola biyodizeli yerine yakıt özellikleri bakımından eşdeğer ama elde edilme zahmeti ve maliyeti daha az olan biyodizeller tercih edilerek ilave edilebilir.
- Yakıt özelliklerine, karakteristiklere, sağlık, çevre ve ekonomik faktörlere göre nano yakıtlar için başka nanopartikül katkıları tercih edilebilir.
- Kobalt oksitin toksik etkisi bulunmaktadır ve nanopartiküllerde bu özelliğin bulunabilmesi doğaldır. Nanopartiküllerin atık olarak atmosfere salınmadan önce filtre edilmesi çalışmaları olabilir.
- Dizel yakıtlara biyodizel ve nanopartikül ilavelerinin optimum sağlanması zincirleme olarak; yakıt özelliklerini, yanma karakteristiklerini, motor performans karakteristiklerini, egzoz emisyon karakteristiklerini iyileştirebilirken performans için tutarları da düşürebilir.
- Dünya’da satışı yapılan dizel yakıtlara belirlenen oranlarda biyodizel ilave edilmesinin zorunluluğu günden güne artarken biyodizel içeren dizel yakıtlara optimum nanopartikül katkısı; dizel-biyodizel karışımının optimum sağlanması, bunlardan oluşturulan nano yakıtların atmosfere salınımdan önce nanopartiküllerinin filtre edilmeleri, saf dizel yakıta göre karakteristik değerlerinin daha iyi olmaları, güvenli taşınabilirlikleri ve depolanabilirlikleri, diğer malzemelerle uyusabilirlikleri, özellikle performans bakımından daha hesaplı olabilmeleri gibi önemlerin her biri, yerine getirilmeleri halinde

alternatif yakıtlar arasından nano yakıtların daha fazla tercih edilirligini artiracagi için birçok basariu çalişmanın gerçekleşmesiyle bu mümkün olabilir.

- Gerek nano yakıtlardaki gerek motor tasarımlarındaki değişikliklerle daha iyi yanma ortamının sağlanabilmesi için türbülans akış ortamına zemin hazırlanabilir.
- Alternatif yakıtlara uyumlu olacak şekilde motor tasarımları geliştirilebiliyorken; biyodizel kullanımı garantisi olan dizel motorların retilerbildiği gibi motor tasarımları nano yakıtlardan alınacak verimi artıracak şekilde geliştirilebilir.
- Nanopartikül katkılarıyla homojen karıştırılarak elde edilen nano yakıtların stabilite durumlarının kontrolü için karıştırma işleminde, nanopartikül üretiminde ve stabilitenin korunmasında doğru yöntemler takip edilmelidir. Nano yakıtların süspansiyon kalitesi uygun tekniklerle belirlenmelidir. Aynı şekilde taşınmaları ve depolanmaları da emniyetle sağlanmalıdır.
- Nano yakıtları da kapsaması gerekli görülerek yakıt ve emisyon standartları (yerel ya da uluslararası olabilir) revize edilebilir ya da yeni baştan ortaya konabilir.

KAYNAKLAR

- Afşar, M. (2015). *Bir dizel motorda atık biyodizel kullanımının yanma karakteristiklerine etkisi* (Yüksek lisans tezi). Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Akay, F. (2017). *Atık zeytinyağından elde edilen biyodizelin motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkileri* (Yüksek lisans tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Akbin, H. M. (2012). *Kanola yağından hidrotalsite tutuklanmış lipaz ile biyodizel üretimi* (Yüksek lisans tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Albayrak, S. (2014). *Biyodizelin tek silindirli bir dizel motorun performans, emisyon ve titreşimlerine olan etkilerinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Alçelik, N. (2017). *Atık yağlardan üretilen biyodizelin tek silindirli bir dizel motorun performans, egzoz emisyonları ve titreşimine olan etkilerinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Al-Kheraif, A. A., Syed, A., Elgorban, A. M., Divakar, D. D., Shanmuganathan, R., & Brindhadevi, K. (2021). Experimental assessment of performance, combustion and emission characteristics of diesel engine fuelled by combined non-edible blends with nanoparticles. *Fuel*, 295, 120590. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120590>
- Alptekin, E. (2013). *Hayvansal atık yağlardan biyodizel üretimi ve bir dizel motorda kullanımının incelenmesi* (Doktora tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Altınsoy, A. S. (2007). *Biyodizel üretimi, motorlarda kullanımı ve Türkiye'deki kaynakların incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Aslan, V. (2019). *Üretiminde farklı alkoller ve katalizörler kullanılan biyodizellerin yakıt özellikleri, motor performansları ve egzoz emisyonlarının incelenmesi* (Doktora tezi). Yozgat Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- ASTM D975 Diesel Fuel Specification. (2024). SlideShare. <https://www.slideshare.net/slideshow/astm-d975-diesel-fuel-specification/3713854> adresinden 8 Kasım 2024 tarihinde alınmıştır.
- Aydın, B. (2022). *Nano yakıt katkı maddesi ilave edilen biyodizel dizel karışımının motor performans ve emisyon üzerindeki etkisinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Aydın, B., & Çelik, M. (2022). Seryum oksit (CeO₂) nanopartikülü ilave edilen biyodizel-dizel (B20) karışımının performans ve emisyonlara etkisinin araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(1), 689-702. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1098431>
- Aydoğan, B. (2008). *Biyodizel kullanılan dizel motorlarda NO_x emisyonlarının ve NO_x emisyonları azaltma yöntemlerinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bakan, F. (2019). *Biyodizel yakıt karışımlarının ve püskürtme basıncının motor performansına ve yanmaya olan etkileri* (Yüksek lisans tezi). Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Balcı, A. B. (2017). *Biyoetanol ile menengiç biyodizelinin motorinle karışımlarının dizel motorda performans, egzoz emisyonları ve yağlama yağına etkilerinin incelenmesi* (Doktora tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Banapurmath, N. R., Sankaran, R., Tumbal, A. V., Narasimhalu, T. N., Hunashyal, A. M., & Ayachit, N. H. (2014). Experimental investigation on direct injection diesel engine fuelled

- with graphene, silver and multiwalled carbon nanotubes-biodiesel blended fuels. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 3(4), 129-138. <https://doi.org/10.18245/ijaet.59113>
- Bekar, N. (2020). Yenilenebilir enerji kaynakları açısından Türkiye'nin enerji jeopolitiği. *Turk J Political Sci*, 3(1), 37-54.
- Beyaz, M. (2022). *Etil proksitol katkılı biyodizelin bir dizel motorunda kullanımının yanma ve emisyonuna etkisinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Batman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Beytekin, A. (2019). *Demir klorür (FeCl₃) katkılı biyodizel-dizel yakıt karışımlarının bir dizel motorda kullanımı* (Yüksek lisans tezi). Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bitire, S. O., & Jen, T. C. (2022). The role of a novel green synthesized nanoparticles added parsley biodiesel blend on the performance-emission characteristics of a diesel engine. *South African Journal of Chemical Engineering*, 41, 161-175. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.06.020>
- Chacko, N., & Jeyaseelan, T. (2020). Comparative evaluation of graphene oxide and graphene nanoplatelets as fuel additives on the combustion and emission characteristics of a diesel engine fuelled with diesel and biodiesel blend. *Fuel Processing Technology*, 204, 106406. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106406>
- Chatur, M. G., Maheshwari, A., & Campili, S. (2023). An experimental study of a diesel engine with varying injection timing fuelled with used cooking methyl ester blend adulterated with copper oxide particles. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.305>
- Çakmak, A. (2021). *Üretilen farklı yakıt katkılarıyla bir dizel motorunun yanma, performans ve emisyon karakteristiklerinin iyileştirilmesinin deneysel incelenmesi* (Doktora tezi). Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Çakmak, A. (2024). Al₂O₃ nanoparçacıklarının ve çeşitli antioksidan katkı maddelerinin dizel motor karakteristiklerine etkilerinin araştırılması. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(1), 223-235. <https://doi.org/10.28948/ngmuh.1284143>
- Çakmak, A., & Özcan, H. (2022). Bor oksit nanoparçacıklarının dizel yakıt katkısı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. *Journal of Boron*, 7(1), 420-429. <https://doi.org/10.30728/boron.1021667>
- Çelebi, Y. (2017). *Bütanol katkısının bir dizel motorda yakıt olarak biyodizel kullanımına etkilerinin deneysel araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çelik, M. (2015). *Biyodizel yakıt özelliklerinin motor performansı ve emisyon karakteristiklerine etkilerinin incelenmesi* (Doktora tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çelik, M., & Bayındırlı, C. (2022). Optimization of thermophysical properties, combustion performance and harmful exhaust gases of biodiesel fuel with nanoparticle additives. *Journal of Engineering Studies and Research*, 28(3), 34-39. <https://doi.org/10.29081/jesr.v28i3.004>
- Çengelci, E. (2011). *Hayvansal yağlardan elde edilen biyodizelin motor performans ve emisyonlarına etkisi* (Yüksek lisans tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çınar, G., & Akyüz, O. (2022). Cu₂O ve Al₂O₃ nanopartiküllerin motor performans ve emisyonlara etkisinin incelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(34), 53-61. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1064145>

- Deniz, Ç. (2013). *Biyodizel-dizel karışımlarının bazı fiziksel özelliklerinin biyodizel oranı ile değişimi* (Yüksek lisans tezi). Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Deviren, H. (2023). *Yağ alkoller ve biyodizel karışımlarının bir dizel motorda yanma ve performans parametrelerine etkilerinin deneysel ve yapay sinir ağı ile optimizasyonu* (Doktora tezi). Batman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Dhahad, H. A., Hasan, A. M., Chaichan, M. T., & Kazem, H. A. (2022). Prognostic of diesel engine emissions and performance based on an intelligent technique for nanoparticle additives. *Energy*, 238, 121855. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121855>
- Dinçbaş, A. (2007). *Biyodizel kullanımının dizel motoru üzerindeki etkilerinin uzun süreli testlerle ve motorinle karşılaştırmalı olarak incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Dobrucalı, E. (2007). *Biyodizelin bir gemi dizel motorunun performansına olan etkisinin deneysel olarak incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gemi İnşaatı Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Ejder, S. B. (2007). *Etanol-dizel, biyodizel-dizel yakıt karışımlarının kullanımının motor performansına etkilerinin deneysel araştırılması* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ela, Ç. (2009). *Devlet hava meydanlarına ait motorlu taşıtlarda biyodizel kullanımının ekonomik ve çevresel etkileri* (Yüksek lisans tezi). Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Elarslan, T. (2022). *Atık ağartma toprağından geri kazanılan atık yağdan biyodizel üretimi ve dizel motor performans ve emisyonlarına etkisinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Muş Alparslan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Elkelawy, M., Etaiw, S. E. H., Bastawissi, H. A. E., Marie, H., Elbanna, A., Panchal, H., et al. (2020). Study of diesel-biodiesel blends combustion and emission characteristics in a CI engine by adding nanoparticles of Mn (II) supramolecular complex. *Atmospheric Pollution Research*, 11(1), 117-128. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.09.021>
- Elkelawy, M., Etaiw, S. H., Ayad, M. I., Marie, H., Dawood, M., & Panchal, H., et al. (2021). An enhancement in the diesel engine performance, combustion, and emission attributes fueled by diesel-biodiesel and 3D silver thiocyanate nanoparticles additive fuel blends. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 124, 369-380. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.02.019>
- Emiroğlu, A. O. (2012). *İçten yanmalı motorlar* [Ders notları]. Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bolu.
- 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. <https://doi.org/10.16984/sofenbilder.395134>
- Emiroğlu, A. O., & Şen, M. (2018a). Combustion, performance and emission characteristics of various alcohol blends in a single cylinder diesel engine. *Fuel*, 212, 34-40. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.016>
- Emiroğlu, A. O., & Şen, M. (2018b). 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. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.069>
- Emiroğlu, A. O., Keskin, A., & Şen, M. (2018c). Experimental investigation of the effects of turkey rendering fat biodiesel on combustion, performance and exhaust emissions of a diesel engine. *Fuel*, 216, 266-273. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.026>

- Ergen, G. (2006). *Ön ısıtma uygulanarak kullanılan biyodizel yakıtının motor performans ve emisyonlarına etkisinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Eryılmaz, T. (2009). *Hardal yağı biyodizelinde farklı karışım oranlarının dizel motorlarda performansa etkisi* (Doktora tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Fayad, M. A., & Dhahad, H. A. (2021). Effects of adding aluminum oxide nanoparticles to butanol-diesel blends on performance, particulate matter, and emission characteristics of diesel engine. *Fuel*, 286, 119363. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119363>
- Fedai, Ö. (2006). *Transesterifikasyon ile kanola yağı metil esteri sentezinin optimizasyonu* (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- George, R. O., Franc, S., James, S. J., John, M., & Sebastian, G. (2015). An experimental analysis on synergetic effect of multiple nanoparticle blended diesel fuel on CI engine. *IJRST – International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 1(12), 151-156.
- Gürkan, Y. (2019). *Etanol katkılı kanola biyodizelinin bir dizel motorunda kullanılabilirliğinin deneysel araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Eğitimi Anabilim Dalı.
- Güruf, G. (2024). *Dizel-biyodizel yakıt karışımlarına nano parçacık (B_2O_3) ilavesinin motor performansına ve emisyonlara etkisinin incelenmesi, ekserji analizi ve optimizasyonu* (Doktora tezi). Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.
- İlhan, O. (2019). *Dizel motorda ön ısıtma uygulanmış biyodizel yakıtı kullanımının etkisinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- İnal, A. (2017). *Haşhaş yağından üretilen biyodizelin motor performansına etkisi* (Yüksek lisans tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- İnal, O. M. (2020). *Deri endüstrisi atık yağlarından üretilen biyodizelin dizel motor yanma performans ve emisyonlarına etkisinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.
- İşler, A. (2007). *Kanola yağı etil esteri ve e-dizel* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Jahani, M., Khavari-Nejad, R. A., Mahmoodzadeh, H., & Saadatmand, S. (2020). Effects of cobalt oxide nanoparticles (Co_3O_4 NPs) on ion leakage, total phenol, antioxidant enzymes activities and cobalt accumulation in *Brassica napus* L. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 48(3), 1260-1275. <https://doi.org/10.15835/nbha48311766>
- Jayaraman, J., Karthik, M., Krishna, B. M., Joy, N., Mariadhas, A., & Appavu, P. (2021). Impact of titanium oxide nano additives on the performance characteristics of a CI engine fuelled with Manilkarazapota methyl ester blends. *Materials Today: Proceedings*, 44, 3601-3605. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.497>
- Kalaimurugan, K., Karthikeyan, S., Periyasamy, M., & Mahendran, G. (2020). Experimental investigations on the performance characteristics of CI engine fuelled with cerium oxide nanoparticle added biodiesel-diesel blends. *Materials Today: Proceedings*, 33, 2882-2885. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.778>
- Kana, S. R., & Shaija, A. (2022). Performance, combustion and emission characteristics of a diesel engine using waste avocado biodiesel with manganese-doped alumina nanoparticles. *International Journal of Ambient Energy*, 43(1), 1437-1444. <https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1707112>

- Karabulut, M. (2015). *Üç silindirli motora sahip tarımsal amaçlı bir traktörde biyodizel kullanımının performans ve emisyonlara etkisi* (Yüksek lisans tezi). Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Karaca, M., & Aslan, V. (2024). Keten tohumu yağından üretilen metil ve etil esterlerin harmanlanması ile edilen karışım biyodizellerin yoğunluk, kinematik viskozite ve ısıl değerlerinin karşılaştırılması. *J Innovative Eng Nat Sci*, 4(2), 541-560. <https://doi.org/10.61112/jiens.1470119>
- 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. <https://doi.org/10.29130/dubited.745180>
- Karthikeyan, P., & Viswanath, G. (2020). Effect of titanium oxide nanoparticles in tamanu biodiesel operated in a two-cylinder diesel engine. *Materials Today: Proceedings*, 22, 776-780. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.138>
- Karthikeyan, S., Elango, A., Prathima, A., & Raja, K. (2014). Environmental effects of nano additive Co_3O_4 in grape seed oil biofuel fuelled in CI engine. *Research Journal of Chemistry and Environment*, 18(5), 14-18.
- Kaya, C. (2006). *Bitkisel yağlardan biyodizel üretimi* (Yüksek lisans tezi). Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı.
- Kaya, O. (2022). *Biyodizele farklı türde nanopartiküller eklenmesinin dizel motor performansı ve emisyonlarına etkisi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Aydın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Keskin, A. (2005). *Tall yağı esaslı biyodizel ve yakıt katkı maddesi üretimi ve bunların dizel motor performansı üzerindeki etkileri* (Doktora tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Keskin, A., Şen, M., & Emiroğlu, A. O. (2020). Experimental studies on biodiesel production from leather industry waste fat and its effect on diesel engine characteristics. *Fuel*, 276, 118000. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118000>
- Koçman, Ö. (2022). *Dünyada ve Türkiye’de petrol sektöründe yeşil yönetim: Türkiye için bir model önerisi* (Doktora tezi). Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- Lenin, K., Raghuvaran, S., Hariharan, K. B., Manimaran, M., Ramakrishnan, H., & Dhanabalan, S. (2022). Experimental investigation on single cylinder four-stroke diesel engine with copper oxide nano-additives using tomato seed oil. *Materials Today: Proceedings*, 69, 1280-1291. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.401>
- Maden, K. (2016). *Kanola yağından biyodizel üretim sürecinin optimizasyonu ve motor performansına etkileri* (Yüksek lisans tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Mert, S. (2020). *Termal bariyer kaplı bir dizel motorda biyodizelin yanmaya olan etkilerinin incelenmesi* (Doktora tezi). Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
- Mohan, S., & Dinesha, P. (2022). Performance and emissions of biodiesel engine with hydrogen peroxide emulsification and cerium oxide (CeO_2) nanoparticle additives. *Fuel*, 319, 123872. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123872>
- Nayir, M. M. (2018). *Kanola yağından baz katalizli transesterifikasyon yöntemi ile biyodizel üretiminde reaksiyon parametrelerinin optimizasyonu* (Yüksek lisans tezi). Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Nişancı, S. (2007). *Biyodizel yakıt karışımlarının performans ve emisyon üzerine etkilerinin deneysel araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Oğuz, H. (2004). *Tarım kesiminde yaygın olarak kullanılan dizel motorlarında fındık yağı biyodizelinin yakıt olarak kullanım imkanlarının incelenmesi* (Doktora tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Opuz, M. (2022). *Biyodizel içerisine metalik esaslı yakıt katkı maddesi ilavesinin motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkisinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Ordu, S. (2022). *Kobalt oksit nanopartiküllerinin sıçanlarda karaciğer üzerine etkisinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Mersin Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Eczacılık Biyokimya Anabilim Dalı, Mersin.
- Örnek, S. S. (2007). *Dizel motorlarda biyodizel kullanımının egzoz emisyonlarına etkilerinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Örs, A. (2016). *Biyodizel bütanol karışımlarının motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisi* (Yüksek lisans tezi). Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Özbiçli, C. (2018). *Kanola-aspir yağı karışımı biyodizel ve motorin yakıtlarının CRDI bir dizel motorda kullanımı* (Yüksek lisans tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Özcan, A. (2023). Küresel iklim değişikliği ve sürdürülebilir yenilenebilir enerji kaynakları üzerine etkileri. *Uluslararası İklim ve Enerji Araştırmaları Dergisi*, 6(1), 45-62.
- Özdemir, M. (2011). *Bir dizel motorda biyodizel ve etanol kullanımının motor performansına ve emisyonlara etkisinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Özer, S. (2015). *Pirina yağından fuzel yağı ile biyodizel üretimi ve dizel motor performans ve emisyonlarına etkisi* (Doktora tezi). Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Karabük.
- Öztürk, Ö. (2007). *Dizel motorlarında karışımsız olarak kullanılan biyodizellerin motor performansına olan etkilerinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Makinaları Programı, İstanbul.
- Pullagura, G., Vanthala, V. S. P., Vadapalli, S., Bikkavolu, J. R., Barik, D., Sharma, P., & Bora, B. J. (2024). Enhancing performance characteristics of biodiesel-alcohol/diesel blends with hydrogen and graphene nanoplatelets in a diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 50(1), 1020-1034. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.313>
- Razzaq, L., Mujtaba, M. A., Soudagar, M. E. M., Ahmed, W., Fayaz, H., Bashir, S., et al. (2021). Engine performance and emission characteristics of palm biodiesel blends with graphene oxide nanoplatelets and dimethyl carbonate additives. *Journal of Environmental Management*, 282, 111917. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111917>
- Reşitoğlu, İ. A. (2010). *Atık yağlardan üretilmiş biyodizelin dizel motor performans ve emisyonuna etkisinin deneysel olarak araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.044>
- Sarıkoç, S. (2019). *Biyodizel-bütanol-dizel karışımlarına hidrojen ve titanyum dioksit ilavesinin performans ve emisyon parametrelerine etkilerinin araştırılması* (Doktora tezi). Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

- Sarvestani, N. S., Tabasizadeh, M., Abbaspour Fard, M. H., Nayebzadeh, H., Chu Van, T., Jafari, M., et al. (2021). Effects of enhanced fuel with Mg-doped Fe₃O₄ nanoparticles on combustion of a compression ignition engine: Influence of Mg cation concentration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110817. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110817>
- Sathish, T., Muthukumar, K., Abdulwahab, A., Rajasimman, M., Saravanan, R., & Balasankar, K. (2023). Enhanced waste cooking oil biodiesel with Al₂O₃ and MWCNT for CI engines. *Fuel*, 333, 126429. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126429>
- Solak, S. (2013). *Biyodizel/LPG çift yakıtlı bir motorda püskürtme zamanının performans ve emisyonlara etkisi* (Yüksek lisans tezi). Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Karabük.
- Soudagar, M. E. M., Mujtaba, M. A., Safaei, M. R., Afzal, A., Ahmed, W., Banapurmath, N. R., et al. (2021). Effect of Sr@ZnO nanoparticles and *Ricinus communis* biodiesel-diesel fuel blends on modified CRDI diesel engine characteristics. *Energy*, 215, 119094. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119094>
- Soysal, C. (2008). *Dizel motorlarında biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kullanılmasının motor performansına etkisinin deneysel olarak incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Söyler, H. (2011). *JP-8 ve biyodizel karışımlarının sıkıştırma ile ateşlemeli motorda yakıt olarak kullanılması* (Yüksek lisans tezi). Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Suhel, A., Abdul Rahim, N., Abdul Rahman, M. R., Ahmad, K. A., Teoh, Y. H., & Zainal Abidin, N. (2021). An experimental investigation on the effect of ferrous ferric oxide nano-additive and chicken fat methyl ester on performance and emission characteristics of compression ignition engine. *Symmetry*, 13(2), 265. <https://doi.org/10.3390/sym13020265>
- Sümer, E. (2017). *Propanolün bir dizel motorda aspir biyodizeli kullanımına etkilerinin deneysel olarak araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sürer, E., Solmaz, H., Yılmaz, E., Calam, A., & İpci, D. (2023). Investigation of the effect of carbon nanotube addition to diesel-biodiesel blend on engine performance and exhaust emissions. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(2), 1055-1064. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.741177>
- Şahin, H. (2022). *Dizel motorda etanol-biyodizel kullanımının motor parametrelerine etkisi* (Yüksek lisans tezi). Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Şahin, T. (2019). *Biyodizel ve bioetanol karışımının tek silindirli bir dizel motorda kullanımının motor performansına ve emisyonlara etkileri* (Yüksek lisans tezi). Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Şen, M., Emiroğlu, A. O., & Keskin, A. (2018). Production of biodiesel from broiler chicken rendering fat and investigation of its effects on combustion, performance, and emissions of a diesel engine. *Energy & Fuels*, 32(5), 5209-5217. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b00278>
- Şen, S. (2012). *Hayvansal yağlardan biyodizel üretimi ve dizel motor performans ve emisyonlarına etkisinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Şimşek, R. (2016). *Ketencik biyodizelinin üretilmesi, içten yanmalı bir motorun performans ve emisyonlarına etkisinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2021, Temmuz). *İstanbul ili atık su ve CO₂ arıtımı ile mikroalgal biyodizel üretimi: Ön fizibilite raporu*. İstanbul Kalkınma Ajansı.

- Tan, T. (2022). *Mangan esaslı dizel-biyodizel yakıt karışımlarının bir dizel motorda kullanımının araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Batman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Tarım ve Orman Bakanlığı. (2021). *Bitkisel yağlar sektör politika belgesi 2020-2024*. Ankara.
- Tillem, İ. (2005). *Dizel motorlar için alternatif yakıt olarak biyodizel üretimi ve kullanımı* (Yüksek lisans tezi). Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Topcu, A. (2008). *Örnek dizel motorda motorin ve kanola yağından elde edilmiş biyodizel için EGR stratejilerinin karşılaştırılması* (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Tural, M. (2023). *Dizel yakıtına bizmut oksit nanopartikül katkısının motor parametreleri üzerindeki etkisinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- U.S. Canola Association. (2024). Biodiesel: Renewable fuel made from canola. <https://www.uscanola.com/biodiesel/biodiesel/#:~:text=The%20entire%20canola%20plant%20is,biodiesel%20and%2080%20percent%20diesel> adresinden 21 Ekim 2024 tarihinde alınmıştır.
- Uçkun, E. (2004). *Biyodizel yakıtı kullanan bir dizel motorunda ekserji analizi* (Yüksek lisans tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ulutürk, E. (2020). *Tavuk kesimhanesi rendering yağından biyodizel üretilmesi ve dizel motoru performans, emisyon ve yanma karakteristikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Uslu, S., & Çelik, M. (2023). Response surface methodology-based optimization of the amount of cerium dioxide (CeO₂) to increase the performance and reduce emissions of a diesel engine fueled by cerium dioxide/diesel blends. *Energy*, 266, 126403. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126403>
- Uyar, M. (2013). *Transesterifikasyon yöntemiyle üretilen biyodizel yakıtlarının üzerine MnO₂, dodekanol, propilen glikol katkı maddelerinin etkisinin deneysel olarak araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Uyar, M. M. (2024). *Nanopartikül katkılı biyodizel yakıtlar üreterek bir dizel güç santralinde etkili parametrelerin incelenmesi* (Doktora tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Uyumaz, A. (2009). *Pamuk yağı esaslı biyodizel ile çalışan bir dizel motorunda yakıt püskürtme avansının motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkileri* (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Üret. (2024). Ham petrolden elde edilen ürünler - Petrol. <https://uret.com.tr/ham-petrolden-elde-edilen-urunler-petrol/> adresinden 13 Eylül 2024 tarihinde alınmıştır.
- Venu, H., & Appavu, P. (2020). Al₂O₃ nano additives blended Polanga biodiesel as a potential alternative fuel for existing unmodified DI diesel engine. *Fuel*, 279, 118518. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118518>
- Venu, H., & Madhavan, V. (2016). Effect of Al₂O₃ nanoparticles in biodiesel-diesel-ethanol blends at various injection strategies: Performance, combustion and emission characteristics. *Fuel*, 186, 176-189. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.046>
- Venu, H., Appavu, P., & Raju, V. D. (2024). Influence of Zr₂O₃ nano additives on particle size diameter (PSD), mass fraction burnt (MFB) and engine characteristics of Jatropha biodiesel fuelled DI diesel engine. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 22(2), 387-405. <https://doi.org/10.1080/14484846.2022.2100042>

- Vignesh, P., Jayaseelan, V., Pugazhendiran, P., Prakash, M. S., & Sudhakar, K. (2022). Nature-inspired nano-additives for biofuel application – A review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 12, 100360. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.100360>
- Vigneswaran, R., Balasubramanian, D., & Sastha, B. D. S. (2021). Performance, emission and combustion characteristics of unmodified diesel engine with titanium dioxide (TiO₂) nanoparticle along with water-in-diesel emulsion fuel. *Fuel*, 285, 119115. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119115>
- Yağız, S. (2019). *Pamuk yağı ve atık pamuk yağı biyodizelinin dizel motorlu bir jeneratörde yakıt olarak kullanım olanaklarının araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Yaşar, F. (2016). *Yosun yağından biyodizel üretimi ve bir dizel motorunda alternatif yakıt olarak kullanılması* (Doktora tezi). Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yeşilyurt, M. K. (2017). *Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına farklı alkol ilavelerinin dizel motorlarda performans, yanma ve emisyon karakteristiklerine etkilerinin incelenmesi* (Doktora tezi). Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yılbaş, Z. (2022). *Kenevir (Cannabis sativa L.) yağı biyodizeli-dizel yakıt karışımına farklı ağır alkol ve atık EPS ilavelerinin bir dizel motorun karakteristikleri üzerine etkileri ile termodinamik, ekonomik ve çevresel analizleri* (Doktora tezi). Yozgat Bozok Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Yıldırım, B. (2019). *Aşırı doldurmalı kısmi yalıtımlı bir dizel motorunda biyodizel ve EGR kullanımının performans ve emisyonlara etkilerinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Yiğit, A. (2009). *Dizel motorlarda kanola yağı metil esteri kullanımının performans ve emisyonlara etkileri* (Yüksek lisans tezi). Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.