

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**BALIK YAĞI ETİL ESTERİNİN DİZEL MOTORLARDA YAKIT
OLARAK KULLANILMASININ ARAŞTIRILMASI**

Mehmet Rahim ARSLAN

Yüksek Lisans Tezi

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Taşıt Tasarım Programı

AĞUSTOS, 2021

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Taşıt Tasarım Programı

Yüksek Lisans Tezi

**BALIK YAĞI ETİL ESTERİNİN DİZEL MOTORLARDA YAKIT
OLARAK KULLANILMASININ ARAŞTIRILMASI**

Tez Yazarı
Mehmet Rahim ARSLAN

Danışman
Prof. Dr. Cumali İLKILIÇ

AĞUSTOS, 2021
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı:	Balık Yağı Etil Esterinin Dizel Motorlarda Yakıt Olarak Kullanılmasının Araştırılması
Yazarı:	Mehmet Rahim ARSLAN
İlk Teslim	09.07.2021
Savunma	10.08.2021

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

	<i>İmza</i>
Danışman:	Prof. Dr. Cumali İLKILIÇ Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi
	Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Hasan BAYINDIR Dicle Üniversitesi, Diyarbakır Teknik Bilimler M.Y.O
	Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Sinan SAYDAM Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi
	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Balık Yağı Etil Esterinin Dizel Motorlarda Yakıt Olarak Kullanılmasının Araştırılması” yüksek lisans tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

10.08.2021

Mehmet Rahim ARSLAN



ÖNSÖZ

Günümüzde motorlu araçlarda kullanılan petrol, doğalgaz ve türevi yakıtlar artan nüfus ve araç sayısına bağlı olarak azalmaktadır. Ayrıca dünya rezervlerinde bulunan fosil yakıtların da hızla azalması doğaya ve insanlara olan ciddi zararlarının artması, bilimi yenilenebilir çevreci ve kolay elde edilebilir enerji kaynakları arayışına sevk etmiştir. Bu bağlamda birçok yeni enerji kaynakları bulunup kullanıma sunulmuştur. Böylece hem yenilenebilir enerji sağlanıp hem de insan sağlığı ve çevreye olan zararlar minimuma indirilmeye çalışılmıştır.

Biyodizel yakıtlar, hayvansal, bitkisel ve atık yağlardan elde edilip motorlu araçlarda enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Fosil yakıtlara göre kolay elde edilmesi çevreci ve maliyeti düşük olmasından dolayı tercih edilmektedir. Dizel motorlar üzerinde herhangi bir revizyona gerek kalmadan kullanılabilir. Aynı zamanda emisyonlarının temiz olması, doğada hızlı ve kolayca çözünmesinden ötürü çevreci bir yakıt olarak gösterilebilir.

Bu tez çalışmasında balık yağından transesterifikasyon yoluyla etil esteri (biyodizel) elde edilip, farklı oranlarda dizel yakıtı ile karıştırılıp, tek silindirli bir dizel motorda test edilerek motor performans karakteristikleri, emisyon değerleri ve yakıtın motor elemanları üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Yaptığım bu tez çalışmasının araştırılmasında, hazırlanmasında ve sonuçlandırılmasında ilgi alaka ve desteklerini esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleriyle yol gösteren tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Cumali İLKILIÇ'a teşekkür ederim. Üretim aşamasında yardımları ve deneyimleriyle çalışmama büyük katkı sağlayan Sayın Prof. Dr. Sinan SAYDAM'a ve deneysel çalışmaların yürütülmesinde ve tezin hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Hüseyin SEVİNÇ'e şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim. Ayrıca deneysel çalışmalar sürecinde yaptığı yardım ve fedakârlıktan ötürü Teknisyen Selahattin BOZ'a ve tez yazım aşamasında destek olup yol gösteren değerli dostlarım İsmet BABALI'ya ve Okan TAN'a teşekkür ve minnettarlıklarımı sunuyorum.

Mehmet Rahim ARSLAN

ELAZIĞ, 2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
TABLOLAR LİSTESİ	xiii
SİMGELER	xiv
KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	16
1.1. Biyodizel İle İlgili Yapılan Çalışmalar	17
1.2. Tezin Amacı	22
2. DİZEL YAKITLAR	24
2.1. Dizel Yakıt Nedir?	24
2.2. Dizel Yakıtın Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri	25
2.2.1. Isı Değeri	25
2.2.2. Setan Oranı	25
2.2.3. Viskozite	25
2.2.4. Kükürt İçeriği	26
2.2.5. Su ve Çöküntü İçeriği	26
2.2.6. Karbon Kalıntısı	26
2.2.7. Parlama Noktası	27
2.3. Dizel Yakıtların Sınıflandırılması	27
2.4. Dizel Motorlarda Yanma	28
2.4.1. Tutuşma Gecikmesi (A-B)	29
2.4.2. Kontrolsüz Yanma (B-C)	30
2.4.3. Kontrollü Yanma (C-D)	30
2.4.4. Gecikmiş Yanma (D-E)	31
2.5. Dizel Motorlarda Emisyon Standartları	31
3. BİYODİZEL YAKITLAR	33
3.1. Biyodizel Nedir?	33
3.2. Biyodizelin Tarihi Süreci	34
3.3. Biyodizelin Türkiye'deki Durumu	34
3.4. Dünyada Biyodizelin Durumu	36

3.5. Biyodizelin Özellikleri.....	39
3.5.1. Termodinamik Özellikleri	40
3.5.2. Kinematik Viskozite.....	40
3.5.3. Yoğunluk.....	40
3.5.4. Setan Sayısı	40
3.5.5. Donma Noktası, Akma Noktası ve Donma Filtresi Tıkanma Noktası.....	41
3.5.6. Parlama Noktası	41
3.5.7. Isıl Değer	41
3.6. Biyodizelin Avantajları ve Dezavantajları	41
3.6.1. Ekonomik ve Enerji Güvenliği.....	42
3.6.2. Tarımsal ve Çevresel	42
3.7. Biyodizel Üretiminde Kullanılan Hammadeler.....	43
3.8. Biyodizel Üretim Yöntemleri.....	44
3.8.1. Transesterifikasyon	45
3.8.2. Süper Kritik Yöntem	46
3.8.3. Miroemülsiyon Yöntemi	46
3.8.4. Piroлиз Yöntemi	47
3.8.5. Seyreltme Metodu	47
3.9. Biyodizelin Üretim Standartları	48
3.9.1. EN 14214 Standartları	49
3.9.2. EN 14213 Standartları	50
3.9.3. EN 590 Standartları	50
3.10. Biyodizel Emisyonları.....	51
3.11. Zararlı Egzoz Emisyonları	53
3.11.1. Karbonmonoksit (CO) Emisyonları.....	53
3.11.2. Karbondioksit (CO ₂) Emisyonu.....	53
3.11.3. Hidrokarbon (HC) Emisyonları	54
3.11.4. Azot Oksit (NO _x) Emisyonları.....	55
3.11.5. Partikül Madde Emisyonları.....	55
4. MATERYAL VE METOT	57
4.1. Balık Yağından Biyodizel Üretimi.....	57
4.1.1. Kullanılan Kimyasal Malzeme Ve Gereçler.....	57
4.1.2. Balık Yağının Temin Edilmesi	58
4.2. Deneyde Kullanılan Etil Alkol.....	60
4.3. Deneyde Kullanılan Sülfürik Asit.....	62
4.4. Serbest Yağ Asidi (FFA) Tayini	63

4.4.1. Titrasyon Deneyinin Birinci Basamağı	64
4.4.2. Titrasyon Deneyinin İkinci Basamağı	65
4.5. Etil Esteri Üretimi	67
4.6. Deney Düzenegi	68
4.7. Balık Yağının Ön Hazırlığı	68
4.8. Transesterifikasyon Reaksiyonu	69
4.9. Karışımın Yıkanması	72
4.10. Faz Ayrışması	74
4.11. Yakıtların Kimyasal Özellikleri	75
4.11.1. Kinematik Viskozite	76
4.11.2. Isıl Değeri	77
4.11.3. Yoğunluk	77
4.11.4. Parlama Noktası	78
4.11.5. Setan İndeksi	78
5. MOTOR DENEYLERİ	79
5.1. Motor Test Düzenegi	79
5.2. Kullanılan Dizel Motor	80
5.3. Kullanılan Emisyon Cihazı	81
5.4. Testlerde Kullanılan Yakıtlar	82
5.5. Dizel Motorun Sökülüp Temizlenmesi	83
5.6. Yakıt Miktarı Ölçümü	85
5.7. Yakıtların Motorda Test Edilmesi	85
6. BULGULAR VE SONUÇLAR	87
6.1. Motor Elemanlarının İncelenmesi	87
6.2. Motor Performanslarının Değerlendirilmesi	88
6.2.1. Motor Efektif Gücünün (P_e) İncelenmesi	88
6.2.2. Motor Moment (M_d) Eğrileri	90
6.2.3. Özgül Yakıt Tüketimi (ÖYT)	92
6.3. Emisyon ve İş Ölçümlerinin Değerlendirilmesi	94
6.3.1. Karbonmonoksit (CO) Emisyonları	95
6.3.2. Hidrokarbon Emisyonları (HC)	97
6.3.3. Karbondioksit Emisyonları (CO_2)	99
6.3.4. Azot Oksit (NO_x) Emisyonları	101
6.3.5. Duman (İs) Emisyonları	104
7. SONUÇLAR	107

ÖNERİLER	111
KAYNAKLAR.....	113
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

Balık Yağı Etil Esterinin Dizel Motorlarda Yakıt Olarak Kullanılmasının Araştırılması

Mehmet Rahim ARSLAN

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı
Ağustos 2021, Sayfa xv+118

İçten yanmalı dizel motorlarda biyodizel yakıt kullanılarak emisyon değerleri, motor güç karakteristikleri ve motor elemanları üzerindeki etkilerin incelenmesi amaçlanmıştır. Ham balık yağına etil alkol ilave edilip transesterifikasyon metoduyla etil esteri (biyodizel) üretilmiştir. Katalizör olarak güçlü bir asit olan Sülfirik Asit (H_2SO_4) kullanılmıştır. Transesterifikasyon metoduyla balık yağı etil alkol ile esterleşerek, vizkozitesi düşürülüp motorda kullanıma uygun hale getirilmiştir. Elde edilen biyodizel %50, %75 oranlarında dizel yakıt ile harmanlanmış ve bunun yanı sıra saf biyodizelde kullanılmıştır. Bunun sonucunda B50, B75 ve B100 yakıt numuneleri elde edilmiştir. Elde edilen bu yakıt numunelerinin özellikleri ölçülerek standart değerleri belirlenmiştir.

İkinci aşamada, üretilen biyodizel yakıtlar tek silindirli, direkt püskürtmeli, hava soğutmalı, 8,5 HP güçte Antor 6LD 400 tip motor üzerinde test edilmiştir. Bu testlerde D100, B100, B75, B50 olmak üzere 4 farklı yakıt denenmiştir. Testler %100 ve %50 yüklerde 1600, 1900, 2200, 2500 ve 2800 d/d motor devirlerinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu testlerde motordaki CO, CO₂, NO_x, HC emisyonları ve is ölçümleri alınmıştır. Aynı zamanda motorun güç, moment değerleri ve özgül yakıt tüketim değerleri ölçülüp, bütün bu ölçümler grafikler halinde sunulup yorumlanmıştır. Ayrıca motor testlerden önce ve testlerden sonra sökülerek incelenmiş ve kullanılan biyodizel yakıtın motor elemanları üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Biyodizel, Transesterifikasyon, Balık Yağı, Etil Alkol, Emisyon

ABSTRACT

Research of the Using Fish Oil Ethly Ester In Diesel Engines

Mehmet Rahim ARSLAN

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Automotive Engineering
August 2021, Page xv+118

It is aimed to examine the emission values, engine power characteristics and the effects on engine components by using biodiesel fuel in internal combustion diesel engines. Ethyl ester (biodiesel) was produced by adding ethyl alcohol to crude fish oil by transesterification method. Sulfuric Acid (H_2SO_4), a strong acid, was used as a catalyst. By transesterification method, fish oil is esterified with ethyl alcohol and its viscosity is reduced and it is made suitable for use in engines. The obtained biodiesel was blended with 50% 75% diesel fuel and also used in pure biodiesel. As a result, B50, B75 and B100 fuel samples were obtained. The properties of these fuel samples obtained were measured and their standard values were determined.

The biodiesel fuels produced in the second stage were tested on an Antor 6LD 400 type engine with a single cylinder, direct injection, air cooling, power of 8.5 HP. In these tests, 4 different fuels were tried, namely D100, B100, B75, B50. The tests were carried out at 100% and 50% loads at 1600, 1900, 2200, 2500 and 2800 revolutions. In these tests, CO, CO₂, NO_x, HC emissions and soot measurements in the engine were taken. At the same time, the power, torque values and specific fuel consumption values of the engine were measured, and all these measurements were presented and interpreted as graphics. In addition, the engine was disassembled before and after the tests and the effects of the used biodiesel fuel on the engine components were examined.

Keywords: Biodiesel, Transesterification, Fish Oil, Ethyl Alcohol, Emission

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Dizel motorlarda gerçekleşen yanma safhaları	29
Şekil 3.1. Türkiye’de biyodizel üretiminde kullanılan hammadde oranları	35
Şekil 3.2. Avrupa biyodizel üretiminde hammadde oranları.....	38
Şekil 3.3. Biyodizel üretiminde kullanılan kaynaklar.	44
Şekil 3.4. Transesterifikasyon reaksiyonu aşaması	46
Şekli 3.5. Yağ asidi zincirlerinin kopması	46
Şekil 4.1. Biyodizel üretiminde kullanılan etanol.	61
Şekil 4.2. Katalizör olarak kullanılan sülfürik asit.....	62
Şekil 4.3. Titrasyon deney düzeneği	63
Şekil 4.4. 0,001 gr ölçüm hassasiyetli terazi	64
Şekil 4.5. Deney düzeneği.....	64
Şekil 4.6. Erlende pembe renk oluşumu.....	65
Şekil 4.7. Erlen içerisinde bulunan biyodizel.....	66
Şekil 4.8. Erlende pembe renk oluşumu.....	66
Şekil 4.9. Esterifikasyon reaksiyonu	67
Şekil 4.10. Biyodizel üretim safhaları	67
Şekil 4.11. Deney düzeneği.....	68
Şekil 4.12. Termometre ile sıcaklık ölçümü	69
Şekil 4.13. Suyun ısıtılarak uzaklaştırılması	69
Şekil 4.14. Etil Esteri reaksiyonu	70
Şekil 4.15. Sabit sıcaklıkta karıştırılan balık yağı	70
Şekil 4.16. Sabit sıcaklıkta karıştırılan karışım.....	71
Şekil 4.17. Soğumaya bırakılan karışım.....	71
Şekil 4.18. Filtreden geçirilen karışım	72
Şekil 4.19. Yıkama işlemine alınan karışım.....	73
Şekil 4.20. Gliserin ve suyun ayrışması	73
Şekil 4.21. Balık yağı etil esterini üç faz hali.....	73
Şekil 4.22. Gliserinin yağ esterinden ayrılması.....	74
Şekil 4.23. Gliserin ve yabancı maddelerin çökmesi	74
Şekil 4.24. Yıkama suyunun görünümü	75
Şekil 4.25. Üretilen biyodizel yakıt.....	75
Şekil 5.1. Motor test tezgâhına ait şematik görünüm	79
Şekil 5.2. Cussons P8160 model test tezgâhı	80
Şekil 5.3. Kullanılan dizel motor	81
Şekil 5.4. BOSCH marka emisyon analizörü	81
Şekil 5.5. Deneylerde kullanılan yakıtlar	82

Şekil 5.6.	Deneylerde kullanılan yakıtlar (biyodizel).....	83
Şekil 5.7.	Yakıt püskürtme enjektörü.....	83
Şekil 5.8.	Egsoz ve emme subapları.....	84
Şekil 5.9.	Pistonun üstten görünümü.....	84
Şekil 5.10.	Pistonun üzerindeki segmanlar	84
Şekil 5.11.	Deney akış şeması.....	86
Şekil 6.1.	Pistonun üstten görünümü.....	87
Şekil 6.2.	Segmanların görünümü.....	87
Şekil 6.3.	Subaplar ve enjektör memesi görünümü.....	88
Şekil 6.4.	Yarım yük durumunda motor efektif güç (P_e) grafiği.....	89
Şekil 6.5.	Tam yük durumunda motor efektif güç (P_e) grafiği.....	89
Şekil 6.6.	Yarım yük durumunda motor momenti (M_d).....	91
Şekil 6.7.	Tam yük durumunda motor momenti (M_d).....	91
Şekil 6.8.	Yarım yük durumunda özgül yakıt tüketimi (g/kWh).....	93
Şekil 6.9.	Tam yük durumunda özgül yakıt tüketimi (g/kWh).....	93
Şekil 6.10.	Yarım yük durumunda CO(%) emisyonları.....	95
Şekil 6.11.	Tam yük durumunda CO (%) emisyonları.....	96
Şekil 6.12.	Yarım yük durumunda HC (ppm) emisyonları.....	98
Şekil 6.13.	Tam yük durumunda HC (ppm) emisyonları.....	98
Şekil 6.14.	Yarım yük durumunda CO ₂ (%) emisyonları.....	100
Şekil 6.15.	Tam yük durumunda CO ₂ (%) emisyonları.....	100
Şekil 6.16.	Yarım yük durumunda NO _x (ppm) emisyonları	102
Şekil 6.17.	Tam yük durumunda NO _x (ppm) emisyonları	102
Şekil 6.18.	Yarım yük durumunda is (%) emisyonları.....	105
Şekil 6.19.	Tam yük durumunda is (%) emisyonları.....	105

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1.	Standart dizel yakıt sınıfları ve özellikleri	27
Tablo 2.2.	Hafif ticari araçlar için AB standartları(g/km)	31
Tablo 2.3.	Ağır hizmet dizel araçlar için AB standartları(g/km).....	32
Tablo 2.4.	Dizel yolcu araçlar için AB emisyon standartları(g/km).....	32
Tablo 3.1.	AB ve Türkiye’de üretilen biyodizel miktarları	38
Tablo 3.2.	AB’de biyodizel harmanlama oranları	39
Tablo 3.3.	Türkiyede biyodizel standartları.....	48
Tablo 3.4.	EN 14214 standart özellikleri.....	49
Tablo 3.5.	EN 14213 standart özellikleri.....	50
Tablo 3.6.	EN 590 standart özellikleri.....	51
Tablo 3.7.	Biyodizel yakıt emisyon oranları	52
Tablo 4.1.	Kullanılan araç gereçler	58
Tablo 4.2.	Çeşitli balık türlerine ait yağ asidi özellikleri	59
Tablo 4.3.	Balık yağının özellikleri.....	60
Tablo 4.4.	Balık yağının standart ölçüm aralıkları	60
Tablo 4.5.	Etil alkolün özellikleri.....	61
Tablo 4.6.	Sülfürik asit özellikleri.....	62
Tablo 4.7.	Yakıtların özellikleri	76
Tablo 4.8.	Kinematik Viskozite Standartları	77
Tablo 4.9.	Kabul görmüş yoğunluk değerleri.....	77
Tablo 4.10.	Kabul görmüş parlama noktası standartları.....	78
Tablo 4.11.	Kabul görmüş setan indeksi standartları	78
Tablo 5.1.	Dizel motorun teknik özellikleri	80
Tablo 5.2.	Emisyon cihazı özellikleri.....	82
Tablo 5.3.	Ölçüm yapılan değerler ve formülleri	86

SİMGELER

d/d	: Bir dakikada yapılan devir sayısı
b_e	: Özgöl Yakıt Tüketimi
M_d	: Motor Momenti
Nm	: Tork birimi (Newton metre)
p_y	: Yoğunluk
P_e	: Efektif Motor Gücü
ppm	: Milyonda bir birim



KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AÖN	: Alt Ölü Nokta
B5	: %5 Biyodizel
B20	: %20 Biyodizel
B50	: %50 Biyodizel
B75	: %75 Biyodizel
B100	: %100 Biyodizel
Btu	: British thermal unit (İngiliz ısı birimi)
CO	: Karbonmonoksit
CO ₂	: Karbondioksit
CN	: Setan sayısı
CP	: Donma Noktası
CFPP	: Soğuk Filtre Tıkanma Noktası
D100	: %100 Dizel
DPF	: Dizel Partikül Filtresi
EGR	: Egzoz Gazları Devir Daimi
EIA	: Energy Information Administration (Enerji Bilgi İdaresi)
EİE	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
EPA	: Environmental Protection Agency (Çevre Koruma Ajansı)
FAME	: Fatty Acid Methyl Esters (Yağ Asidi Metil Esterleri)
H ₂ SO ₄	: Sodyum Hidroksit
HC	: Hidrokarbon
HCl	: Hidroklorik Asit
H ₂ O	: Su
HRR	: Heat Release Rate (Isı Yayılma Oranı)
LNT	: Fakir Azot Oksit Tuzağı
MGP	: Galon Başına Kat Edilen Mil
NaOH	: Sodyum Hidroksit
NO _x	: Azot Oksit
nPAH	: Nitrik Polisilik Aromatik Hidrokarbonlar
O ₂	: Oksijen
ÖYT	: Özgöl Yakıt Tüketimi
P _c	: Kritik Basınç
PP	: Akma Noktası
PM	: Partikül Madde
PAH	: Poli Aromatik Hidrokarbonlar
SCR	: Selective Catalytic Reduction (Seçici Katalitik Redüksiyon)
T _c	: Kritik Sıcaklık
ÜÖN	: Üst Ölü Nokta
V _c	: Kritik Hacim

1. GİRİŞ

Enerji, her ülkenin ekonomik açıdan kalkınabilmesi için temel bir gereksinimdir. Sanayi, ulaşım, tarım, ticaret ve ev sektörleri dâhil ekonominin her alanı enerjiye ihtiyaç duyar. Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bilgi İdaresi (EIA) raporuna göre, toplam dünya enerji tüketimi 2000 yılında 406 katrilyon İngiliz ısı birimi (Btu) iken, bu miktarın 2035 yılına kadar 769,8 katrilyon Btu'ya yükselmesi beklenmektedir. Bu miktar yaklaşık %47,25'lik bir artışa eşdeğerdir ve enerji ihtiyacı kesinlikle daha da artacaktır. Bundan dolayı alternatif enerji kaynaklarının araştırılmasına ihtiyaç vardır ve araştırmacılar buna katılmaktadır. Yenilenebilir enerji türleri arasında rüzgâr enerjisi, hidroelektrik, güneş enerjisi, biyokütle ve biyoyakıtlar gelmektedir. Sanayileşmiş dünyada dizel yakıtı olan yüksek talep ve yaygın kullanım alanından dolayı kaynaklanan kirlilik sorunları, bu geleneksel kaynaklardan çevre ve insan sağlığına daha az zarar veren, yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Dizel motorlar daha iyi yakıt ekonomisi nedeniyle, otomotiv alanında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat sınırlı fosil yakıt rezervi, çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkiler, bilim insanlarını dizel motorun yüksek verimini korurken dizele alternatif olabilecek yakıt arayışına sevk etmiştir. Fosil yakıtların dünyadaki sınırlı rezerv kaynakları hızla tükenmekte, iklim ve çevre üzerinde olumsuz etkileri küçümsemeyecek boyutlara gelmiştir. Atmosfere yüksek CO₂ salınımı, küresel ısınmanın temel nedeni olarak gösterilmektedir. Bunun yanı sıra NO_x, SO_x, CO, HC gibi emisyonlardaki artış iklim değişikliği ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere sebebiyet vermektedir (Yanfei Li & Xu, 2012).

Çeşitli tarımsal ve atık hammaddelerden biyoyakıt üretme hızı son on yılda büyük bir ilerleme göstermiştir. Biyoyakıtı duyulan bu ilgi, fosil petrol fiyatlarındaki paralel artış ve dünya çapında sera gazı emisyonlarını azaltma ihtiyacından meydana gelmektedir. Biyoyakıtlar, aynı zamanda birçok devlet tarafından, başta tahıllar, bitkisel yağlar, şeker bitkileri olmak üzere çeşitli tarımsal ürünler için yeni satış bölgeleri oluşturularak enerji arzına katkı sağlama ve tarımsal gelirleri sürdürme aracı olarak benimsenmektedir. Karayolu taşımacılığında fosil yakıtlar yerine biyoyakıt üretimi, tüketimi ve geliştirilmesine yönelik önemli kamu politikaları tüm dünyada oluşturulmuştur. Son on yıl içerisinde ABD, AB ve Asya ülkeleri ve Brezilya gibi birçok ülke bu konuda oldukça iddialı adımlar atmıştır. Ancak tarım fiyatlarındaki artış ve onu takip eden 2007-2008 gıda krizi toprak kıtlığı bağlamında dünyada biyoyakıtlar üzerinde kötü bir izlenimin oluşmasına sebep olmuştur. Ayrıca biyoyakıt emisyonlarının sera gazları üzerindeki etkisi hala önemli bir tartışma konusudur. Bunun yanında mevcut biyoyakıtların düşük enerji verimi de göz önüne alındığında özellikle akademik alanda oldukça büyük tartışmalara neden olmaktadır. Geleneksel gıda ve yem bitkilerinden üretilen birinci nesil biyoyakıtlar (1G) gıda güvenliği ve sera gazları üzerindeki olumsuz etkileri sebebiyle eleştirilmektedir. Bunun altında yatana sebep ise araziyi gıda ve yemden ve ayrıca arazi ormanı kullanımlarından mahrum bırakmalarıdır.

Bu olumsuz durumda gıda ve yem sektörüne zarar vermeden çeşitli biyokütle kaynaklarından üretilen ikinci nesil (2G) biyoyakıtların hızla gelişmesine olanak tanımıştır. Biyodizel, toksik olmayan, doğada biyolojik olarak parçalanabilen, yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Taze veya atık bitkisel yağlar, hayvansal yağlar ve yağlı tohum bitkileri başta olmak üzere geniş bir hammadde yelpazesi mevcuttur. Biyodizel ister saf halde ister motorinle harmanlanarak kullanılsın, genelde petrol bazlı dizele göre daha düşük emisyon ölçümlerine sahiptir. Biyodizel, atmosferde ki CO₂ seviyesinde net bir artışa katkıda bulunmaz ve sera gazı emisyonlarını en aza indirmeyi hedefler(Vicente, Martínez, & Aracil, 2004)(AntolÃ-n vd., 2002). Aynı zamanda biyodizel, kükürt içeriği, parlama noktası, aromatik içerik ve doğada biyolojik parçalanabilirlik açısından motorine göre çeşitli üstünlüklere sahiptir (Martini & Schell, 1998). Gelişmiş ülkelerde, modern teknolojilerin kullanılmasına ve biyoyakıt kullanılarak verimli biyoenerji elde edilmesine yönelik birçok çalışma vardır ve bunlar maliyet bakımından fosil yakıtlarla rekabet edebilecek duruma gelmiştir.

Araştırmacılar tarafından yapılan birçok çalışma, biyodizelin çevreci bir yakıt olduğunu göstermektedir. Biyodizelin birçok ülkede tanıtılması, üretilmesi ve kullanılması sonucu, ürün kalitesi ve kullanıcı güvenliği sağlamak için farklı yakıt standartları geliştirilmiştir. Biyodizel yakıtlar araç motorlarında doğrudan ya da motorin ile karıştırılarak kullanılabilir. Avrupa’da kullanılan yakıtlar B5 (%5 biyodizel), ve B100 (%100 biyodizel) oranlarında biyodizel içerir. B20’ye kadar biyodizel karışımlar neredeyse bütün dizel motorlarında kullanılabilir ve çoğu depolama ve dağıtım ekipmanı ile uyumludur. Bunun yanı sıra mevcut dizel motorlar üzerinde değişikliğe gidilmeden %100 biyodizel, yakıt olarak kullanılabilir.

1.1. Biyodizel İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Behçet ve Oral yaptıkları çalışmada, balık ve fındık yağından ürettikleri biyodizel yakıtları %50 oranında dizel yakıt ile karıştırarak BYME50 ve FYME50 olarak adlandırmış ve bu yakıtların motor performansı üzerindeki etkilerini ve emisyon değerlerini incelemişlerdir. Motor gücü, motor moment, CO, HC ve SO₂ gibi parametreler incelenmiş olup, bu ölçümlerde sırasıyla %4.87, %3.2, %15.84, %25.82, %39.52 oranlarında azalma gözlenirken, özgül yakıt tüketimi ve NO_x emisyonlarında ise sırasıyla %3.51 ve %14.78 artma gerçekleştiği ifade edilmiştir. Kullanılan yakıtlarda fazla çıkan NO_x emisyonlarının, NO_x kontrol sistemleri, seçici katalitik redüksiyon (SCR), fakir azot oksit tuzağı (LNT) ve EGR sistemleri kullanılarak azaltılabileceği dile getirilmiştir(Behçet & Oral, 2014).

Çoban (2021) dizel motorunda Taguchi deney tasarım metodunu kullanarak farklı yük ve devirlerde biyodizel yakıtın, motor performansına, NO_x ve is emisyonlarına olan etkilerini incelemiştir. Yapılan çalışmalarda en iyi sonuçların; efektif güç için B20 yakıtında %100 yük ve

2200 d/d'de, is emisyonları için B50 yakıtında %40 yük ve 1200 d/d'de, motor torku için B20 yakıtında %100 yük ve 1600 d/d'de, efektif verim için B20 yakıtında %80 yük ve 1600 d/d'de, NO_x için B20 yakıtında %40 yük ve 2200 d/d'de olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca optimum değerlerin NO_x ve is emisyonları için B20 yakıtı %40 yük ve 2200 d/d'de, özgül yakıt sarfiyatı için B20 yakıtında %80 yük ve 1600 d/d'de elde edildiği ifade edilmiştir. Taguchi istatistiksel deney tasarım metoduyla yapılan deneylerin %0,01 ile %5 hata payıyla yapıldığı dile getirilmiştir (Çoban, 2021).

Sezer (2016) yaptığı çalışmada soya yağından elde ettiği biyodizeli, dizel yakıtla belli oranlarda karıştırarak dizel motor üzerindeki püskürtme, yanma, performans ve emisyon değerlerini incelemiştir. Biyodizel kullanıldığında, yakıt püskürtme basıncının %0,7 ile %6,7 oranlarında düştüğünü gözlemlemiştir. Püskürtme hızı, yakıt demeti koni açısı ve yakıt demeti nüfuz derinliğinin azaldığını, ortalama damlacık çapının ise arttığını ifade etmiştir. Biyodizelin tutuşma gecikmesinin %13,6 ile %77,9 ve yanma sürelerinin %4,2 ile %26,2 oranlarında düştüğünü dile getirmiştir. Ayrıca biyodizelin silindir basıncı ve özgül basınç artışının dizel yakıtla kıyasla daha düşük, silindir sıcaklıklarının ise daha yüksek olduğunu vurgulamıştır. Biyodizelin hava fazlalık katsayısının dizel yakıtla göre %2,7 ile %15,4 oranında yüksek olduğunu saptamıştır. %100 biyodizel kullanıldığında moment ve güç parametrelerinde %15,8-%18,1 oranında düşme ve özgül yakıt tüketimi değerlerinde ise %18,8-%22,1 oranında artış olduğunu ifade etmiştir. Efektif verim için saf biyodizelin, dizel yakıtla kıyasla daha düşük çıktığını dile getirmiştir. Son olarak biyodizelin dizel yakıtına göre partikül madde emisyonu için %23,5-%77,4 oranında azaldığını, NO_x emisyonunda %21,8-%126 oranında ve CO₂ emisyonunda ise %0,7-%8,5 oranında artışa sebep olduğunu ifade etmiştir(Sezer, 2016).

Aksoy ve Yılmaz yaptıkları çalışmada, balık yağı biyodizelinin %10 oranında dizel yakıt ile karıştırarak 4 zamanlı bir dizel motorda farklı yüklerde (3.75 Nm, 7.5 Nm, 11,25 Nm, 15 Nm) ve maksimum tork (2200d/d) devrinde test ederek biyodizelin, yanma ve motor performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yapılan testlerde B10 yakıtının silindir basıncı ve ısı dağılımını arttırdığını gözlemlemişlerdir. Tutuşma gecikmesi ve yanma sürelerinin B10 yakıtındaki yüksek viskozite ve yoğunluktan dolayı yükseldiğini tespit etmişlerdir. Biyodizeldeki indike termik verimin dizel yakıtla kıyasla %9,51 azaldığını ve %25,58 olduğu belirtilmiştir. Özgül yakıt tüketimi ise dizel yakıtla nazaran B10 yakıtında 11,25 Nm yükte %32 artarak 0,214 kg/kWh olarak ölçülmüştür. Biyodizelde O₂ oranının fazla olduğu ve yanma sonunda silindir iç sıcaklığının dizele kıyasla daha fazla olduğu vurgulanmıştır. Nihayetinde balık yağı biyodizelindeki ısı enerjisinin dizel yakıtla yakın olduğu ve setan sayısının dizelden fazla olması cihetiyle düzgün yanma ve performans değerlerinin elde edildiği belirtilmiştir. Balık yağı biyodizeli-dizel yakıt karışımının (B10) yanma üzerinde olumlu etki sağladığı ve dizel motor üzerine herhangi bir değişikliğe gidilmeden kullanılabileceği vurgulanmıştır(Aksoy & Yılmaz, 2019).

Usta ve arkadaşları yaptıkları çalışmada dizel yakıt içerisinde ayrı ayrı etanol ve biyodizel yakıtı katıp karşılaştırarak motor performansı ve emisyon üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Dizel yakıtta etanol ve biyodizel karıştırılması CO, SO₂ ve is emisyonlarını düşürürken NO_x miktarlarını da arttırdığı ifade edilmektedir. Etanol katkısıyla güç değerlerinde azalma ve özgül yakıt tüketiminde (ÖYT) artış görüldüğü, biyodizel katkısıyla dizel yakıtta çok yakın güç ve ÖYT değerleri elde edildiği ifade edilmiştir. Etanol karışımlarına %1 değerinde izopropanol katılıp karışımın dengesi sağlanmış ancak güçteki düşüş ve ÖYT değerindeki artışın düzeltilebilmesi açısından etanol-dizel karışımlarına setan sayısı iyileştirici ilave edilerek bu sorunun ortadan kaldırılabileceği öngörülmüştür(Usta, Can, & Öztürk, 2004).

Behçet ve Çakmak 2011 yılında yaptıkları çalışmada balık yağı metil esterini dizel yakıt ile karıştırarak bir dizel motorda test edip, motor performansı ve emisyon etkilerini incelemişlerdir. Karışımlardaki biyodizel miktarı arttıkça dizel yakıtla kıyasla moment, güç, CO ve SO₂ değerlerinde azalma olduğunu, ÖYT, NO_x emisyonu ve eksoz gazı sıcaklığında ise yükselme olduğunu tespit etmişlerdir. Biyodizel karışımların dizele yakın özelliklerde olması ve emisyon değerlerinde azaltıcı rol oynamasından dolayı dizel yakıtlara alternatif olarak kullanılabileceği vurgusu yapılmıştır(Behçet & Çakmak, 2011a).

Behçet ve arkadaşları 2012 yılında bitkisel ve hayvansal yağlardan elde ettikleri biyodizel yakıtları bir dizel motor üzerinde kullanarak motor performansı ve emisyon ölçümleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneylerden edilen verilere göre dizel yakıtla nazaran balık yağı metil esteri (BYME) ve atık kızartma yağı metil esterinin (APYME) emisyon değerlerinin çevreye uygun olduğu, ancak motor performans değerlerinin dizel yakıtla oranla düşük çıktığı görülmüştür. BYME ve APYME yakıtlarının kullanılmasıyla dizel yakıtla göre güç ve torkta sırasıyla %3,3 ve %3,87 oranlarında düşüş olduğu, ÖYT değerlerinde ise %10,33'lük artış olduğu tespit edilmiştir. Biyodizellerde dizele göre HC ve CO emisyonlarının sırasıyla %17,29 ve %21,15'lik düşüş olduğu, ancak NO_x değerlerinde %10,25'lik artış olduğu ifade edilmiştir. Biyodizel yakıtların NO_x hariç diğer emisyon değerlerini azalttığı için, atık yağ kaynaklı metil esterlerin dizele seçenek olarak kullanılabileceği öne sürülmüştür(Behçet, Aydın, & Çakmak, 2012).

Varuvel ve diğ. (2012) atık balık yağından ürettikleri biyodizel yakıtı farklı oranlarda dizel yakıt ile karıştırıp bir dizel motor üzerinde test ederek emisyon, performans ve yanma üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda önceden ısıtılmış balık yağının fren termal verimliliğinin, test edilen diğer yakıtlara nazaran düşük çıktığı belirtilmiştir. Yüksek viskozite nedeniyle yanmanın kötüleştiği, buna bağlı olarak CO, HC ve PM emisyonlarının yüksek çıktığı ifade edilmiştir. Ancak dizel ile biyo-yag ilavesinin fren termal verimliliğini arttırdığı ve yanma hızının iyileşmesine bağlı olarak PM ve CO emisyonlarında azalma olduğu saptanmıştır. Damıtılmamış biyo-yag ile biyo-yag arasında fren termal verimliliğinde pek bir değişiklik olmadığı vurgulanmıştır. Damıtılmamış biyo-yagda tutuşma gecikmesinin kısa olmasına rağmen biyo-yag

ile kıyaslandığında yanma hızının o kadar iyi olmadığı belirtilmiştir. Biyo-yagın fren termal veriminin dizelden yüksek olduğu ve NO_x emisyonlarındaki artışa rağmen, diğer emisyonlarda dizelden daha düşük olduğu dile getirilmiştir. Dizel yakıtta az miktarda biyo-yag ilavesinin, motor performansında ve diğer emisyonlarda çok bir değişiklik yapmadan NO_x emisyonlarını azaltacağı söylenmiştir. Distilasyondan sonra biyo-yagın kısmen ya da tamamen dizel yakıtına alternatif olabileceği belirtilmiştir (Varuvel, Mrad, Tazerout, & Aloui, 2012).

Aydın ve Öğüt (2017) tek silindirli 4 zamanlı, su soğutmalı bir dizel motor üzerinde, aspir yağı biyodizeli üreterek, biyoetanol ilavesi ile hacimsel olarak %2,5 ve %5 oranlarında dizel yakıt ile karıştırmış ve ters orantılı olarak test etmiştir. Testlerde motor performansı ve emisyon değerleri ölçülmüştür. Performansa göre değerlendirmede, yakıtın optimum karışımı D100, emisyonu göre değerlendirilmede ise B2.5M5D92.5 yakıtı olduğu ifade edilmiştir. B2.5M5D92.5 yakıtının setan sayısının diğer test yakıtlarından fazla olduğu belirtilmiş, yüksek setan sayısının sessiz çalışma, motor ilk hareketini kolaylaştırma ve yanma veriminin artması gibi avantajları olduğunu belirtmişlerdir. Performans olarak motor güç ve torkunda azalma, ÖYT değerlerinde artma olduğu görülmüştür. Emisyon ölçümlerinde ise CO, HC, NO_x, CO₂, SO₂ ölçümlerinde azalma görülürken, O₂ değerlerinde artma gözlemlenmiştir (Aydın & Öğüt, 2017).

Kumar ve diğ. (2020) atık plastik yağ ve balık yağı biyodizelini dizel yakıt ile belirli oranlarda karıştırarak B20FOME ve B20FOME10WPO olarak isimlendirdikleri yakıtlar elde etmiş, performans, yanma ve emisyon özelliklerini incelemişlerdir. Balık yağının transesterifikasyonla elde edilmesi halinde viskozite ve yoğunlukta düşmeye, kalorifik değerde ise artışa sebep olduğu söylenmiştir. B20FOME10WPO yakıtının, tam yükte dizele göre ÖYT oranında %9,3 artış olduğu belirlenmiştir. B20FOME10WPO'daki oksijen içeriğinin yanma aşamasına pozitif katkıda bulunduğu söylenmiş. B20FOME10WPO yakıtı için HC ve CO emisyonunun, dizele kıyasla azaldığı ve verimli bir yanma sağlandığı belirtilmiştir. Dizel ile karşılaştırıldığında pusluluk ve NO_x oranlarında hafif bir artış gözlemlenmiş. Buna bağlı olarak balık yağı ve dizel ile karıştırılan plastik yağın, iyi verimlilikleri ve azaltılmış emisyonları olduğundan gelecekte dizel motorlar için umut verici bir yakıt olabileceği sonucuna varılmıştır (Kumar, Manjunatha, & Ramesha, 2020).

Aksoy ve diğ. (2017) nötrale atık yemeklik yağ biyodizel-dizel yakıt ve dizel yakıt ile farklı yüklerde ve 2200 devirde tek silindirli, dört zamanlı, direkt enjeksiyonlu bir dizel motor üzerinde çalışma yapmışlardır. Biyodizelin yanma, performans ve emisyon değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Üretilen B30 yakıtının silindir içi basıncını ve ısı salınım oranlarını arttırdığı belirtilmiştir. Motor yükündeki artmanın yanmanın gecikmesine yol açtığı ancak B30 yakıtı ile daha kısa yanma süresinin elde edildiği vurgulanmıştır. Biyodizeldeki O₂ miktarının fazla olmasından kaynaklı oksidasyon reaksiyonlarının iyileştiği detayına yer verilmiştir. Ancak dizelin kalorifik değerinin yüksek olmasından dolayı daha fazla ısı verim elde edildiği belirtilmiştir.

B30 yakıtı ile CO ve is emisyonlarında azalmalar görülmüş, ancak NO_x değerlerinde dizele kıyasla artış olduğu söylenmiştir. Nötrale edilmiş atık yemeklik yağ biyodizel-dizel yakıt karışımı (B30), dizel motorda modifikasyon yapılmadan kullanılabileceği ifade edilmiştir (Aksoy, Uyumaz, Boz, & Yılmaz, 2017).

Gharehghani ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada balık yağı biyodizeli-dizel karışımlarını tek silindirli dizel motorda test ederek, performans ve emisyonlar üzerindeki etkilerini incelemiştir. Biyodizelde yüksek setan sayısı ve O₂ içeriğinden kaynaklı yanma iyileşmesi sağlandığı ve biyodizelin kullanılmasının çevrimden çevrime değişimleri azalttığı ifade edilmiştir. Bundan dolayı hızlı ve kararlı yanma meydana gelmiştir. Biyodizel, dizel yakıtla karşılaştırıldığında %2.92 daha fazla brüt termal verim sağladığı tespit edilmiş. Yanma kaybı B100 için %15,2 ve dizel yakıt için %15,72 oranında olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, biyodizelin brüt verimi, %100 motor yükünde dizelden %2 oranında daha yüksek çıkmıştır. CO ve HC emisyonlarında düşüş görülmüş, ayrıca çeşitli yakıt karışımları için CO₂ emisyonu %5,2-%27 oranında azalırken, HC emisyonu için ise bu değer %11,6-%70 oranındadır. Fakat biyodizelin dizel yakıttan %12,8 daha fazla NO_x emisyonu gösterdiği ve tamamlanmamış yanma nedeniyle CO₂ emisyonunun yüksek çıktığı ifade edilmiştir (Gharehghani, Mirsalim, & Hosseini, 2016).

Sekmen ve Şen (2016) hamsi yağından biyodizel üreterek BYME olarak adlandırmış ve dizel yakıt ile %5, %20, %50, %100 oranlarında karıştırarak tek silindirli, hava soğutmalı dizel bir motorda kullanmışlardır. Testler tam yük ve farklı devirlerde gerçekleştirilmiş, emisyon ve performans değerleri incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda biyodizelin kalorifik değerinin dizel yakıttan düşük olması sebebiyle moment ve efektif güç değerlerinde düşüş, ÖYT değerlerinde ise artış olduğu görülmüştür. Biyodizeldeki oksijen miktarı, düşük karbon/hidrojen oranı ve setan sayısının yüksek olmasından dolayı CO, HC ve is emisyonlarında azalma olduğu tespit edilmiştir. Yine biyodizeldeki oksijen içeriği ve silindir sıcaklığının artmasına bağlı olarak NO_x emisyonunda artış olduğu ifade edilmiştir (Sekmen & Şen, 2016).

Aydın ve ark. (2017) atık yağlardan elde ettikleri biyodizeli tek silindirli, hava soğutmalı bir dizel motorda test ederek emisyon ve performans karakteristiklerini incelemişlerdir. Deneyler sabit hız ve farklı yük aralığında yapılmıştır. Biyodizelin, dizel yakıtı nazaran fren özgül yakıt tüketiminde %3'lük artış, fren özgül enerji tüketiminde ise %5'lik düşüş gösterdiği ifade edilmiştir. CO, NO_x ve is emisyonlarında dizele kıyasla sırasıyla %33, %17 ve %31'lik düşüş HC emisyonunda ise %24'lük artış olduğu belirtilmiştir. Ayrıca biyodizelin motor performansını yükseltirken, ÖYT ve egzoz sıcaklıklarını düşürdüğü tespit edilmiştir. Biyodizelin, motor yakıt sisteminde herhangi bir revizyona gerek kalmadan kullanılabileceği ifade edilmiştir (Aydın, Afşar, & Çelik, 2017).

Çelik ve ark. (2016), kanola yağı biyodizeline farklı oranlarda n-heptan katarak tek silindirli bir dizel motor üzerinde test etmiş ve motor performans değerlerini incelemiştir. Karışım yakıtlarını KYME-H0, KYME-H4, KYME-H8, KYME-H12, KYME-H16, KYME-H20 olarak isimlendirilmiştir. Maksimum güç ve moment artışı KYME-H4 yakıtında elde edilmiştir. Yine maksimum silindir gaz basıncı KYME-H4 yakıtında elde edilmiştir. Bunun sebebi olarak yakıtta n-heptan ilavesiyle moleküller arasındaki bağın kırılarak viskozitenin azalması gösterilmiştir. Azami ısı yayılımının kontrolsüz yanma evresinde KYME-H4 yakıtında olduğu belirtilmiştir. Minimum tutuşma gecikmesinin yine KYME-H4 karışımında elde edildiği, tutuşma gecikmesi müddetinin artmasıyla egzoz gazı sıcaklığının düştüğü vurgulanmıştır. Testler sonucunda karışıma ilave edilen ve en iyi sonuçların alındığı n-heptan oranı %4 olarak belirlenmiş, n-heptan yüzdesinin artmasıyla güç ve moment değerlerinde düşüş olduğu ifade edilmiştir (Çelik, Solmaz, Yücesu, & Yılmaz, 2016).

1.2. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında atık balık yağlarının değerlendirilmesi amacıyla transesterifikasyon yöntemi kullanılarak balık yağı etil esteri üretilmesi ve bir dizel motor üzerinde test edilerek performans ve emisyon ölçümlerinin yapılması ve diğer biyodizel yakıtlar ile sonuçlarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Yapılan literatür araştırmalarında üretilen biyodizel yakıtların emisyon değerleri üzerinde azaltıcı etkilerinin olduğu görülmüştür. Çevre ve insan sağlığını kötü etkileyen zararlı emisyon gazlarının düşürülmesi hedeflenmiştir. Üretilen balık yağı etil esteri %75 ve %50 oranlarında dizel yakıt ile harmanlanarak %100 biyodizel ve %100 dizel olmak üzere dört farklı yakıt çeşidiyle motor üzerinde testler yapılmıştır. Yanma ürünleri olan CO, CO₂ HC, NO_x ve is emisyonları üzerinde ölçümler yapılmıştır. Biyodizel yakıtların üretilmesi ve kullanılmasında ki esas maksat, doğaya zarar veren hayvansal, bitkisel ve endüstriyel atık yağların değerlendirilmesi ve motorlu taşıtlardan çevreye salınan zararlı gazların yıkıcı etkilerini azaltmaktır.

Küresel enerji kaynaklarının hızla tükenmesi, insanları yenilenebilir, çevre dostu enerji hammaddeleri arayışına sevk etmiştir. Bu sebeplerden dolayı biyodizel yakıtlar artan enerji talebini karşılamak ve motorlu araçlarda dizel yakıt yerine kullanılabilirliği açısından alternatif olarak görülmektedir. Biyodizel yakıtlar dizel motor üzerinde herhangi bir revizyona gidilmeden rahatça kullanılabilir. Yapılan deneysel çalışmalarda üretilen biyodizelin motor üzerindeki performansları incelenmiştir. Performans karakteristikleri olarak motor gücü, motor moment ve özgül yakıt tüketimi incelenmiştir. Aynı zamanda kullanılan yakıtın motor elemanları üzerindeki etkilerinin incelenmesi için, motor hem testlerden önce hem de testlerden sonra sökülüp incelendi. Bu incelemelerde biyodizel yakıtı doğrudan maruz kalan supaplar, piston-segman takımları ve enjektör memesi üzerinde deformasyon ve kurum izlerine bakıldı.

Bu çalışmayı literatürdeki diğer çalışmalardan ayıran özelliği balık yağı etil esteri elde edilirken kimyasal tepkimede katalizör olarak kullanılan NaOH veya KOH gibi kuvvetli bazlar yerine, kuvvetli bir asit olan sülfirik asidin (H_2SO_4) kullanılmasıdır. Burada amaç iki aşamalı transesterifikasyon işlemi uygulamadan ve bazik katalizör kullanmadan balık yağı içerisindeki yüksek yağ asitleri oranını düşürmektir.



2. DİZEL YAKITLAR

Dizel yakıt, motor silindirine sıkıştırma strokunun sonuna yakın, üst ölü noktadan sadece birkaç krank açısı derece önce püskürtülür. Sıvı haldeki yakıt, enjektör meme ucundaki küçük deliklerden veya nozüllerden bir veya daha fazla jet olarak yüksek hızda ve basınçta enjekte edilir. Püskürtülen yakıt küçük damlacıklar halinde atomize olur ve yanma odası içine alınır. Atomize olmuş yakıt, ısıtılmış basınçlı havadan ısıyı emer, buharlaşır ve yüksek sıcaklıktaki yüksek basınçlı hava ile homojen olarak karışır. Piston üst ölü noktaya yaklaşmaya devam ettikçe, karışım sıcaklığı yakıtın tutuşma sıcaklığına yaklaşır. Önceden karıştırılmış yakıt ve havanın hızlı tutuşması, tutuşma gecikme süresinden sonra gerçekleşir. Bu ani ateşleme, yanmanın başlangıcı (aynı zamanda tutuşma gecikme süresinin sonu) olarak kabul edilir ve yakıt-hava karışımı yandıkça yüksek bir silindir basıncı meydana gelir. Önceden karıştırılmış yanmadan kaynaklı artan basınç, karışımın yanmamış kısmını sıkıştırır ve ısıtır ve ateşlemeden önceki gecikmeyi kısaltır. Aynı zamanda kalan yakıtın buharlaşma oranını da yükseltir. Atomizasyon, buharlaşma, yakıt buharı-hava karışımı ve yanma, silindir içerisine püskürtülen yakıtın tamamı yanana kadar devam eder (Hannu & Khair, 2020).

2.1. Dizel Yakıt Nedir?

Dizel yakıtlar, sıkıştırmalı ateşlemeli motorlarında kullanılan, keşfi 1892 yılında Alman mühendis Rudolf Diesel tarafından yapılan, petrolün damıtılmasıyla elde edilen fosil yakıt türüdür (U.S. Energy Information Administration, 2020). İlk petrol rafinerisi 1851 yılında İskoçya’da inşa edildiğinde sadece kandiller için parafin ürettiyordu. Yan ürün olarak gazyağı elde edilmeye başlanınca kandillerde kullanımı yaygınlaştı. Bununla birlikte dizel de yan ürün olarak elde ediliyordu ve “distilat” diye adlandırılıyordu fakat Rudolf Diesel onu faydalanılabilir bir yakıt olarak insanlığa sunmadan önce kullanılmadan atılıyordu (Anonymous, 2019).

Dizel yakıtlar, tıpkı benzin gibi ham petrol kaynaklı bir yakıt türü olsa da benzinden farkını üretilme ve damıtılma metoduyla ortaya koymaktadır. Benzin en hafif petrol kaynaklı sıvı yakıt türüken dizel ise en yoğun ikinci petrol kaynaklı sıvı yakıt türüdür. Dizelin yoğun yapıda olması nedeniyle benzine göre daha stabil ve daha az yanıcı özelliği vardır. Bu durum, dizelin kullanımı için daha fazla sıkıştırma ve daha yüksek ateşleme sıcaklığı gerektirdiğinden üretimi ve tüketici bazında satın alımı pahalı hale getirir de yakıt veriminin yüksek olması nedeniyle negatif yönlerini telafi etmektedir (By Admin, 2019).

42 galon ham petrolden yaklaşık olarak 11-12 galon dizel yakıt elde edilmektedir. Tren, otomobil, kamyon, otobüs, tarım araçları, deniz taşıtları yapı ve inşaat makineleri, askeri araçlar

başta olmak üzere birçok alanda ve farklı motor çeşitlerinde kullanılması dizelin yaygın kullanımının göstergesidir (Beck, 2019).

2.2. Dizel Yakıtın Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Dizel yakıtlar, ham petrolden damıtılarak izole edilen çeşitli hidrokarbonlardan meydana gelir. Dizel yakıtlar, hafif ve ağır akaryakıtlar arasında bir yerde bulunan ham petrolün bir fraksiyonudur. Kaynama noktası 200°C ile 360°C arasında olan dizel yakıt grupları gaz yağı olarak tanımlanır. Dizel yakıt, esasen rafine edilmiş bir gaz yağıdır. Özel katkıların yanı sıra biyodizel gibi biyoyakıtlarla da harmanlanmaktadır (Marquard & Bahls, 2015). Dizel yakıtların içeriğini ve yanma verimini belirleyen faktörler aşağıda başlıklar halinde verilmiştir.

2.2.1. Isı Değeri

Isı değeri, dizel yakıtın yanması ile ortama verdiği ısı olarak kabul edilir. Motorda tam yanma olduğu düşünüldüğünde dizel yakıtının ortalama ısı değeri 41MJ/Kg olarak esas alınabilir. Bu durumda yanma verimlilik faktörü 0.4 ve HRR (Heat Release Rate) 1.53 kW olduğu düşünülür (Zhao, Yan, Liu, Liang, & Yao, 2013).

2.2.2. Setan Oranı

Setan derecesi, dizel yakıtlarda yakıtın tutuşma kolaylığı, yanma özelliklerini, motor çalıştırma ve yanma pürüzlülüğünü etkileyen yakıtın bir tutuşma kalitesinin ölçüsüdür. Setan derecesi ne kadar yüksek olursa yakıtın yanma odasına girdiği ve yanmaya başladığı zaman arasındaki süre o kadar az olur. Saf setan 100 olarak derecelendirilmiştir. Setan derecelendirme kriterleri motor tasarımı, motor boyutu ve çevresel koşullara bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Mesela, yüksek rakıma ve düşük sıcaklığa sahip bir bölge ile deniz seviyesinde, sıcak bir iklime sahip bölgede aynı motor ve aynı dizel yakıt için setan derecesine bağlı olarak aynı verim göstermesi beklenemez (Şarkar, 2015).

2.2.3. Viskozite

Viskozite esas olarak sıvının akmaya karşı gösterdiği direnci ifade eder. Basınç ile ters; sıcaklık ile doğru orantılıdır. Viskozitenin dizel motorlarda yakıt ve yanma için uygun bir değerde tutulması, performans ve motor ömrü açısından büyük öneme sahiptir (Schaschke, Fletcher, & Glen, 2013). Eğer motor içerisindeki dizel yakıt soğuk iklim şartlarında optimum viskozite değerinde tutulamazsa ve yakıtın viskozitesi artarsa yakıtta oluşan katılaşma veya donma yakıt hatlarında veya filtrelerde tıkanmaya neden olabilir. Yanma verimini de olumsuz etkiler.

Öte yandan düşük viskozite yakıtta akışkanlığı arttıracığından yanma odasında gerçekleşen yakıt püskürtmesi yakıtın en verimli yanacağı ve uygun hava-yakıt karışımı elde edeceği duruma geçeceğinden yanma reaksiyonunu en verimli seviyede tutar, duman oluşumunu azaltır. Düşük viskozite değerleri, eğer istenen durumun altına inerse, bu sefer de yüzeyde tutunma özelliği azalacağından yağlama özelliğini yitirir (Schaschke vd., 2013).

2.2.4. Kükürt İçeriği

Yakıtın kükürt içeriği motor temel bileşenleri için aşınma ve korozyon oluşumunda doğrudan etkilidir. Yakıtta kükürt içeriği arttıkça kükürt dioksit, kükürt trioksit ve buna bağlı olarak sülfürik asit oranı da artar. Sıcaklığın artması bu maddelerin motor içerisindeki yoğunluğunun artmasına neden olur. Bu istenmeyen durumlar piston ve silindir gibi hareketli parçalarda veya hareketli parçalara temas eden yüzeylerde aşınma meydana getirmektedir. Ayrıca bu maddelerin yakıt içerisinde bulunması, yakıtın temas ettiği tüm metal yüzeylerde aşınma ve korozyona sebep olur (Al-Rousan, 2006).

2.2.5. Su ve Çöküntü İçeriği

Depolama veya transfer esnasında çevresel şartlar dolayısı ile su ile temas etmesi veya nemli ortamın yakıtı doğrudan etkilemesiyle yakıt içerisine azda olsa su karışabilmektedir. Su, yakıt içerisinde kolayca çözünerek ayrıştırılması zor bir hale gelir. Isıtma-buharlaştırma veya vakumlama yolu ile su yakıttan uzaklaştırılabilse de bunlar pahalı yöntemlerdir. Yakıt içerisinde kalan su, motor belirli bir süre kullanılmazsa çökelti oluşturabilir. Çamurlu ve balçık kıvamındaki bu çökelti yakıt hatlarının, vanaların ve filtrelerin tıkanmasına neden olabilir. Ayrıca su, tank içerisinde ve hatlarda metal yüzeylerde korozyona sebep olabilir; yakıt enjeksiyon sistemine zarar vermesi durumunda ise yanma performansını olumsuz etkilenebilir (Fregolente, Wolf Maciel, & Oliveira, 2015).

Günümüzde yakıttan suyu uzaklaştırma konusunda en fazla tercih edilen yöntem polimerik hidrojenlerin kullanılmasıdır. Bu malzeme, hidrofil yapısı sayesinde suyu absorbe ederek şişer. Yakıttan hidrojenlerin ayrıştırılmasıyla da suyun basit ve ucuz bir yöntemle yakıttan uzaklaştırılması sağlanır.

2.2.6. Karbon Kalıntısı

Motor bileşenleri üzerinde, yüksek ısıdan kaynaklı yanma kalıntıları oluşabilir. Kok veya karartı olarak adlandırılan bu kalıntılar belirli bir miktarı aşması durumunda motor performansını olumsuz etkileyebilir. Yakıtlarda karbon kalıntısı üretim aşamasındaki rafine sürecine bağlıdır (Latarche, 2021).

2.2.7. Parlama Noktası

Endüstriyel süreçlerde yanıcı sıvıların güvenlik seviyelerini değerlendirmede en önemli kriter sayılan parlama noktası, bir yanıcı sıvının ateşleme kaynağı varlığında meydana gelen buharın en düşük tutuşma sıcaklığıdır. Dizel için ortalama parlama noktası 70°C'dir. Bir yakıt ne kadar düşük bir parlama noktasına sahipse o kadar patlama riski barındırır (Mejía, Salgado, & Orrego, 2013).

2.3. Dizel Yakıtların Sınıflandırılması

Standart dizel, benzinin oktan sayısı ile derecelendirilmesi gibi dizel yakıtı da tutuşmasının ne kadar kolay olduğunu ve ne kadar hızlı yandığını gösteren setan sayısı ile derecelendirilir. Setan sayısı ne kadar yüksek olursa, yakıtın uçuculuğu o derece artar. Piyasaya sunulan ve dizel motorlarda kullanılan dizel yakıtın setan sayısı 40-55 aralığındadır. Dizel yakıtlar 1D, 2D ve 4D olmak üzere üç ayrı sınıfta incelenir. Bu sınıflar arasındaki farkı viskozite, setan sayısı ve akma noktası belirlemektedir.

4D yakıtlar daha çok düşük hızlı motorlarda kullanılır, 2D yakıtlar daha sıcak havalarda tercih edilir ve bazen verimli bir kış yakıtı oluşturmak için 1D ile harmanlanır.

1D yakıtı, düşük viskoziteye sahip olduğundan soğuk havalarda tercih edilmektedir. 2000'li yıllarda ultra düşük kükürtlü dizel yakıtlar standart hale geldiğinden, setan sayısı azaltıldı ve bu da oluşan bu yeni yakıtta olan talebi düşürdü. Toplam setan sayısını arttırmak için Fuel Bomb gibi dizel yakıt katkı maddeleri kullanılmaktadır. Fuel Bomb dizel motorun daha iyi çalışmasına ve daha yüksek yakıt ekonomisi elde etmesine yardımcı olacak yağlayıcı katkı maddelerine sahiptir (Diesel Power Products, 2011). Dizel yakıt sınıfları ve bu yakıt sınıflarına ait özellikler Tablo 2.1'de verilmiştir (Gürkan, 2019).

Tablo 2.1. Standart dizel yakıt sınıfları ve özellikleri (Gürkan, 2019)

Özellik	1-D	2-D	4-D
Setan Sayısı (Minimum)	40	40	40
Parlama Noktası(°F)	100	125	130
Viskozite Saybolt (S), (100°F'de)	30-34	33-45	45-125
%Kül, (Ağırlıkça)	0.01	0.02	0.1
%Kükürt, (Ağırlıkça)	0.5	1	2

Düşük hızlı, sabit motorlarda daha çok 4D yakıtlar kullanılır ancak 4D yakıt çoğu mobil donanım için uygun değildir. Yüksek hızlı dizel motorlarda 1D ve 2D dizel yakıtlar kullanılır ve

1D ile 2D yakıt arasındaki farkı akma noktası ve viskozite belirlemektedir. Akma noktası bir sıvının akacağı en düşük sıcaklık ve viskozite sıvının akmaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. 1D yakıtlar soğuk hava şartlarında motorun verimli ve düzgün çalışması için tasarlanmıştır, dolayısıyla viskozitesi ve akma noktası düşüktür. 2D yakıtlar daha sıcak havalarda motorda kullanılmak için tasarlanmış, viskozitesi ve akma noktaları da yüksektir. Yüksek viskozite, yakıt enjeksiyon mekanizmasının hareketli parçaları için daha iyi bir yağlama sağlar. 2D yakıtlar galon başına daha fazla Btu (İngiliz ısı birimi - bir (1) pound suyu bir (1) fahrenheit derece) yükseltmek için gerekli ısı miktarı taşıdığından, galon başına daha fazla güç üretebilirler ve bu durum dizel yakıt ekonomisi için büyük öneme sahiptir. Buradan da anlaşılacağı üzere dizel yakıtın Btu değeri ne kadar yüksek olursa, galon başına elde edilen güç verimi de o derece yüksek olur ve daha yüksek mpg (galon başına kat edilen mil) ile sonuçlanır. Her üretici genelde 1D ve 2D dizel yakıtlar için minimum ya da maksimum setan oranını ve önerilen çalışma sıcaklığını belirtir. Herhangi bir dizel yakıt 1D ve 2D özelliklerini karşılayabilir fakat Btu derecesi çok düşükse yakıt mpg'side düşer (Joseph H. Pons, 1993).

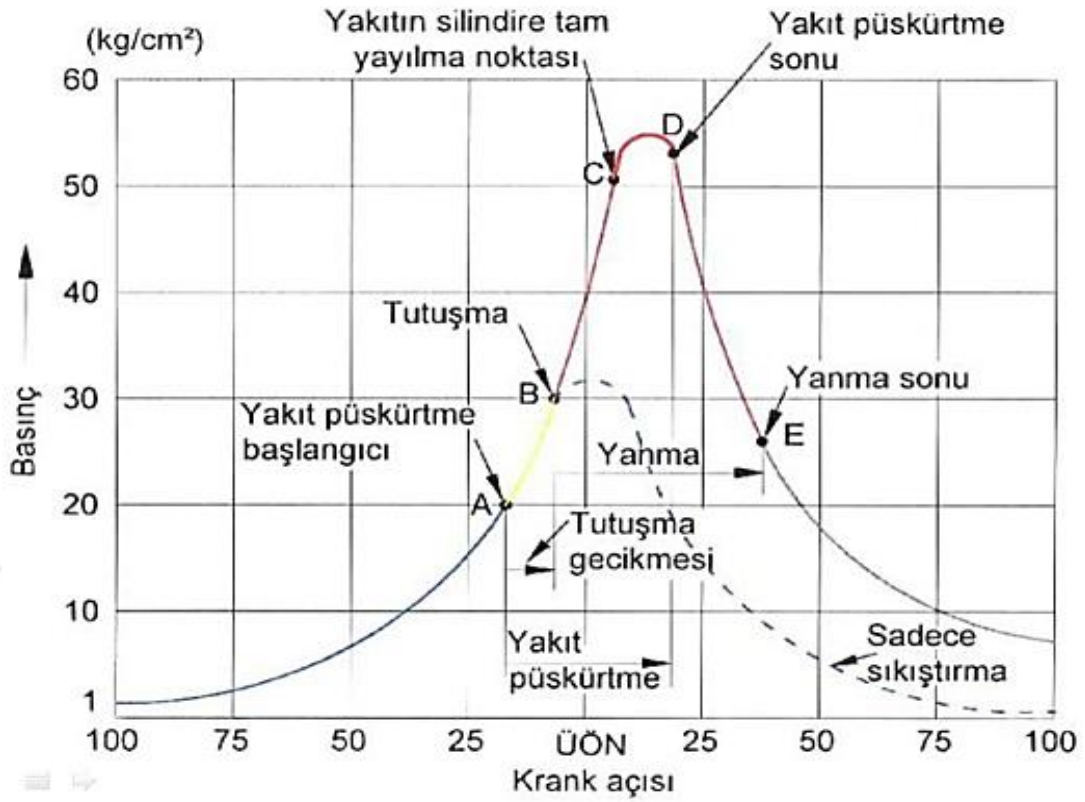
2.4. Dizel Motorlarda Yanma

Dizel motorlarda yanma olayı; emme zamanında yanma odasına alınan havanın, sıkıştırma zamanı bitimine doğru sıcaklığı 600-900 °C'ye geldiğinde enjektörlerden yüksek basınç altında atomize olan dizel yakıtın püskürtülmesiyle gerçekleşir.

Tutuşma gecikmesi süresini azaltmak için, yakıtın iyice atomize olması gerekir ve buda çok küçük meme oluklarına sahip enjektörlerle, yakıtın yüksek basınçta silindir içerisine püskürtülmesiyle mümkün olabilir. Yakıt ne kadar iyi atomize olursa birim hacim başına düşen yüzey alanı artar ve yakıt molekülünün ısınma ve buharlaşma süresi azalır. Dizel motorlarda meydana gelen yanma safhaları Şekil 2.1'de verilmiştir (T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, 2012). Dizel motorlarda yanma olayı 4 aşamada gerçekleşmektedir (Polat 2011).

Bunlar;

- I. Tutuşma gecikmesi
- II. Kontrolsüz yanma (Hızlı yanma)
- III. Kontrollü yanma
- IV. Gecikmiş yanma olarak sıralanır.



Şekil 2.1. Dizel motorlarda gerçekleşen yanma safhaları (T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, 2012)

2.4.1. Tutuşma Gecikmesi (A-B)

Sıkıştırma bitiminde yanma odası içerisine püskürtülen yakıt hemen alev almaz. Yakıtın tutuşabilmesi için hava ile homojen karışması ve oda sıcaklığının yükselmesi gerekir. Bu safha hazırlık safhasıdır ve püskürtülen yakıtın %5-15'i yanar (Demir, y.y.). Enjektörün dizel yakıtı silindir içerisine püskürtmesinden, ilk alev topunun oluştuğu zamana kadar geçen devreye tutuşma gecikmesi denir. Tutuşma gecikmesinin başlangıcı, sıkıştırma sonunun bitimini gösterir. Yanma safhaları verilen Şekil 2.1'de A-B arasında gösterilen bu kısa zaman dilimi 2000 d/d ile çalışan bir motor için 0,0009 saniye olarak ölçülmüştür (T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, 2012). Burada tutuşma gecikmesi süresinin uzaması, silindir içerisindeki yakıtın hava ile homojen karışıp bütünüyle buharlaşması için yeterli bir süredir. Yüksek hızlarda tutuşma gecikmesi süresinin uzaması silindir içerisindeki hava-yakıt karışımının daha iyi olmasını sağlar. Tutuşma gecikmesi safhasında yakıt silindire girmeyi sürdürür ve tutuşma anına kadar silindir içinde birikir. Tutuşma gecikmesi sırasında reaksiyon hızı düşüktür ve oluşan yanma ürünleri ara ürünlerdir (Gürkan, 2019). Tutuşma gecikmesi süresince krank milinde meydana gelen dönüş açısına gecikme açısı denir ve bu açı krank açısal hızı ile tutuşma gecikmesi süresinin çarpımına eşittir. Burada yakıt pompası krank miline bağlı olduğu için silindir içerisine püskürtülecek olan yakıt miktarı gecikme açısına bağlıdır. Tutuşma gecikmesi süresi aşağıdaki faktörlere bağlı olarak göre farklılık gösterir. Bunlar;

- I. Hava- yakıt karışımının reaksiyon hızı
- II. Silindir içerisinde oluşan havanın sıcaklığı
- III. Silindir içinde meydana gelen basınç
- IV. Yakıt moleküllerinin boyutu
- V. Motor devri
- VI. Yakıt kalitesi
- VII. Yakıt cinsi olarak sıralanabilir.

2.4.2. Kontrolsüz Yanma (B-C)

Hızlı yanma olarak da bilinir. Silindir içerisine püskürtülen yakıtın sıcaklığı artar, oksijenle karışarak buharlaşır. İlk alevlenme olduğu anda yakıtın hepsi birden kontrolsüz bir şekilde hızla tutuşarak yayılır, sıcaklık ve basınç ani bir artış gösterir ve silindir içerisinde maksimum basınca ulaşılır. Silindir içerisindeki basıncın artış hızı ve büyüklüğü mevcut olan yakıtın oranına bağlıdır (Dinçer, 2010). Şekil 2.1’de görüldüğü üzere B-C arası hızlı ve ani yanmanın olduğu evredir, burada basınç maksimum düzeye çıkar.

Hızlı yanma evresinde basıncın ani ve hızlı yükselişi motorun vuruntulu çalışmasına sebep olur, bu durum dizel vuruntusu olarak adlandırılır. Gelişen teknolojiyle birlikte silindir içerisine kontrollü yakıt püskürtmek için kademeli püskürtme yöntemi uygulanmaktadır. Kontrolsüz yanmadaki basınç yükselmesi;

- I. Yakıtın silindirde atomize olma kabiliyetine
- II. Ekstra püskürtülen yakıt miktarına
- III. Püskürtme enjeksiyonu dizaynına
- IV. Yakıtın havayla homojen karışabilme derecesine bağlı olarak değişkenlik gösterir(Borat, Balcı, & Sürmen, 1992).

2.4.3. Kontrollü Yanma (C-D)

Kontrollü yanma evresinde basınç artışı yavaşlar ve daha sonra pistonun hareketinden kaynaklı kademli bir şekilde azalmaya başlar. Bu safhada silindir içindeki basınç ve sıcaklık çok yüksek olduğundan içeriye püskürtülen yakıt herhangi bir gecikme yaşanmadan hemen tutuşarak yanar. Daha sonra devam eden püskürtme ve yanma olaylarında basınç sabit kalır (Polat, 2011). Yakıt püskürtme işlemi bittiğinde silindir içerisindeki yakıtın tamamı bitinceye kadar yanma devam eder. Kontrollü yanma safhası Şekil 2.1’de görüldüğü üzere C-D arasında gerçekleşir. Yüksek randıman elde edilebilmesi için piston, ÜÖN’ ye yakın bir konumdayken yanmanın bitmesi gerekir. Kontrollü yanma safhası;

- I. Silindir içindeki hava türbülansına

- II. Pistonun o anki konumuna
- III. İçeriye püskürtülen yakıt hızı gibi durumlara bağlıdır.

2.4.4. Gecikmiş Yanma (D-E)

Bu safhada püskürtme işlemi sona ermiş ve piston AÖN'ye inmektedir. Silindir içerisine püskürtülen ve yanmamış yakıt piston aşağı indikçe ortamda kalan oksijenle tutuşarak yanar (T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, 2012). Gecikmiş yanma safhasının kısa sürmesi gerekir, aksi takdirde bu süre uzarsa egzoz gazlarının sıcaklığı artar ve verimde düşüş yaşanır. Şekil 2.1'de art yanma yani gecikmiş yanma safhası D-E arasında gerçekleşmektedir.

2.5. Dizel Motorlarda Emisyon Standartları

Emisyon standartları motorlu araçlardan çevreye salınan zararlı egzoz gazlarını kontrol altına almak için oluşturulmuştur. Kontrol altına alınması gereken emisyonlar CO, HC, NO_x ve partikül madde (PM) emisyonlarıdır. Bu emisyonlar sınırlandırılarak tam yanma ürünleri olan H₂O, N₂ ve CO₂ oluşması istenmektedir. AB tarafından getirilen sınırlamalar sonucu 1992-1993 yıllarında Euro I, 1995-1996 yıllarında Euro II, 2000 yılında Euro III, 2005 yılında Euro IV, 2009 yılında Euro V ve 2014 yılında Euro VI standartları kabul edilmiştir (Yavuz, 2017). Tablo 2.2'de hafif ticari araçlar için, Tablo 2.3'te ağır hizmet dizel motorları için ve Tablo 2.4'te dizel yolcu araçları için AB emisyon standartları verilmiştir (Gürkan, 2019).

Tablo 2.2. Hafif ticari araçlar için AB standartları (g/km) (Gürkan, 2019)

Dizi	Tarih	CO	HC	NO _x	HC+NO _x	PM
Euro I	1994	5.17	-	-	1.4	0.19
Euro II	1998	1.25	-	-	1.0	0.12
Euro III	2001	0.8	0.29	0.65	0.72	0.07
Euro IV	2006	0.63	0.16	0.33	0.39	0.04
Euro V	2010	0.63	0.16	0.235	0.295	0.005
Euro VI	2015	0.63	0.16	0.105	0.195	0.005

Tablo 2.3. Ağır hizmet dizel araçlar için AB standartları (g/km) (Gürkan, 2019)

Dizi	Tarih	Test	CO	HC	NO _x	PM
Euro I	1992 < 85 kW		4.5	1.1	8.0	0.612
	1992 > 85 kW	CE R-49	4.5	1.1	8.0	0.36
Euro II	Ekim 1996		4.0	1.1	7.0	0.25
	Ekim 1998		4.0	1.1	7.0	0.15
Euro III	Ekim 1999	ESC&ELR	1.5	0.25	2.0	0.02
	Ekim 2000		2.1	0.66	5.0	0.10
Euro IV	Ekim 2005	ESC&ELR	1.5	0.46	3.5	0.02
Euro V	Ekim 2008		1.5	0.46	2.0	0.02
Euro VI	Aralık 2013		1.5	0.13	0.4	0.01

Tablo 2.4. Dizel yolcu araçlar için AB emisyon standartları (g/km) (Gürkan, 2019)

Dizi	Tarih	CO	HC+NO _x	NO _x	PM
Euro 1	Temmuz 1992	2.72(3.16)	0.97(1.13)	-	0.14(0.18)
Euro 2, IDI	Ocak 1996	1.0	0.7	-	0.08
Euro 2, DI	Ocak 1996	1.0	0.9	-	0.10
Euro 3	Ocak 2000	0.64	0.56	0.0	0.05
Euro 4	Ocak 2005	0.50	0.30	0.25	0.025
Euro 5a	Eylül 2009	0.50	0.23	0.18	0.005
Euro 5b	Eylül 2011	0.50	0.23	0.18	0.005
Euro 6	Eylül 2014	0.50	0.17	0.08	0.005

3. BİYODİZEL YAKITLAR

Biyodizel, genel olarak bitkisel ve hayvansal yağlardan, geri dönüştürülmüş restoran yağından ya da endüstriyel atık yağlardan üretilen yenilenebilir, biyolojik olarak parçalanabilen bir yakıttır. Biyodizel, Yenilenebilir Yakıt Standardının hem biyokütle bazlı dizel hem de genel gelişmiş biyoyakıt gereksinimini karşılar. “Yeşil dizel” olarak da adlandırılan yenilenebilir biyodizel, dizelden farklıdır. Biyodizel yakıtta petrol dizeli gibi sıkıştırma ateşlemeli motorlara yakıt sağlamak için kullanılır. Soğuk havalarda biyodizel performansı biyodizel karışımına, hammaddeye ve petrol dizelinin özelliklerine bağlıdır. Genellikle, daha düşük oranlarda biyodizel içeren karışımlar, soğuk havalarda daha iyi performans gösterir. Biyodizel üretim süreci; sıvı ya da katı yağları, mono alkil esterler veya biyodizel adı verilen kimyasallara dönüştürür. Bu kimyasallar aynı zamanda yağ asidi esterleri olarak da tanımlanır ve süreç esterifikasyon olarak adlandırılır (Alleman vd., 2016).

3.1. Biyodizel Nedir?

Endüstriyel gelişimde önemli bir role sahip olan dizel yakıtlar; artan nüfus yoğunluğuyla birlikte ulaşım, üretim, ısınma gibi birçok alanda kullanımı yaygınlaşmıştır. En yaygın kullanım alanı olan ulaşım, dizel motorlar, mükemmel sürdürülebilirlikleri ve ısı verimlilikleri nedeniyle otomobillerde ve nakliye ekipmanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Fosil yakıtların yakılmasından elde edilen enerji birçok teknolojik gelişmeyi ve sosyo-ekonomik büyümeyi sağlarken aynı zamanda ekosistemi de tehdit eden tehlikeli çevresel sorunları da beraberinde getirmiştir. Sanayileşmiş dünyada dizele olan yüksek talep ve yaygın kullanımından kaynaklanan kirlilik sorunları, bu geleneksel fosil yakıtlardan daha az çevreye zararı bulunan, tükenmeyen, yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesini zorunlu hale getirmiş ve insanları bu alanlarda çalışmaya yapmaya yönlendirmiştir (Sarin, 2012).

Hayvansal, bitkisel ve kullanılmış yemeklik yağlardan elde edilen biyodizel yakıtlar, yüksek parlama noktası, üstün biyo-parçalanabilirlik özelliği, mükemmel yağlama ve kayda değer yanma verimliliği gibi yakıt özellikleriyle fosil yakıtların avantajlarını sağlamaktadır. Bu bağlamda çevreye zararının fosil yakıtlara göre nispeten az ve yenilenebilir bir kaynak olması nedeniyle petrodizelden üstünlüğünü ortaya konulmuştur (Lin & Li, 2009).

Biyodizel, bitkilerden veya hayvanlardan elde edilen ve uzun zincirli yağ asidi esterlerinden oluşan bir dizel yakıt şeklidir. Biyodizel, hayvansal yağ, soya fasulyesi yağı veya diğer bazı bitkisel yağlar gibi lipidlerin alkolle kimyasal olarak reaksiyona sokulması ve bir metil, etil veya propil ester üretilmesi sonucu sentezlenir.

3.2. Biyodizelin Tarihi Süreci

Bitki ve tohum yağlarının kullanımı MÖ 1500'e kadar dayanmaktadır. Mısır ve Antik Yunan medeniyetlerinde, başlıca zeytin ve hint yağı olmak üzere, tedavi ve güzellik amaçlarının yanı sıra, bitkisel yağlar aydınlanma ve ısınma ihtiyacını karşılamak için de yakıt kaynağı olarak kullanılmıştır (Balasubramanian & Steward, 2019).

Biyodizelin tarihi ise, 1890'larda Alman mühendis Rudolf Diesel tarafından dizel motorunun keşfi ile başlar. Bitkisel yağ, 1900 yılında Paris'te düzenlenen ve fuar sırasında beş motor modelinin sergilendiği ve test edildiği dünya fuarında yakıt olarak kullanılmaktaydı. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra, çeşitli akademik çalışmalar, dizel motorlarda bitkisel yağ kullanımı ve biyodizel uygulamasında yaşanan operasyonel zorluklar fark edilmiştir. Bununla birlikte, alternatif yakıt araştırmaları, 1970'lerde Arap-İsrail Savaşı'nın yarattığı enerji krizine kadar azaldı. Bruwer'ın bitkisel yağ esterleri üzerinde yaptığı bilimsel çalışmada dizel motorda ayçiçek yağı kullanarak, ayçiçeği metil esterlerinin kullanılmasının viskozite sorunlarını ve operasyonel sorunları ortadan kaldırdığını ortaya koymuştur.

Avrupa'da biyodizelin ticari üretimi 1980'lerde başlamıştır. Avrupa Birliği'nde biyodizel üretimi büyük ölçüde artmış ve tüketim iki katına çıkmıştır. Örneğin, 2004'te tahmini üretim rakamı 1,9 milyon ton iken, 2006'da 4,9 milyon tona çıkmıştır ve bu rakamlar biyodizelin Almanya, İtalya, Avusturya, Fransa ve İsveç gibi Avrupa ülkelerine dağılmış 254'ten fazla tesiste üretilmesiyle katlanarak artmıştır (Maroa & Inambao, 2020).

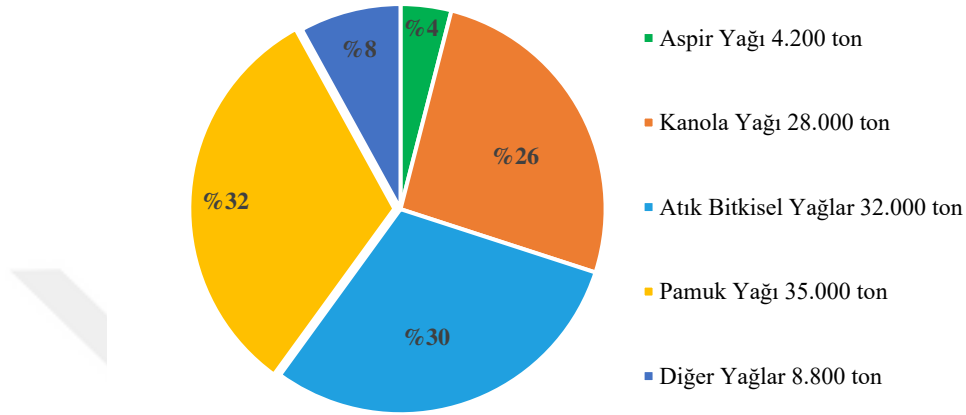
3.3. Biyodizelin Türkiye'deki Durumu

Yenilenebilir enerji, ülkelerin enerji gereksinimlerini lokal kaynaklarından temin ederek, dışa olan bağımlılığın azaltılması, çevreye verilen zararların minimuma indirilmesi noktasında oldukça önemlidir. Türkiye'de mevcut imkânlarla üretilebilecek en önemli yerli yakıt biyodizeldir.

Türkiye'nin sahip olduğu su kaynakları, tarım için elverişli araziler, güneş alma süresinin uzunluğu, iklim şartları ve coğrafi özellikler göz önüne alındığında biyokütle enerjisi açısından büyük bir potansiyele sahip olduğu görülür. Tarımsal artıkların çokluğu biyokütle enerji potansiyelini arttırmaktadır.

Türkiye 23,07 milyon hektar tarıma elverişli arazi alanları ile zengin bir potansiyele sahiptir. Bu tarımsal alanların 18.11 milyon hektarlık kısmı ekilidir ve geriye kalan kısım ise nadasa bırakılmaktadır. Ülkemizde tahıl tozu, buğday sapı, fındık kabuğu gibi çeşitli tarımsal artıklar biyokütle enerjisi için vazgeçilmez kaynaklardır. Şekil 3.1'de Türkiye'de biyodizel üretiminde kullanılan hammadde oranları verilmiştir (Biyodizel Sanayi Derneği, 2019). Bütün bu avantajlar değerlendirildiğinde Türkiye'de biyokütleden enerji üretimi gerekli hale gelmektedir. Türkiye'de üretilen biyodizelin motorinle harmanlanan %2 oranındaki kısmı özel tüketim vergisinden muaf

tutulmuştur. 27.09.2011 tarihinde resmi gazetede yayımlanan EPDK kararı gereğince piyasaya sürülen dizel yakıt türlerinin, yerli tarım ürünlerinden elde edilmiş biyodizel ile 1 Ocak 2014 itibariyle minimum %1 oranında, 1 Ocak 2015 itibariyle minimum %2 oranında, 1 Ocak 2016 itibariyle minimum %3 oranında harmanlanması zorunlu hale getirilmiştir (Kapluhan, 2021).



Şekil 3.1. Türkiye’de biyodizel üretiminde kullanılan hammadde oranları (Biyodizel Sanayi Derneği, 2019)

Yapılan araştırmalarda Türkiye’de biyodizelin yasadışı olarak piyasaya sürüldüğü tespit edilmiştir, buda hem dizel motorlu araçlara, hem çevreye, hemde ekonomiye ciddi zararlar vermektedir. Türkiye’de biyodizel üretmek için herhangi yasal bir engel bulunmamaktadır, fakat üretilen biyoyakıtların satılması için Enerji Piyasa Düzenleme Kurulu 05.01.2006 tarih ve 630/26 sayılı kararla biyodizel işletmelerine işletme lisansı alma zorunluluğu getirmiştir. Böylece diğer akaryakıt ürünlerinde olduğu gibi biyodizel yakıtların da ithalatı, taşınması, dağıtımı, depolanması ve satışı, düzenleme altına alınarak, lisansa tabi tutulmuştur. Biyodizel piyasasının kontrol altına alınmasındaki amaç, üretilen biyodizel yakıtların belirlenen standartlara uymamasıdır, çünkü üretilen ve standartların dışında olan yakıtlar motor parçalarına, yakıt pompasına v.b parçalara zarar vermektedir (Alptekin & Çanakçı, 2006).

Biyoyakıtların faydaları; biyokütleden tedarik edilen yenilenebilir enerji kaynağı olmaları ve dışarıya bağımlılığı düşürerek ekonomik katkıda bulunmaları, fosil yakıtlara nazaran çevre dostu olmaları gibi avantajlarından dolayı ülkemizde önemli bir yere sahiptir. Biyoyakıtların, enerji kırsal kalkınma ve çevre sorunlarına alternatif bir çözüm olacağı belirtilmektedir (Özertan, 2007). Türkiye’de yapılmış ilk biyodizel çalışma 1934 yılında Atatürk Orman Çiftliği’nde traktörlerde bitkisel yağların denenmesiyle gerçekleşmiştir.

Biyodizel yakıtlar, alternatif olarak 1970 yılında yaşanan petrol krizi sonrası gündeme alınmış, fakat sonradan rafa kaldırılmıştır. 1998 yılında gerçekleştirilen 1.Enerji Şurası’ndan sonra biyodizel ile ilgili kamusal ve bireysel alanda çalışmalar başlatılmıştır. Ülkemizde biyodizelin

üretimi ve kullanımı ile ilgili olumsuz faktörler olmakla beraber, biyodizel üretimi ile sağlanacak ekonomik avantajlarda mevcuttur. Bu avantajlar aşağıda sıralanmıştır (Yaşar, 2009).

- Hammadde açısından uygun tarımsal alanlar
- AB'nin hammadde ve biyoyakıt kaynaklarının yetersizliği
- Kırsal kalkınma hedeflerine yönelik yapılan katkılar
- Enerji güvenliği, verimliliği ve çeşidine sağlanacak katkılar
- Atık yağ sanayi sektörüne yönelik fırsatlar
- Atık yağların değerlendirilmesi ve yapılacak çevresel katkılar

Biyodizel yakıtlara olan rağbet özellikle 2000 yılından sonra artmış ve birçok girişimci biyodizel üretmeye başlamıştır. Bundan dolayı EİE bünyesinde “Biyoenjeri Proje Grubu” oluşturulmuş ve Türkiye’de biyodizel alanında pilot üretim sistemleri kurularak çalışmalar yapılmıştır (Sabancı, Atal, & Yaşar, 2006).

Türkiye’de 2016 yılında yapılan araştırmalarda toplam enerji kaynakları içerisinde %87 oranında fosil yakıtlar ve %13 oranında ise yenilenebilir enerji kaynaklarının olduğu tespit edilmiştir. Düşük karbonlu ekonomiye geçişte, özellikle ulaşım sektöründe, yenilenebilir enerji kaynakları bakımından biyodizel yakıtlar önemli bir yere sahiptir. Özellikle 2000’li yıllardan beri enerji arzı güvenliğinin sağlanması ve emisyonların düşürülmesi açısından biyoyakıt üretimi ve kullanımı ulusal düzeyde teşvik edilmektedir.

Bu bakımdan Türkiye’de 2017 yılında AB “Benzin ve Motorin Kalitesi Direktifi” doğrultusunda, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı “Benzin ve Motorin Türlerinin Çevresel Etkilerine Dair Yönetmelik” hazırlamıştır. Böylece EN 590 Dizel standartları kapsamında EPDK tarafından belirlenen özellikler uygulanmıştır. 1 Ocak 2018’de kabul edilen yönetmelikle dizel yakıtlara %0,5 oranında biyodizel karıştırılması mecburi hale getirilmiştir (Biyodizel Sanayi Derneği, 2019).

3.4. Dünyada Biyodizelin Durumu

Biyokütle enerjisi, çevreci ve yenilenebilir olması sayesinde gelişmekte olan ülkelerin artan enerji ihtiyacını karşılamak için özellikle 2000’li yıllardan sonra büyük yatırımlar yaptığı bir sektör konumundadır. Biyokütle enerji kaynakları kullanılarak biyodizel, biyoetanol ve biyogaz gibi yenilenebilir yakıtlar üretilmektedir (Kaya, Şenel, & Koç, 2018). İlk biyodizel üretim tesisi 1988 yılında Avusturya’da yıllık 500 ton üretim kapasitesine sahip bir çiftçi kooperatifi tarafından kurulmuştur. Yine Avusturya’da yıllık 10.000 ton üretim kapasiteli ilk endüstriyel tesis kurulmuştur (Sabancı vd., 2006). Dünyada biyodizel üretiminde 2015 yılı verilerine göre, % 43’lük oranla AB ülkeleri başı çekerken bunları sırasıyla %15 ile ABD, %13 ile Brezilya, %10 ile Dünyanın geri kalan ülkeleri, %7 ile Arjantin, %4 ile Endonezya ve Tayland, %2 ile Kolombiya ve Malezya, son olarak %1 ile Malezya takip etmektedir.

Biyodizel üreten tüm büyük ülkelerde hammadde olarak yerli tarım ürünleri kullanılmaktadır. Hem sanayileşmiş hem de gelişmekte olan ülkeler ham petrol fiyatlarının yükselişe geçtiği dönemlerde çeşitli biyodizel politikaları uygulamıştır. Biyodizel ticareti, küresel üretimin %10-%15'ini oluşturmaya rağmen gelişmekte olan bazı ülkeler biyodizel sektöründe ciddi ekonomilere sahiptir. Biyodizel sektöründe söz sahibi olan ülkeler çeşitli politikalar uygulamıştır. Bu politikalar;

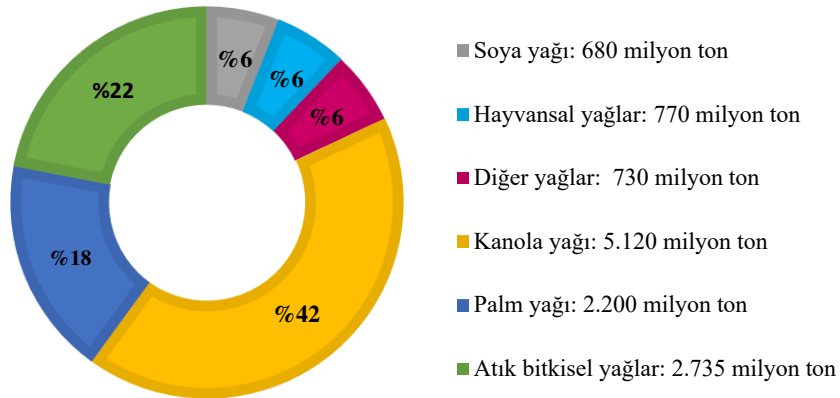
- Yerli enerji arzını güvence altına almak
- Enerji kullanımında yenilenebilir yakıtların payını arttırmak
- Bitkisel yağların fiyatlarını ve yan ürünlerin verimli kullanılmasını desteklemek
- Enerji kullanımının iklim üzerindeki etkisini azaltmak olarak sıralanabilir (Naylor & Higgins, 2017).

Biyodizel talebi, özellikle Asya/Pasifik bölgesi, Orta ve Güney Amerika ve Afrika/Ortadoğu bölgelerinde önümüzdeki yıllarda hızlı büyümeler beklenmektedir. Gelişmekte olan ülkeler, artan biyodizel talebini karşılamak ve fosil petrol ürünlerine olan bağımlılığı azaltmak için, aynı zamanda elde edilecek biyodizellerin yerli kaynaklar kullanılarak üretilmesi için çeşitli politikalar geliştirmektedir. AB bugün %55 oranında pazar payına sahip olmasına rağmen son 5 yılda diğer ülkelerde önemli gelişmeler kaydetmiştir. AB dışı biyodizel üretimi 2004'te 0,16 milyar ve 2009'da 7,7 milyar düzeyindeydi. Bu artışlar özellikle Arjantin, Brezilya ve ABD'de olup üretimin büyük bir kısmını bu ülkeler yapmakta ve AB'ye ihraç etmektedirler. AB ve ülkemizde 2018 yılına ait biyodizel üretim miktarları Tablo 3.1'de verilmiştir (Biyodizel Sanayi Derneği, 2019). AB'de ise biyodizel üretimi 1990 yılında başlamıştır. AB'de biyodizel üretimi, biyoyakıt politikasından, fosil yağ ve bitkisel yağ fiyatlarından etkilenmektedir. AB ülkelerinde biyodizel yakıtlar esasen kolza yağından üretilmektedir. Avrupa'da biyodizel üretiminde kullanılan hammadde oranları ve miktarları Şekil 3.2'de verilmiştir (Biyodizel Sanayi Derneği, 2019). Gıda ve yem bitkilerinden üretilen birinci nesil (1G) biyoyakıtlar, dünya gıda güvenliği ve emisyonlar üzerinde olumsuz etkileri sebebiyle sıcak bakılmamakta, çünkü araziye gıda ve yemden ve ayrıca orman kullanımlarından uzaklaştırabiliyorlar. 2020 analizi OLEOSIM adlı bir dünya tarımsal denge modeli kullanılarak yapılan simülasyon verileri ve 2050 için yapılan literatür analizi sonucu 1G biyoyakıtların üretilmesinin gıda ve yem için kullanılan tahıl üretimi üzerinde olumsuz etkilere neden olacağı sonucuna varılmıştır (Hervé, Agneta, & Yves, 2011).

Tablo 3.1. AB ve Türkiye’de üretilen biyodizel miktarları(Biyodizel Sanayi Derneği, 2019)

Ülke	2018 Biyodizel Üretimi	Tarım Yapılabilir Alanlar Toplamı
Türkiye	120.000 m ³	23.830.000 hektar
Almanya	2.610.000 m ³	11.900.000 hektar
Fransa	1.700.000 m ³	18.510.000 hektar
İspanya	1.200.000 m ³	13.700.000 hektar
Polonya	1.030.000 m ³	12.140.000 hektar
İtalya	560.000 m ³	6.280.000 hektar
Yunanistan	130.000 m ³	2.630.000 hektar

Biyoyakıtlar artan petrol fiyatları ve sera gazı emisyonları nedeniyle 1990’lı yıllarda yeniden gündeme gelmiştir. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan biyoyakıt, etanol ve biyodizeldir. Etanol, biyokütle olarak da bilinen bitki çeşitlerinden üretilen yenilenebilir bir yakıttır. Etanol benzin ile farklı oranlarda karıştırılabilmektedir. ABD’de benzinin yaklaşık %97’si bir miktar etanol karışımı barındırır.



Şekil 3.2. Avrupa biyodizel üretiminde hammadde oranları (Biyodizel Sanayi Derneği, 2019)

İkinci yakıt türü olan biyodizel, bitkisel, hayvansal ve atık yağlardan elde edilip motorinle harmanlanarak dizel motorlarda kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan karışım oranı %20 biyodizel-%80 dizelden oluşan B20 yakıtıdır. AB’de biyodizel üretiminde 2018 yılında kullanılan hammaddelerin biyodizel yakıt ile harmanlama oranları Tablo 3.2’de verilmiştir (Scott & Lieberz, 2018). Biyoyakıt üretiminde önde gelen bir diğer bölge Latin Amerika’dır. Latin Amerika’da biyoyakıt temiz enerjiye geçmenin en önemli yoludur ve dünyanın %8’den daha az ulaşım enerjisini kullanmasına rağmen dünya biyoyakıt ihtiyacının %23’ünü karşılamaktadır. Arjantin ve Brezilya biyoyakıt üretiminde dünya pazarında büyük bir yere sahiptir.

Dünya piyasasında ikinci sırada yer alan Brezilya 1973 petrol krizinden sonra yenilenebilir enerji üretimine önem vermiş ve bugün dünyada, bu alanda Amerika'dan sonra en büyük paya sahiptir.

Tablo 3.2. AB’de biyodizel harmanlama oranları (Scott & Lieberz, 2018)

Ülke	Harmanlama Oranı
Avusturya	%6,3 biyodizel
Almanya	%4 sera gazı azaltımı
Fransa	%7.7 biyodizel
İspanya	%6 toplam enerji miktarı
Polonya	%7,5 biyodizel+biyoetanol
İtalya	%7 toplam enerji miktarı
Yunanistan	%7 toplam enerji miktarı
Belçika	%6 biyodizel
İngiltere	%7,8 toplam enerji miktarı
Slovakya	%5,8 toplam enerji miktarı
Portekiz	%9 toplam enerji miktarı
Romanya	%6,5 biyodizel

Dünya pazarında söz sahibi olan bu ülkeler, fosil yakıtlara alternatif olarak biyoyakıtları teşvik etmektedirler. Bu alanda birinci, ikinci ve üçüncü nesil olmak üzere çeşitli hammaddelerden biyoyakıtlar üretilmektedir. Birincil biyoyakıtlar, temel olarak ısıtma amacıyla ve elektrik üretimi için kullanılan organik malzemelerden oluşur. Bunlar, ateş yakmak için kullanılan ve doğal hallerinde bulunan talaş ve peletlerdir. İkincil biyoyakıtlar ise işlenmiş biyokütledir ve genelde araç motorlarında yaygın olarak kullanılan etanol ve biyodizel gibi sıvı yakıtlardır. Üçüncü nesil biyoyakıtlar ise gıda ürünlerinden oluşmayan fakat ağırlıklı olarak petrol ürünlerinde bulunan hammaddelerden üretilen yakıt türleridir. Bunlar, gelişmiş biyoyakıtlar veya yeşil hidrokarbonlar olarak anılmaktadır. Dünya piyasasında biyoyakıtlara olan talep yeni hammadde arayışlarını da beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda algler ve yosunların artan hammadde talebini karşılayabileceği düşünülmektedir. Güney Kaliforniya Üniversitesi okyanus yüzeyinde büyük ölçekte yosun yetiştirmek için çalışmalar yapmakta ve güneş enerjisi şamandıralarını ve su altı tetrahedron (eşkenar düzgün dörtyüzlü üçgen) yapısını kullanmayı planlamaktadır (Mittal, 2021).

3.5. Biyodizelin Özellikleri

Biyodizelin özelliklerini termodinamik ve fiziksel olmak üzere iki çatı altında toplayabiliriz. Bu özellikler biyodizelin karakterize edilmesini ve yanma modellemesini belirlemektedir.

3.5.1. Termodinamik Özellikleri

Biyodizel yakıtların süreç modellenmesi ve simülasyon çalışmaları için kritik özellikleri, buharlaşma ısısı ve buhar basıncı önemli rol oynamaktadır. Bunlara kritik sıcaklık (T_c), kritik basınç (P_c) ve kritik hacim (V_c) dâhildir. Biyodizel yakıtların yüksek sıcaklıklarda bozulması nedeniyle kritik termodinamik özellikleri ve sistematik modelleri oluşturmak zordur.

3.5.2. Kinematik Viskozite

Viskozite, bir sıvının diğeri üzerinde hareket ederken yaşadığı iç sürtünme sonucunda akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Bu nedenle, viskozite yakıtın püskürtme davranışını doğrudan etkilediği için kritik bir özelliktir. Genel olarak, daha yüksek viskozite, daha zayıf yakıt püskürtmesine neden olur. Yüksek viskozite, daha büyük damlacık boyutlarına sebep verir ve daha kötü buharlaşmaya neden olabilir. Ayrıca daha dar püskürtme açısına ve yakıt püskürtmesinin silindir içine daha fazla nüfuz etmesine neden olabilir. Bu, genel olarak daha kötü yanmaya, daha yüksek emisyonlara ve artan yağ seyrelmesine neden olabilir.

3.5.3. Yoğunluk

Yanma odası içindeki hava-yakıt oranı ve enerji içeriği, yakıt yoğunluğuna doğrudan bağlıdır. Biyodizel yakıtlarının yoğunlukları petrol dizelinkinden genellikle biraz daha fazladır ve biyodizel karışımlarının yoğunluk seviyesini artırmak, karışımın yoğunluğunun da artmasına neden olmaktadır. FAME (Yağ Asidi Metil Esterleri) yoğunluğu, doymamışlığın derecesinden güçlü bir şekilde etkilenir ve daha yüksek doymamışlık, artan yoğunluğa yol açar. Biyodizel yoğunluğunun da zincir uzunluğundan etkilendiği ve daha yüksek zincir uzunluğunun daha düşük yakıt yoğunluğuna yol açtığı gözlenmiştir.

3.5.4. Setan Sayısı

Setan sayısı (CN), bir yakıtın otomatik tutuşma kalite karakteristiğinin bir ölçüsü olarak ifade edilir. Biyodizel büyük ölçüde uzun zincirli hidrokarbon gruplarından oluştuğundan, tipik olarak petrol dizelinden daha yüksek bir CN'ye sahiptir. Saf FAME moleküllerinin CN'si zincir uzunluğu ile artar, fakat bu etki karmaşık karışımlar düşünüldüğünde etkisini yitirir.

Bununla birlikte FAME yakıtları CN'si doymamışlık derecesiyle ters orantılıdır; doymamışlık arttıkça yakıt CN'si azalmaktadır.

3.5.5. Donma Noktası, Akma Noktası ve Donma Filtresi Tıkanma Noktası

Bir yakıtın düşük sıcaklıkta kullanılmasında iki önemli parametre vardır: Bunlar donma noktası (CP) ve akma noktasıdır (PP). Donma noktası, dizeldeki mumun veya biyodizeldeki biyo mumun altında bulutlu bir görünüm oluşturduğu sıcaklık olarak ifade edilir. Katılaşmış mumlar yağı kalınlaştırır ve motorlardaki yakıt filtrelerinin ve enjektörlerin tıkanmasına neden olur. Akma noktası, çözeltiden çıkan mum miktarının yakıtı jelleştirme için yeterli olduğu sıcaklıktır. Biyodizel, geleneksel dizele kıyasla daha yüksek CP ve PP'ye sahiptir. Soğuk filtre tıkanma noktası (CFPP), belirli bir hacimde dizel yakıtın belirli koşullar altında soğutulduğunda belirli bir süre içinde standart bir filtreleme cihazından 1°C sıcaklıkta geçmesi olarak kabul edilir.

3.5.6. Parlama Noktası

Parlama noktası ile yakıt uçuculuğu arasında ters orantı vardır. Parlama noktası bakımından biyoyakıt kalitesi, yüksek uçuculuktaki safsızlıklar tarafından meydana gelen kirliliğe karşı alınan koruma önlemleriyle doğru orantılıdır. Örneğin, ürün ayrıştırma işlemlerinden sonra kalan fazla metanol elde edilen biodizelin parlama noktası değerini yakıt içerisinde bulunan miktar kadar düzensiz hale getirecektir.

3.5.7. Isıl Değer

Biyodizel, yüksek oksijen içeriğine sahiptir, bu nedenle petrol dizelden daha düşük kütle-enerji değerlerine sahiptir. Yağ asidi karbon zinciri arttıkça (sabit bir doymamışlık seviyesi için) oksijenin kütle oranı azalır, dolayısıyla ısıtma değeri artar (Saxena, Jawale, & Joshipura, 2013).

3.6. Biyodizelin Avantajları ve Dezavantajları

Bilinçsiz biyoyakıt üretiminin çevreye ciddi zararları da olabilir. Örneğin, mısır ve soyadan elde edilecek biyoyakıt için kurulacak geniş ölçekli tarım arazisi bölgedeki orman arazilerinin azalmasına neden olabilir. Üretilen yakıt pahasına, biyoyakıtta kullanılacak mısır ve soya gibi tahıllar için tarım arazisi açmak amacıyla ormanları yok etmek hem biyo çeşitliliğin dengesini bozmak hem bu arazilerde erozyon riskini arttırmak hem de küresel ısınmaya ve sera gazı etkisini artırmaya katkıda bulunmak demektir.

Bu nedenle, biyodizel üretiminde kâr-zarar dengesini iyi hesap ederek hareket etmemiz gerekmektedir (Javed & Zaman, 2010).

3.6.1. Ekonomik ve Enerji Güvenliği

Avantajları

Artan nüfus ve kentleşme, üretim ve sanayi gelişimini de artırdığı için petrol bazlı yakıtlara yönelik talebi de artırmıştır. Yakıt çeşitliliğın sağlanması petrol ithal eden ülkeler için alternatif kaynaklar sunmaktadır. Biyodizel yakıtını bu alternatif kaynaklardan biri olarak ele alırsak, herhangi bir ülke kendi biyodizel yakıtını üretmesi durumunda hem daha ucuza yakıt temin etmiş olacak hem de ham petrole olan talep azalacağı için petrol fiyatlarında düşüşe neden olabilecektir (Kuchler & Linnér, 2008).

Dezavantajları

Biyodizel yakıt henüz petrol bazlı yakıtlar ile rekabet edecek alt yapıya sahip değildir. Biyodizel yakıtlar geliştirme aşamasında olduğundan dolayı altyapısı petrol bazlı yakıtlar kadar gelişmiş olmadığı için ham petrol fiyatı düşük olduğu zamanlarda biyodizel yakıtlar fiyat açısından kârlı olmayabilir. Tüketici alışkanlığı biyodizel yakıtlara kaymadığı ve biyodizel yakıtlara gerekli talep olmadığı müddetçe bu yakıt için üretim altyapısı gerekli seviyede gelişmeyeceğinden petrol bazlı yakıtlara göre her zaman ekonomik avantaj sağlayamayacaktır (Kuchler & Linnér, 2008).

3.6.2. Tarımsal ve Çevresel

Avantajları

Biyodizelin geliştirilmesi, tarım endüstrisine önem veren ve gelişmekte olan ülkeler için büyük umut vaat etmektedir. Ayrıca etkisi giderek daha fazla belirgin hale gelen küresel ısınma, fosil yakıtlardan doğaya salınan sera gazlarından dolayı, yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak kabul edilen ve nispeten daha az zararlı gaz salınımı yapan biyoyakıt kullanımının önemini artırmıştır. Fosil yakıtlar yerine biyoyakıt kullanmanın iki temel faydası vardır. Birincisi, yenilenebilir oldukları için biyoyakıtlar, uzun vadeli, nispeten ucuz (gelişmiş bir altyapıda), güvenli enerji kaynaklarıdır. İkincisi, birçok biyoyakıt, üretimlerinde ve kullanımlarında sera gazı yayılımları, petrol veya doğal gazdan çok daha azdır. Ayrıca biyoyakıtta artan taleple birlikte kırsal alanda ekonomik canlanma yaşanması söz konusu olduğundan kentlerde yaşanan nüfus yoğunluğu nispeten kırsal kesime doğru kayma eğilimi gösterecektir (Javed & Zaman, 2010).

Dezavantajları

Bilinçsiz biyoyakıt üretiminin çevreye ciddi zararları da olabilir. Örneğın, mısır ve soyadan elde edilecek biyoyakıt için kurulacak geniş ölçekli tarım arazisi bölgedeki orman arazilerinin azalmasına neden olabilir. Üretilcek yakıt pahasına, biyoyakıtta kullanılacak mısır ve soya gibi

tahıllar için tarım arazisi açmak amacıyla ormanları yok etmek hem biyo çeşitliliğin dengesini bozmak hem de bu arazilerde erozyon riskini artırmak hem de küresel ısınmaya ve sera gazı etkisini artırmaya katkıda bulunmak demektir.

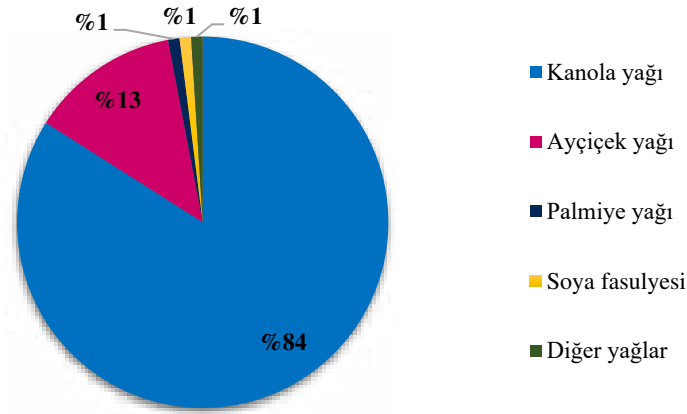
Bu nedenle, biyodizel üretiminde kâr-zarar dengesini iyi hesap ederek hareket etmemiz gerekmektedir (Javed & Zaman, 2010). Tarımsal faaliyetlerin belirli bölgelerde çok artması tatlı su kaynaklarının bilinçsizce tüketimine neden olduğunda yer altı su kaynakları yenilenmeye fırsat bulamazsa ilgili bölgelerde su kıtlığı ve çoraklaşma baş gösterebilir. Ayrıca tarımsal faaliyetler, eğer toprağın kendini yenileyecek şartlar sağlanmadan tarım yapılırsa, toprakta verim kaybına neden olabilir. Bu da toprağın zaman içerisinde üretime elverişliliğini yitirmesi anlamına gelmektedir.

Üretimde kullanılacak yapay gübreler tarım ve böcek ilaçları hem ekolojik dengeyi bozmakta hem de yer altı su kaynaklarına karışarak kirlilik meydana getirmektedir. Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda, kâr-zarar dengesini iyi hesap ederek, mümkün olan en az zararla ve bilinçli bir şekilde biyoyakıt üretimini gerçekleştirmemiz gerekmektedir.

3.7. Biyodizel Üretiminde Kullanılan Hammadeler

Biyodizel üretmek için daha çok bitkisel ve hayvansal yağlar, geri kazanım yağları, belediye ve endüstriyel atık kökenli geri kazanım yağları, atık bitkisel yağlar, kullanılmış kızartma yağları ve algler tercih edilmektedir. Biyodizel üretiminde kullanılan kaynaklar pasta grafiği halinde Şekil 3.3'te verilmiştir (Aktaş vd., 2020). Biyodizel üretiminde kullanılan hammadeler:

- I. Bitkisel yağlar; soya fasulyesi, aspir, pamuk, palmiye, ayçiçeği, kolza yağları
- II. Hayvansal yağlar; balık yağları, tavuk yağları, don yağları, seçilmiş beyaz gres veya domuz yağları
- III. Geri kazanım yağları; bitkisel yağ sanayi yan ürünleri
- IV. Atık bitkisel yağlar; yemeklerde kullanılmış artık yağlar
- V. Endüstriyel ve kentsel kaynaklı atık yağlar olarak sıralanabilir.



Şekil 3.3. Biyodizel üretiminde kullanılan kaynaklar (Aktaş vd., 2020).

Fakat biyodizel üretiminde bitkisel kaynaklı yağlar kullanıldığında genelde ekonomik bir avantaj sağlarlar, çünkü temin edilmesi kolay ve maliyeti düşüktür. Hayvansal yağ metil esterinin setan sayısının yüksek olması, korozif olmaması, temiz ve yenilenebilir olması, FFA'larının suda düşük olma eğiliminde olması gibi özellikler avantaj olarak görülebilir ancak hayvansal yağların, bitkisel yağlara nazaran sınırlı miktarda olması, onları üretimde ikinci planda tutmaktadır (Ahmia, Danane, Bessah, & Boumesbah, 2014). Şekil 3.3'te biyodizel üretiminde kullanılan kaynakların oranları verilmiştir. Buna göre %84 oranında kolza yağı, %13 oranında ayçiçek yağı ve %1 oranlarında soya fasulyesi, palm yağı ve diğer hammadde üretimde yerlerini almaktadır. Kolza yağı (kanola) transesterifikasyon reaksiyonunda en çok kullanılan bitkisel yağdır ve yüksek kalitede biyodizel elde etmek için çok elverişlidir.

Avusturya ve Almanya'da kanola yağı, Güney Fransa ve İtalya'da ayçiçek yağı, ABD'de soya fasulyesi yağı, Malezya'da palm yağı biyodizel üretiminde en çok tercih edilen bitkisel yağlardır. Aynı zamanda ABD, İngiltere ve Avusturya artık yemeklik yağlardan biyodizel üreten lider ülkelerdir. Biyodizel üretiminde gerek bitkisel yağ gerekse hayvansal yağ olsun sürekli ve düzenli tedarik edilemediğinden sorun teşkil etmektedir. Biyodizel üretiminde kullanılan yağların türü ve miktarı oldukça önemlidir, çünkü biyodizel uygulamalarında yağdaki serbest yağ asitleri oranı üretilen yakıtın kalitesini belirlemektedir (Aktaş vd., 2020).

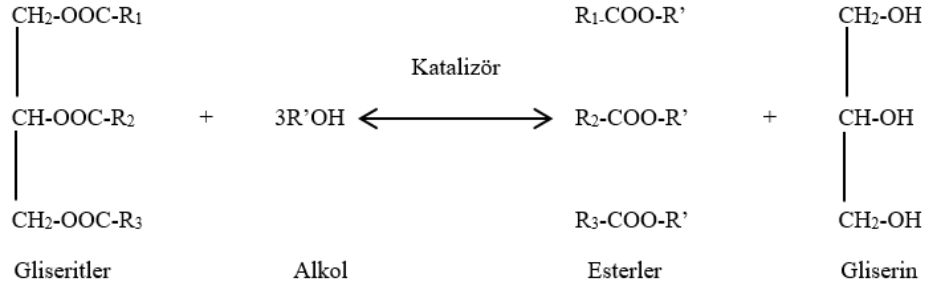
3.8. Biyodizel Üretim Yöntemleri

Bitkisel, hayvansal ve atık yağların viskozitelerinin yüksek olması, onları dizel motorlarda doğrudan kullanmayı sakıncalı hale getirir. Yağların motorda kullanıma uygun hale gelmesi için fiziksel ve kimyasal yapılarının değiştirilmesi, viskozitelerinin düşürülmesi gerekir. Gerçekleştirilen kimyasal reaksiyonlar ile üretilen biyodizel yakıt özelliklerinin dizel yakıtı yakın özelliklerde olması sağlanır. Yağların yüksek viskozitelerini düşürmek amacıyla

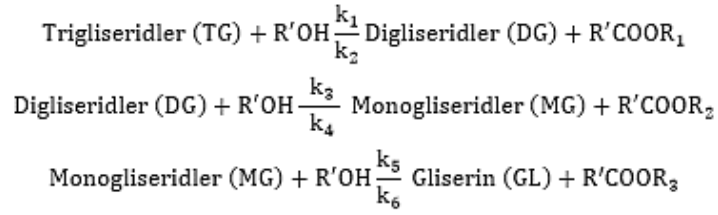
transesterifikasyon, piroliz, mikroemülsiyon, seyreltme ve süper kritik yöntem gibi fiziksel ve kimyasal metotlar uygulanır.

3.8.1. Transesterifikasyon

Dizel motorlarda bitkisel ya da hayvansal yağların doğrudan motorda kullanılması, yanma odasında karbon birikmesine, enjektörün boğulmasına ve tıkanmasına, yakıt borularının zarar görmesine neden olur. Piroliz, transesterifikasyon ve mikroemülsiyon yağların yüksek viskozitelerini düşürmek için kullanılan yöntemlerdir ancak bunların içinde en yaygın kullanılan transesterifikasyon reaksiyonudur. Bu yöntem sayesinde katı yağlar (trigliseritler), viskozitesi dizel yakıt seviyesine yakın olan alkil esterlerine dönüştürülür. Transesterifikasyon, basitçe reaktanların genellikle ısı veya basınç altında karıştırılmasıyla ilerleyen geri dönüşümlü bir denge reaksiyonudur, ancak reaksiyona bir çeşit katalizör ilave edilirse süreç hızlanacaktır. Verimli biyodizel üretimi için, başarılı bir transesterifikasyon reaksiyonu ve reaksiyon sürecinden sonra ester ve gliserol atıklarının kolay ve etkili bir şekilde ayrışması sağlanmalıdır (Gebremariam & Marchetti, 2017). Transesterifikasyon daha geniş tanımıyla, bir metanolün gliserinin yerine geçtiği biyodizel durumunda, bir esterin bir gliserid esterinin alkil estere dönüşmesi işlemidir. Üretilen biyodizel yakıtlar, ham sıvı ve katı yağlardan daha düşük viskoziteye sahiptir, çünkü transesterifikasyon, ham yağlardaki yağ asidi moleküllerinin karbon uzunluğunu kısaltır. Transesterifikasyon reaksiyonu, üçlü zincirli trigliseritleri, yan ürün olarak gliserin ile üç tek zincirli metil ester molekülüne dönüştürür, ancak yağ asitlerinin zincir uzunlukları değişmez. Katalizör burada devreye girer ve yağ asidi zincirlerini gliserine tutan bağı kırar, yağ asidi zincirleri daha sonra metanol ile bağlanır. Transesterifikasyon reaksiyonu üç aşamada meydana gelir. İlk etapta, bir yağ asidi zinciri trigliserit molekülünü koparır ve metanol ile birleşerek metil ester molekülü oluşturur ve bir digliserit molekülü (gliserin ile bağlı iki yağ asidi zinciri) bırakır. Daha sonra bir yağ asidi zinciri digliserit molekülünü koparır ve metanol ile birleşerek başka bir metil ester molekülü oluşturarak bir mono gliserit molekülü bırakır. En son aşamada mono gliseritler metil esterlere dönüştürülür (Kumar vd., 2020). Transesterifikasyon reaksiyon süreçleri Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te verilmiştir (Marchetti, Miguel, & Errazu, 2005). Transesterifikasyon reaksiyonu sonrası üretilen biyodizel, petrol bazlı dizel yakıtla benzer özelliklere sahip olup mevcut dizel motorlar üzerinde herhangi bir modifikasyona gerek duyulmadan kullanılabilir.



Şekil 3.4. Transesterifikasyon reaksiyonu aşaması (Marchetti vd., 2005)



Şekli 3.5. Yağ asidi zincirlerinin kopması (Marchetti vd., 2005)

3.8.2. Süper Kritik Yöntem

Reaktanlar ve aynı zamanda katalizörlerin neden olduğu teknik problemler süper kritik yöntemi kullanılarak çözülür. Süper kritik reaksiyon metodu, aşırı yüksek sıcaklık ve basınç altında gerçekleşir. Bir gaz ya da sıvı, kritik noktasının ötesinde yüksek basınç ve sıcaklık altında olduğunda yapısında olağandışı değişimler olur ve süper kritik sıvı faz üretilir. Bu yöntem ile oda sıcaklığında karışmayan metanol ve yağ homojen bir sıvı meydana getirir. Bunun sebebi metil alkolün çözünürlüğündeki keskin düşüş ve dielektrik sabitindeki azalmadır. Bu durumda reaksiyon hızlanır. Katalizör reaksiyon sürecini hızlandırmak için kullanılır. Bu yöntem kullanılarak ham yağlardan biyodizel üretimi yaklaşık 4 dakika sürmektedir, ancak bu yöntem çok yüksek basınç ve sıcaklık altında gerçekleştiğinden oldukça hassas ve maliyetli bir işlem gerektirmektedir çünkü çok fazla enerjiye ihtiyaç duyulur. Süper kritik yöntem çok fazla enerji gerektiren bir yöntem olduğu için biyodizel üretiminde her ne kadar üretim sürecini hızlandırırsa da ekonomik bir alternatif yöntem olarak görülmemektedir (Gebremariam & Marchetti, 2017).

3.8.3. Miroemülsiyon Yöntemi

Bu yöntem, termodinamik olarak kararlı, izotropik sıvı yağ-su gibi birbiriyle karışmayan sıvıların yüzey aktif madde kullanılarak (bir sıvının yüzey gerilimini, iki sıvı arasındaki ara yüzey gerilimini düşüren bileşikler) karıştırılması işlemidir. Mikroemülsiyon, yağın viskozite ve bazı atomizasyon özelliklerindeki sorunları düzeltir. Yağın uçucu özelliğini arttırmak için kullanılan

alkol, duman oluşumunu azaltmaktadır, ancak alkollerin setan sayısının düşük olması emülsiyonunda setan sayısını düşüreceğinden, setan sayısını arttırmak için alkil nitrat kullanılmaktadır (Rajalingam, Jani, Kumar, & Khan, 2016). Mikroemülsiyonlar daha çok yağ içinde su veya su içinde yağ emülsiyonu şeklinde oluşturulurlar. Emülsiyonun meydana gelmesi için hızlı bir karıştırma işlemi yapılmaktadır. Emülsiyonun meydana gelmesinde sıvı fazlar arasındaki hacim oranı, karıştırma süresi ve hızı, yüzey aktif madde miktarı önemli rol oynar. Burada yüzey aktif maddesi su-yag ara yüzeyinde, suda hidrofilik kısım, yağda ise hidrofobik kısım kalacak şekilde ara yüzey gerilimini düşürür, su ve yağı ayıran kuvvetleri zayıflatır ve böylece meydana gelen iki fazın birbirinden ayrışmasını engeller (Telli & Altınpınar, 2020).

3.8.4. Piroliz Yöntemi

Termal parçalanma olarak da bilinen piroliz yöntemi, hidrokarbonların kompleks yapısını katalizörlü yada katalizörsüz en basit yapısına çevirme işlemidir. Bu işlemde sonra yağın yoğunluğu ve viskozitesi düşmektedir. Biyodizel üretilecek yağlarda bu iki özellik motorda yakıtın atomizasyonunu önemli ölçüde etkiler.

Biyodizel üretimi için piroliz reaksiyonunda genelde alümina, zeolit ve redmud katalizör olarak kullanılır. Piroliz reaksiyonu 250-300 °C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleşir (Rajalingam vd., 2016). Termal parçalanma yöntemi, biyodizel üretmek için pahalı bir yoldur. Ayrıca piroliz reaksiyonu sırasında oksijen uzaklaştırıldığı için, oksijenli bir yakıt kullanmanın yararlarını da ortadan kaldırmaktadır (Parawira, 2010). Piroliz reaksiyonu endotermiktir ve daha yüksek sıcaklıklarda da gerçekleştirilebilmektedir.

3.8.5. Seyreltme Metodu

Seyreltme metodu yüksek konsantrasyona sahip bir çözeltinin yoğunluğunu düşürmek için gerçekleştirilen bir dizi sıralı reaksiyonlar bütünüdür. Yoğunluğu düşürülecek çözelti kademeli olarak seyreltilir. Seyreltme işleminde bitkisel ya da atık yağlar bir solvent veya dizel yakıt ile farklı oranlarda karıştırılarak inceltir. Burada en çok kullanılan işlem yağların dizel yakıtla karıştırılmasıdır, bu işlem kullanılan yağın viskozitesini ve dizel yakıt kullanımını azaltır. Seyreltme reaksiyonunda %20, %30, %40, %50 ve %80 oranlarında hayvansal, bitkisel ya da atık yağlar kullanılır. Seyreltme yöntemiyle biyodizel üretmek için fıstık yağı, ayçiçek yağı, kolza yağı ve atık yağlar daha çok kullanılır (Aktaş vd., 2020).

3.9. Biyodizelin Üretim Standartları

Biyodizel yakıtlar saf halde kullanıldıkları gibi dizel yakıtlarla da farklı oranlarda karıştırılarak kullanılabilir. Karışım oranlarını, üretilen biyodizelin hammaddesini ve test metotlarını belirlemek için çeşitli üretim standartları tanımlanmıştır. Bu standartlara göre biyodizel yakıtlar aşağıda da belirtildiği üzere farklı oranlarda dizel yakıtlarla karıştırıldığında nasıl isimlendirileceği gösterilmiştir.

B5 : % 5 Biyodizel + %95 Dizel

B20 : % 20 Biyodizel + %80 Dizel

B50 : % 50 Biyodizel + % 50 Dizel

B100 : % 100 Biyodizel

Bu oranların yanı sıra biyodizel-dizel yakıtlar ile daha farklı oranlarda da karışımlar hazırlanabilmektedir. Türkiye’de EN 14214 ve EN 14213 standartları esas alınarak TS EN 14214 ve TS EN 14213 olarak Türk standartları kabul edilmiştir. Tablo 3.3’te Türk standartlarına ait özellikler verilmiştir (Akgün, Bayındır, Aydın, & Düz, 2009).

Tablo 3.3. Türkiyede biyodizel standartları (Akgün vd., 2009)

Kriterler	Birim	EN 14214
Yoğunluk	15 °C g/m ³	0.86-0.9
Viskozite	40 °C mm ² /s	3.5-5
Parlama Noktası	°C	> 101
Kükürt	% m/m	< 0.01
Sülfatlanmış Kül	% m/m	0.02
Su	mg/kg	< 500
Karbon Kalıntısı	% m/m	< 0.03
Toplam Kirlilik	mg/kg	< 24
Setan Sayısı	-	> 51
Metanol	% kütle	< 0.2
Ester İçeriği	% kütle	> 96.5
Monoglisaritler	% kütle	< 0.8
Diglisaritler	% kütle	< 0.2
Triglisaritler	% kütle	< 0.4
Serbest Gliserol	% kütle	< 0.02
Toplam Gliserol	% kütle	< 0.25
Fosfor	mg/kg	< 10
Alkali Metaller (Na,K)	mg/kg	< 5

3.9.1. EN 14214 Standartları

Biyodizel yakıt türü olan yağ asidi metil esteri (FAME) için yapısal özelliklerin ve test metodlarının belirlendiği bir standarttır. Bu standart türü Avrupa Standardizasyon Komitesi tarafından belirlenmiştir. EN 14214 standardında hayvansal ya da bitkisel yağlara metil alkol katılarak biyodizel üretilir. EN 14214 standartları arasında ülkelere göre farklılıklar görülmektedir. Bu farklar iklim şartlarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Fakat meydana gelen bu farklar ülke bazında detaylandırılmıştır (Wikipedia, 2019). Türkiye standartları ise TS EN 14214 olarak numaralandırılmıştır. Türkiye’deki bu standartlar 2009 yılında yenilenerek 2004 versiyonun yerine geçmiştir. Tablo 3.4’te EN 14214 standartları detaylı bir şekilde gösterilmektedir (Tütüncü, 2013).

Tablo 3.4. EN 14214 standart özellikleri(Tütüncü, 2013)

Özellik	Birim	Alt limit	Üst Limit	Deney metodu
Ester İçeriği	% (k/k)	96.5	-	EN 14103
Yoğunluk 15 °C’de	kgm ⁻³	860	900	EN ISO 3675/EN ISO 12185
Viskozite 40 °C’de	mm ² s ⁻¹	3.5	5.0	EN ISO 3104
Parlama Noktası (°C)	°C	101	-	EN ISO 2719/EN ISO 3679
Kükürt İçeriği	mgkg ⁻¹	-	10	EN ISO 20846/EN ISO 20884
Karbon Artığı Kalıntısı (%10 damıtma kalıntısında)	%(k/k)	-	0.3	EN ISO 10370
Setan Sayısı	-	51.0	-	EN ISO 5165
Sülfatlanmış Kül İçeriği	%(m/m)	-	0.02	ISO 3987
Su İçeriği	mgkg ⁻¹	-	500	EN ISO 12937
Toplam Kirlilik	mgkg ⁻¹	-	24	EN 12662
Bakır Şerit Korozyonu (3 saat 50°C’de)	derece	Sınıf 1	Sınıf 1	EN ISO 2160
Oksidasyon Kararlılığı 110°C	saat	6	-	EN 15751/EN 14112
Asit Değeri	mgKOH/g	-	0.5	EN 14104
İyot Sayısı	İ g/100g	-	120	EN 14111
Linolenik Asit Metilester	%(k/k)	-	12	EN 14103
Çoklu Doymamış (>=4 çift bağ) Metilester	%(k/k)	-	1	EN 15779
Metenol İçeriği	%(k/k)	-	0.2	EN 14110
Monoglisid İçeriği	%(k/k)	-	0.8	EN 14105
Diglisid İçeriği	%(k/k)	-	0.2	EN 14105
Triglisid İçeriği	%(k/k)	-	0.2	EN 14105
Serbest Gliserin	%(k/k)	-	0.02	EN 14105/EN 14106
Toplam Gliserin	%(k/k)	-	0.25	EN 14105
Grup 1 Metaller(Na+K	mgkg ⁻¹	-	5	EN 14108/EN 14109/EN 14538
Grup 2 Metaller(Ca+Mg	mgkg ⁻¹	-	5	EN 14538
Fosfor İçeriği	mgkg ⁻¹	-	4	EN 14107

3.9.2. EN 14213 Standartları

EN 14213 standartları ısıtma yakıtlarını kapsar. Bu standartlar hayvansal ve bitkisel yağlardan elde edilen yağ asidi metil esterinin (FAME) kimyasal, fiziksel özellik ve deney metotlarını kapsar. Türkiye’ de bu standartlar TS EN 14213 olarak numaralandırılmıştır. Ancak TS EN 14213:2004 versiyonu güncellenerek TS EN 14214:2013 olarak belirlendi. Tablo 3.5’te EN 14213 ait ulusal standartlar verilmiştir (Tütüncü, 2013).

Tablo 3.5. EN 14213 standart özellikleri (Tütüncü, 2013)

Özellik	Birim	Alt limit	Üst Limit	Deney metodu
Ester İçeriği	% (k/k)	96.5	-	EN 14103
Yoğunluk 15 °C’de	kgm ⁻³	860	900	EN ISO 3675/EN ISO 12185
Viskozite 40 °C’de	mm ² s ⁻¹	3.5	5.0	EN ISO 3104
Parlama Noktası (°C)	°C	101	-	EN ISO 2719/EN ISO 3679
Kükürt İçeriği	mgkg ⁻¹	-	10	EN ISO 20846/EN ISO 20884
Karbon Artığı Kalıntısı (%10damıtmakalıntısında)	%(k/k)	-	0.3	EN ISO 10370
Sülfatlanmış Kül İçeriği	%(m/m)	-	0.02	ISO 3987
Su İçeriği	mgkg ⁻¹	-	500	EN ISO 12937
Toplam Kirlilik	mgkg ⁻¹	-	24	EN 12662
Oksidasyon Kararlılığı 110°C	saat	6	-	EN 15751/EN 14112
Asit Değeri	mgKOH/g	-	0.5	EN 14104
İyot Sayısı	İ g/100g	-	120	EN 14111
Çoklu Doymamış (>=4 çift bağ) Metilester	%(k/k)	-	1	EN 15779
Monogliseric İçeriği	%(k/k)	-	0.8	EN 14105
Digliseric İçeriği	%(k/k)	-	0.2	EN 14105
Trigliseric İçeriği	%(k/k)	-	0.2	EN 14105
Serbest Gliserin	%(k/k)	-	0.02	EN 14105/EN 14106
Soğuk Filtre Tıkanma Noktası (SFTN)	°C	-	-	EN 116
Net Yanma Isısı (hesaplanmış)	mjkg ⁻¹	35	-	DIN 51900-(1,2,3)

3.9.3. EN 590 Standartları

EN 590 Avrupa Standardizasyon Komitesi tarafından bildirilerek, Avrupa Birliği ve diğer Avrupa ülkelerinde kullanılacak tüm dizel yakıtlarının karşılaması gereken fiziksel özellikleri belirten standarttır. 98/70/EG’ye dayalı olarak %7’ye kadar metil esteri biyodizelinin dizel yakıt ile 7:93 oranında karıştırılmasına müsaade eder. EN 590 Avrupa emisyon standartlarıyla piyasaya çıkarıldı. Bu standart revizyonların her birinde dizel yakıttaki kükürt içeriğini azaltmak için

çıkarıldı. 2007 yılından bu yana ultra düşük kükürtlü dizel olarak adlandırılır. Yağlayıcı olarak kükürtün bir faydasının olmadığı ve katkı maddeleriyle değiştirilmesi öngörülmüştür (Wikipedia, 2021). Türkiye’de TS EN 590+A1 olarak numaralandırılmış ve TS EN 590:2014 standartları olarak kabul edilmiştir. Tablo 3.6’da EN 590 dizel yakıt standartlarına ait özellikler verilmiştir (Tütüncü, 2013).

Tablo 3.6. EN 590 standart özellikleri (Tütüncü, 2013)

Özellik	Birim	Alt limit	Üst Limit	Deney metodu
Setan İndeksi		46.0	-	EN ISO 4264
Setan Sayısı		51.0	-	EN ISO 5165
Yoğunluk 15°C’de	kgm ⁻³	820	845	ISO 5264,ISO 5165
Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar	% (k/k)	-	8	EN ISO 12916
Kükürt İçeriği	mgkg ⁻¹	-	10	ISO 14596, ISO 4260
Parlama Noktası	°C	55	-	EN ISO 2719
Karbon Kalıntısı (on 10% damıtma artığında)	%(k/k)	-	0.30	EN ISO 10370
Kül İçeriği	%(k/k)	-	0.01	EN ISO 6245
Su İçeriği	mgkg ⁻¹	-	200	EN ISO 12937
Toplam Kirlilik	mgkg ⁻¹	-	24	EN ISO 12662
Bakır Şerit Korozyonu (3 saat 50°C’de)	Derece	Sınıf 1	Sınıf 1	EN ISO 2160
Oksidasyon kararlılığı	gm ⁻³	-	25	EN ISO 12205
Viskozite 40°C’de	mm ² s ⁻¹	2.00	4.5	EN ISO 3104
Yağ asidi metil ester içeriği	%(V/V)	-	7	EN 14078

3.10. Biyodizel Emisyonları

Biyodizel ile yapılan birçok çalışmada, karbon dioksit (CO₂), karbon monoksit (CO), kükürt oksit (SO_x), partikül (PM), nitrik polisilik aromatik hidrokarbonlar (nPAH) ve polisilik aromatik hidrokarbonlar (PAH) gibi zararlı emisyon gazlarının dizel yakıtlara göre daha aşağı seviyelerde olduğu, ancak NO_x oranlarında bir miktar artış olduğu sonucuna varılmıştır. Çevre ve insan sağlığı açısından bakıldığında biyodizel kullanmak daha avantajlı olmaktadır. Hayvansal ve bitkisel hammaddelerden elde edilmesi nedeniyle, biyolojik karbon döngüsüne katkı sağlayıp, sera etkisini arttırıcı etki göstermez. Çevre Koruma Ajansına (EPA) göre Tablo 3.7’de dizel yakıtlar ile karşılaştırıldığında ortalama biyodizel emisyon oranları verilmiştir (Yaşar, 2016).

Tablo 3.7. Biyodizel yakıt emisyon oranları (Yaşar, 2016)

Emisyonlar	(%)B20	(%)B100
Karbon Monoksit (CO)	-12	-48
Azot Oksit (NO _x)	±2	10
Toplam Yanmamış Hidrokarbon (THC)	-20	-67
Partikül Maddeler (PM)	-12	-47
Sülfatlar	-20	-100
Polistik Aromatik Hidrokarbonlar (PAH)	-13	-80
N-Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar (Nitratlı-PAH's)	-50	-90
Ozon (O ₃)	-10	-50
Hidroflorik Asit (HF)	-2.10	-15.51
Kükür Oksitler (SO _x)	-1.61	-8,03
Metan	-0.51	-2.57
Hidroklorik Asit (HCl)	+2.71	+13.54

Tabloda görüldüğü üzere NO_x ve hidroklorik asit (HCl) hariç diğer tüm emisyonlarda düşüşler görülmektedir.

- Kükürt emisyonları saf biyodizel kullanımı ile oldukça aşağı değerlere çekilmiştir. Sülfat ve kükürt oksitlerin (asit yağmurlarının temel bileşenleri) emisyonlarında dizel yakıtı göre önemli ölçüde azalma olmaktadır.
- Biyodizel kullanımı ile HCl, CO ve PM oranlarında önemli miktarda düşüşler olmuştur. Ancak NO_x emisyonlarında biraz artış görülmüştür.
- Biyodizel yakıt ile toplam hidrokarbon miktarı (sis ve ozon oluşumuna neden olan faktör) dizele kıyasla %50 daha düşük çıkmıştır.
- Karbon monoksit (CO) emisyonları dizel yakıtı nazaran %48 oranında düşmüştür.
- Biyodizel kullanımında dizele kıyasla PM miktarında %47 oranında düşüş görülmüştür.
- NO_x emisyonlarının, üretilen biyodizel yakıtı, motor tipine ve test yöntemlerine göre azalır veya artar. Ancak biyodizel yakıtın içeriğinde kükürt olmaması, standart dizel ile yapılmayan NO_x ölçüm tekniklerinin biyodizel ile kullanılabilmesine olanak sağlar. Bundan dolayı biyodizeldeki NO_x emisyonu efektif bir şekilde kontrol altına alınabilir ya da tamamen yok edilebilir (Yaşar, 2016).

Piyasada yaygın olarak kullanılan B20 biyodizeli için zararlı emisyonların ortalama %15 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Ancak elde edilen verilere göre NO_x emisyonlarında B20 biyodizeli için artma ya da düşmeler görülmüştür. Bundan dolayı biyodizelin NO_x emisyonları üzerinde net bir etkisi görülmemektedir. Yapılan çalışmalarda biyodizelin petrol dizeline nazaran sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azalttığı görülmüştür (McCormick, 2007).

3.11. Zararlı Egzoz Emisyonları

Motorlu araçlarda yanma olaylarından sonra egzoz yoluyla dışarıya salınan, insan sağlığı ve çevre üzerinde olumsuz etkileri olan CO, CO₂ HC, NO_x, PM-is emisyonları başlıca zararlı gazlar olarak tanımlanır.

3.11.1. Karbonmonoksit (CO) Emisyonları

Karbonmonoksit gazı tatsız, renksiz, kokusuz ve yanıcı zehirli bir gazdır. CO vücuda solunum ile girer ve vücutta parçalanmaz. CO kana karışarak vücudun doku ve organlarına alınan O₂ oranını azaltır. Solunumla vücuda alınan CO bulantı, görmede bulanıklık, baş dönmesi ve reflekslerde yavaşlamaya sebebiyet verir, daha fazla CO'ya maruz kalınması durumunda sonuç ölümcül olur. CO gazı hem insan sağlığına hem de çevreye ciddi zararlar verebilen tehlikeli bir bileşendir. Çevreye salınan CO gazının büyük bir kısmı motorlu araçlardan kaynaklanmaktadır. Egzoz emisyonlarında CO oluşumunun nedenleri olarak, silindir içerisine yeterli miktarda oksijen alınmaması ve içeriye alınan oksijenin yanma odasında homojen olarak dağılmaması gösterilebilir. Yanma odasındaki O₂ eksikliği CO' nun CO₂'ye dönüşmemesine sebebiyet verdiği için yanma kötüleşir ve CO salınımı artar. Emisyon ürünü olan CO hız ve yük değişimlerine genelde duyarsız olup, daha çok hava/yakıt oranıyla değişmektedir. CO oluşumunun en önemli sebebi hava fazlalık katsayısıdır. Silindir içerisine alınan karışım yakıt bakımından zenginleştikçe karbonun tamamını yakacak O₂ yetersiz olduğundan CO miktarı artar. Motorlu taşıtlardan salınan CO gazları soğuk havalarda artış gösterir. Soğuk havalarda motorun çalışması için daha fazla yakıt gerekeceğinden, ihtiyaç duyulan O₂ miktarıda artar, ancak katalitik konvertör ve O₂ sensörleri gibi bazı emisyon kontrol mekanizmalarının soğuk havalarda ki duyarlılığı azalır (Ülger, 2010). Denklem 3.1'de C atomunun CO'ya, Denklem 3.2'de ise, CO molekülünün CO₂'ye oksidasyon aşamaları gösterilmektedir.



Yukarıda belirtilen denklemlerde yanma reaksiyonunda ortamda hala yeterli oksijen varsa CO yerine CO₂ emisyonu meydana gelir (İlkılıç & Behçet, 2006).

3.11.2. Karbondioksit (CO₂) Emisyonu

CO₂ gazının büyük bir kısmı motorlu taşıt emisyonları ile birlikte, bitki ile diğer canlıların solunumu sonucu ve enerji üretim tesislerinden atmosfere salınan gazlardan meydana gelmektedir. Yüksek miktarda karbon salınımı asidik oluşuma neden olur ve buda asit yağmurlarını tetikler.

Dünya, yeryüzüne gelen güneş ışınlarıyla birlikte, yeryüzünden atmosfere yansıyan ışınların etkisiyle de ısınır. Yansıyan bu ışınlar metan, CO₂, su buharı ve atmosferdeki diğer gazlar tarafından hapsedilir ve bu gazlar atmosferin ve nihayetinde dünyanın ısınmasına neden olur. Yeryüzünün ısınmasında büyük rolü olan CO₂ güneşten gelen ışınlar karşısında büyük oranda geçirgendir ancak yeryüzünden tekrar atmosfere yansıyan kızıl ötesi ışınları absorbe eder. Ancak atmosferde CO₂ ile birlikte bulunan CH₄, CFC₅ ve N₂O gibi gazları yeryüzünden yansıyan kızılötesi ışınları absorbe ederek atmosferin belli bir sıcaklıkta kalmasını sağlar. Atmosferde bu gazların oranlarının artması kızıl ötesi ışınların absorplanması ve buna bağlı olarak da atmosferin sıcaklığının artması anlamına gelir ve bu duruma sera etkisi denmektedir. Sera etkisi, atmosferin daha fazla ısınmasına neden olur ve yeryüzünün genelinde ısınmaya sebep olur. Yıllık olarak 1 ppm artan CO₂ miktarı günümüzde 380 ppm'e kadar çıkmıştır. BM Çevre Raporu'na göre küresel ısınmaya sebep olan en etkili gaz CO₂ olup, dünya çapında CO₂ emisyonlarının %5 oranında azaltılması istenmiştir (iklimBU, 2021).

CO₂ gazlarının atmosfere salınımının en büyük nedenlerinden biri olan motorlu taşıtlarda, hava/ yakıt (H/Y) oranı arttıkça CO miktarı düşer ve CO₂ miktarı da artar. Buna bağlı olarak motorlu taşıtlarda, ısınma amaçlı kullanılan sistemlerde ve enerji üretim tesislerinde kaliteli yanmayı H/Y oranı belirler. Yanma odasında türbülans yükseldikçe CO düşer ve CO₂ artar, yani hava-yakıt ne kadar iyi homojenize olursa o kadar iyi bir yanma meydana gelir.

3.11.3. Hidrokarbon (HC) Emisyonları

HC oluşumunun en belirgin nedenleri arasında silindir içerisindeki yakıtın O₂ eksikliğinden eksik yanması, ya da hiç yanmadan dışarı atılması gösterilebilir. Egzozlardan atmosfere salınan HC bileşenleri arasında etan, eten, propan, metan, formaldehid, benzen, izobütan, toluen ve 1.3 bütan gibi insan sağlığını tehdit eden zararlı maddeler vardır (Karamangil, 2003). Atmosferde bulunan HC'ler, NO_x ve ışık ile reaksiyona girerek "fotokimyasal sis" denilen bir sis bulutu oluşturup, insan ve diğer canlılar üzerinde olumsuz bir etki meydana getirmektedir (Göktaş & Sayın, 2020).

HC'ler silindir içerisinde daha çok cidar etrafında toplandıklarından ve yanmaya tam katılmadıklarından motor verimini de düşürürler. Yakıt silindir içeresine püskürtüldükten sonra tam yanmaya engel olan bir kısım oluşumlar vardır. Bunlar;

- I. Buharlaşan hava-yakıt karışımının silindir içerisindeki boşluklara emilmesi
- II. Atomize olmuş yakıtın cidarlardaki yağ filmi tarafından emilmesi
- III. HC'lerin piston kafası üzerindeki birikintiler tarafından emilmesi
- IV. Alev cephesinin cidarlara ulaşmadan sönmesi
- V. Silindir içerisinde yanmamış karışımın egzoz supabından kaçması olarak sıralanabilir (Karamangil, 2003).

3.11.4. Azot Oksit (NO_x) Emisyonları

Azot oksitler genelde renksiz ve kokusuzdur. Atmosferdeki NO_x gazları akciğerde doku tahribatlarına ve akciğerin işlevlerinin bozularak solunum yolu hastalıklarına neden olmaktadır. NO_x gazları atmosferde su ile reaksiyonu sonucu, aşındırıcı nitröz asit ve nitrik asite dönüşerek yağmurlar ile yeryüzüne inerek asit yağmurlarına sebep olurlar. Bu maddelerin havada konsantrasyonlarının artması insan sağlığı ve çevre üzerinde ciddi zararlara neden olmaktadır. NO_x emisyonları içerisinde en tehlikeli bileşen NO₂ gazıdır. Azot oksitler asit yağmurlarının oluşmasına, hava ve su kalitesinin düşmesine, bitki örtüsü üzerine olumsuz etkisi sebebi ile tarım ve dünya üzerindeki bitki florası üzerinde geri dönüşümü mümkün olmayan olumsuz etkilere sebep olmaktadır.

Dizel motorlarda hava/yakıt oranının artması, maksimum basınç ve maksimum sıcaklığın artması anlamına gelir ve bu durum karışımın geniş bir alanda stokiyometrik orana yakın bir değerde yanmasını sağlar. Hava/yakıt oranının artması demek NO_x'lerin artması demektir. Tutuşma gecikmesinin kısılması, setan sayısı yüksek yakıtlarda silindir içinde biriken yakıt miktarını ve hızlı yanma devresindeki sıcaklık artışını düşüreceğinden NO_x emisyonun azalmasını sağlar. Aynı zamanda türbülans oranı, enjektör memesi delik sayısı, yanma odası şekli ve püskürtme basıncı gibi değişkenler yakıt karışımının oluşturulmasında etkili olduğu için NO_x emisyonunda da önemli rol oynarlar (Uyumaz, Boz, Yılmaz, Solmaz, & Polat, 2017).

NO_x yoğunluğunun fakir karışımlarda azalmasının sebebi, yanmanın yavaş ve maksimum sıcaklığın düşük olmasıdır. Azot oksit emisyonlarının azaltılması için sıcaklığın 1800°K'ye gelmesini engellemek ve yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen yanma olaylarının sürelerini kısaltmak ve aynı zamanda oksijen yoğunluğunun da düşürülmesi gerekir (Gümüş, Şentürk, Solak, & Karataş, 2013).

3.11.5. Partikül Madde Emisyonları

Partikül madde (PM), egzoz emisyonları içinde en karmaşık yapıya sahip olanıdır. Partikül madde, seyreltilmiş ve soğutulmuş egzoz dumanından örneklenen filtrelenebilir katı ve yoğunlaşan sıvı maddelerdir. PM'nin esas bileşenleri yakıttan ve yağlama yağından meydana gelen karbonlu katılar ve ağır hidrokarbonlardır. Dizel partikül emisyonları PM yada DPM olarak kısaltılır, DPM iş sağlığı alanlarında kullanılan bir terimdir (Majewski & Jääskeläinen, 2019). PM maddeler insan sağlığı ve çevreye ciddi zararlar verebilen emisyonlara dâhildir. PM ve NO_x dizel emisyon kontrolü teknolojisinde odak noktadadır. Egzozdan çevreye atılan partikül maddeleri kontrol altına almak için dizel partikül filtresi (DPF) kullanılır. DPF egzoz gazlarının geçişine izin verirken, katı ve sıvı partikülleri toplamak için egzoz monte edilir.

DPF, partikül madde ve isi tutabilen gözenekli metal veya seramikten yapılan bir filtredir. Ancak gelişen teknolojiyle birlikte DPF'leri silikon karpit ve kordierit gibi malzemelerden de yapılmaktadır. Bu filtrelerin yüksek oranda is tutma ve düşük basınç azalmasına sahip olmaları gerekir. Dizel motorlarda dört farklı partikül emisyonu mevcuttur. Bunlar;

- I. Mavi Duman: Tamamen yanmamış yakıt veya özellikle aşınmış silindirlerde yağ moleküllerinden meydana gelen dumandır.
- II. Beyaz Duman: Genellikle soğuk havalarda karşılaşılan ve kirletici olmayan su buharıdır. Ancak soğuk havalarda ilk hareket esnasında ya da düşük yüklerde görünen beyaz duman, artan yükte kaybolmuyorsa bu yoğunlaşmış yakıt buharıdır.
- III. Siyah Duman: Karbon-is partiküllerinin meydana getirdiği dumandır. Motorda tam yükte ve düşük hava/yakıt oranlarında görülür.
- IV. Diğer Partiküller: Sülfatlar başta olmak üzere yağlama yağı ve yakıt içinde bulunan farklı katkı maddelerinden oluşur (Yavuz, 2017).

İs emisyonlarında hava/yakıt oranına, motorun devrine, yüküne bağlı olarak artma ya da azalma görülür. Motorda yük artınca is emisyonları da artmaktadır, bunun yanı sıra zengin yanma da is oluşumunu arttırmaktadır. Yine yanma reaksiyonunda ortamda yetersiz O_2 is oluşumuna sebep olmaktadır.

4. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmanın ilk ayağı Fırat Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Ham balık yağından transesterifikasyon metoduyla etil esteri (biyodizel) elde edilmiştir. Bu aşamada balık yağı, katalizör olarak sülfürik asit (H_2SO_4) kullanılarak etil alkol ile asidik esterifikasyona sokulmuştur. Kimyasal reaksiyon sonucu sentezlenen etil esteri saf su ile yıkama işlemine tabi tutularak saflaştırılmıştır. Üretilen biyodizel yakıtlar farklı oranlarda dizel yakıtı ile harmanlanarak dizel motorunda kullanılmıştır. Motorin-biyodizel karışımları %50 %75 ve %100 biyodizel içerecek şekilde karıştırılarak hazırlanmış ve bu karışımlar sırasıyla B50 B75 ve B100 olarak isimlendirilmiştir.

Deneylerin ikinci basamağı Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Buradaki deneyler, tek silindirli direk püskürtmeli bir dizel motor üzerinde yapılmıştır. Deneylere başlanmadan önce motor sökölüp, piston segman takımı, supaplar ve yakıt enjektörü silinip temizlenerek tekrar motora monte edilmiştir. Bunun amacı deneylerden sonra kullanılan yakıtın motor elemanları üzerindeki etkilerini incelemektir. D100, B50, B75, B100 yakıtları motor çalışma sıcaklığına geldikten sonra sırasıyla farklı yük ve devirlerde kullanılarak test edilmiştir. Deneylerde motorun güç, moment ve özgül yakıt tüketimi gibi performans değerleri test edilmiş aynı zamanda CO, CO₂, NO_x, HC ve is değerleri ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Kayıt altına alınan veriler grafikler halinde yorumlanmıştır.

4.1. Balık Yağından Biyodizel Üretimi

4.1.1. Kullanılan Kimyasal Malzeme Ve Gereçler

Biyodizel üretimi için gerekli kimyasal malzemeler ve araç gereçler üniversitenin kimya ve otomotiv laboratuvarlarından temin edilmiştir. Eksik araç gereçler ise ücret karşılığı dışarıdan temin edilmiştir. Tablo 4.1’de bu malzemeler ayrıntılı olarak gösterilmektedir.

Tablo 4.1. Kullanılan araç gereçler

Araç gereç ve özellikleri	Adet-Miktar
Manyetik Karıştırıcı Isıtıcı	1
Cam Beher (2000 ml)	2
Cam Beher (250 ml)	4
250 ml Ayırma Hunisi	2
500 ml Ayırma Hunisi	1
1000 ml Ayırma Hunisi	1
Termometre	1
Bez Filtre	5
0.001 gr Ölçüm Hassasiyetinde Terazi	1
Erlen (100 ml)	1
Cam Büret (50 ml)	1
Cam Pipet	1
Farklı Hacimlerde Plastik Kaplar	10
Fenolftalein	500 ml
Toluene	2.5L

4.1.2. Balık Yağının Temin Edilmesi

Deneylerde kullanılan balık yağı Samsun Bafra’ dan Samsun Balıkçılık Su Ürünleri Hayvancılık İnşaat Turizm SAN. TİC. LTD. şirketinden ücret karşılığı temin edilmiştir. Biyodizel üretmek için hamsi yağı tercih edilmiştir. Bunun sebebi özellikle ülkemizde Karadeniz Bölgesinde hamsi türünün oldukça fazla olmasından ve kolay temin edilebilmesinden ötürüdür. Biyodizel üretimi için Fırat Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü laboratuvarları kullanılmıştır. Farklı balık türlerine ait balık yağı özellikleri Tablo 4.2’de gösterilmiştir (Korkut Yıldırım, Kop, & Demir, 2007).

Ham balık yağı, balık unu yapımında yan ürün olarak üretilmektedir. Balık unu, presleme işleminden sonra pres kek ve pres sıvısı olarak çıkar. Pişirme işleminden sonra balıklardan çıkan sıvıdan ayrışması gereken büyük partiküller ve kılçıklar vardır. Bu ayrıştırma işlemi vibrasyonlu elekler kullanılarak yapılmaktadır. Bu işlemlerin ardından elde edilen sıvı üç şekilde ayırmaya tabi tutulur.

Dekantörler: Pres sıvısı içerisinde arta kalan katı partiküllerin ayrıştırılması.

Seperatörler: Pres sıvısı içerisinde bulunan ham balık yağının ayrıştırılması.

Saflaştırma: Ham yağın içerisinde kalan nemin ve istenmeyen maddelerin yok edilmesi (Korkut Yıldırım vd., 2007).

Tablo 4.2. Çeşitli balık türlerine ait yağ asidi özellikleri (Korkut Yıldırım vd., 2007)

Yağ Asidi	Kimyasal Yapı	Hamsi	Capelin	Atlantik Herring	Pasifik Herring	Salmon
Miristik Asit	14:00	7.4	5.4-8.2	5.1-6.4	5.7-7.6	2.2-3.7
Palmitik Asit	16:00	17.4	8.2-11.9	10.9-12.7	16.6-18.3	10.2-17
Palmitoleik	16:01	10.5	8.3-12.4	8.8-12	7.6-8.3	4.1-8.7
Stearik Asit	18:00	4.0	1-1.4	0.9-1.2	1.8-2.2	3.2-4.7
Oleik Asit	18:01	11.6	12.4-17.4	12.6-13	16.9-22.7	18.6-21.4
Linoleik Asit	18:2 W6	1.2	0.7-1.4	0.7-1.1	0.6-1.6	1.2-2
a-Linolenik Asit	18:3 W3	0.8	0.1-0.8	0.3-0.6	0.4-0.6	0.6-1
Staeridonik Asit	18:4 W3	3.0	0.2-7	1.5-1.7	1.6-2.8	2-2.1
Gadoleik Asit (Ekoseboik Asit)	20:01	1.6	8.6-27.4	14.1-16.1	9.4-10.7	5.4-8.4
Araşidonik Asit	20:4 W6	0.1	0.1-3	0.3-0.4	0.4	0.9
Eikosapentaenoik Asit (EPA)	20:5 W3	17	2.8-1.9	7.4-8.4	8.1-8.6	6.7-12
Erüsik Asit	22:01	1.2	9.4-25	19.8-20.8	11.6-12	5.5-9.4
Dekasopentaenoik Asit	22:5 W3	1.6	0.1-0.9	0.4-0.8	0.8-1.3	2.3-2.9
Dekosahegzaenoik Asit (DHA)	22:6 W3	8.8	1-14	3.9-4.9	4.8-7.6	13.8-16.1

Balık türü, su sıcaklığı, mevsim, yağın elde edilme yöntemi, gibi faktörler balıklardaki yağ asidi değerlerinin değişiklik göstermesine neden olmaktadır. Kış aylarında su sıcaklığının düşmesine bağlı olarak balıklardaki yağ oranlarında artış olmaktadır. Buna bağlı olarak yağın renginde de koyulaşma meydana gelir. Balık yağlarında yeterli protein ve su bulunmaması bakterilerin üreyip çoğalması için besi alanı oluşturmaz. Bundan dolayı yağlar yüksek sıcaklıklarda elde edildiğinden bünyede var olan az miktarda bakteride yok olmaktadır ve yağların içerisindeki asitlikten dolayı bakteri üremesi de görülmez (Korkut Yıldırım vd., 2007). Balık yağının genel özellikleri Tablo 4.3'te verilmiştir (Korkut Yıldırım vd., 2007). Balık yağının parlama noktası, viskozitesi ve yoğunluğu Tablo 4.4'da verilmiştir (Yahyaee, Ghobadian, & Najafi, 2013).

Tablo 4.3. Balık yağının özellikleri (Korkut Yıldırım vd., 2007)

Parametreler	Kabul Değerleri
Nem	max 1
Peroksit	< 5 meq/kg
p-Anisidin	< 20 meq/kg
%FFA	max 15 mg/kg
İyot	min 100
Toplam Yağ Asitleri	min %85
Sabunlaşmayan Madde(mg/KOH/gr)	max 1
Tortu	max 0.5
Kırılma İndisi	1.473-1.475
PCDDs (Dioksin) & PCDFs (Furanlar)	max 2 pg
PCBs (Poliklorlubifeniller)	< 0.09 mg/kg
TOTOX (Total Oxidation)	max 26 meq/kg

Tablo 4.4. Balık yağının standart ölçüm aralıkları (Yahyaee vd., 2013)

Özellik	Standart Test Yöntemi	Balık Yağı
Parlama Noktası (°C)	ASTM D92	164
Kinematik Viskozite (mm ² /s)	ASTM D445	4.205-4.717
Yoğunluk (kg/m ³)	ASTM D1298	867-869

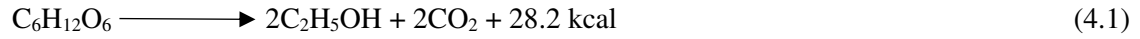
4.2. Deneyde Kullanılan Etil Alkol

Balık yağından biyodizel üretmek için etil alkol kullanılmıştır. Etil alkole ait özellikler Tablo 4.5'te verilmiştir. Kullanılan etil alkol Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Etil alkol bünyesinde bulundurduğu oktan sayısının yüksek olması sebebiyle benzin yerine kullanılmaya uygun alternatif yenilenebilir yakıt olarak görülebilir. Bunun yanı sıra dizel yakıtı nazaran küçük moleküler yapıya sahip olmasından ve bünyesinde O₂ bulundurması, dizel yakıtlarda bulunan kükürt, kanserojen maddeler ve ağır metaller barındırmaması sebebiyle emisyonlarda pozitif bir etki sağlamaktadır (Usta vd., 2004).

Etil alkol uçucu ve renksiz bir sıvıdır. Fark edilmeyen mavi, dumansız bir alev ile yanar (Vikipedi, 2021). Biyodizel üretiminde kullanılan etanol %99 saflıktadır. Temin edilen %96'lık etanol CaO kullanılarak saflık derecesi % 99.9'a yükseltilmiştir. Bu amaçla, 1.00 litre etil alkol içine 50.0 gram CaO ilave edilip, kapalı bir kaptaki 24 saat bekletildikten sonra, etil alkol CaO üzerinden alınarak, distilasyon balonuna alınıp, tekrar 20.0 gram yeni CaO eklenerek, CaO üzerinden distillendi ve ağzı kapalı kaptaki saklandı. Esterleşme işlemi için balık yağının içerisinde

%30 oranında etanol kullanılmıştır. Etanol, maya olmak üzere birtakım mikroorganizmaların şekeri fermante etmesi sonucu elde edilir. Fermantasyon sonucu meydana gelen ürünler fermantasyon ana ürünleri ve fermantasyon yan ürünleri olarak gruplandırılır. Alkol fermantasyonunda oluşan ana ürünler etanol ve karbondioksittir. Oluşan yan ürünler ise az miktarda gliserin, asetaldehit, yüksek alkoller, asit, esterler ve metil alkoldür (Özçelik, y.y.).

Endüstride alkol üretmek amacıyla pancar, şeker kamışı, mısır ve tahıl mahsulleri gibi hammaddeler kullanılır. Etil alkol fermantasyonuna ait reaksiyon Denklem 4.1’de verilmiştir (Özçelik, y.y.).



Tablo 4.5. Etil alkolün özellikleri

Etanolün Özellikleri	
Kimyasal Formülü	C ₂ H ₅ OH
Moleküler Ağırlığı	46.07 g/mol
Yoğunluk	0.789 g/cm ³
Donma Noktası	-114.3 °C
Kaynama Noktası	78.4 °C
Viskozite (20 °C)	1.200 cP
Parlama Noktası	12 °C



Şekil 4.1. Biyodizel üretiminde kullanılan etanol.

4.3. Deneyde Kullanılan Sülfürik Asit

Sülfürik asit renksiz, kokusuz bir sıvı olup, kuvvetli bir asittir. Derişik sülfürik asit, çok hidroskopik olup maddelerden su çekmek için de kullanılmaktadır. Ham balık yağından biyodizel elde etmek için kuvvetli bir asit olan sülfürik asit (H_2SO_4) katalizörü kullanılmıştır. Esterleşme işlemi için balık yağı içerisinde %3 oranında sülfürik asit kullanılmıştır.

Yapılan literatür araştırmalarında serbest yağ asidi yüksek olan yağlarda iki aşamalı transesterifikasyon işlemi uygulanmaktadır. Biyodizel üretilecek yağlar, ilk etapta asidik katalizörle tepkimeye sokulup serbest yağ asidi oranı düşürüldükten sonra, ikinci adım olarak baz katalizörlü transesterifikasyon işlemi uygulanmaktadır (Düzgün, 2015). Deneyde kullanılan sülfürik aside ait özellikler Tablo 4.6’da verilmiştir. Deneyde kullanılan sülfürik asit Şekil 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.6. Sülfürik asit özellikleri

Sülfürik Asit Özellikleri	
Kimyasal Formülü	H_2SO_4
Moleküler Ağırlığı	98.09 g/mol
Yoğunluk	1.84 g/cm ³
Donma Noktası	10 °C
Kaynama Noktası	337 °C
Buhar Basıncı (20 °C)	0.001 mmHg
Parlama Noktası	Parlayıcı Değil



Şekil 4.2. Katalizör olarak kullanılan sülfürik asit.

4.4. Serbest Yağ Asidi (FFA) Tayini

Balık yağı içerisindeki serbest yağ asidi miktarını belirlemek amacıyla titrimetik metod uygulanmıştır. Titrasyon, derişimi bilinmeyen analitin derişimini (konsantrasyonunu) belirlemek amacıyla yapılır. Bu aşamada çift kademeli titrasyon deneyi yapılmıştır. Titrasyon deneyi için katalizör olarak fenolftalein kullanılmıştır. Fenolftalein asidik ortamda renksizdir, bazik ortamda ise pembe renk alır. Yağların esterleştirilmesindeki zorluk bünyelerinde yüksek miktarda serbest yağ asidi bulundurmalarıdır. Serbest yağ asitleri ester ve gliserinin ayrılmasını engelleyerek sabunlaşmaya sebep olmaktadır. Serbest yağ asitleri değerinin %2'den yüksek olması esterleşme verimini negatif yönde etkilemektedir (Sekmen & Şen, 2016).

Fakat serbest yağ asidi değerleri %5'e kadar olan yağlarda fazladan katalizör takviyesi yapılarak esterleşebileceği ifade edilmiştir. Serbest yağ asidi oranı %5'in üzerinde olan yağlarda reaksiyonda oluşan sabun, esterlerin ve gliserinin ayrışmasını engelleyerek yıkama işlemi sırasında emülsiyon oluşumuna sebep olacağı belirtilmektedir (Van Gerpen, 2005).

Titrasyon deneyi için 0,001 gr ölçüm hassasiyetine sahip terazide 1 molar 0,4 gram sodyum hidroksit (NaOH) tartılarak, 100 ml'lik balon joje içine içerisine alınıp üzerine bir miktar saf su ilave edilip çözüldükten sonra hacmi 100 ml'ye tamamlandı.

Bu işlemin ardından hazırlanan çözelti 50 ml'lik cam büret içerisine alındı. Deney düzeneği Şekil 4.3 ve kullanılan terazi Şekil 4.4'de gösterilmektedir.



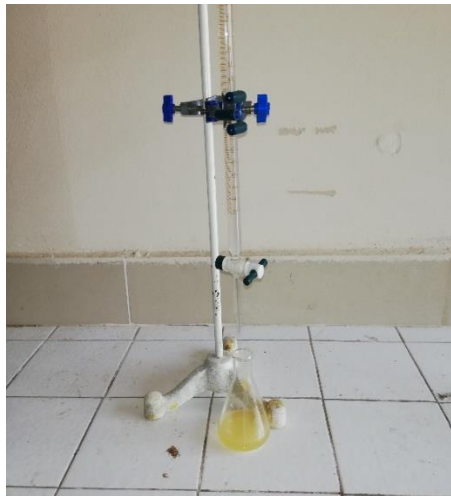
Şekil 4.3. Titrasyon deney düzeneği



Şekil 4.4. 0,001 gr ölçüm hassasiyetli terazi

4.4.1. Titrasyon Deneyinin Birinci Basamağı

Cam pipet yardımıyla 1 ml balık yağı alınarak 100 ml'lik erlene aktarıldı ve yağı çözmesi için 20 ml toluene ilave edildi. Daha sonra erlende bulunan çözünmüş yağın içerisine 3-4 damla fenolftalein damlatıldı ve karıştırıldı. Ardından büretin musluğu yavaş yavaş açılarak erlenin içerisine NaOH çözeltisi damla damla ilave edildi ve renk değişimi gözlemlendi. Erlende pembe renk gözlemlenene kadar damlatma ve karıştırma işlemi devam etti. İşlem sonunda ortam bazik hale geldi ve pembe renk gözlemlendi. Erlen içerisinde pembe rengin 15 saniye kadar kaybolmadığı noktaya dönüm noktası denir ve bu noktada işlem durduruldu. Cam büret içerisinde harcanan NaOH miktarı 1,25 ml olarak ölçüldü. Deney düzeneği Şekil 4.5 ve erlende pembe renk oluşumu Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Deney düzeneği



Şekil 4.6. Erlende pembe renk oluşumu

Deneyde hesaplama yapılan formül, Denklem 4.2’de verilmiştir. Yapılan titrasyon deneyi sonucunda balık yağı içerisinde bulunan serbest yağ asidi oranı %5 olarak hesaplanmıştır. Hesaplama aşağıda gösterildiği gibi yapılmıştır.

$$\%A.S = \frac{M_{NaOH} \cdot V_{NaOH}}{V_{yağ}} * M_{NaOH} \quad (4.2)$$

Burada;

A.S: Serbest yağ asidi oranı (%)

M_{NaOH} : NaOH molaritesi (mol/L)

V_{NaOH} : Bürette harcanan NaOH miktar (ml)

$V_{yağ}$: Kullanılan balık yağının hacmi (ml)

M_{NaOH} : Kullanılan bazın mol ağırlığı (g/mol)

4.4.2. Titrasyon Deneyinin İkinci Basamağı

Sülfürik asit katalizörü kullanılarak üretilen biyodizelden cam pipet yardımıyla 1 ml alınıp 100 ml erlen içerisine aktarıldı. Yağı daha iyi çözmesi için 20 ml toluene ve 3-4 damla fenolftalein erlen içerisine ilave edildi. Cam büretteki NaOH çözeltisi damla damla erlen içerisine damlatılarak renk değişimi olana kadar titrasyon işlemine devam edildi ve harcanan NaOH miktarı 0.40 ml olarak tespit edildi. Deney düzeneği Şekil 4.7 ve erlende pembe renk oluşumu Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Erlen içerisinde bulunan biyodizel

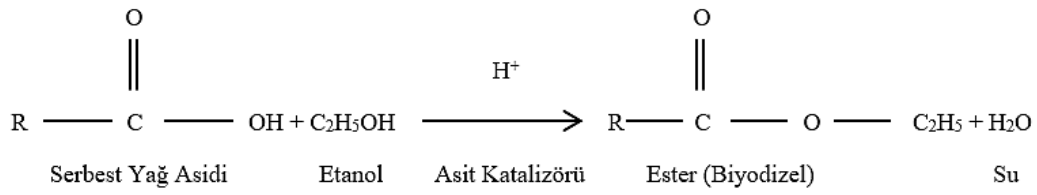


Şekil 4.8. Erlenide pembe renk oluşumu

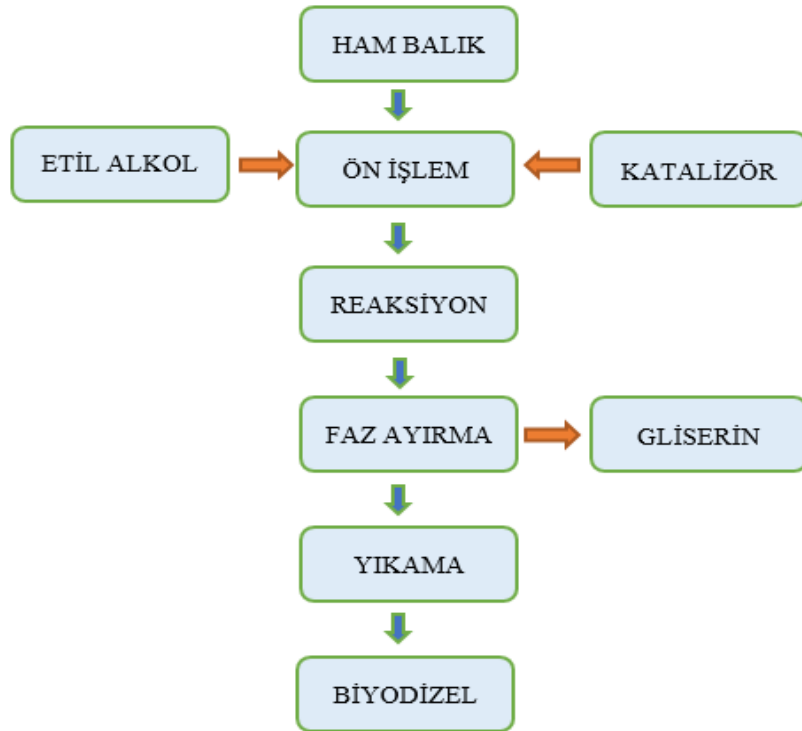
Yapılan titrasyon deneyi sonucunda üretilen etil esteri (biyodizel) içerisinde bulunan serbest yağ asidi oranı %1,6 olarak hesaplanmıştır. Titrasyon deneyinin 1. basamağındaki işlemler takip edilmiş ve hesaplamalar için Denklem 4.2 kullanılmıştır.

4.5. Etil Esteri Üretimi

Esterler karboksilik asitlerin türevleridir. Bir alkolle bir karboksilik asit arasında meydana gelen denge reaksiyonu ürünüdürler. Esterler hidrojen bağının meydana gelmesinde hidrojen bağı alıcısı olarak tepkimede yer alırlar (Anonim, 2007). Biyodizel sentezi için hamsi balık yağı kullanılmıştır. Ham balık yağına etil alkol (C_2H_5OH) katılarak sülfürik asit (H_2SO_4) katalizörlüğünde etil ester üretilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda balık yağından yeterli miktarda biyodizel üretilmiştir. Şekil 4.9’da asit katalizörlü ön iyileştirme reaksiyon denklemi görülmektedir. Biyodizel üretiminde izlenen adımlar Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.9. Esterifikasyon reaksiyonu



Şekil 4.10. Biyodizel üretim safhaları

4.6. Deney Düzeneği

Deney düzeneğine ait resim Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Bunun yanı sıra termometre, manyetik karıştırıcılı ısıtıcı, beher ve reaksiyon sonucunda meydana gelen gliserin ve katalizör artıklarını yıkayıp ayrıştırmak için ayırma hunileri ve farklı hacimlerde plastik kaplar kullanılmıştır.



Şekil 4.11. Deney düzeneği.

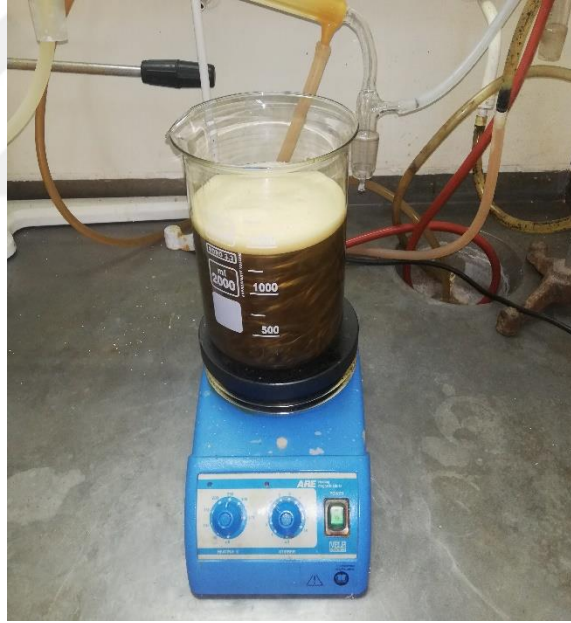
4.7. Balık Yağının Ön Hazırlığı

Biyodizel üretilecek saf haldeki balık yağının içerisinde yabancı katı partiküllerin bulunabileceği düşünülerek bez filtreler yardımıyla süzme işlemi yapılmıştır. Daha sonra balık yağının içerisindeki suyun uzaklaştırılması amacıyla yağ 115 °C’ye kadar manyetik karıştırıcılı ısıtıcıda karıştırılarak ısıtılmıştır. Balık yağının ısıtılıp suyun uzaklaştırılması ve sıcaklık ölçümü Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’te gösterilmiştir. Saf balık yağının içerisinde bulunan su, tepkimede sabunlaşmaya sebep olarak, katalizör miktarını düşürür ve transesterifikasyon reaksiyonunu olumsuz etkiler (Demirbas & Karslioglu, 2007).

Balık yağı içerisinde bulunan suyun uzaklaştırılmasının ardından yağ soğumaya bırakılarak sıcaklığının 50 °C’ ye düşmesi beklenmiştir. Reaksiyonda alkol olarak etil alkol ve katalizör olarak sülfürik asit kullanılmıştır. Bu ön hazırlık işlemlerinin ardından transesterifikasyon reaksiyonuna başlanmıştır. Reaksiyon 50 °C’de ve 24 saatlik dilimde gerçekleştirilmiştir.



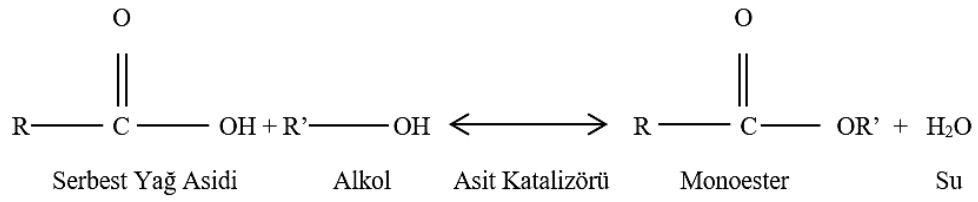
Şekil 4.12. Termometre ile sıcaklık ölçümü



Şekil 4.13. Suyun ısıtılarak uzaklaştırılması

4.8. Transesterifikasyon Reaksiyonu

Balık yağından biyodizel üretmek için transesterifikasyon yöntemi uygulanmıştır. Transeseterifikasyon yağ asitlerinin bazik ya da asidik katalizörler yardımıyla kısa zincirli alkollerle esterleşme reaksiyonudur. Reaksiyonda; 1 mol trigliserit, 3 mol alkol ile tepkimeye girerek 3 mol ester ve 1 mol gliserin oluşturur (Tütüncü, 2013). Etanol ile gerçekleştirilen reaksiyona ait denklem Şekil 4.14’te verilmiştir.



Şekil 4.14. Etil Esteri reaksiyonu

Transesterifikasyon yöntemi ile balık yağından biyodizel üretimi aşağıdaki sıralama gibidir:

1. Manyetik karıştırıcılı ısıtıcıda 1,50 litre balık yağı 115 °C' ye kadar 1 saat boyunca karıştırılıp ısıtılarak içerisindeki su uzaklaştırıldıktan sonra soğuması için beklenmeye alındı ve yağ sıcaklığı 50 °C' ye düştüğünde reaksiyona başlandı. Sabit sıcaklıkta (50 °C) karıştırılan balık yağı Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Sabit sıcaklıkta karıştırılan balık yağı

2. Sıcaklığı 50 °C'ye gelen balık yağına önce yavaş ve kontrollü bir şekilde %3'lük 40 ml sülfürik asit (H₂SO₄) ilave edilerek sabit sıcaklıkta karıştırılmaya bırakıldı. Kısa bir süre sonra kahverengi tonda olan balık yağı, koyu siyah renge büründü ve ortamda keskin acı bir koku hissedildi. Meydana gelen reaksiyon ekzotermik olduğundan sıcaklık artışı gözlemlendi. Daha sonra karışımın içerisine 400 ml etanol (%30) ilave edilerek sabit sıcaklıkta karıştırılmaya devam edildi. Sülfürik asit ve etanol katılan balık yağı Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Sabit sıcaklıkta karıştırılan karışım

3. Transesterifikasyon reaksiyonu manyetik karıştırıcılı ısıtıcıda sabit sıcaklıkta (50°C) 24 saat boyunca devam ettirildi. 24 saatin ardından soğumaya bırakılan ve karıştırılmaya devam edilen karışım Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Asit katalizörlü reaksiyonlar baz katalizörlü reaksiyonlara göre oldukça yavaş gerçekleşirler. Aynı zamanda reaksiyonda asit katalizörü tercih edildiğinde reaksiyon süresinin uzun ve alkolün buharlaşma sıcaklığının düşük olması sebebi ile alkol buharlaşacağından, reaksiyonda kullanılacak olan alkol miktarı da buna bağlı olarak artacaktır.



Şekil 4.17. Soğumaya bırakılan karışım

4. 24 saat süren reaksiyon sonunda üretilen balık yağı etil esteri soğumaya bırakıldı ve sıcaklık 20 °C olarak ölçüldü. Daha sonra elde edilen karışım bez filtrelerden geçirilerek ayrı bir kaba alındı. Bu işlemlerin ardından üretilen etil esteri içerisindeki alkol ve katalizör artıklarının temizlenmesi için suyla yıkama işlemine alındı. Yıkama işlemine alınmadan önce filtreden geçirilip ayrı bir kaba alınan karışım Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Filtreden geçirilen karışım

4.9. Karışımın Yıkaması

Üretilen balık yağı etil esteri filtrelerden geçirildikten sonra ayrı kaplara konarak yıkama işlemi için farklı hacimlerdeki ayırma hunilerine aktarıldı. Yıkama işlemi için 25 °C’lik ılık su kullanıldı. Her karışım için suyla yıkama işlemi 5 defa tekrar edildi. Burada yoğunluk farkından yararlanılarak ayırma işlemi gerçekleştirildi. Yoğunluğu daha az olan balık yağı etil esteri yüzeyde kalırken yoğunluğu yüksek olan gliserin ve su dibe doğru çöktü. Yıkama işlemine tabi tutulan ve faz ayrışması gözlenen balık yağı etil esteri Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de gösterilmektedir.



Şekil 4.19. Yıkama işlemine alınan karışım



Şekil 4.20. Gliserin ve suyun ayrışması



Şekil 4.21. Balık yağı etil esteri üç faz hali

4.10. Faz Ayrışması

Ayırma hunilerine alınan balık yağı etil esterini 25 °C'lik suyla beşer defa yıkanmıştır. Balık yağı etil esterini içerisindeki reaksiyona girmemiş atık maddeler, alkol ve katalizör artıkları, ayırma hunileri yardımıyla ortamdaki uzaklaştırılmıştır. Yıkama işlemine alınmadan önce simsiyah olan balık etil esterini rengi, yıkandıkça açıldığı gözlenmiştir. Aynı zamanda keskin acı bir kokusu olan esterini, yıkama işlemlerinden sonra oldukça azaldığı görülmüştür. Balık yağı etil esterini içerisinde faz ayrışmaları Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te gösterilmektedir. Burada ayırma hunisinin dibinde yıkama suyu ve artık maddeler bulunmaktadır. İstenmeyen bu kısım ayırma hunisindeki musluk vasıtasıyla ortamdaki uzaklaştırılmış ve biyodizel elde edilmiştir.



Şekil 4.22. Gliserinin yağ esterinden ayrılması



Şekil 4.23. Gliserin ve yabancı maddelerin çökmesi



Şekil 4.24. Yıkama suyunun görünümü

Yıkama işlemlerinin ardından elde edilen biyodizel, içerisinde istenmeyen yabancı madde olma ihtimaline karşı bez filtre ile süzülerek başka kaplara aktarılmıştır. Üretilen biyodizel Şekil 4.25'te görülmektedir. Şekillerde de görüldüğü üzere üretilen biyodizel yakıt koyu kahve renktedir. Elde edilen biyodizel yakıtı, farklı oranlarda dizel yakıtı ile karıştırılarak, dizel motorda kullanıma hazır hale getirilmiştir. Biyodizel %50 ve %75 oranlarında dizel yakıt ile karıştırılmıştır. Karışım sonucu oluşan bu yeni yakıtlar B50 ve B75 olarak adlandırılmıştır.



Şekil 4.25. Üretilen biyodizel yakıt

4.11. Yakıtların Kimyasal Özellikleri

Transesterifikasyon reaksiyonu sonucu elde edilen biyodizel, dizel motorda kullanılmak için belli oranlarda dizel yakıt ile karıştırılarak kimyasal özellikleri incelenmiştir.

Üretilen biyodizele ait yakıt özellikleri ve dizel yakıt özellikleri Tablo 4.7’de verilmiştir. Bu çalışmada elde edilen değerler literatürde yapılan diğer çalışmalardaki değerlerle benzerlik göstermiştir ve kabul edilen sınırlar dâhilindedir.

Tablo 4.7. Yakıtların özellikleri

Özellikler	D100	B50	B75	B100
Kinematik Viskozite (40°C) mm²/s	2.853	3.78	4.244	4.708
Isıl Değer kJ/kg	43220	40961	39834.5	38702
Yoğunluk	830.4	862	877.8	893.6
Parlama Noktası (°C)	62	112.5	137.75	163
Setan İndeksi	55.2	55.5	55.65	55.8

Burada;

B50: %50 Biyodizel + %50 Dizel yakıt

B75: %75 Biyodizel + %25 Dizel yakıt

B100: %100 Biyodizel yakıt

D100: %100 Dizel yakıt

4.11.1. Kinematik Viskozite

Kinematik viskozite yakıtların karakteristik özelliğini belirleyen parametrelerden biridir. Viskozitenin yüksek olması yakıtın düşük atomizasyonuna kötü yanmasına, enjektör memelerinin tıkanmasına, segman takımında karbon birikimine ve buna bağlı olarak yağlama yağının kötüleşmesine neden olmaktadır (Kinast, 2003). Yakıttaki viskozitenin yüksek olması, yanma odası içerisine püskürtülen yakıtın akışkanlığını azalttığı için pompalanabilmeyi güçleştirir. Bu durum motor gücünde azalmaya sebep olmaktadır. Viskozite sıcaklığa bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Sıcaklık arttıkça viskozite düşer. Yakıtların viskozitesi 40 °C’de D100 için 2,853 mm²/s, B50 için 3,78 mm²/s, B75 için 4,244 mm²/s ve B100 için 4,708 mm²/s olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu değer saf haldeki balık yağına kıyasla düşük çıkmıştır. Yakıtlardaki biyodizel karışım oranının artması, viskozitenin de artmasına sebep olmuştur. Bu değer belirtilen biyodizel yakıt standartları içerisinde. Hesaplama EN 14214 standartları ve EN ISO 3104 deney metodu tercih edilmiştir. Biyodizelin vizkozite değeri yüksek çıkmış ise bu transesterifikasyon reaksiyonunun başarılı sonuçlanmadığını göstermektedir (Gürkan, 2019). Uluslararası standartlarda belirlenmiş kinematik viskozite değerleri Tablo 4.8’de verilmiştir (Akyarlı vd., 2004).

Tablo 4.8. Kinematik Viskozite Standartları (Akyarlı vd., 2004)

Kinematik Viskozite Standartları		
ASTM	D 6751	1.9-6.0 mm ² /s
DIN	E 51606	3.5-5.0 mm ² /s
pr EN	14214	3.5-5.0 mm ² /s

4.11.2. Isıl Değeri

Motordaki yüksek güç miktarı, yakıtın yanma odasına verebileceği kalorik enerjiye bağlıdır. Isıl değeri yakıtın birim kütlesi/hacmi başına elde edilen enerji miktarıdır (Koç, 2011). Tablo 4.7’de görüldüğü üzere üretilen biyodizelin ısı değerleri dizel yakıtı oranla düşüktür. Isıl değer D100 için 43220 kJ/kg, B50 için 40961 kJ/kg, B75 için 39834.5 kJ/kg ve B100 için 38702 kJ/kg olarak hesaplanmıştır. Biyodizel-dizel yakıt karışımı arttıkça da ısı değeri daha da düşmüştür. Buna bağlı olarak B100 yakıtının ısı değerinde daha fazla düşüş meydana gelmiştir. Kullanılan yakıtlarda ısı değerlerinin düşmesi motor performansında da düşüşe sebep olmaktadır.

4.11.3. Yoğunluk

Yakıtın birim hacimdeki kütle miktarı olarak bilinir. Yoğunluk, yakıt yapısı, karbon-hidrojen oranı, yakıtın atomizasyonu ve tutuşma özelliği hakkında malumat verir (Şen, 2012). Üretilen biyodizel yakıtın yoğunluğu dizel yakıtı oranla daha fazladır. Biyodizel yakıt karışım oranı arttıkça da bu değer dizele göre artış göstermektedir.

Konsantrasyon, hidrokarbon zincirleri uzadıkça azalır, çift bağ miktarı yükseldikçe de artış gösterir (Nişancı, 2007). Yakıtların yoğunluğu 15 °C’de D100 için 830,4 kg/m³, B50 için 862 kg/m³, B75 için 877,8 kg/m³ ve B100 için 893,6 kg/m³ olarak hesaplanmıştır. Ölçülen yoğunluk değeri saf haldeki balık yağı yoğunluğuna göre daha yüksek çıkmıştır. Yakıtlardaki biyodizel karışım oranının artması, yoğunluğun artmasına sebep olmuştur. Yoğunluk ölçümünde EN 14214 standartları ve EN ISO 3675 deney metodu takip edilmiştir. Üretilen biyodizelin yoğunluğunun yüksek çıkması, transesterifikasyon reaksiyonu sonucunda gliserinlerin ortamdan iyice uzaklaştırılmadığını göstermektedir. Buna rağmen üretilen biyodizeldeki yüksek yoğunluk, motorda güç kaybı azalmasına neden olur (Altınsoy, 2007). Uluslararası standartlarda belirlenmiş yoğunluk değerleri Tablo 4.9’da gösterilmiştir (Akyarlı vd., 2004).

Tablo 4.9. Kabul görmüş yoğunluk değerleri (Akyarlı vd., 2004)

Yoğunluk Standartları		
ASTM	D 6751	860-900 kg/m ³
DIN	E 51606	875-900 kg/m ³
pr EN	14214	860-900 kg/m ³

4.11.4. Parlama Noktası

Sıvı buharının parlayabilir bir ortamda meydana getirdiği en düşük sıcaklık olarak tanımlanır. Biyodizelin dizel yakıtlara olan üstünlüğünden biride parlama noktasının oldukça yüksek olmasıdır. Biyodizel yakıtlardaki bu üstünlük, kolay taşınabilirlik ve güvenli depolama sağlamaktadır (Akyarlı vd., 2004). Yakıtların parlama noktası D100 için 62 °C, B50 için 112,5 °C, B75 için 137,75 °C ve B100 için 163 °C olarak ölçülmüştür. Bu değer saf haldeki balık yağına oranla düşük çıkmıştır. Bu hesaplamada EN 14214 standartları ve EN ISO 2719 deney metodu takip edilmiştir. Yakıtlardaki biyodizel karışım oranının artması parlama noktasının artmasına sebep olmuştur. Ölçümlerde Uluslararası ölçülerde kabul edilen parlama noktası değerleri Tablo 4.10'da verilmiştir (Akyarlı vd., 2004).

Tablo 4.10. Kabul görmüş parlama noktası standartları (Akyarlı vd., 2004)

Parlama Noktası Standartları		
ASTM	D 6751	≥ 130 °C
DIN	E 51606	≥ 100 °C
pr EN	14214	≥ 120 °C

4.11.5. Setan İndeksi

Dizel yakıtlarda tutuşma gecikmesinin süresini belirleyen parametredir. Setan sayısı arttıkça tutuşma gecikmesine ayrılan zaman azalır. Tutuşma gecikmesindeki kısalma ani yanma esnasında oluşan basınç artışını düşürür.

Yakıtın büyük bir kısmı kontrollü yanma sürecinde yandığından yanma odasında meydana gelen maksimum basınç düşük seyretmektedir. Setan sayısı uzun düz zincirli doymuş hidrokarbonlarda yüksektir. Dizel yakıtlarda yüksek setan sayısı motorun rahat ve sessiz çalışmasını sağlar. Ancak setan sayısının standartlardan yüksek olması halinde; tutuşma gecikmesi kısalır, yakıt yanma odasında homojen dağılmaz ve dumanlı bir yanma gerçekleşir (Ejder, 2007).

Tablo 4.11'de uluslararası ölçülerde setan indeksi değerleri belirtilmiştir (Akyarlı vd., 2004). Yakıtların setan indeksi D100 için 55,2, B50 için 55,5, B75 için 55,65 ve B100 için 55,8 olarak ölçülmüştür. Bu ölçümde EN 14214 standartları ve EN ISO 5165 deney metodu tercih edilmiştir.

Tablo 4.11. Kabul görmüş setan indeksi standartları (Akyarlı vd., 2004)

Setan İndeksi Standartları		
ASTM	D 6751	< 47.0
DIN	E 51606	< 49.0
pr EN	14214	< 51.0

Üretilen biyodizel yakıtların dizel motor üzerinde test edilmesi için Cussons P8160 model, elektrikli dinamometre mekanizmasına sahip motor test düzeneği kullanılmıştır. Motor test düzeneği Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2. Cussons P8160 model test tezgâhı

5.2. Kullanılan Dizel Motor

Motor deneyleri için ANTOR 6LD 400 marka tek silindirli dizel motor kullanılmıştır. Test motorunun özellikleri Tablo 5.1’de verilmiştir (Tekdoğan, 2020). Kullanılan motor Şekil 5.3’te gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Dizel motorun teknik özellikleri (Tekdoğan, 2020)

Marka / Model	Antor 6LD 400
Motor Tipi	Dizel – Tek Silindirli
Silindir Hacmi	395.0 cc
Güç	8.5 HP
Ağırlık	45 kg
Çalışma Şekli	Marşlı
Tork	2 kg-M@2200 d/d
Strok Sayısı	4
Püskürme Şekli	Direk Püskürtmeli
Silindir Çapı	86 mm
Püskürtme Basıncı	200 kg/cm ²
Soğutma Şekli	Hava Soğutmalı
Verim Kapasitesi	Yüksek
Sıkıştırma Oranı	18/1
Karter Yağ	1.2 lt
Kapasitesi	
Yağ Tüketimi	11.5 gr/h



Şekil 5.3. Kullanılan dizel motor

5.3. Kullanılan Emisyon Cihazı

Egzoz emisyon ve is değerlerini ölçmek için BOSCH marka egzoz gazı analizörü kullanılmıştır. Cihaz HC ve NO_x verilerini ppm cinsinden CO, CO₂, O₂ ve is verilerini % cinsinden ölçmektedir. Emisyon analizörü HC, NO_x, CO, CO₂, O₂ ve is değerlerini anlık ölçebilmektedir. Kullanılan emisyon analizörü Şekil 5.4'te ve cihaza ait özellikler Tablo 5.2'de verilmiştir (Tekdoğan, 2020).



Şekil 5.4. BOSCH marka emisyon analizörü

Tablo 5.2. Emisyon cihazı özellikleri (Tekdoğan, 2020)

Parametreler	Ölçüm Aralıkları	Hassasiyet
CO	0-10 %	0.001%
HC	0-9.999 ppm	1 ppm
CO ₂	0-18%	0.01%
NO _x	0-5000 ppm	≤ 1 ppm
O ₂	0-21.7%	0.01%

5.4. Testlerde Kullanılan Yakıtlar

Dizel motorda kullanılmak üzere dizel yakıtla (D100) birlikte dört ayrı yakıt çeşidi kullanılmıştır. Önceden belirlenen oranlarda dizel-biyodizel yakıtlar karıştırılmış ve B50, B75, B100 olarak adlandırılmıştır. Hazırlanan yakıtlar motor çalışma rejim sıcaklığına geldikten sonra test edilmiştir. Deneylerde kullanılan yakıtlar Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da gösterilmektedir.

Burada;

D100: %100 Dizel yakıt

B50: %50 Biyodizel + %50 Dizel yakıt

B75: %75 Biyodizel + %25 Dizel yakıt

B100: %100 Biyodizel yakıt



Şekil 5.5. Deneylerde kullanılan yakıtlar

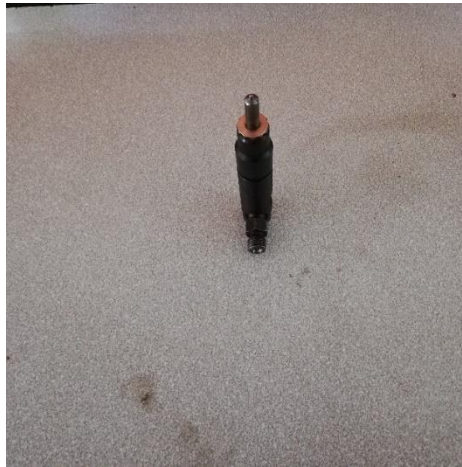


Şekil 5.6. Deneylerde kullanılan yakıtlar (biyodizel)

5.5. Dizel Motorun Sökülüp Temizlenmesi

Testlerde kullanılan biyodizel yakıtların, motor elemanları üzerindeki etkileri inceleneceği için motor sökölüp temizlendi. Motor üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmadan tekrar toplandı.

Burada piston segman takımı, enjektör memesi ve silindir üst kapağı ile birlikte supaplar temizlendi ve testlerden sonra bu elemanlar üzerinde oluşan kurumlar ve deformasyon izleri incelendi. Sökölüp temizlenen motor parçaları, Şekil 5.7’de yakıt püskürtme enjektörü, Şekil 5.8’de egzoz ve emme supapları Şekil 5.9’da pistonun üstten görünümü ve Şekil 5.10’da piston segman takımları verilmiştir.



Şekil 5.7. Yakıt püskürtme enjektörü



Şekil 5.8. Egsoz ve emme subapları



Şekil 5.9. Pistonun üstten görünümü



Şekil 5.10. Pistonun üzerindeki segmanlar

Şekillerde görüldüğü üzere testlerde incelenecek motor elemanları tel fırça ve zımpara kullanılarak kurum ve yabancı maddeler temizlenmiş, contaları değiştirilmiş ve yağlanarak motora tekrar monte edilmiştir. Motor testleri bittikten sonra bu parçalar tekrar sökülüp kullanılan yakıtların bu elemanlar üzerinde meydana getirdiği kurum ve deformasyon izleri incelenmiştir. Sökülen parçaların her birinin resmi çekilip gerekli incelemeler yapıldıktan sonra motor üzerindeki yerlerine geri takılmıştır.

5.6. Yakıt Miktarı Ölçümü

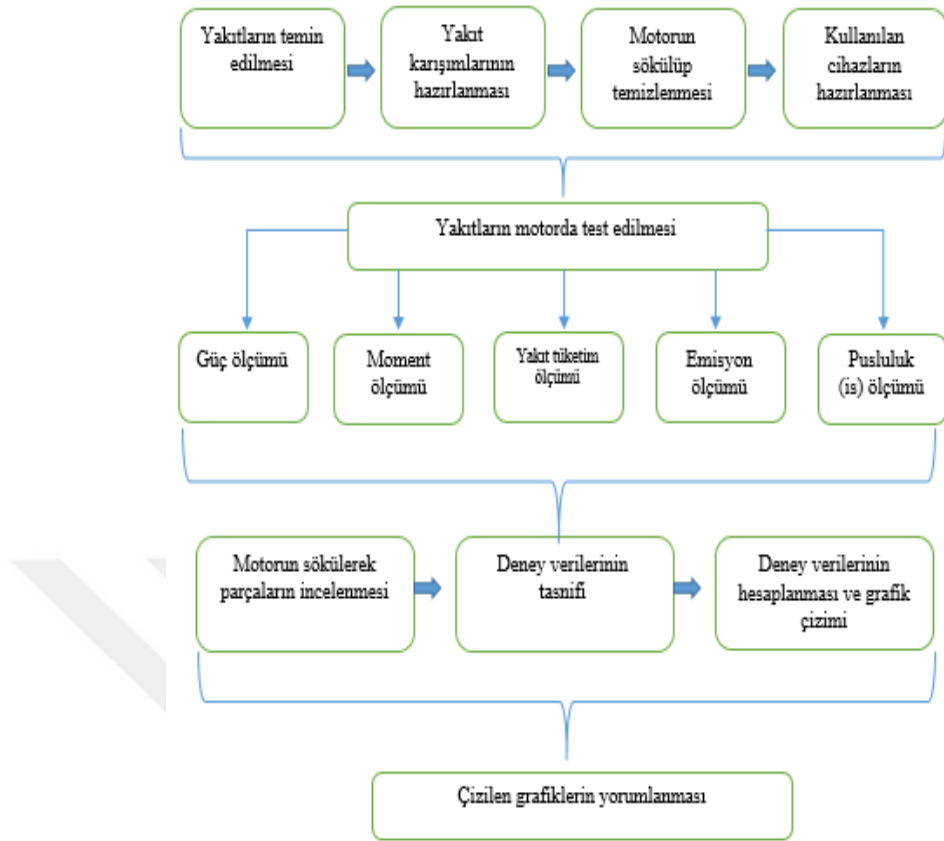
Deneylerde yakıt sarfiyatını ölçmek için kronometre kullanılarak dereceli kapta hacimsel olarak 10 ml yakıtın ne kadar sürede tüketildiği ölçülmüştür. Ölçümler %50 ve %100 yük durumu için beş farklı devirde ayrı ayrı yapılmıştır. Ölçülen bu değerler kayıt altına alınıp, özgül yakıt tüketimini hesaplamada kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen veriler, grafikler oluşturularak yorumlanmıştır.

5.7. Yakıtların Motorda Test Edilmesi

Deneylere başlanmadan önce motorda dizel yakıt kullanılarak motorun çalışma rejim sıcaklığına ulaşması sağlanmıştır. Deneylere motor kararlı hale geldikten sonra %50 yük durumunda motorun ile 1600 d/d'de başlanmış ve sırasıyla 1900 d/d, 2200 d/d, 2500 d/d, 2800 d/d olmak üzere beş farklı devir aralığında test edilmiştir. Aynı şekilde dizel yakıtla beş farklı devirde %100 yük durumunda testler devam etmiştir. Testler devam ederken her devir ve yükte motorun performans, emisyon, is ve yakıt tüketim ölçümleri yapılmıştır. Motor yapılan her testten sonra beklenmeye alınarak dinlenmesi sağlanmıştır.

Daha sonra B50 yakıtı sırasıyla %50 yük durumu ve %100 yük durumunda 1600 d/d, 1900 d/d, 2200 d/d, 2500 d/d, 2800 d/d aralığında test edilerek, motor performansı (motor gücü ve motor moment), yakıt tüketimi hesaplanmış egzoz emisyon ve is ölçümleri yapılmıştır. Yine bu ölçümler her devir ve yükte ayrı ayrı yapılmıştır.

Aynı şekilde bu işlemler B75 ve B100 yakıtları için %50-%100 yük durumlarında 1600 d/d, 1900 d/d, 2200 d/d, 2500 d/d ve 2800 d/d devir aralıklarında ayrı ayrı yapılmıştır. Yine test edilen B75 ve B100 yakıtlar için motor performansı, yakıt tüketimi hesaplanmış, anlık olarak emisyon ve is ölçümleri yapılmıştır. Hesaplanan veriler ve elde edilen ölçümler performans ve emisyon grafikleri oluşturmada kullanılmış ve yorumlanmıştır. Deney yapım aşamaları Şekil 5.11'de gösterilmiştir. Motorda ölçüm yapılan değerler ve hesaplama yapılan formüller Tablo 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.11. Deney akış şeması

Tablo 5.3. Ölçüm yapılan değerler ve formülleri

Hesaplanan Değerler	Hesaplanan Değerlerin Formülleri	Ölçülen Değerler
Moment	$M_d = m \cdot L \cdot (Nm)$	CO ₂
Efektif Güç	$P_e = M_d \cdot n / 9549.3 \text{ (kW)}$	CO
Özgül Yakıt Tüketimi	$b_e = 3600 \cdot \Delta v \cdot \rho_y / P_e \cdot \Delta t \text{ (g/kWh)}$	HC
		NO _x
		İs

Tabloda;

M_d : Moment (Nm)

m : Kuvvet (N)

L : Kuvvet kolu uzunluğu (m)

P_e : Güç (kW)

n : Devir (d/devir)

b_e : Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)

ρ_y : Kullanılan yakıt yoğunluğu (kg/m³)

Δt : Yakıtın tüketilme süresi (s)

Δv : Yakıt tüketimi hacmi (ml)

6. BULGULAR VE SONUÇLAR

6.1. Motor Elemanlarının İncelenmesi

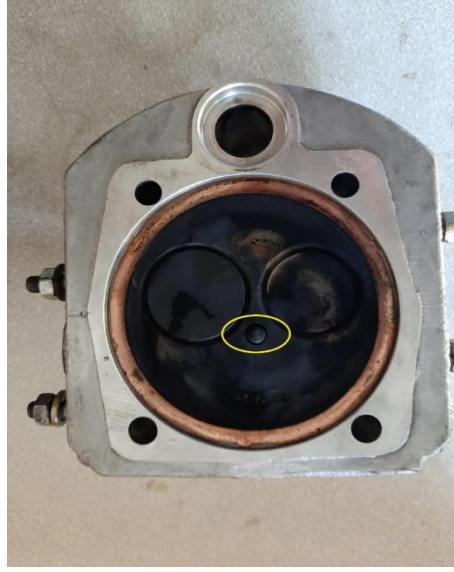
Yakıtların motor üzerinde test edilip sonuçlar alındıktan sonra motor tezgâhta sökülerek piston, segman, supaplar ve enjektör memesi üzerindeki kurumlara bakılarak parçaların herhangi bir deformasyona maruz kalıp kalmadığı incelendi. Parçalarda meydana gelen kurum (is) izleri Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Pistonun üstten görünümü



Şekil 6.2. Segmanların görünümü



Şekil 6.3. Subaplar ve enjektör memesi görünümü

50 saat süren deneylerden sonra yapılan gözlemler ve ölçümler sonucu incelenen motor elemanları üzerinde herhangi bir deformeye rastlanmadı. Ancak deneylerin uzun sürmesi ve yanmanın bazı yük ve devir aralıklarında kötüleşmesinden dolayı piston yüzeyinde, subaplarda ve enjektör memesi (sarı alan) üzerinde fazla kurum oluşumu gözlemlendi. Ancak enjektör memesi üzerinde oluşan kurumun yakıt püskürtmesine engel olabilecek seviyede olmadığı görülmüştür. Segman takımlarında da herhangi bir kurum ya da değişim izine rastlanmadı. Sonuç olarak 50 saatlik kullanımın ardından incelenen motor elemanları üzerinde herhangi bir kırılma, çatlama ya da çizilme izine rastlanılmadı.

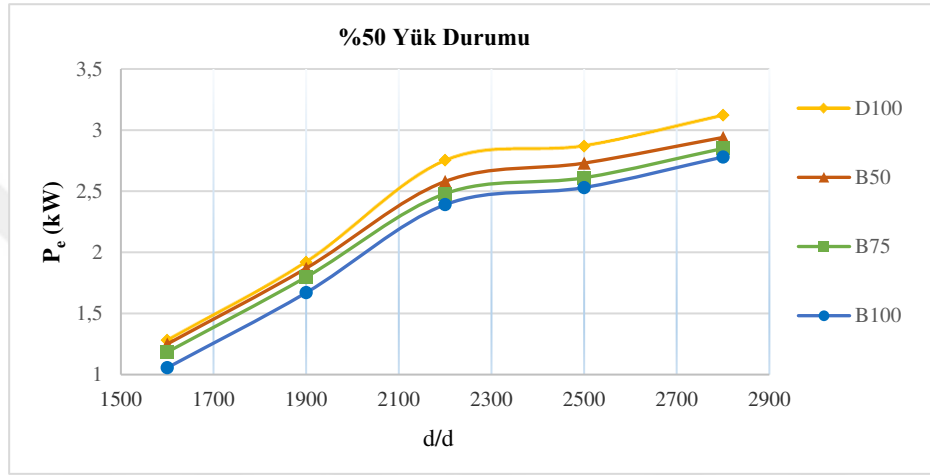
6.2. Motor Performanslarının Değerlendirilmesi

Motor performansı olarak, tam ve yarım yük durumlarında, farklı devirlerde (1600-2800 d/d) 300 d/d aralıklarla motor gücü, motor momenti ve özgül yakıt tüketimi ölçülmüştür. Bu değerlendirmelerden elde edilen ölçümler hesaplanarak grafikler halinde sunulmuş ve yorumlanmıştır.

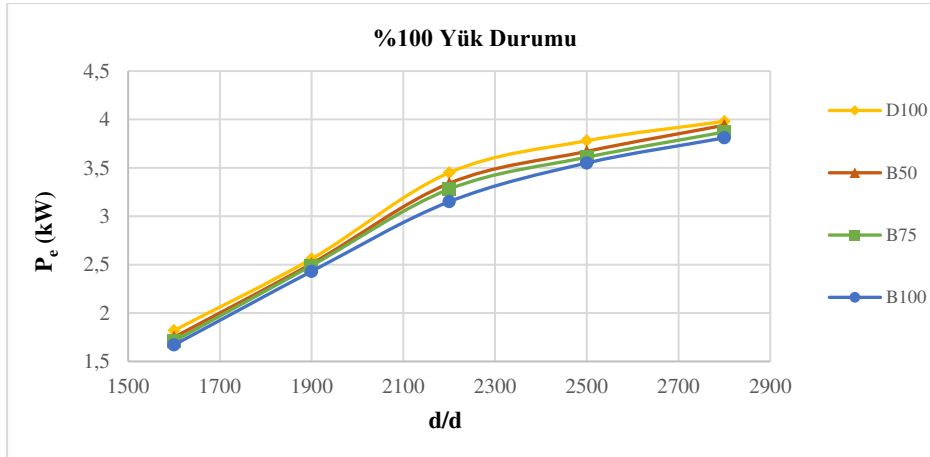
6.2.1. Motor Efektif Gücünün (P_e) İncelenmesi

Dizel motorun gücü, o motorun birim zamanda tükettiği hava ve yakıt debileri ile motorun yakıttaki kimyasal enerjiyi işe dönüştürme verimiyle orantılıdır. Dizel motorlarda güç artışı yakıt tüketimiyle orantılı olarak artar. Motor gücü maksimum noktasına kadar artmaktadır. Motorun devrine bağlı olarak, giriş havasının akış ve kütle dirençleri artmaktadır. Bu artışa bağlı olarak sürtünme kayıplarının da motor hızıyla birlikte artması ve doğru oranda hava-yakıt karışımı elde

edilememesi momentin azalmasına ve güç artışının da yavaşlamasına neden olur. Efektif motor gücü, etkin güçtür ve motorun iş yapabilme kabiliyetini gösterir. Motorda güç eğrisi, devir sayısının artmasıyla birlikte, kritik bir noktaya ulaştıktan sonra orda maksimum değerine ulaşır ve ardından düşmeye başlar. Bunun sebebi ise motor hızı arttıkça sürtünme kayıplarının minimuma inmesi ve silindir içerisine alınan yakıt dolgusunun azalmasıdır. İçten yanmalı motorların büyük çoğunluğunda güç karakteristik eğrileri benzerlik göstermektedir. Yarım ve tam yük durumlarında farklı devirlerde ölçülen güç karakteristik eğrileri Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'te verilmiştir.



Şekil 6.4. Yarım yük durumunda motor efektif güç (P_e) grafiği



Şekil 6.5. Tam yük durumunda motor efektif güç (P_e) grafiği

Motor yarım ve tam yükteyken grafikler incelendiğinde güç eğrilerinde artış olduğu görülmektedir. Motor gücü, 2200 d/d'ye kadar hızlı bir artış göstermiş ardından bu artış hızı yavaşlamıştır. Maksimum güç değerleri 2800 d/d'de elde edildi. Motor gücü, artan motor devrine bağlı olarak artmaktadır. Ancak biyodizel yakıtlar dizele yakıta göre daha düşük güç artışı

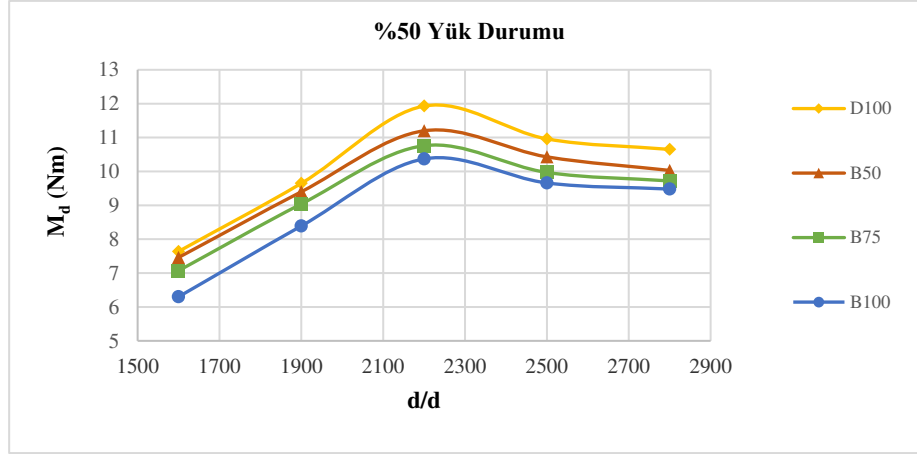
sağlamıştır, her iki grafikte de en düşük güç oranları B100 yakıtında elde edilmiştir, bunu sırasıyla B75 ve B50 yakıtları takip etmektedir. Fakat biyodizel yakıtların ısı değerlerinin dizele göre düşük olmasına rağmen, güç değerlerinin birbirine çok yakın seyretmesi, biyodizelin yoğunluğunun dizelden yüksek olmasından kaynaklanmaktadır (Behçet & Çakmak, 2011b). Motor gücü, motor devrinin bir fonksiyonu olmasından dolayı devir sayısı arttıkça kullanılan tüm yakıtlarla birlikte güç artmaktadır. Dizel yakıtların ısı değerleri yüksek olduğundan dolayı tam ve yarım yük durumlarında bütün devirlerde güç oranı biyodizele kıyasla yüksek çıkmıştır. Silindire gönderilen yakıt, yakıt pompası tarafından hacimsel olarak ölçülerek gönderilmektedir. Bundan dolayı yüksek yoğunluktaki yakıt kütleli olarak yanma odasına daha fazla gönderildiği için motor gücü artmaktadır (Altun, 2009). Dizel yakıt içerisinde biyodizel oranının %20'den fazla olması, alt ısı değerini düşürdüğünden biyodizel yakıtların güç değerleri, dizele göre düşük çıkmıştır.

Yoğunluğu ve viskozitesi yüksek biyodizel enjektörden yanma odasına püskürtüldüğünde yeterince iyi atomize olmadığından daha iri zerrelere halinde yanmaya katılır. Bu durum ise yakıtın buharlaşma ve yanma sürelerini arttırarak daha çok genişleme periyodunda olmasına, dolayısıyla motor momenti ve gücünün dizel yakıtı göre düşük değerde seyretmesine neden olmaktadır (Altun, 2004).

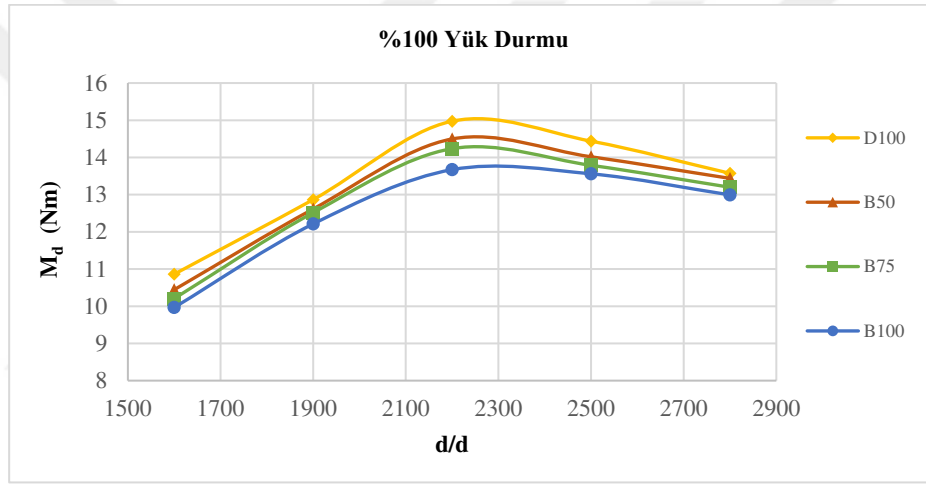
6.2.2. Motor Moment (M_d) Eğrileri

İçten yanmalı motorlarda, motor momentini belirleyen en önemli faktör efektif basınçtır. Motorda efektif basıncın maksimum olduğu devirlerde, motor momenti de maksimum değerlere çıkar. Ancak bu devirlerin altına ya da üstüne çıkıldığında moment düşer. Yanma odasındaki yakıt içeriği, karışım oranı ve hava türbülansı alevin yayılma hızını etkiler. Bu anlamda motor hızı arttıkça, hava hareketleri de artacağından yanma iyileşir ve yüksek devirlere çıkıldıkça motor momenti de artar. Motor yük altındayken devir sayısı arttıkça her çevrimde silindir içerisine alınan yakıt miktarı ve piston hızı artar. Bundan dolayı genişleme zamanında yanma daha uzun süreceğinden efektif basınç düşer. Belirli bir devire çıkıldığında momentin maksimum değere ulaşır sonra düşmesi bu durum ile açıklanabilir. Düşük hızlardan yüksek hızlara çıkıldıkça moment, motor gücüne bağlı olarak artar. Momentin artmasında ki bir diğer sebep ise artan hıza bağlı olarak hava-yakıt karışımının iyileşmesi ve kurs başına gaz kaçakları ile ısı kaybının azalması olarak gösterilebilir. Motor gücünde olduğu gibi maksimum torkun elde edildiği devir sayısında silindire maksimum karışım kütlesi enjekte edilir. Yine motora alınan havanın akış ve kütle dirençleri artan hız nedeniyle artmaktadır, buna paralel olarak sürtünme kayıpları da artmaktadır.

Bu sebeplerden, doğru karışım oranı elde edilemediği için moment düşmeye başlar ve aynı zamanda güç artış hızı da yavaşlar. Yarım ve tam yük durumlarında motor momentine ait grafikler Şekil 6.6 ve Şekil 6.7'de verilmiştir.



Şekil 6.6. Yarım yük durumunda motor momenti (M_d)



Şekil 6.7. Tam yük durumunda motor momenti (M_d)

Motor karakteristiklerinde bilindiği gibi genelde atmosferik motorlarda, momentin maksimum olduğu devir orta devirdir. Yarım ve tam yük durumlarında motor momenti incelendiğinde maksimum efektif basıncın elde edildiği orta devirde yani 2200 d/d'de maksimum torka ulaşılmış ardından artan devir ve motor hızıyla birlikte motor momenti düşmüştür. En yüksek tork D100 yakıtında elde edilirken, bunu sırasıyla B50, B75 ve B100 yakıtları takip etmektedir. Grafiklerden de anlaşılabacağı üzere dizel yakıttaki biyodizel ilavesi arttıkça motor momentinde düşüş olmuştur. Bunun sebebi motor gücünde de olduğu gibi biyodizel yakıtların enerji değerinin dizel yakıttan düşük olmasıdır.

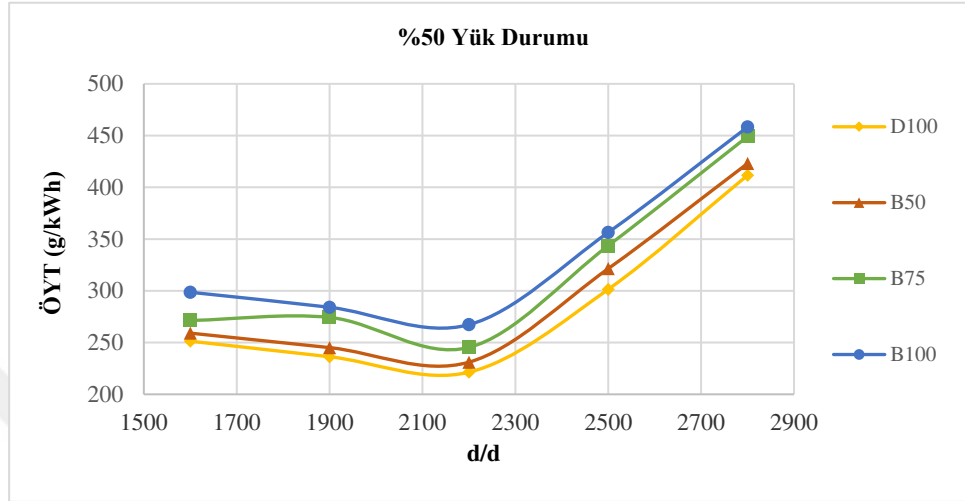
Yarım yük altında motor momenti dizel yakıtta maksimum 12 Nm iken, tam yük altında bu değer 15 Nm olarak ölçülmüştür. Motora uygulanan yüklerle birlikte motor gücü artmış ve paralelinde motor momenti de artış göstermiştir. Motor yükünün artması demek silindir içerisine daha fazla hava-yakıt karışımı alınması demek, buda doğal olarak güç artışına ve buna bağlı olarak tork artışına neden olmaktadır. B100, B75 ve B50 yakıtlarının moment değerlerinin artmasının, ancak

dizele göre düşük çıkmasının bir diğer sebebi, biyodizel yakıtların yüksek viskoziteye bağlı olarak yanma odasına daha fazla yakıt gönderilmekte ve motorda güç artışı sağlamaktadır. Sağlanan güç artışıyla birlikte motorda moment değerleri de artış göstermektedir. Maksimum motor momentinin elde edildiği 2200 d/d'den sonra artan devirle birlikte tüm yakıtlar için moment düşmüştür. Bunun nedeni olarak silindire giren karışım miktarının azalması, motorda hacimsel verimin düşmesi ve artan sürtünme kayıpları gösterilebilir (Çoban, 2021). Biyodizel yakıtların dizel yakıtı göre moment değerlerinin düşük olmasının başka bir nedeni; biyodizel, dizele kıyasla daha düşük ısı değere sahip olduğu için, silindir içerisine eşit miktar yakıtın gönderilmesi durumunda, dizel yakıttan daha az enerji vermektedir ve bu durum biyodizelin düşük moment eğrilerini açıklamaktadır (İçingür & Koçak, 2006). Elde edilen sonuçlar literatürde yapılan diğer çalışmalar ile benzerlik göstermektedir. Artan motor hızı ile emme zamanı kısılacığından, hacimsel verimde azalır. Hacimsel verimin azalması, motorda yanma şartlarını kötüleşmesine neden olacağından, efektif basıncın düşmesine sebep olur. Motorda moment oluşumunun efektif basınca bağlı olduğu bilinmektedir. Motor momenti, motor gücüne kıyasla, artan devir ve buna bağlı artan mekanik kayıplar ve azalan hacimsel verim gibi değişkenlerden daha kısa zamanda olumsuz etkilenmiştir. Düşük devirlerde dizel kullanımında düşük moment değerlerinin elde edilmesi; motor tasarımı yapılırken, yakıt özellikleri göz önünde bulundurularak motorun en çok çalışma devir aralığı dikkate alınır. Dizel yakıtın yoğunluk, parlama noktası ve setan sayısı gibi özellikler yakıtın atomizasyonu, reaksiyonlar ve verimli yanma için çok önemlidir. Yanma odası tasarımı, enjeksiyon sistemi verilen bu özelliklere göre dizayn edilir. Motorun en çok çalıştığı devir aralığı, dizele göre tasarlandığı için bu devrin dışına çıkıldığında, belirlenen ideal şartlardan uzaklaşır. Bütün bu durumlar düşük ve yüksek motor hızlarında, düşük moment oluşumu sebepleri olarak görülmektedir.

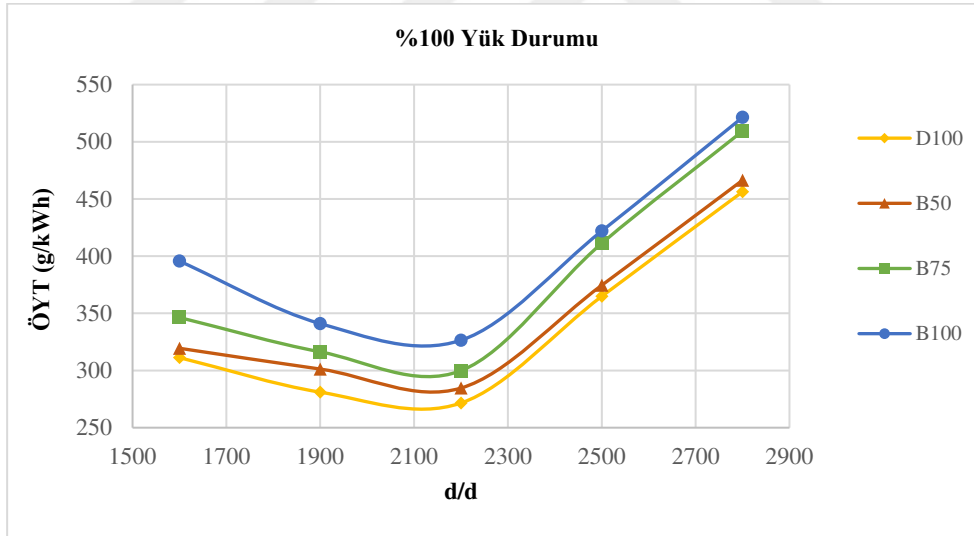
6.2.3. Özgöl Yakıt Tüketimi (ÖYT)

Özgöl yakıt tüketimi; birim güç başına kütle olarak tüketilen yakıt miktarıdır. Dizel motorlarda özgöl yakıt tüketimi; yakıtın yoğunluğuna, viskozitesine, alt ısı değeri ve hacimsel yakıt enjeksiyon sistemine bağlı olarak değişir. Fakat genelde alt ısı değeri düşük olan yakıtlarda özgöl yakıt tüketimi artar (Usta vd., 2004). Aynı zamanda yüksek yoğunluktaki yakıtın ÖYT'yi arttırdığı görülmüştür. ÖYT motor gücüne ve motor yüküne bağlı olarak değişmektedir. Her çevrimde ve motor devrinde yanma odasına alınan yakıtın hacimsel miktarı aynı olmasına karşın, yakıtların farklı yoğunlukta olması, alınan yakıt miktarını etkiler. Özgöl yakıt tüketimi, motor hızının artmasıyla önce belirli bir minimum noktaya kadar düşer daha sonra artan devir sayısı ile birlikte artışa geçer. Motor ilk çalışma esnasında sürtünmeler fazla olduğundan ÖYT fazladır, motor devri arttırılınca sürtünmelerde azalacağından ÖYT belirli bir noktaya kadar azalır.

Azalmanın olduğu minimum noktadan sonra, yükte birlikte motor devrinin de artmasıyla daha fazla yakıt kullanılacağından ÖYT artar. Yarım ve tam yük durumlarında özgül yakıt tüketimi Şekil 6.8 ve Şekil 6.9’da verilmiştir.



Şekil 6.8. Yarım yük durumunda özgül yakıt tüketimi (g/kWh)



Şekil 6.9. Tam yük durumunda özgül yakıt tüketimi (g/kWh)

Özgül yakıt tüketimine ait grafikler incelendiğinde, her iki grafikte de ÖYT'nin artan motor devriyle önce belirli bir minimum noktaya kadar azaldığı ardından tekrar yükseldiği görülmektedir. Tam ve yarım yük durumlarında bütün yakıtlarda 2200 d/d'ye kadar ÖYT azalmış daha sonra artan yük ve motor hızıyla birlikte artmıştır. Motor ilk çalıştırıldığı sırada yani 1600 d/d'de ÖYT fazladır, mekanik sürtünmeler fazla olduğundan yakıt tüketimi de buna bağlı olarak yüksektir. Ancak yüklü durumda motor devri arttırılınca sürtünmeler azalacağından ÖYT en ideal çalışma devri olan 2200

d/d'ye kadar azalır, bu noktadan sonra devir artışı devam ettiğinden daha fazla yakıt kullanılacağından ÖYT artar. Her iki grafikte de en düşük özgül yakıt tüketimi D100 yakıtında görülürken, bunu sırasıyla B50, B75 ve en fazla tüketim de B100 yakıtında görülmüştür. Bunun iki temel sebebinden ilki biyodizel yakıtların alt ısı değerlerinin dizele göre düşük olması, ikincisi ise biyodizel yakıtların yoğunluk ve viskozitelerinin dizele kıyasla yüksek olmasıdır. Biyodizel yakıtların dizel yakıt ile aynı devirde çalışabilmesi için düşük ısı değer ve yüksek yoğunluk nedeniyle aynı hacimde daha fazla kütleye (ağırlığa) sahip yakıt tükettiği düşünülmektedir. Yüksek hızlarda sürtünme, ısı kayıpları ve yanmanın kötüleşmesi özgül yakıt tüketimini arttırıcı sebepler olarak görülmüştür. Biyodizel yakıtların, dizel yakıtla harmanlama oranı arttıkça ÖYT miktarı da artmıştır, çünkü elde edilen yakıtın ısı değeri düşük, yoğunluğu yüksektir. 2200 d/d'de yarım yükte maksimum ÖYT miktarı B100 yakıtı için minimum 267 g/kWh iken tam yükte minimum B100 yakıtı için 326 g/kWh olarak ölçülmüştür.

Aynı şekilde özgül yakıt tüketimi yarım yükte 2200 d/d'de B50 için minimum 231 g/kWh iken B75 yakıtı için minimum 245 g/kWh olarak ölçülmüştür. Tam yük 2200 devirde ise ÖYT B50 için 284 g/kWh ve B75 için 299 g/kWh olarak ölçülmüştür.

Değerlerden de anlaşılacağı üzere yük artışına paralel olarak özgül yakıt tüketimi de artmıştır. En düşük özgül yakıt tüketim değerleri motor maksimum tork hızındayken elde edilmiştir. En düşük ÖYT değerleri dizel yakıt kullanımında elde edilmiştir. Buna göre dizel yakıt için 2200 devirde yarım yükte ÖYT 221 g/kWh ve tam yükte 271 g/kWh olarak ölçülmüştür. Bu değerler göz önüne alındığından tüm yük ve devir şartlarında biyodizel yakıtların özgül yakıt tüketimi dizel yakıttan fazladır. Bunun sebebi yukarıda da açıklandığı üzere, yanma odasına hacimsel olarak aynı miktarda yakıt gönderilmesine rağmen yoğunluk farkından dolayı biyodizel yakıtın kütlesi daha fazladır ve ısı kapasitesi düşüktür. Düşük ısı değere sahip olan yakıt karışımlarının, dizel yakıt ile eşit güç üretebilmeleri için daha fazla yakıt tüketmesi beklenen bir sonuçtur. Buna bağlı olarak B50, B75 ve B100 yakıtlarının dizele göre daha düşük enerji içeriğine sahip olduğu düşünülmektedir. Özgül yakıt tüketimindeki artışların başka bir nedeni şöyle açıklanabilir. Azalan enjeksiyon basıncı ile yakıt partikül çapları artar ve buna bağlı olarak yanma sırasında tutuşma gecikme süreside artacağından özgül yakıt tüketimi de artar. Dolayısıyla azalan enjeksiyon basıncı ile hava-yakıt karışımının homojen karıştırma olanakları azalacağından ÖYT artar (Sayin, Necati, & Canakci, 2010).

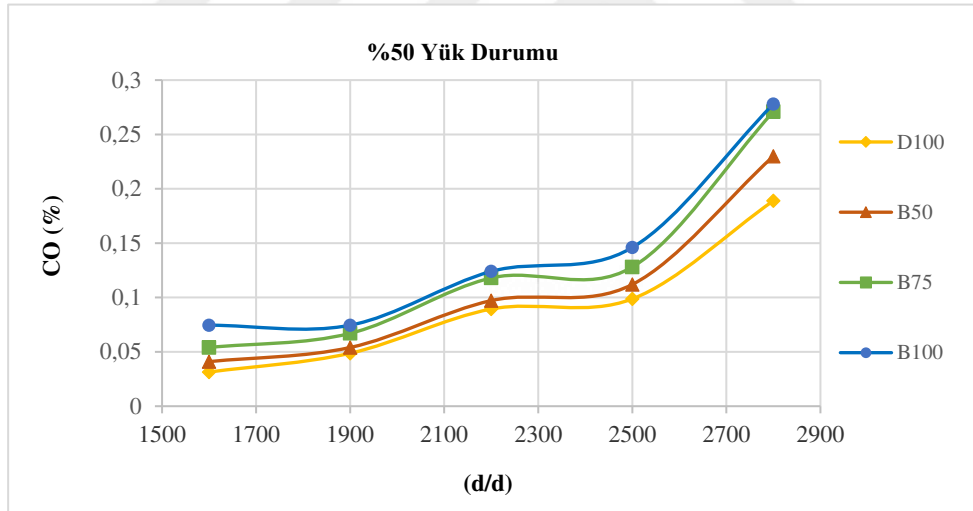
6.3. Emisyon ve Isı Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

Deneylerde emisyon ölçümleri olarak CO, CO₂, NO_x, HC ve pusluluk (is) ölçümü yapıldı. CO, CO₂ ve is değerleri %, HC ve NO_x değerleri ise ppm cinsinden ölçülmüştür. Alınan ölçümlerin ortalama değerleri hesaplanarak grafik haline getirilmiş ve yorumlanmıştır.

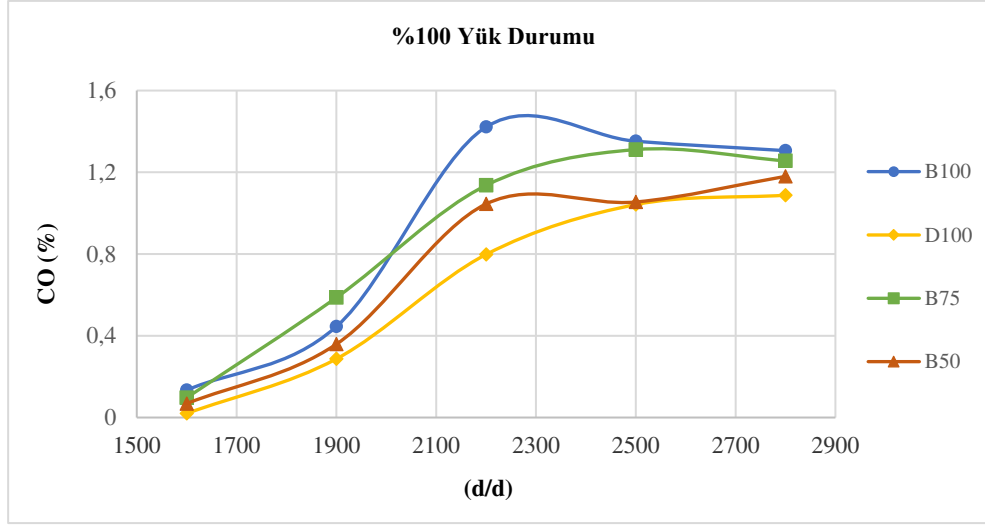
6.3.1. Karbonmonoksit (CO) Emisyonları

Yanma odası içerisine alınan havada oksijen miktarının yetersiz olması, tam yanmanın gerçekleşmemesine neden olur ve bunun sonucunda CO gazları oluşur. Silindir içerisinde ÜÖN'den sonra CO miktarı maksimum değerine ulaşır. CO'nun bir kısmı iş (genişleme) strokunda su buharı ile indirgenmektedir. Teorikte, hava-yakıt karışımlarından daha fakir karışımlarda CO emisyonu bulunmamalıdır. Fakat bu karışımlarda aşağıda belirtilen durumlardan dolayı CO emisyonu oluşmaktadır. Yarım ve tam yükte CO emisyonlarına ait grafikler Şekil 6.10 ve Şekil 6.11'de verilmiştir.

- Hava fazlalık katsayısının 1 civarında olması durumunda CO oluşması, genelde CO₂'nin termal parçalanması yoluyla meydana gelir. Denklem 6.1'de bu tepkime verilmiştir.
- Silindir cidarlarında sıcaklık az olduğundan dolayı alev bu bölgelere ulaşamaz, dolayısıyla yanma buralarda tam olarak gerçekleşmez.



Şekil 6.10. Yarım yük durumunda CO (%) emisyonları.



Şekil 6.11. Tam yük durumunda CO (%) emisyonları.

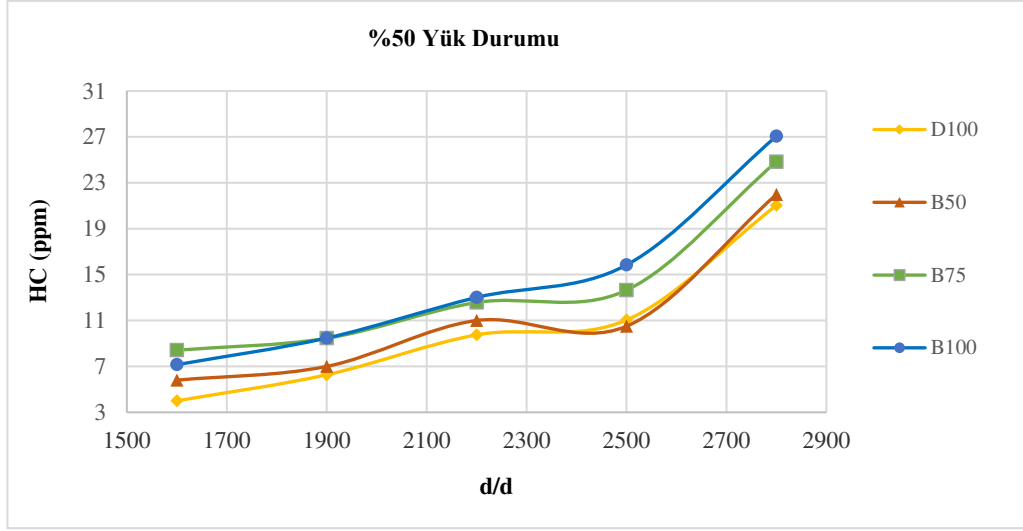
Şekil 6.10’ da motor yarım (%50) yükte çalıştırılırken kullanılan bütün yakıtlarda, CO emisyonlarında devir sayısına paralel olarak artış gözlenmiştir. CO gazlarının oluşumunun asıl sebebi içeriye alınan havanın (O_2) yanma için yetersiz olmasıdır. Buna bağlı olarak motor yükü arttıkça hava/yakıt oranı azalmakta ve oluşan CO emisyonu da artmaktadır. Motorda kullanılan biyodizel yakıtların dizel ile harmanlama oranı arttıkça CO emisyonları da artmıştır. Bu durum biyodizel yakıtlarda oksijen miktarının fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Grafik incelendiğinde 1900 d/d’den sonra CO emisyonları artış göstermiş ve 2500 d/d’den sonra CO emisyonlarında ani bir artış görülmektedir. B100 ve B75 yakıtlarında birbirine paralel bir artma olurken, B50 ve D100 yakıtlarında ise bu artış biraz daha yavaş ilerlemiştir. Biyodizel karışımları dizele göre düşük devirlerde daha fazla CO emisyonu vermektedir. Düşük devirlerde biyodizel karışımlarında viskozitenin yüksek olması, silindir içerisine püskürtülen yakıtın türbülansın azlığından ve buna bağlı olarak yakıtın atomizasyonunu ve buharlaşmasını zorlaştırmaktadır, buda zengin yanmaya sebep olmakta ve yanma kötüleştiğinden yüksek CO emisyonuna neden olmaktadır. Yüksek devirlere çıkıldıkça motor hızı artar ve yanma kötüleşir, buna bağlı olarak CO emisyonları da artar. 2500 d/d’den sonra CO emisyonlarında meydana gelen ani artışın sebebi olarak, yüksek devirlere çıkıldıkça içeriye alınan yakıt miktarının artması, oksijen ve yanma için gerekli olan sürenin azalması gösterilebilir. CO emisyonlarının oluşumunu etkileyen en önemli faktör hava/yakıt oranıdır.

Şekil 6.11’de motor tam yük (%100) durumundayken biyodizel ve dizel yakıtların CO emisyonları, artan devir sayısı ile paralel olarak artmaktadır. Biyodizel yakıtlarda, dizel yakıtı kıyasla 2500 d/d’ye kadar CO emisyonlarında daha hızlı ve yüksek bir artış söz konusudur. Bu devirden sonra emisyon değerleri birbirine yakın seyretilmiş ve B50 yakıtı hariç diğer yakıtlarda düşüş eğilimi gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, biyodizel yakıtın yapısındaki oksijenin tam yük

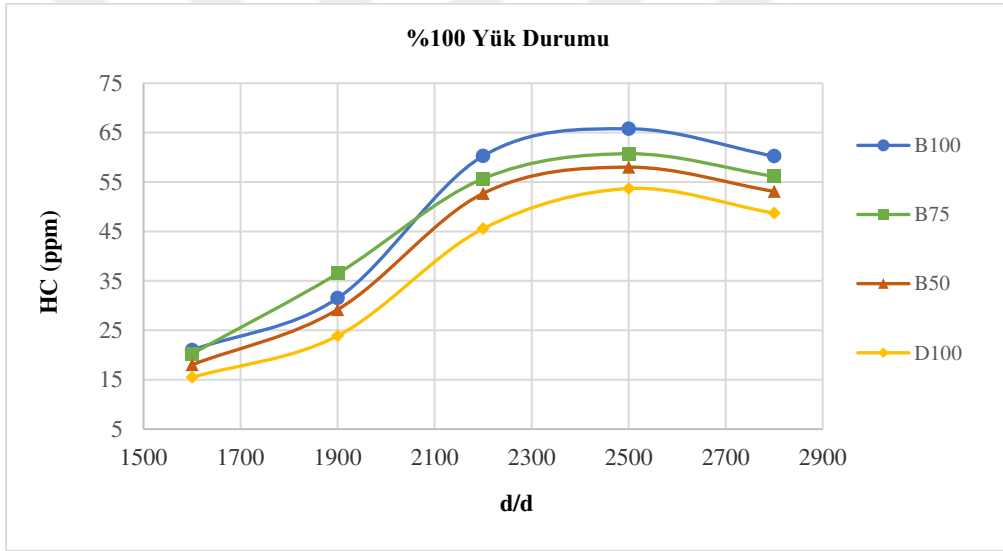
durumunda, hava/yakıt oranını arttırarak, yakıtın zengin olduğu bölgelerde, yanmanın iyileşmesini sağlayarak CO emisyonlarında azaltıcı bir etki meydana getirmesidir. Motor tam yükteyken hava/yakıt oranı azaldığından yani içeriye devir sayısının artmasıyla daha fazla yakıt püskürtülür ve yanma odasına alınan oksijen miktarı da yetersiz kalınca zengin karışım meydana gelir, bu da yanmanın kötüleşmesine ve CO emisyonlarının artmasına sebep olur. Aynı zamanda artan yük ve devire bağlı olarak silindir içerisinde yüksek sıcaklık oluşumu sebebiyle CO₂ ayrışmasının reaksiyonu sonucu CO emisyonları artış gösterir. Tam ve yarım yük durumlarında, düşük devirlerde, karbonmonoksit emisyonlarının yüksek olması, hacimsel verimin yüksek olmasına rağmen, yanma odası sıcaklığının düşük olması ve tutuşmanın silindir cidarlarına yakın bölgelerde meydana gelmemesi sonucu, eksik yanma olarak gösterilebilir. CO emisyonu birçok farklı sebepten kaynaklanabilir. Bunlar; zayıf atomizasyon, düşük setan sayısı, uzun tutuşma gecikmesi ve zayıf karışım oluşumudur. Biyodizele dizel ilavesi yanma hızını azaltır ve CO emisyonunu arttırır. Karışımdaki dizel miktarının artması, motor performansını düşürür ve CO emisyonunu arttırır (Varuvel vd., 2012).

6.3.2. Hidrokarbon Emisyonları (HC)

Egzoz gazlarının içerisinde HC'lerin bulunmasının sebebi, yakıtın tutuşma sıcaklığına gelmemesi ya da silindir içerisinde yeterli oksijenin bulunmamasından dolayı yakıtın tam okside olmaması ya da yarı okside olmasından kaynaklanmaktadır. HC emisyonları, motorun ilk hareket esnasında ve yüksek devirlerde yüksek oranlarda seyredir. İlk çalışma esnasında motorun soğuk olması yanma verimini düşürür aynı zamanda yüksek devirlere çıkıldıkça yanmaya ayrılan süre kısalmış ve volümetrik verim düşer, bütün bunlar HC emisyonlarının artmasına sebep olmaktadır. HC emisyonlarını birçok parametre olumlu ya da olumsuz etkilemektedir. Yanma odası tasarımı, hava/yakıt oranı, yakıt bileşenleri, supap bindirmeleri, silindir içerisindeki yağ ve kalıntılar, boşluk hacimleri, motor tasarımı ve egzoz supabından meydana gelen kaçaklar gibi birçok etken HC emisyonlarını etkilemektedir (Sekmen & Şen, 2016). HC emisyonları, emisyon cihazından ppm cinsinden ölçülmüştür. Yarım ve tam yükte HC emisyonlarına ait grafikler Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'te verilmiştir.



Şekil 6.12. Yarım yük durumunda HC (ppm) emisyonları.



Şekil 6.13. Tam yük durumunda HC (ppm) emisyonları.

Şekil 6.12’de yarım yük durumundaki HC emisyonlarına ait grafik incelendiğinde emisyonların belirli oranlarda artan devir sayısı ile birlikte arttığı görülmektedir. 1600-2200 d/d aralığında emisyonlarda az miktarda artış olmuş, 2200-2500 d/d aralığında emisyon oranlarında bir düşüş meydana gelmiş, sonrasında artan devir sayısı ile birlikte emisyonlar artmıştır. Düşük devirlerde HC emisyonlarındaki artış, motor ilk çalıştırıldığı sırada motorun soğuk olması ve buna bağlı olarak tutuşma sıcaklığının ve yanma veriminin düşük olması, aynı zamanda düşük motor hızlarında yanmamış HC emisyonunun artması, bu devirlerde özgül yakıt tüketiminin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Yüksek devirlerde, motor hızı arttıkça yanmaya ayrılan sürenin yetersiz olması, hava/yakıt oranının fakirleşmesine bağlı olarak yanmanın kötüleşmesi ya da eksik

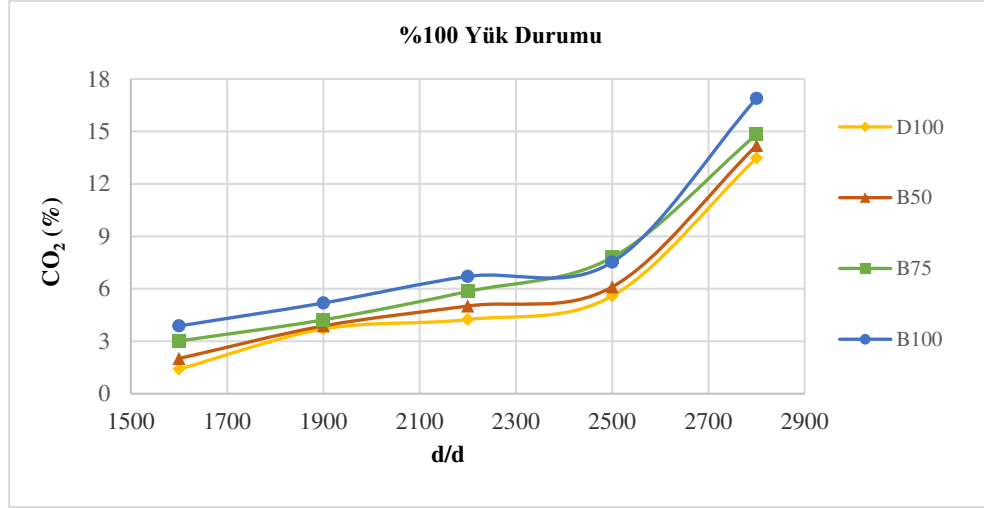
yanma meydana gelmesi gibi durumlardan dolayı yanmamış HC'ler emisyonun artmasına sebep olur. Motor gücü arttıkça HC emisyonlarının da buna paralel olarak arttığı gözlemlenmiştir. B100 yakıtının HC emisyonunun, D100 yakıtına nazaran yüksek çıkmasının sebebi B100 yakıtının yoğunluğunun D100'e göre yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Yüksek yoğunluktaki yakıtlar karışımı zenginleştirmekte ve bu sebeple HC emisyonları artmaktadır.

2300-2500 d/d aralıklarında HC emisyonlarındaki kısmi azalmanın sebebi devir sayısının artmasıyla birlikte silindir içi tutuşma sıcaklığın artması ve yanmanın iyileşmesi gösterilebilir.

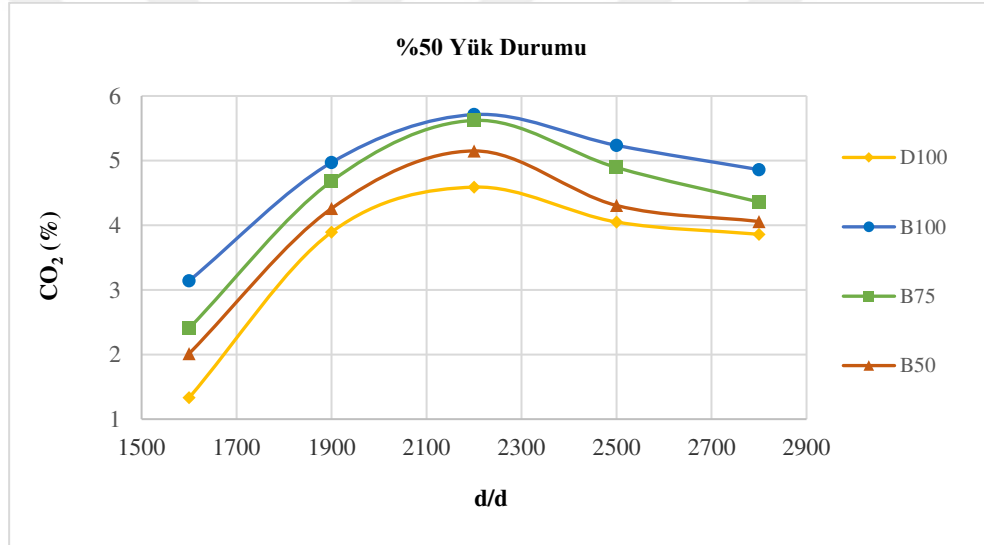
Şekil 6.13'te tam yük altında farklı devir aralıklarında HC emisyonlarının 2500 d/d'ye kadar artış gösterdiği, 2500 d/d'den sonra düşme eğiliminde olduğu görülmektedir. Düşük motor hızlarında silindir içi tutuşma sıcaklığının düşük olmasına bağlı olarak HC emisyonlarında artış olmuştur. Motor yükünün artmasıyla birlikte motor gücünde artmış ve bundan dolayı HC emisyonları artmıştır. HC emisyonları CO emisyonlarıyla paralellik gösterir. Motor tam yük durumundayken hava/yakıt oranı azaldığından içeriye alınan O₂ miktarı da azalır ve eksik yanma meydana geldiği için yanmamış HC egzozdan dışarı atılır. 2500 d/d 'den sonra HC emisyonlarının azalma eğiliminde olmasının sebebi, bu devir aralıklarında silindir içi tutuşma sıcaklığının artması, biyodizel yakıt içeriğinde bulunan oksijenin zengin hava/yakıt karışımı bölgelerinde kısmi oksidasyonlarını tamamlaması ve böylece yanmanın iyileşmesi gösterilebilir. Dizel motorlarda HC oluşumunun birçok nedeni vardır. Her püskürtmeden sonra enjektörün iğne tarafından kapatılamayan uç hacminde kalan yakıt, genişleme zamanının sonlarına doğru genişleyerek, silindir içerisine girer ve O₂ eksikliğinde yanarak CO ve HC emisyonlarına neden olur. Yine segman boşluklarında, silindir kenarlarında biriken yakıt ve yağ, cidara çarpan yakıt parçacıkları, tutuşma zorlaştıkça fakir karışımlar, HC emisyonlarının esas sebeplerini meydana getirmektedir (Behçet vd., 2012).

6.3.3. Karbondioksit Emisyonları (CO₂)

Egzoz gazları içerisinde CO₂ bulunması tam yanmanın gerçekleştiği anlamına gelir ve emisyonlar açısından önemli bir kriterdir. CO₂ emisyonu sera gazı oluşumunda önemli bir parametredir. Ancak CO₂'nin atmosferdeki fotosentez çevrimine katıldığını destekleyen birçok araştırmacı bulunmaktadır (Gökalp, 2009). Bünyesinde hidrokarbon içeren yakıtların yanmasıyla açığa çıkan bir gaz olan CO₂ genelde yakıt içerisinde bulunan C atomu oranına ve yakıtın yanma verimine bağlıdır. Karbondioksit emisyonlarına (%) cinsinden ölçülmüştür. Yarım ve tam yük durumlarında karbondioksit emisyonlarına ait grafikler Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'te verilmiştir.



Şekil 6.14. Yarım yük durumunda CO₂ (%) emisyonları



Şekil 6.15. Tam yük durumunda CO₂ (%) emisyonları

Şekil 6.14'te yarım yük durumunda bütün CO₂ emisyonlarında artış görülmektedir. 2200 d/d'ye kadar artan emisyonlar bu devirde maksimum değerine ulaşmış ve devir sayısı arttıkça düşüşe geçmiştir. Bütün biyodizel yakıtlardaki CO₂ emisyonları dizele kıyasla yüksek seviyelerde seyretmiştir. Motor devrinin artması silindir içi basınç ve sıcaklığı arttırdığından yanma iyileşmiş ve tam yanma ürünü olan CO₂ emisyonları artmıştır. CO₂ emisyonlarının artması yanmanın tamamlandığını ve hidrokarbonların CO₂'ye dönüştüğünü gösterir.

Bu da bize 2200 d/d'de tam yanma olduğunu gösterir. Grafik incelendiğinde en iyi yanmanın maksimum tork devri olan 2200 d/d'de olduğu görülmektedir. 2200 d/d'den sonra CO₂ emisyonlarında düşüş meydana gelmiştir. Bunun sebebi olarak, yetersiz O₂ kaynağı nedeniyle yanmanın kötüleşmesi ve yanmaya ayrılan sürenin kısılması gösterilebilir. Ayrıca artan devirle

birlikte, yanma hızı artar buna bağlı olarak oksijen ve karbon atomlarının reaksiyon süreleri kısalmır ve buda CO₂ emisyonlarının azalmasının sebebi olarak gösterilebilir.

Şekil 6.15'te tam yük durumunda artan devir sayısı ile birlikte bütün yakıtlarda CO₂ emisyonlarının arttığı görülmektedir. Fakat yaklaşık 2200-2500 d/d aralıklarında emisyonlarda hafif bir düşüş olmuştur. Bunun sebebi olarak bu devir aralığında O₂ yetersizliğinden yanmanın kötüleştiği düşünülmektedir. 2500 d/d'den sonra emisyonlarda ani bir artış söz konusudur. Motor yükünün artmasıyla birlikte CO₂'de artar.

Silindir içi sıcaklığın yüksek olması, artan motor yüklerinde içeriye alınan daha fazla yakıt sebebiyle oksidasyon reaksiyonlarının iyileşmesini sağlar. Yanmanın iyileşmesi ve tam yanma için yeterli O₂ bulunması CO₂ oranını artırır. Biyodizel yakıtların setan sayısının dizel yakıttan fazla olması, tutuşma gecikmesini kısaltarak, yanma odasında yakıtça zengin bölge oluşumunu önler, bundan dolayı hidrokarbonlar CO₂'ye daha yüksek oranda dönüştüğünden CO₂ emisyonunda artar. Grafikler incelendiğinde biyodizel yakıtların CO₂ emisyonları dizelden fazla çıkmıştır. Bunun sebebi olarak biyodizelin içeriğinde bulunan yüksek oksijen miktarından dolayı hava fazlalık katsayısının dizelden yüksek olması gösterilebilir. B100 ve B75'in CO₂ emisyonları birbirine çok yakın seyretmiştir yine D100 ve B50'nin CO₂ emisyonları da birbirine paralel gitmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere dizel yakıtı biyodizel ilave oranı arttıkça emisyonlarda artmıştır. Biyodizel içeriğinde bulunan yüksek O₂ miktarı daha iyi karışım oranına katkıda bulunmuş ve yakıtın oksidasyonunu arttırmıştır.

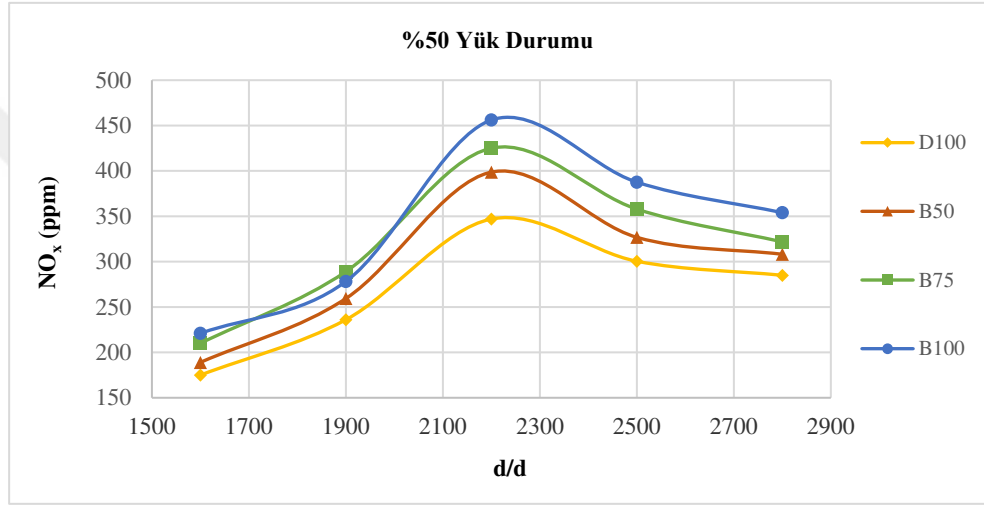
6.3.4. Azot Oksit (NO_x) Emisyonları

Azot oksitler yani NO_x'ler içeriğinde NO ve NO₂ barındırır. Yanma odasında yakıt-hava karışımının yanması esnasında havadaki azotun oksidasyonu neticesinde meydana gelir. NO_x emisyonları genelde, yüksek yanma sıcaklıkları neticesinde oluşur. NO_x'lerin oluşumunda hava/yakıt oranı, yanma süresi ve ortam sıcaklığı belirleyici faktörlerdir. Yanma sıcaklığı 1800 °K'nin üzerine çıktığında NO_x oluşumu büyük oranda artış gösterir (Cumali & Aydın, 2011). NO_x 'ler genelde azot oksitlerden (NO₂) oluşur. Oluşum reaksiyonu Denklem 6.2, Denklem 6.3 ve Denklem 6.4'te verilmiştir (Gökalp, 2009).

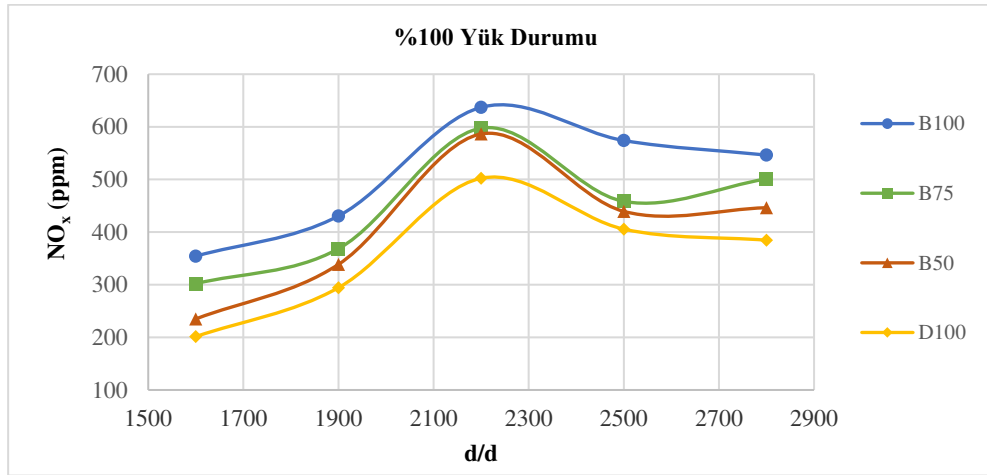


Azotun oksijenle reaksiyonu sonucu NO' lar oluşur ancak bunun için yüksek sıcaklık ve yüksek oksijen yoğunluğuna ihtiyaç vardır. Emisyonlardaki NO_x gazlarının azaltmak için yanma

odasındaki sıcaklığın 1800 °K'ye ulaşmasını engellemek, yüksek sıcaklıklara ulaşılan süreyi kısaltmak gerekir ve O₂ oranını düşürmek gerekir. Bununla birlikte maksimum alev sıcaklığını düşürmek için EGR'de tercih edilebilir. NO_x emisyonları yakıtın viskozitesi, setan sayısı, püskürtme ve yanma basıncı ve yanma sıcaklığına bağlı olarak değişir. En yüksek NO_x emisyonu, yanma veriminin en yüksek olduğu fazla hava oranına sahip egzoz gazında görülmektedir (Jamrozik, 2017). Emisyon eğrileri yapılan bazı çalışmalarla farklılık gösterse de, benzer çalışmalarda mevcuttur. NO_x emisyonları ppm cinsinden ölçülmüştür. Yarım ve tam yük durumlarında azot oksit emisyonlarına ait grafikler Şekil 6.16 ve Şekil 6.17'de verilmiştir.



Şekil 6.16. Yarım yük durumunda NO_x (ppm) emisyonları



Şekil 6.17. Tam yük durumunda NO_x (ppm) emisyonları

Şekil 6.16'da yarım yükte NO_x değerlerinin 2200 d/d'ye kadar sürekli arttığı görülmektedir. B100 yakıtı ve diğer tüm yakıtlar bu devirde maksimum değerlerine ulaşmıştır. En az artış D100'de

görülürken bunu sırasıyla B50 ve B75 yakıtları takip etmektedir. Buradan da anlaşılabileceği üzere en iyi yanma maksimum tork yani 2200 d/d aralığında olmuştur. NO_x emisyonlarının bu aralıkta artması maksimum silindir içi sıcaklığına ulaşıldığını göstermektedir.

NO_x emisyonları maksimum tork devri olan 2200 d/d'de sırasıyla B100 için 456 ppm, B75 için 425 ppm, B50 için 398 ppm ve D100 için 347 ppm olarak ölçülmüştür. 2200 d/d'ye kadar artan NO_x emisyonlarının, bu devirlerde silindir içi sıcaklığın yükselmesine bağlı olarak yanmanın iyi olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca biyodizel içeriğindeki oksijen miktarı da NO_x salınımını arttırmıştır. Yine yüksek devirlere çıkıldıkça yanma verimindeki düşüş nedeniyle emisyonlar artmıştır. Motor devrinin artmasıyla NO_x salınımı azalmıştır. Bunun muhtemel nedeni olarak, yüksek motor devirlerinde, silindir içerisindeki hacimsel verimlilik ve gaz akış hareketlerindeki artışa bağlı olarak hava-yakıt karışımının hızlanmasına ve daha kısa tutuşma gecikmesine yol açtığı ve emisyonları azalttığı düşünülmektedir. Biyodizel yakıtların alt ısı değeri dizele oranla düşüktür. Buna bağlı olarak emisyonlarda 2200 d/d'den sonra görülen azalmanın, yanma basıncının ve tutuşma gecikmesinin düşmesine bağlı olarak, düşük sıcaklığa sebep olmuş ve NO_x salınımı düşürmüş olabilir.

Şekil 6.17'de tam yük durumundaki NO_x emisyonları incelendiğinde yarım yük durumuna göre, daha fazla bir artışın olduğu ve yine maksimum artmanın 2200 d/d'de olduğu görülmektedir. Bu devirde NO_x emisyonları sırasıyla B100 için 637 ppm, B75 için 597 ppm, B50 için 586 ppm ve D100 için 502 ppm olarak ölçülmüştür. D100 yakıtının emisyon değerlerinin biyodizel yakıtlara oranla düşük çıkmasının muhtemel nedeni olarak, dizel yakıtın setan sayısı, biyodizel yakıtlardan küçük olduğu için, tutuşma gecikmesi ve yanma süresi setan sayısına bağlı olarak uzamıştır ve buda D100 yakıtının biyodizellere göre daha düşük NO_x salınımı yapmasını sağlamıştır. Çünkü setan sayısı ne kadar küçük olursa tutuşma gecikmesi ve yanma süresi o derece artar. Fakat bazı araştırmacılar NO_x emisyonlarının tutuşma gecikmesine duyarsız olduğunu savunurken, bazı araştırmacılar ise tutuşma gecikmesinin artan NO_x emisyonunun bir nedeni olabileceğini belirtmişlerdir (Altun, Bulut, & Öner, 2008). Devir sayısındaki artış emisyon artışına neden olmuştur. Ayrıca motor yükünün artması da NO_x emisyonlarını arttırmıştır. Bunun sebebi, yük arttıkça silindir içi sıcaklık artar ve içeriye püskürtülen yakıt miktarı da artacağından zengin bir karışım oluşur. Buna bağlı olarak biyodizel içeriğindeki O₂ atomu termal olarak NO_x üretmek için kullanılabileceğinden, bu yüksek sıcaklıktaki zengin yakıt çekirdeğinin NO_x emisyonlarını etkilediği düşünülmektedir. Bu iki etken, özellikle yüksek yüklerde biyodizel için NO_x yoğunluğunun artmasına neden olmaktadır. Grafik incelendiğinde NO_x oranını yaklaşık 2200-2600 d/d aralığında azalma gösterdiği, ardından tekrar artma eğilimine geçtiği görülmektedir. NO_x emisyonlarındaki bu azalmanın muhtemel sebebi karışımın daha küçük kalorifik değerinden kaynaklanmaktadır. Buda, silindir içinde daha düşük sıcaklıklara ve egzoz emisyonlarında düşük NO_x gazlarına neden olur. 2500 d/d'den sonra B75 ve B50 yakıtlarında NO_x yoğunluğu artma

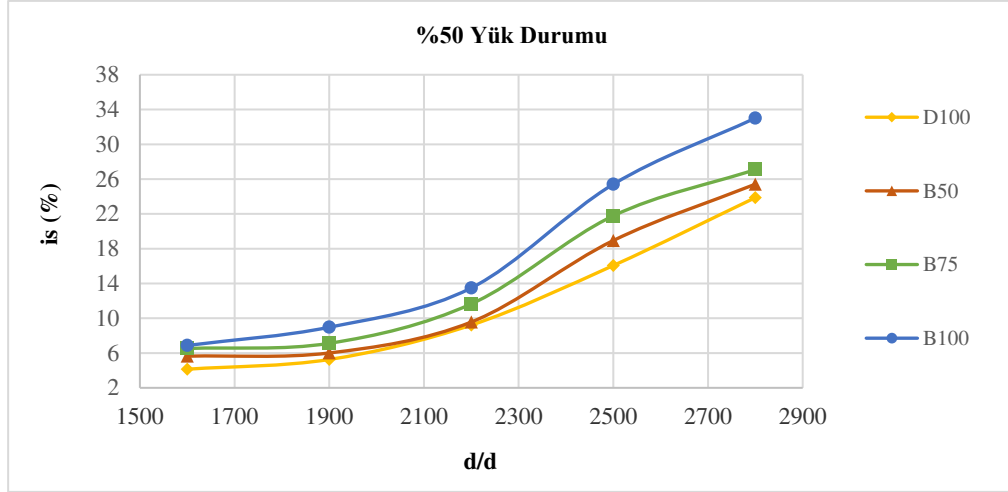
eğilimindedir. Yüksek yüklerde içeriye fazla yakıt aktarıldığından zengin karışım neticesi olarak emisyonlarda artış olduğu düşünülmüştür. Ancak B100 ve D100 yakıtları azalma eğilimindedir. Bu devirlerde artan silindir gaz basıncına rağmen, artan yük ve devir ile birlikte ortamda O_2 miktarının yetersiz olması sonucu azalma gösterdiği düşünülmektedir.

Dizel motorlarda, yanma başlamadan hemen önce silindir içerisine yakıt püskürtüldüğü için, yakıt-hava karışımı enjeksiyon zamanında homojen halde değildir. Bu nedenle enjeksiyon süresi boyunca birçok egzoz emisyonu oluşur. Buda düşük devirlerde emisyonların artmasına neden olur. Her iki grafik incelendiğinde bütün yakıtlar için motorun orta devirlerde, yani ideal çalışma bölgesinde maksimum sıcaklık ve yanma süresinin yeterli olduğu koşullar altında yüksek NO_x emisyonları meydana gelmiştir. Ayrıca belirli çalışma şartlarında ve motor hızlarında, dizel yakıtına göre daha çok biyodizel yakılması, daha fazla enerjinin açığa çıkmasına ve silindir içi sıcaklığın artmasına yol açar ve buda NO_x salınımını artırır (Aktaş & Sekmen, 2008).

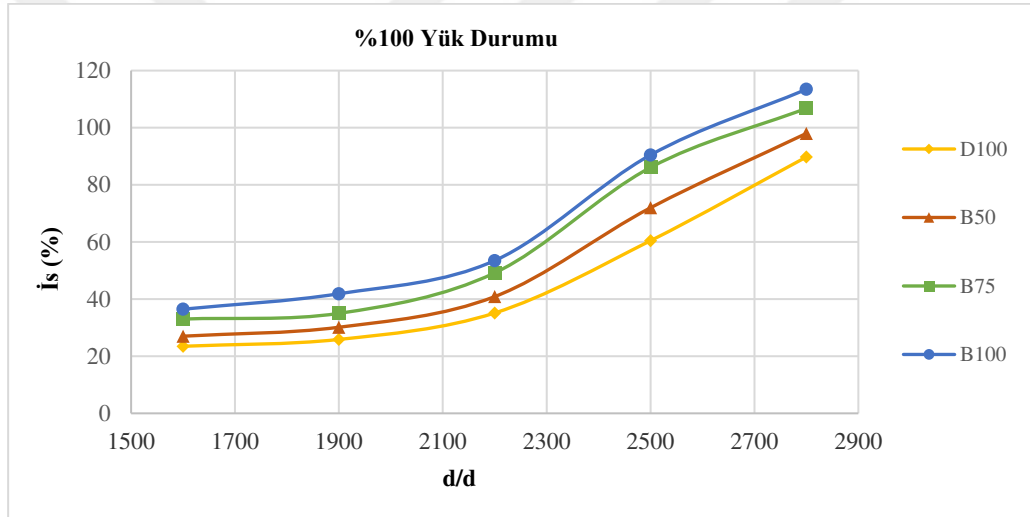
6.3.5. Duman (İs) Emisyonları

Dizel motorlarda, silindirde yanma sırasında O_2 'nin yetersiz olması ve sıvı fazda bulunan hidrokarbon bileşikli yakıt parçacıklarının fazla bulunduğu yerde, katı halde karbon parçacıklarının meydana gelmesine ve yanmayarak is partikülleri halinde dışarı atılmasına sebep olur. Bunun en büyük nedenleri arasında, silindir içerisine alınan hava miktarı, yakıtın içeriğinde bulunan O_2 miktarı ve yakıtın silindir içerisinde hava ile hızlı ve homojen karışmayıp buharlaşmaması gösterilebilir (Yeşilyurt, Arslan, & Eryılmaz, 2018). Duman emisyonları genellikle hidrokarbondan oluşan yakıtların tam olarak oksitlenmemesi neticesinde oluşur.

Silindir içerisine yakıt püskürtüldüğünde, yakıt bünyesindeki hidrojen atomları, oksijen molekülleri ile hızlıca reaksiyona girmekte, geride kalan C molekülleri ise ortamda yeteri miktarda O_2 bulamadığından reaksiyona girememekte ve egzozdan is partikülü şeklinde dışarı salınmaktadır. İs emisyonu, yakıt içeriğindeki C miktarına, motor yük ve devrine bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir (Şen, 2012). İs emisyonlarını; yanma odası tasarımı, motorun çalışma şartları, yakıtın fiziksel ve kimyasal özellikleri, silindir içindeki O_2 konsantrasyonu, kullanılan yakıtın türü, hava/yakıt oranı ve homojenliği gibi parametreler etkilemektedir (Emiroğlu & Şen, 2018). İs emisyonları % cinsinden ölçülmüştür. Yarım ve tam yük durumlarında farklı devir aralıklarında ölçülen is emisyonlarına ait grafikler Şekil 6.18 ve Şekil 6.19'da verilmiştir.



Şekil 6.18. Yarım yük durumunda is (%) emisyonları



Şekil 6.19. Tam yük durumunda is (%) emisyonları

Şekil 6.18’de yarım yük durumunda is emisyonları artan devirle birlikte artış göstermiştir. İs emisyonları düşük devirlerde tüm yakıtlarda birbirine yakın seyrederken yüksek devirlere çıkıldıkça aralarındaki fark artmıştır. Bunun sebebi olarak, ÖYT’nin fazla olması ve silindir içindeki hava sirkülasyonunun yavaş olması duman koyuluğunun artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Yine test motorunun turboşarz gibi ek hava sirkülasyonu sağlayacak mekanizmaya sahip olmaması is emisyonunu artmasını olası nedenleri arasında gösterilebilir. Her devir ve yük için yakıt yoğunluğunun artmasıyla birlikte kurum emisyonları kabaca artan bir eğilim göstermektedir. Bir yandan, yakıt yoğunluğunun artmasıyla yakıttaki PAH (poli aromatik hidrokarbon) fraksiyonu artar ve PAH, kurum oluşturma eğilimi yüksek olan sıkı bir kimyasal yapıya sahiptir (Reijnders, Boot, & de Goey, 2016). Kullanılan tüm yakıtlar için yük uygulanmasıyla egzoz gazının duman yoğunluğunun arttığı görülmektedir. Biyodizel yakıtların

duman konsantrasyonunun dizel yakıttan daha yüksek seyrettiği fark edilmektedir. Bunun sebebi; düşük uçuculuk ve biyodizel yakıtların viskozitelerinin yüksek olması nedeniyle yakıt moleküllerinin hava ile yeteri kadar karışamamasıdır. Biyodizel moleküllerinin daha ağır olması is yoğunluğunun başka bir artış sebebi olarak görülmektedir. Motor devrinin artmasıyla birlikte yüksek hızlara çıkılmış ve yanmaya ayrılan zaman kısaldığı için yanma veriminde düşüş yaşanmış ve bu durum is emisyonlarının artmasına sebep olmuştur.

Şekil 6.19'da tam yük farklı devirler altında dizel ve biyodizel yakıtların is emisyon grafiği görülmektedir. Grafik incelendiğinde artan yük ile birlikte is emisyonlarının yarım yük durumuna göre büyük artış gösterdiği görülmektedir. Devir ve yük miktarının artmasıyla is emisyonlarının artması beklenen bir durumdur. Özellikle orta devirlerden yani 2200 d/d'den sonra emisyonlarda büyük bir artış yaşanmıştır. Artan devir ve yük ile birlikte yanma odasına püskürtülen yakıt miktarının artması, yanma için gerekli süre ve O_2 miktarı azalmasına bağlı olarak is yoğunluğunun arttığı düşünülmüştür (Hazar, Sevinc, & Sap, 2019). Ayrıca, yakıt yoğunluğu ve distilat sıcaklığı arasında düzenli bir eğilim olmamasına rağmen, yüksek konsantrasyonlu yakıtların distilasyon sıcaklığı genellikle yüksektir, bu da yakıt-hava karıştırma sürecini yavaşlatabilir ve kurum oluşumunu artırabilir (Liu vd., 2018). Bütün motor devirlerinde D100 yakıtının is emisyonları B100 yakıtından daha düşük çıkmıştır. Dizelin yakıt açısından zengin bölgelerinde yakıtın eksik yanması motorda partikül madde emisyonlarının artmasına neden olmaktadır. Bunun temel nedeni yakıt açısından zengin bölgelerde oksijen miktarının homojen yanma için yetersiz olmasıdır.

Yanma odasına gönderilen yakıt miktarının artmasıyla, silindir cidarlarında sıcaklığın düştüğü ve bundan dolayı oksidasyon reaksiyonlarının silindir duvar yüzeylerine yakın bölgelerde bozulduğu ve is emisyonlarının artmasına sebep olduğu tahmin edilmektedir. Yüksek viskozite ve yoğunluğa sahip balık yağından üretilen biyodizel, silindir içerisinde iyi atomize olmadığı, büyük damlacıklar halinde kaldığı ve duman yoğunluğunun buna bağlı olarak arttığı düşünülmektedir.

7. SONUÇLAR

Hamsi türüne ait ham balık yağından transesterifikasyon yöntemiyle etil alkol kullanılarak biyodizel üretilmiştir. Üretilen biyodizel yakıt %50 ve %75 oranlarında dizel yakıt ile harmanlanarak ve %100 biyodizel kullanılarak elde edilen B50, B75 ve B100 yakıtları tek silindirli bir dizel motor üzerinde dizel yakıt ile birlikte test edilmiştir. Kullanılan yakıtların dizel motor üzerindeki performans karakteristikleri ve emisyon değerleri incelenmiş olup, bu yakıtların motor elemanları (piston-segman takımı, enjektör memesi, supaplar) üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Motor performansı olarak; efektif motor gücü, motor momenti ve özgül yakıt tüketimi incelenmiştir. Emisyon parametreleri olarak karbonmonoksit (CO), karbondioksit (CO₂), hidrokarbon (HC), azot oksit (NO_x) ve is emisyonları ölçülmüştür. Motor deneyleri tam ve yarım yük altında farklı devirlerde (1600-2800 d/d) 300 d/d aralıklarla yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde izah edilmiştir.

1. Biyodizel yakıtlar dizel motorlar üzerinde herhangi bir ayar ve değişiklik yapılmadan saf ya da dizel yakıt ile harmanlanarak kullanılabilir.
2. Atık balık yağları değerlendirilerek çevreye vereceği zararların kaldırılması, ayrıca biyodizel hammaddesi olarak kullanılması ekonomik açıdan avantaj kazandırmaktadır.
3. Balık yağından biyodizel üretmek için transesterifikasyon metodu tercih edilmiş ve etil alkol kullanılarak, sülfürik asit (H₂SO₄) katalizörüyle balık yağı etil esteri üretilmiştir.
4. Motor deneylerine başlanmadan önce, incelenecek olan motor elemanları sökülerek temizlenmiş ve herhangi bir değişiklik yapılmadan motor üzerindeki yerlerine takılmıştır.
5. Motor deneyleri, motor çalışma rejim sıcaklığına geldikten sonra başlamış ve belirli aralıklarla motor dinlenmeye bırakılmıştır.
6. Motor gücünde tam ve yarım yük durumlarında artan devir sayısı ile birlikte artış meydana gelmiştir. Motor gücü, maksimum tork hızı olan 2200 d/d'ye kadar hızlı bir artış göstermiş, daha sonra bu artış hızı yavaşlamıştır. Maksimum güç değerleri bütün yakıtlar için 2800 d/d'de elde edilmiştir. Fakat biyodizel yakıtlar dizel yakıtı göre daha düşük güç artışı sağlamıştır, her iki grafikte de en düşük güç değerleri B100 yakıtında elde edilmiştir, bunu sırasıyla B75 ve B50 yakıtları takip etmektedir. Normalde biyodizel yakıtların ısı değerlerinin, dizel yakıtı göre düşük olmasına rağmen güç değerlerinde ki artış, biyodizelin yoğunluk ve viskozitesinin fazla olması ve bu nedenle silindire daha fazla yakıt püskürtülmesi ve biyodizelin yapısında bulunan oksijenin tam yanmaya yardım etmesiyle açıklanabilir.
7. Motor moment değerleri incelendiğinde tam ve yarım yük durumlarında maksimum tork devri olan 2200 d/d'ye kadar hızlı bir artış olmuş ve bu devirde maksimum değerine ulaşmış ardından artan motor hızıyla birlikte düşmüştür.

En yüksek moment değeri D100 yakıtında elde edilirken, bunu sırasıyla B50, B75 ve B100 yakıtları takip etmiştir. Motor yarım yükteyken en düşük tork değeri 10,37 Nm ile B100 yakıtında ölçülmüştür ve tam yük durumunda en düşük tork değeri yine 13,67 Nm ile B100 yakıtında ölçülmüştür. Moment 2200 d/d'ye kadar hızlı bir artış göstermiştir, çünkü bu devir aralığında silindir içerisinde maksimum basınç elde edilir ve maksimum karışım kütlesi yanma odasına alınır. Ancak motor hızının ve gücünün artmasına karşın moment bu devirden sonra azalmaya başlamıştır. Momentteki bu azalmanın bir diğer sebebi biyodizel yakıtların yüksek yoğunluk ve viskoziteleri nedeniyle, özellikle yüksek hızlarda meydana gelen sürtünme artışlarından dolayı, yakıtın pompa elemanı doldurma gecikmesi dizel yakıtı kıyasla daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

8. Tam ve yarım yüklerde motorda ÖYT miktarı artmıştır. Beklendiği gibi en düşük ÖYT değerleri D100 yakıtında elde edilmiştir ve en düşük veriler motor 2200 d/d iken ölçülmüştür. En yüksek ÖYT değerleri sırasıyla B100, B75 ve B50 yakıtları kullanılırken ölçülmüştür. Motor yarım yükteyken en düşük ÖYT değerleri sırasıyla D100 için 221 g/kWh, B50 için 231 g/kWh, B75 için 245 g/kWh ve B100 için 267 g/kWh olarak ölçülmüştür. Tam yükte en düşük ÖYT değerleri sırasıyla D100 için 271 g/kWh, B50 için 284 g/kWh, B75 için 299 g/kWh ve B100 için 326 g/kWh olarak ölçülmüştür.
9. CO emisyonları tam ve yarım yüklerde artmış ve dizel yakıtı göre yüksek çıkmıştır. Dizel yakıtındaki biyodizel ilavesi arttıkça CO emisyonlarının da arttığı görülmüştür. Bunun temel sebebi olarak yanma odasındaki O₂ yetersizliği ve biyodizel yakıtların yüksek viskozitesi gösterilebilir. Biyodizel yakıtlar dizel yakıtı göre yüksek viskoziteye sahip oldukları için silindir içerisinde iyi atomize olamadığından yanma kötüleşmiş ve CO emisyonları artmıştır.
10. HC emisyon oluşumu genellikle CO emisyonlarına paralel hareket ettiği için tam ve yarım yüklerde kullanılan bütün yakıtlarda yüksek çıkmıştır. Motor hızı arttıkça HC emisyonları da artmıştır, en düşük emisyon değerleri dizel yakıtı aittir. HC emisyonları motor yarım yükteyken 2500 d/d'den sonra artma eğilimine geçmişken tam yük durumunda 2500 d/d'den sonra azalma eğilimine geçmiştir. Yarım yük durumunda 2500 d/d'den sonra artan HC emisyonları; motor hızı arttıkça yanmaya ayrılan sürenin yetersiz olması, hava/yakıt oranının fakirleşmesine bağlı olarak yanmanın kötüleşmesi ya da eksik yanma meydana gelmesi gibi durumlardan dolayı HC emisyonlarının arttığı görülmüştür. Motor tam yükteyken 2500 d/d'den sonra HC emisyonlarının azalma eğilimine geçmesinin sebebi, bu devir aralıklarında silindir içi tutuşma sıcaklığının artması, biyodizel yakıt içeriğinde bulunan oksijenin zengin hava/yakıt karışımı bölgelerinde kısmi oksidasyonlarını tamamlaması ve böylece yanmanın iyileşmesi gösterilebilir.

11. CO₂ emisyonları kullanılan bütün yakıtlar için yarım ve tam yük durumlarında artmıştır. Egzoz emisyonlarının içerisinde CO₂ bulunması tam yanmanın gerçekleştiğini gösterdiği için CO₂'nin artması istenen bir durumdur. Ancak yarım yük durumunda CO₂ gazları 2200 d/d'den sonra azalmaya başlamıştır. Yetersiz O₂ miktarı nedeniyle yanmanın kötüleşmesi ve yanmaya ayrılan sürenin kısılması CO₂ gazı emisyonlarını düşürmüştür. Aynı zamanda artan motor hızıyla birlikte, yanma hızı artar buna bağlı olarak oksijen ve karbon atomlarının reaksiyon süreleri kısalmış ve bu da CO₂ gazlarının azalmasını nedeni olarak gösterilebilir. Motor tam yükteyken CO₂ emisyonlarında 2500 d/d'den sonra ani bir artış yaşanmıştır. Motor yük ve devrinin artmasıyla birlikte CO₂'de doğal olarak artar. Silindir içi sıcaklığın yüksek olması, artan motor yüklerinde içeriye fazla yakıt gönderilmesi sebebiyle oksidasyon reaksiyonlarının iyileşmesi sağlanır. Yanmanın iyileşmesi ve tam yanma için yeterli O₂'nin bulunması CO₂ oranını arttırdığı düşünülmektedir.
12. NO_x emisyonları her iki motor yükünde de artan motor hızıyla birlikte artmış 2200 devirde maksimum değere ulaşmış ardından genel olarak azalma eğilimine geçmiştir. Biyodizel yakıt kullanılıncaya NO_x emisyonlarının artması beklenen bir durumdur. Çünkü yanma odası sıcaklığı 1800 °K'yi bulduğu için bu tür yüksek sıcaklıklarda NO_x oluşumu artar ve 2200 d/d'de silindir içi sıcaklık maksimum değerine ulaştığı için bu devir aralığında kullanılan bütün yakıtlar için NO_x gazları artmıştır. Motor yarım yükteyken NO_x emisyon oluşumu maksimum 2200 d/d'de sırasıyla B100 için 456 ppm, B75 için 425 ppm, B50 için 398 ppm ve D100 için 347 ppm olarak ölçülmüştür. Aynı şekilde motora %100 yük uygulandığında NO_x oluşumu maksimum B100 için 637 ppm, B75 için 597 ppm, B50 için 586 ppm ve D100 için 502 ppm olarak ölçülmüştür.
13. Duman yoğunluğu artan motor yükü ve hızıyla birlikte her iki yük uygulamasında artmıştır. Motorun en verimli çalışma aralığı olan 2200 d/d'den son is emisyonlarında ciddi bir artış söz konusudur. Artan motor hızıyla silindire alınan yakıt miktarının artması, tam yanmaya ayrılan sürenin kısılması ve içeriye alınan oksijen miktarının azalması gibi durumlardan dolayı is emisyonlarında artış gözlenmiştir. Her iki yük durumunda da en düşük is emisyonu D100 yakıtına aittir, bunu sırasıyla B50, B75 ve B100 yakıtları takip etmektedir. Biyodizel yakıtlardaki yüksek viskozite ve yoğunluktan dolayı silindir içerisinde iyi atomize olamamaları hava ile homojen bir karışım oluşturmalarına engel olur. Bu durumda eksik yanma meydana gelir ve duman yoğunluğu artar.
14. 50 saatlik çalışmanın ardından, motor elemanları (piston-segman takımı, supaplar, enjektör meme ucu) deneyler tamamlandıktan sonra sökülüp incelendiğinde anormal derecede is ve kurum meydana geldiği görüldü. Ancak parçalar, özellikle supaplar üzerinde meydana gelen kurumların, motorun çalışma performansına negatif yönde etki

edebilecek seviyede olmadığı görülmüştür. Kullanılan biyodizel yakıtlar yüksek viskozitelerinden dolayı yeterince iyi atomize olamadıklarından, yakıt zerreleri büyümüş ve kötü yanma meydana gelmiştir, ayrıca biyodizel yakıtların içeriğindeki karbon atomu oranının fazla olması, dizel yakıta göre motor elemanları üzerinde is ve kurum oluşumunu arttırmıştır. Çalışma süresi boyunca kullanılan biyodizel yakıtların yakıt hattında herhangi bir tıkanmaya neden olmadığı ve yakıta doğrudan maruz kalan motor elemanları üzerinde herhangi bir probleme sebebiyet vermediği görülmüştür.



ÖNERİLER

Yapılan çalışmalar sonucunda atık balık yağından üretilen biyodizel yakıtın hem saf halde hem de motorin ile harmanlanarak, motor üzerinde hiçbir değişiklik ve ayara gerek kalmadan kullanılabileceği görülmüştür ve yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar göz önüne alınarak birtakım önerilerde bulunulmuştur.

1. Kullanılan biyodizel yakıtlar motor elemanlarına herhangi bir hasar vermemiştir, motor gayet sağlıklı ve sarsıntısız çalışmıştır. Ancak egzoz gazları incelendiğinde emisyon değerlerinin arttığı görülmüştür. Hayvansal kaynaklı biyodizellerle, emisyonlar üzerinde daha tutarlı ve uzun vadeli çalışmalar yapılabilir.
2. Biyodizel yakıtların yüksek viskozite ve yoğunluklarından dolayı yer yer kötü yanmalar meydana gelmiş ve buna bağlı olarak emisyonlar artmıştır. Isıl ve kimyasal yöntemler kullanılarak balık yağı etil esterinin yüksek viskozite ve yoğunluğu düşürülebilir.
3. Kötü ya da eksik yanmanın başka bir sebebi olarak görülen atomizasyon sorunu da emisyonların yükselmesinde önemli rol oynamıştır. Silindir içerisine püskürtülen yakıtın daha iyi atomize olup hava ile homojen bir karışım oluşturması için enjektör püskürtme basıncı artırılabilir. Literatürde yapılan çalışmalarda, püskürtme basıncının artırılması yanma ve dolayısıyla emisyonlar üzerinde olumlu bir etki yaratmıştır.
4. Biyodizel yakıtların alt ısı değerlerinin motorine göre düşük olması kötü yanma ve yüksek emisyon nedenlerinden biri olarak görülmektedir. Bu olumsuzluk; biyodizel yakıt, motorda kullanılmadan önce bir ön ısıtma işlemine tabi tutularak kısmen iyileştirilebilir. Nitekim bu konuda yapılan çalışmalar mevcut ve bu durumu desteklemektedir.
5. Biyodizel yakıt kullanımı kısa vadede herhangi bir sorun teşkil etmez, ancak uzun vadede kullanımı motor parçaları üzerinde özellikle yakıt enjeksiyon sisteminde zamanla korozyona, aşınmaya, çürümeye yol açabileceği yapılan çalışmalarda vurgulanmıştır. Bu olumsuzluklar göz önüne alındığında biyodizel yakıtla çalışabilecek motorlar üretmek ve geliştirmek daha uygun olacaktır.
6. Biyodizel yakıtlar ekonomik açıdan incelendiğinde, özellikle hayvansal yağlarla üretim, motorine göre maliyeti arttırdığından hammadde açısından zengin olan bitkisel kaynaklı yağların biyodizel üretiminde kullanılması daha uygun olacaktır.
7. Biyodizel üretmek için farklı potansiyel hammaddeler bulunmaktadır. Bitkisel ve hayvansal yağların uzun vadede biyodizel üretimi için kullanılması çeşitli olumsuzluklar doğuracağından, biyodizel üretiminde hammadde ihtiyacını karşılayacak farklı yenilenebilir kaynakların araştırılması ve üretimde yenilenebilir kullanılmış yağların tercih edilmesi önerilmektedir.

8. Biyodizel yakıtların kısa vadede yüksek güç ve tork gerektirmeyen motorlar üzerinde (örneğin jeneratörler gibi) kullanımının uygun olacağı düşünülmektedir.

Hayvan yağları hâlihazırda kullanılmakta ve atılmamaktadır, gerek hayvan yemi olarak veya diğer farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Ayrıca hayvan yağlarından üretilen biyodizel motorin ile karıştırılarak motorlarda yakıt olarak kullanılmaktadır. Sonuç olarak hayvansal yağdan elde edilen biyodizel yakıtın bir dizel motor üzerinde herhangi bir değişime gidilmeden alternatif yakıt olarak kullanılabileceği görülmüştür. Atık balık yağlarının yakıt olarak değerlendirilebileceği yapılan çalışmalarla desteklenmiştir.



KAYNAKLAR

- Ahmia, A. C., Danane, F., Bessah, R., & Boumesbah, I. (2014). Raw material for biodiesel production. Valorization of used edible oil. *Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°2*, 17, 335–343.
- Akgün, G., Bayındır, H., Aydın, H., & Düz, Z. (2009). Hayvansal Yağlardan Biyodizel Üretimi ve Teknik Değerlerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Çalışma. *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu 2009 - DİYARBAKIR*, 131–136.
- Aksoy, F., Uyumaz, A., Boz, F., & Yılmaz, E. (2017). Experimental Investigation of Neutralized Waste Cooking Oil Biodiesel / Diesel Mixture and Diesel Fuel in a Diesel Engine at Different Engine Loads. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 1(1), 7–15.
- Aksoy, F., & Yılmaz, E. (2019). %10 Balık Yağı Biyodizeli-%90 Dizel Yakıt Karışımı İle Çalışan Direkt Enjeksiyonlu Bir Dizel Motorunda Yanma ve Performans Karakteristiklerinin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7(1), 12–24. <https://doi.org/10.29109/gujsc.466544>
- Aktaş, A., & Sekmen, Y. (2008). *Biyodizel İle Çalışan Bir Dizel Motorda Yakıt Püskürtme Avansının Performans Ve Egzoz Emisyonlarına Etkisi*. 23(1), 199–206.
- Aktaş, E. S., DemİR, Ö., & Uçar, D. (2020). A review of the biodiesel sources and production methods. *International Journal of Energy and Smart Grid*, 5(1), 1–10.
- Akyarlı, A., Alpaslan, N., Çicek, T., Diktaş, E., Elmacı, Y., Karagözlü, C., ... M.Oğuz Şahin. (2004). *Biyodizel Yakıtın Uluslararası Standartlarda Üretimi*. 1–11.
- Al-Rousan, A. A. (2006). Effect of dust and sulfur content on the rate of wear of diesel engines working in the Jordanian desert. *AEJ - Alexandria Engineering Journal*, 45(5), 527–536. Tarihinde adresinden erişildi <https://www.researchgate.net/publication/266051330>
- Alleman, T. L., McCormick, R. L., Christensen, E. D., Fioroni, G., Moriarty, K., & Yanowitz, J. (2016). Biodiesel handling and use guide. İçinde *Biodiesel Handling and Use Guide* (Fifth Edit). U.S.
- Alptekin, E., & Çanakçı, M. (2006). Biyodizel ve Türkiye'deki Durumu. *Mühendis ve Makina*, 47(561), 57–64. Tarihinde adresinden erişildi http://www.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/8264bdb65b97eea_ek.pdf
- Altınsoy, A. S. (2007). *Biyodizel Üretimi, Motorlarda Kullanımı Ve Türkiye'deki Kaynakların İncelenmesi*. 99.
- Altun, Ş. (2004). *Motorin ve Susam Yağı Karışımlarının Dizel Motorlarda Kullanılabilirliği*. Fırat Üniversitesi Elazığ.
- Altun, Ş. (2009). *Havyansal Yağlardan Biyo-yakıt Üretimi ve Bir Dizel Motorunda Deneyisel, Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Fırat Üniversitesi Elazığ.
- Altun, Ş., Bulut, H., & Öner, C. (2008). The comparison of engine performance and exhaust emission characteristics of sesame oil-diesel fuel mixture with diesel fuel in a direct injection diesel engine. *Renewable Energy*, 33(8), 1791–1795. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.11.008>
- Anonim. (2007). Esterleşme Reaksiyonu. Tarihinde 05 Haziran 2021, adresinden erişildi <https://acikders.ankara.edu.tr/mod/resource/view.php?id=4945>
- Anonymous. (2019). The History And Origin Of Diesel Fuel. Tarihinde 24 Haziran 2021, adresinden erişildi Kendrick Oil company website: <https://kendrickoil.com/the-history-and-origin-of-diesel-fuel/>
- AntolÃ-n, G., F.V. Tinaut, Briceno, Y., Castano, V., C. Perez, & A.I. Ramirez. (2002). Optimisation of biodiesel production by sunflower oil transesterification. *Bioresource Technology*, 83(2), 111–114. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00200-0](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00200-0)
- Aydın, F., & Ögüt, H. (2017). Effects of using ethanol-biodiesel-diesel fuel in single cylinder diesel engine to engine performance and emissions. *Renewable Energy* 103 (2017) 688e694, 103, 688–694. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.083>

- Aydın, M., Afşar, M., & Çelik, M. B. (2017). Tek Silindirli Bir Dizel Motorda Atık Biyodizel Kullanımının Motor Performansı ve Emisyonlarına Etkisi. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(5), 1–1. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.295296>
- Balasubramanian, N., & Steward, K. F. (2019). Biodiesel : History of Plant Based Oil Usage and Modern Innovations. *Substantia*, 3(2), 61–62. <https://doi.org/10.13128/Substantia-281>
- Beck, K. (2019). What Is the Origin of Diesel Fuel? Tarihinde 24 Haziran 2021, adresinden erişildi Sciencing website: <https://sciencing.com/origin-diesel-fuel-19702.html>
- Behçet, R., Aydın, S., & Çakmak, A. (2012). Bitkisel ve Hayvansal Atık Yağlardan Üretilen Biyodizellerin Tek Silindirli Bir Dizel Motorda Yakıt Olarak Kullanılması. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2(4), 55–62.
- Behçet, R., & Çakmak, A. (2011a). Bir Dizel Motorda Yakıt Olarak Kullanılan Balık Yağı Metil Esteri Karışımlarının Motor Performans Ve Emisyonlarına Etkisi. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, (May), 16–18.
- Behçet, R., & Çakmak, A. (2011b). *Farklı Hammaddelerden Üretilen Biodizel Yakıtların Motor Performans Ve Emisyonlarının Karşılaştırılması*. (September). Tarihinde adresinden erişildi <https://www.researchgate.net/publication/305748436>
- Behçet, R., & Oral, F. (2014). Dizel Motor Performans ve Emisyonları Üzerindeki Biyodizel-Dizel Karışım Yakıtların Etkisi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 15–23. <https://doi.org/10.17798/beufen.83960>
- Biyodizel Sanayi Derneği. (2019). *Biyodizel Endüstri Raporu 1*. Tarihinde adresinden erişildi www.biyodizel.org.tr
- Borat, O., Balcı, M., & Sürmen, A. (1992). *Dizel Motorlarında Yanma*. Tarihinde adresinden erişildi <https://www.google.com/search?q=dizel+motorlarda+yanma&oq=dizel+motorlarda+yanma+&aqs=chrome..69i57j0l9.5503j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>
- By Admin. (2019). A Brief History of Diesel Fuel and Its Uses. Tarihinde 28 Haziran 2021, adresinden erişildi Biltmore oil website: <https://www.biltmoreoil.com/a-brief-history-of-diesel-fuel-and-its-uses>
- Çelik, M., Solmaz, H., Yücesu, H. S., & Yılmaz, E. (2016). Kanola Metil Esterine N-Heptan Katkısının Motor Performansı Ve Yanma Karakteristiklerine Etkilerinin İncelenmesi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 36, 1, 9-16, 2016 J. of Thermal Science and Technology ©2016 TIBTD Printed in Turkey ISSN 1300-3615, 9–16.
- Çoban, A. (2021). *Biyodizel Karışımları ile Çalışan Bir Dizel Motorunda Performans , NO ve İş Emisyonlarını Etkileyen Faktör Seviyelerinin Taguchi Yöntemi ile Belirlenmesi Determination of the Factors Levels Affecting Performance , NO and Soot Emissions in a Diesel Engine*. 229–237. <https://doi.org/10.21541/apjes.816398>
- Cumali, İ., & Aydın, H. (2011). *Determination of performance and exhaust emissions properties of B75 in a CI engine application*. 92, 1790–1795. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.04.032>
- Demir, A. (y.y.). *Sıkıştırma ile Ateşlemeli Motorlar*. Tarihinde adresinden erişildi <https://docplayer.biz.tr/8767209-Marmara-universitesi-teknoloji-fakultesi-makine-muhensiligi-bolumu-sikistirma-ile-ateslemeli-motorlar.html>
- Demirbas, A., & Karslioglu, S. (2007). Biodiesel production facilities from vegetable oils and animal fats. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 29(2), 133–141. <https://doi.org/10.1080/009083190951320>
- Diesel Power Products. (2011). The Different Types Of Diesel Fuel. Tarihinde 23 Haziran 2021, adresinden erişildi <https://www.dieselpowerproducts.com/blog/the-different-types-of-diesel-fuel/>
- Dinçer, A. (2010). Dizel Motorlarda Yanma, Yanma Atıkları. Tarihinde adresinden erişildi İş Makinaları Mühendisleri Birliği website: <http://www.ismakinalari.org.tr/tr/article.asp?id=40>
- Düzgün, Ö. (2015). *Balık Yağından Biyodizel Üretimi Ve Motorlarda Test Edilmesi*. Krabük: Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi.
- Ejder, S. B. (2007). *Etanol - Dizel, Biyodizel - Dizel Yakıt Karışımlarının kullanımının Motor Performansına Etkilerinin Deneyisel Araştırılması*.

- Emiroğlu, A. O., & Şen, M. (2018). Combustion, performance and emission characteristics of various alcohol blends in a single cylinder diesel engine. *Fuel*, 212(February 2017), 34–40. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.016>
- Fregolente, P. B. L., Wolf Maciel, W. M., & Oliveira, L. S. (2015). Removal Of Water Content From Biodiesel And Diesel Fuel Using Hydrogel Adsorbents. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 32(4), 895–901. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20150324s20140142>
- Gebremariam, S. N., & Marchetti, J. M. (2017). Biodiesel production technologies : review. *AIMS Energy*, 5(May), 425–457. <https://doi.org/10.3934/energy.2017.3.425>
- Gharehghani, A., Mirsalim, M., & Hosseini, R. (2016). Effects of waste fish oil biodiesel on diesel engine combustion characteristics and emission. *Renewable Energy*, 101(2017), 930–936. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.045>
- Gökalg, B. (2009). *Biyodizel Katkılı Gemi Ve Uçak Yakıtlarının İçten Yanmalı Motorlardaki Performansının İncelenmesi*. Kocaeli Üniversitesi.
- Göktaş, M., & Sayın, C. (2020). Buji Ateşlemeli Motorlarda Alkol Yakıt Kullanımının Performans, Emisyon ve Yanma Karakteristikleri Açısından İncelenmesi. *Erciyes University Journal of Institute Of Science and Technology*, 36(1), 1–21. Tarihinde adresinden erişildi <https://dergipark.org.tr/tr/pub/erciyesfen/515510>
- Gümüş, A., Şentürk, H., Solak, Z., & Karataş, Ö. (2013). *Motorlu Taşıtlar Ve Adapazarın'da Motorlu Taşıtlardan Kaynaklanan Emisyonların Envanterlenmesi*. 53(9), 1689–1699.
- Gürkan, Y. (2019). *Etanol Katkılı Kanola Biyodizelinin Bir Dizel Motorunda Kullanılabilirliğinin Deneysel Araştırılması* (C. 8). Fırat Üniversitesi.
- Hannu, J., & Khair, M. K. (2020). Combustion in Diesel Engines. Tarihinde 26 Mayıs 2021, adresinden erişildi https://dieselnet.com/tech/diesel_combustion.php
- Hazar, H., Sevinc, H., & Sap, S. (2019). Performance and emission properties of preheated and blended fennel vegetable oil in a coated diesel engine. *Fuel*, 254(January), 115677. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115677>
- Hervé, G., Agneta, F., & Yves, D. (2011). *Biofuels and World Agricultural Markets: Outlook 2020 and 2050*. 130–141. <https://doi.org/10.5772/20581>
- İçingür, Y., & Koçak, M. S. (2006). *Fındık Yağı Metil Esterinin Dizel Yakıtı Alternatifi Olarak Performans ve Emisyon Parametrelerinin İncelenmesi*. 119–124.
- iklimBU. (2021). Sera Etkisi Nedir? Tarihinde adresinden erişildi Boğaziçi Üniversitesi İklim Değişikliği ve Politikaları Uygulama ve Araştırma Merkezi website: <http://climatechange.boun.edu.tr/sera-etkisi-nedir/>
- İlkılıç, C., & Behçet, R. (2006). Hava Kirliliğinin İnsan Sağlığı Ve Çevre Üzerindeki Etkisi. *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 46(6), 66–72. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2011-090823>
- Jamrozik, A. (2017). The effect of the alcohol content in the fuel mixture on the performance and emissions of a direct injection diesel engine fueled with diesel-methanol and diesel-ethanol blends. *Energy Conversion and Management*, 148, 461–476. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.030>
- Javed, A., & Zaman, K. (2010). *Pros And Cons Of Bio-Fuel Industry: Evidence From Pakistan*. 1(1), 10–18.
- Joseph H. Pons. (1993). Diesel fuel grade and MPG. Tarihinde 23 Haziran 2021, adresinden erişildi Endüstriyel Teknoloji Güneybatı Louisiana Üniversitesi website: <http://www.dnr.louisiana.gov/assets/TAD/education/ECEP/diesel/b/b.htm>
- Kapluhan, E. (2021). Türkiye’de biyokütle enerjisinde mevcut durum. *Y.T. Yayıncılık Eğitim Ltd. Şti. Yıl 27 Sayı 118*, (April). Tarihinde adresinden erişildi <https://yeniturkiye.com/yenilenebilir-enerji-ozel-sayisi/>
- Karamangil, M. İ. (2003). Buji Ateşlemeli Motorlarda Hidrokarbon Emisyon Kaynakları. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü*.
- Kaya, K., Şenel, M. C., & Koç, E. (2018). Dünyada ve Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi. *Technological Applied Sciences (NWSATAS)*, 7223(November 2017), 219–234.

<https://doi.org/10.12739/NWSA.2018.13.3.2A0152>.Kaya

- Kinast, J. A. (2003). Production of biodiesels from multiple feedstocks and properties of biodiesels and biodiesel/diesel blends. Final report. Report 1 in a series of 6. Subcontractor report. *National Renewable Energy Laboratory*, (March), 57. Tarihinde adresinden erişildi <https://www.nrel.gov/docs/fy03osti/31460.pdf>
- Koç, M. (2011). *Biyodizel Üretimine Uygun Türkiye’de Yetişen Ve Yetiştirilecek Bitkilerin Ve Biyodizel Teknolojilerinin Belirlenmesi*.
- Korkut Yıldırım, A., Kop, A., & Demir, P. (2007). Balık Yemlerinde Kullanılan Balık Yağı ve Özellikleri. *Ege Üniversitesi Su Ürünleri Dergisi*, 24, 195–199.
- Kuchler, M., & Linnér, B. (2008). *CSPR Briefing Pros and Cons of International*.
- Kumar, T. D., Manjunatha, & Ramesha, D. K. (2020). Performance, combustion and emission characteristics of B20 fish biodiesel blended with waste plastic oil on a diesel engine. *Journal of Physics: Conference Series*, 1473(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1473/1/012036>
- Latarche, M. (2021). Oil fuels chemistry and treatment. İçinde *Pounder’s Marine Diesel Engines and Gas Turbines* (ss. 117–149). <https://doi.org/10.1016/C2017-0-04828-0>
- Lin, C. Y., & Li, R. J. (2009). Fuel properties of biodiesel produced from the crude fish oil from the soapstock of marine fish. *Fuel Processing Technology*, 90(1), 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.08.002>
- Liu, H., Ma, J., Dong, F., Yang, Y., Liu, X., Ma, G., ... Yao, M. (2018). Experimental investigation of the effects of diesel fuel properties on combustion and emissions on a multi-cylinder heavy-duty diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 171(June), 1787–1800. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.089>
- Majewski, W. A., & Jääskeläinen, H. (2019). Egzoz Partikül Maddesi. Tarihinde adresinden erişildi <https://dieselnet.com/tech/dpm.php#intro>
- Marchetti, J. M., Miguel, V. U., & Errazu, A. F. (2005). Possible methods for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 1300–1311. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.08.006>
- Maroa, S., & Inambao, F. (2020). *Biodiesel, Combustion, Performance and Emissions Characteristics*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-51166-1>
- Marquard & Bahls. (2015). Diesel Fuel. Tarihinde 17 Haziran 2021, adresinden erişildi <https://www.marquard-bahls.com/en/news-info/glossary/detail/term/diesel-fuel.html>
- Martini, N., & Schell, J. S. (1998). *Plant Oils as Fuels*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-72269-1>
- McCormick, R. L. (2007). The impact of biodiesel on pollutant emissions and public health. *Inhalation Toxicology*, 19(12), 1033–1039. <https://doi.org/10.1080/08958370701533509>
- Mejía, J. D., Salgado, N., & Orrego, C. E. (2013). Effect of blends of Diesel and Palm-Castor biodiesels on viscosity, cloud point and flash point. *Industrial Crops and Products*, 43(1), 791–797. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.08.026>
- Mittal, V. (2021). Biyoyakıtta gelecekteki eğilimler. Tarihinde 21 Haziran 2021, adresinden erişildi Biyoyakıtlar Uluslararası Dergisi website: <https://biofuels-news.com/news/future-trends-in-biofuel/>
- Naylor, R. L., & Higgins, M. M. (2017). The political economy of biodiesel in an era of low oil prices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77(April), 695–705. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.026>
- Nişancı, S. (2007). *Biyodizel yakıt karışımlarının performans ve emisyon üzerine etkilerinin deneysel araştırılması*.
- Özçelik, F. (y.y.). Etil Alkol Üretimi. *Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü*, 12–13.
- Özertan, G. (2007). *Biyoyakıtlar Türkiye İçin Ne İfade Ediyor?* Tarihinde adresinden erişildi http://www.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/8264bdb65b97eea_ek.pdf

- Parawira, W. (2010). Biodiesel production from *Jatropha curcas* : a critical review. *Scientific Research and Essays Vol. 5(14)*, 31(1), 1796–1808.
- Polat, S. (2011). Dizel motorlar. *Hitit Üniversitesi Meslek Yüksek Okulu*, 1–150.
- Rajalingam, A., Jani, S. P., Kumar, A. S., & Khan, M. A. (2016). Production methods of biodiesel. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 8(3), 170–173. Tarihinde adresinden erişildi www.jocpr.com
- Reijnders, J., Boot, M., & de Goey, P. (2016). Impact of aromaticity and cetane number on the soot-NO_x trade-off in conventional and low temperature combustion. *Fuel*, 186, 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.009>
- Sabancı, A., Atal, M., & Yaşar, A. (2006). Türkiye’de Biyodizel Kullanım ve Olanakları. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 2(1), 33–39. Tarihinde adresinden erişildi <http://www.>
- Sarin, A. (2012). Biodiesel Production and Properties. İçinde R. K. Malhotra Director (R&D) (Ed.), *Nature* (Published, C. 192). <https://doi.org/10.1038/192943a0>
- Şarkar, D. K. (2015). Thermal Power Plant. İçinde *Thermal Power Plant*. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-00536-9>
- Saxena, P., Jawale, S., & Joshipura, M. H. (2013). A review on prediction of properties of biodiesel and blends of biodiesel. *Procedia Engineering*, 51(NUiCONE 2012), 395–402. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.055>
- Sayin, C., Necati, A. Ö., & Canakci, M. (2010). The influence of operating parameters on the performance and emissions of a DI diesel engine using methanol-blended-diesel fuel. *Fuel*, 89(7), 1407–1414. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.035>
- Schaschke, C., Fletcher, I., & Glen, N. (2013). Density and Viscosity Measurement of Diesel Fuels at Combined High Pressure and Elevated Temperature. *Processes*, 1(2), 30–48. <https://doi.org/10.3390/pr1020030>
- Scott, E., & Lieberz, S. (2018). Biofuel Mandates in the EU by Member State in 2018. İçinde *USDA Foreign Agricultural Service*. Tarihinde adresinden erişildi [https://gain.fas.usda.gov/Recent GAIN Publications/Biofuel Mandates in the EU by Member State in 2017_Berlin_EU-28_6-1-2017.pdf](https://gain.fas.usda.gov/Recent%20Publications/Biofuel%20Mandates%20in%20the%20EU%20by%20Member%20State%20in%202017_Berlin_EU-28_6-1-2017.pdf)
- Sekmen, Y., & Şen, S. (2016). *Hamsi (Engraulis Encrasicolus) Yağından Biyodizel Üretimi Ve Dizel Motor Performans Ve Emisyonlarına Etkisi*. 31(1), 19–27.
- Şen, S. (2012). *Hayvansal Yağlardan Biyodizel Üretimi Ve Dizel Motor Performans Ve Emisyonlarına Etkisinin Araştırılması*.
- Sezer, İ. (2016). Dizel yakıtı, biyodizel yakıtı ve karışımlarının içten yanmalı motorlara etkilerinin teorik incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.278437>
- T.C. Milli Eğitim Bakanlığı. (2012). *Motorlu araçlar teknolojisi dizel motorlari yakıt sistemleri*. Tarihinde adresinden erişildi [http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Dizel Motorları Yakıt Sistemleri \(Motorlu Araçlar\).pdf](http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Dizel%20Motorlari%20Yakit%20Sistemleri%20(Motorlu%20Araclar).pdf)
- Tekdoğan, R. (2020). *Bir Dizel Motorda Zeolit Maddesinin Emisyon Ve Performans Üzerine Etkisinin Yapay Sinir Ağları (Ysa) İle Araştırılması*. Fırat Üniversitesi.
- Telli, M. B., & Altınpınar, A. (2020). Mikroemülsiyon Tekniği ile Üretilmiş Hidroksiapatit Nanoparçacıkların Ti6Al4V Altıtlar Üzerine Elektroforetik Biriktirme Yöntemi ile Kaplanması ve Vakum Ortamında Sinterlenmeleri. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 10(2), 158–167. <https://doi.org/10.7212/zkufbd.v10i2.1600>
- Tütüncü, H. (2013). Transesterifikasyonla Balık Yağı Metil Esteri Sentezinin Optimizasyonu. *Integration of Climate Protection and Cultural Heritage: Aspects in Policy and Development Plans. Free and Hanseatic City of Hamburg*, 26(4), 1–37.
- U.S. Energy Information Administration. (2020). Diesel fuel explained. Tarihinde 29 Haziran 2021, adresinden erişildi <https://www.eia.gov/energyexplained/diesel-fuel/>
- Ülger, M. (2010). *İstanbul Trafiğindeki Ticari Taksilerin Emisyon Açısından Olumsuz Etkileri* (C. 53).

Bahçeşehir Üniversitesi.

- Usta, N., Can, Ö., & Öztürk, E. (2004). Alternatif Dizel Motor Yakıtı Olarak Biyodizel Ve Etanolün Karşılaştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(3), 325–334.
- Uyumaz, A., Boz, F., Yılmaz, E., Solmaz, H., & Polat, S. (2017). Taşıt Egzoz Emisyonlarını Azaltma Yöntemlerindeki Gelişmeler. *MESTEK 2017 | 4. Ulusal Meslek Yüksekokulları Sosyal Ve Teknik Bilimler Kongresi*, (November 2018).
- Van Gerpen, J. (2005). Biodiesel processing and production. *Fuel Processing Technology*, 86(10), 1097–1107. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.11.005>
- Varuvel, E. G., Mrad, N., Tazerout, M., & Aloui, F. (2012). Assessment of liquid fuel (bio-oil) production from waste fish fat and utilization in diesel engine. *Applied Energy*, 100, 249–257. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.035>
- Vicente, G., Martínez, M., & Aracil, J. (2004). Integrated biodiesel production: a comparison of different homogeneous catalysts systems. *Bioresource Technology*, 92(3), 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.08.014>
- Wikipedi. (2021). Etanol. <https://doi.org/10.1016/0163->
- Wikipedia. (2019). En 14214. Tarihinde 14 Haziran 2021, adresinden erişildi https://en.wikipedia.org/wiki/EN_14214#cite_ref-1
- Wikipedia. (2021). EN 590. Tarihinde adresinden erişildi https://en.wikipedia.org/wiki/EN_590
- Yahyaee, R., Ghobadian, B., & Najafi, G. (2013). Waste fish oil biodiesel as a source of renewable fuel in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17(6), 312–319. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.025>
- Yanfei Li, G. T., & Xu, H. (2012). Application of Biodiesel in Automotive Diesel Engines. İçinde Z. Fang (Ed.), *Biodiesel - Feedstocks, Production and Applications* (ss. 387–389). <https://doi.org/10.5772/45895>
- Yaşar, B. (2009). *Alternatif Enerji Kaynağı Olarak Biyodizel Üretim Ve Kullanım Olanaklarının Türkiye Tarımı Ve AB Uyum Süreci Açısından Değerlendirilmesi*. Çukurova Üniversitesi.
- Yaşar, F. (2016). Yosun Yağından Biyodizel Üretimi Ve Bir Dizel Motorunda Alternatif Yakıt Olarak Kullanılması (C. 3). Batman Üniversitesi.
- Yavuz, H. (2017). *Otomotiv teknolojisi Emİsyon Kontrol Sİstemleri*. 1–72.
- Yeşilyurt, M. K., Arslan, M., & Eryılmaz, T. (2018). Biyodizel-Dizel Yakıt Karışımlarına Etanol Katılmasının Performans, Yanma Ve Emisyon Karakteristiklerine Etkilerinin Deneysel İncelenmesi. *İsi Bilimi Ve Teknigi Dergisi/ Journal of Thermal Science and Technology*, 38(2), 129–150.
- Zhao, Z., Yan, J., Liu, F., Liang, D., & Yao, H. (2013). Exhaust System Optimization based on Experiment and Numerical Simulation. *Procedia Engineering*, 52, 634–639. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.198>

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Rahim ARSLAN

[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]