

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**MİKRODALGA ISITMALI BİR BİYODİZEL REAKTÖR  
TASARIMI VE PİLOT ÖLÇEKLİ PROTOTİP GELİŞTİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**VELİ GÖKHAN DEMİR**

**BALIKESİR, NİSAN - 2018**

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**MİKRODALGA ISITMALI BİR BİYODİZEL REAKTÖR**  
**TASARIMI VE PİLOT ÖLÇEKLİ PROTOTİP GELİŞTİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**VELİ GÖKHAN DEMİR**

**Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Nadir İLTEN (Tez Danışmanı)**

**Prof. Dr. Hakan Serhad SOYHAN**

**Prof. Dr. Bedri YÜKSEL**

**Doç. Dr. Cenk ÇELİK**

**Doç. Dr. Enver YALÇIN**

**BALIKESİR, NİSAN - 2018**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

Veli Gökhan DEMİR tarafından hazırlanan “MİKRODALGA ISITMALI BİR BİYODİZEL REAKTÖR TASARIMI VE PİLOT ÖLÇEKLİ PROTOTİP GELİŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 09.04.2018 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Doç. Dr. Nadir İLTEN

Üye  
Prof. Dr. Hakan Serhad SOYHAN

Üye  
Prof. Dr. Bedri YÜKSEL

Üye  
Doç. Dr. Cenk ÇELİK

Üye  
Doç. Dr. Enver YALÇIN

  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

**Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2014/102 nolu proje ile desteklenmiştir.**

## ÖZET

### MİKRODALGA DESTEKLİ BİR BİYODİZEL REAKTÖR TASARIMI VE PİLOT ÖLÇEKLİ PROTOTİP GELİŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

VELİ GÖKHAN DEMİR

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. NADİR İLTEN)

BALIKESİR, NİSAN - 2018

Yapılan bu çalışmada, pilot ölçekte mikrodalga destekli biyodizel üretimi yapabilen bir biyodizel reaktörü tasarlanmış ve imal edilmiştir. Mikrodalga ve konvansiyonel ısıtma sistemlerine sahip reaktörde ayçiçek, kanola, soya ve atık ayçiçek yağlarından transesterifikasyon ve sulu yıkama yöntemleri kullanılarak biyodizel (AYB, KYB, SYB, AAYB) üretimleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, mikrodalga ışıma altında ayçiçek, kanola ve soya yağlarından; 6:1 molar metanol:yağ oranında metanol, yağın kütlece %1.0'ı kadar KOH, 60°C sıcaklık ve 5 dakika reaksiyon süresi koşullarında EN 14214 standartlarına uygun biyodizel üretilebildiği tespit edilmiştir. Bunun yanında, aynı reaksiyon koşulları ve hammadde kullanılarak gerçekleştirilen konvansiyonel üretimde, 60 dakika sonunda dahi transesterifikasyonun tamamlanamadığı ve standartlara uygun biyodizel üretilemediği görülmüştür. Mikrodalga ışıma altında AAYB üretimi için optimum reaksiyon koşulları ise kullanılmamış yağlardan farklı olarak %1.5 KOH varlığında elde edilmiştir. Üretilen AYB, KYB ve SYB'nin saf ve motorin ile belirli oranlardaki karışımlarının motor testleri, tek silindirli ve direk püskürtmeli bir dizel motorda, sabit devir-değişen yük koşullarında gerçekleştirilmiştir. Üretilen tüm biyodizel çeşitleri, motorine çok benzer motor performansları sağlamışlar; CO ve HC emisyonlarında iyileştirme, NO<sub>x</sub> ve CO<sub>2</sub>'de ise bir miktar artışa neden olmuşlardır. Genel olarak, biyodizeller içinde SYB düşük yükte, AYB ise yüksek yükte daha iyi sonuç vermiştir. Çalışmanın son bölümünde, Diesel-RK programı ile SYB20 ve motorine ait motor simülasyonları oluşturularak, testlerde incelenemeyen yanma analizleri ve duman koyuluğu - PM emisyon salınım değerleri tahmin edilmiş ve çıkan sonuçlar irdelenmiştir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Mikrodalga, biyodizel, motor testleri, motor simülasyonu.

## **ABSTRACT**

### **DESIGNING A MICROWAVE HEATED BIODIESEL REACTOR AND ITS APPLICATION IN PILOT SCALE**

**PH.D THESIS**

**VELİ GÖKHAN DEMİR**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
MECHANICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. NADİR İLTEN )**

**BALIKESİR, APRIL 2018**

In this study, a biodiesel reactor being capable of microwave assisted biodiesel production on pilot scale was designed and manufactured. In the reactor having microwave and conventional heating systems, the biodiesel productions (SOB, COB, SYOB and WSOB) have been realized by using transesterification and water washing methods from sunflower, canola, soybean and waste sunflower oils. According to the results of the experiments, it has been found that biodiesel in accordance with EN 14214 standards can be produced from sunflower, canola and soy oils under microwave irradiation at a molar ratio of methanol to oil of 6: 1 molar: methanol, oil at a mass of 1.0% KOH, 60°C temperature and 5 minutes reaction time. However, in the conventional production using the same reaction conditions and feedstock, the transesterification could not be completed even after 60 minutes, and biodiesel which is suitable to the standards could not be produced. The optimum reaction conditions for WSOB production under microwave irradiation were obtained in the presence of 1.5% KOH, unlike the unused oils. Engine tests of being produced of SOB, COB and SYOB, diesel and their various blends were carried out using a single-cylinder and direct-injection diesel engine under constant speed and various load conditions. Consequently, all the sorts of the produced biodiesels achieved much similar engine performances with diesel, while causing improvements in CO and HC, a slight increase in NO<sub>x</sub> and CO<sub>2</sub> emissions. In general, among the biodiesels, SBOB and SOB gave better results at low and high loads, respectively. In the last part of the study, combustion analyzes and smoke-PM emissions were estimated by making engine simulations of SBOB20 and diesel using Diesel-RK software, and the results were criticized.

**KEYWORDS:** Microwave, biodiesel, engine tests, engine simulation.

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>x</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>xii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1    Biyodizele Genel Bakış .....	5
1.1.1    Biyodizelin Yakıt Özellikleri .....	6
1.1.2    Biyodizel Yakıt Standartları .....	7
1.1.3    Dünyada Biyodizelin Durumu .....	8
1.1.4    Türkiye’de Biyodizelin Durumu.....	10
1.2    Biyodizel Üretimi .....	11
1.2.1    Bitkisel Yağlar ve Özellikleri .....	11
1.2.1.1    Bitkisel Yağlar .....	13
1.2.1.2    Türkiye Bitkisel Yağ Üretimi.....	16
1.2.2    Transesterifikasyon Yöntemi .....	17
1.2.3    Konvansiyonel Metotlar ile Biyodizel Üretimi .....	20
1.3    Mikrodalga Teknolojisi ve Biyodizel.....	23
1.3.1    Mikrodalga.....	23
1.3.2    Mikrodalga Destekli Isıtma .....	26
1.3.2.1    Mikrodalganın Kimyasal Reaksiyonlar Üzerindeki Etkileri.....	28
1.3.3    Mikrodalga Işıma Altında Biyodizel Üretimi .....	31
1.4    Mikrodalga Destekli ve Konvansiyonel Biyodizel Üretim Metotlarının Kıyaslanması .....	34
1.5    Biyodizel Motor Test ve Simülasyonları.....	37
<b>2. MİKRODALGA DESTEKLİ BİYODİZEL REAKTÖRÜ TASARIMI VE İMALATI</b> .....	<b>44</b>
2.1.1    Reaktörün Tasarım ve İmalat Aşamaları .....	45
<b>3. BİYODİZEL ÜRETİMİ</b> .....	<b>56</b>
3.1    Hammadde (Yağlar) ve Kimyasal Malzemeler.....	56

3.2	Biyodizel Üretim Yöntemi .....	59
3.2.1	Filtrasyon .....	60
3.2.2	Metoksit Karışımının Hazırlanması.....	60
3.2.3	Transesterifikasyon.....	60
3.2.4	Numune Alma.....	63
3.2.5	Dinlendirme (Faz Ayrımı) .....	63
3.2.6	Saflaştırma (Sulu Yıkama).....	64
3.2.7	Kurutma .....	65
3.2.8	Filtrasyon .....	66
3.3	Yağ ve Biyodizel Numunelerinin Karakterizasyonu.....	66
<b>4.</b>	<b>MOTOR TESTLERİ VE SİMÜLASYONU .....</b>	<b>72</b>
4.1	Motor Testleri.....	72
4.1.1	Test Yakıtları .....	72
4.1.2	Motor Test Sistemi.....	73
4.1.3	Motor Testlerinin Yapılışı .....	75
4.1.4	Ölçüm ve Hesaplamalar .....	75
4.2	Motor Simülasyonu .....	79
4.2.1	Diesel-RK .....	81
4.2.2	Modelin Oluşturulması ve Hesaplamalar .....	82
4.2.2.1	Motorun Tanımlanması.....	82
4.2.2.2	Yakıtların Seçilmesi .....	83
4.2.2.3	Yakıt Demeti Modeli.....	83
4.2.2.4	Yakıt Buharlaştırma Modeli .....	85
4.2.2.5	Isı Yayılım Modeli .....	86
4.2.2.6	Isı Transferi Modeli.....	88
4.2.2.7	NO <sub>x</sub> Emisyon Modeli.....	89
4.2.2.8	Duman Koyuluğu-PM Emisyon Modeli .....	89
<b>5.</b>	<b>BULGULAR .....</b>	<b>91</b>
5.1	Biyodizel Üretimi .....	91
5.1.1	Bitkisel Yağlardan Biyodizel Üretimi .....	91
5.1.1.1	Ester İçeriği .....	92
5.1.1.2	Biyodizel Verimi.....	94
5.1.1.3	Yoğunluk.....	96
5.1.1.4	Kinematik Viskozite.....	98
5.1.2	Atık Yağdan Biyodizel Üretimi .....	100



5.1.2.1	Ester İçeriği .....	100
5.1.2.2	Biyodizel Verimi .....	103
5.1.2.3	Yoğunluk .....	104
5.1.2.4	Kinematik Viskozite .....	106
5.1.3	Motor Test Yakıtı Üretimi .....	108
5.1.4	Değerlendirme .....	113
5.2	Motor Testleri .....	114
5.2.1	Motor Performansı .....	115
5.2.1.1	Özgül Yakıt Tüketimi ( $b_e$ ) .....	115
5.2.1.2	Efektif Verim ( $\eta_e$ ) .....	118
5.2.1.3	Egzoz Gazı Sıcaklığı (EGS) .....	120
5.2.2	Egzoz Emisyonları .....	122
5.2.2.1	Hidrokarbonlar (HC) .....	123
5.2.2.2	Karbon Monoksit (CO) .....	125
5.2.2.3	Karbon Dioksit (CO <sub>2</sub> ) .....	126
5.2.2.4	Azot Oksit (NO <sub>x</sub> ) .....	128
5.3	Motor Simülasyonu .....	131
5.3.1	Püskürtme Gecikmesi ve Enjeksiyon zamanı .....	131
5.3.2	Silindir İçi Gaz Basıncı (P) .....	132
5.3.3	Isı Yayılım Oranı (IYO) .....	135
5.3.1	Tutuşma Gecikmesi .....	137
5.3.2	Duman Koyuluğu ve Partikül Madde (PM) Emisyonları .....	138
<b>6.</b>	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>140</b>
<b>7.</b>	<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>143</b>
<b>8.</b>	<b>EKLER .....</b>	<b>158</b>

# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 1.1: Transesterifikasyon reaksiyonunun gelişimi.....	17
Şekil 1.2: Elektromanyetik dalga spektrumu.....	23
Şekil 1.3: Konvansiyonel ve mikrodalga ısıtma mekanizmaları . .....	27
Şekil 1.4: Mikrodalga destekli ısıtma. ....	28
Şekil 1.5: Laboratuvar ölçekli konvansiyonel biyodizel üretim sistemi.....	34
Şekil 1.6: Pilot ölçekli biyodizel reaktörü . . . . .	35
Şekil 1.7: Mikrodalga sentez ünitesi.....	36
Şekil 1.8: Mikrodalga fırından dönüştürülmüş biyodizel üretim sistemi . . . . .	36
Şekil 2.1: Biyodizel reaktörü ve saflaştırma ünitesi bileşenlerinin şematik gösterimi.....	44
Şekil 2.2: Reaktör ve bileşenlerinin şematik gösterimi. ....	46
Şekil 2.3: Reaktör tankı imalatı. ....	47
Şekil 2.4: Teflon ile kaplanmış reaktör tankı iç yüzeyi ve reaktör bileşenleri. ....	48
Şekil 2.5: Akışkan viskozitesine bağlı karıştırıcı tipleri . . . . .	48
Şekil 2.6: Reaktör kapağı: (a) üst görünüş, (b) alt görünüş. ....	50
Şekil 2.7: Reaktör güç merkezi.....	52
Şekil 2.8: Reaktör kontrol ekranı.....	52
Şekil 2.9: PLC sisteminin programlaması. ....	53
Şekil 2.10: Reaktör kontrol ekranı ara yüzünün tasarlanması. ....	54
Şekil 2.11: Mikrodalga destekli biyodizel reaktörünün önden görünümü. ....	54
Şekil 2.12: Mikrodalga destekli biyodizel reaktörünün üstten görünümü.....	55
Şekil 3.1: Biyodizel üretimi akış şeması. ....	59
Şekil 3.2: Biyodizel-gliserol faz ayrımı.....	64
Şekil 3.3: Reaksiyon sürelerine göre biyodizel numuneleri. ....	64
Şekil 3.4: Biyodizelin yıkanma (saflaştırılma) işlemi. ....	65
Şekil 4.1: Motor test yakıtlarının genel görünümü.....	73
Şekil 4.2: Motor test düzeneği genel görünümü.....	74
Şekil 4.3: Motor test düzeneği bileşenlerinin görünümü.....	76
Şekil 4.4: OTAM I-LAB yazılımı ekran görüntüsü. ....	77
Şekil 4.5: Motor karakteristik ve yapısal özelliklerinin tanımlanması. ....	82
Şekil 4.6: Yakıt demetinin yedi karakteristik bölgesi.....	84
Şekil 5.1: Bitkisel yağ biyodizellerinin reaksiyon süresi-ester içeriği değişimi.....	93

<b>Şekil 5.2:</b> Bitkisel yağ biyodizellerinin reaksiyon süresi-verim değişimi. ....	95
<b>Şekil 5.3:</b> Bitkisel yağ biyodizellerinin reaksiyon süresi-yoğunluk değişimi. ....	97
<b>Şekil 5.4:</b> Bitkisel yağ biyodizellerinin reaksiyon süresi-viskozite değişimi. ....	99
<b>Şekil 5.5:</b> Farklı KOH oranları için reaksiyon süresi–AAYB ester içeriği değişimi.....	101
<b>Şekil 5.6:</b> Farklı KOH oranları için reaksiyon süresi–AAYB verimi değişimi. ....	104
<b>Şekil 5.7:</b> Farklı KOH oranları için reaksiyon süresi–AAYB yoğunluk değişimi. .	105
<b>Şekil 5.8:</b> Farklı KOH oranları için reaksiyon süresi–AAYB viskozite değişimi...	106
<b>Şekil 5.9:</b> Motorin ve AYB yakıtlarının motor yüküne bağlı $b_e$ değişimi.....	117
<b>Şekil 5.10:</b> Motorin ve AYB yakıtlarının motor yüküne bağlı $\eta_e$ değişimi.....	118
<b>Şekil 5.11:</b> Motorin ve AYB yakıtlarının motor yüküne bağlı EGS değişimi. ....	121
<b>Şekil 5.12:</b> Motorin ve AYB yakıtlarının motor yüküne bağlı HC emisyonu değişimi. ....	124
<b>Şekil 5.13:</b> Motorin ve AYB yakıtlarının motor yüküne bağlı CO emisyonu değişimi. ....	125
<b>Şekil 5.14:</b> Motorin ve AYB yakıtlarının motor yüküne bağlı CO <sub>2</sub> emisyonu değişimi.....	127
<b>Şekil 5.15:</b> Motorin ve AYB yakıtlarının motor yüküne bağlı NO <sub>x</sub> emisyonu değişimi. ....	129
<b>Şekil 5.16:</b> Motorin ve SYB20'nin motor yüküne bağlı enjeksiyon ve püskürtme gecikme süreleri.....	131
<b>Şekil 5.17:</b> Motorin ve SYB20'nin motor yükü ve °KMA'ya bağlı silindir içi gaz basıncı değişimi.....	133
<b>Şekil 5.18:</b> Motorin ve SYB20'nin motor yüküne bağlı $P_{maks}$ değerleri. ....	134
<b>Şekil 5.19:</b> Motorin ve SYB20'nin $P_{maks}$ konumları (°KMA). ....	135
<b>Şekil 5.20:</b> Motorin ve SYB20'nin motor yükü ve KMA'ya bağlı ısı yayılımları...	136
<b>Şekil 5.21:</b> Motorin ve SYB20'nin motor yüküne bağlı IYO <sub>maks</sub> değerleri.....	136
<b>Şekil 5.22:</b> Motorin ve SYB20'nin motor yüküne bağlı tutuşma gecikmeleri.....	138
<b>Şekil 5.23:</b> Motorin ve SYB20'nin motor yüküne bağlı duman koyuluğu ve PM emisyon değerleri.....	139

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 1.1:</b> Uluslararası biyodizel ve dizel yakıtı (motorin) standartları. ....	7
<b>Tablo 1.2:</b> Bazı bitkisel yağların asit kompozisyonları .....	13
<b>Tablo 1.3:</b> Bazı bitkisel yağlara ait özellikler . ....	13
<b>Tablo 1.4:</b> Motorin ve bazı bitkisel yağların temel bileşenleri . ....	14
<b>Tablo 1.5:</b> Türkiye yağlık bitki üretimi .....	16
<b>Tablo 1.6:</b> Bazı materyallerin dielektrik özellikleri ve dalma derinliği değerleri ....	26
<b>Tablo 1.7:</b> Konvansiyonel ve mikrodalga destekli biyodizel üretim çalışmaları.....	33
<b>Tablo 2.1:</b> 2.45 GHz mikrodalga ışıma altında bitkisel yağların ortalama dielektrik özellikleri . ....	46
<b>Tablo 3.1:</b> Biyodizel üretiminde kullanılan yağların bazı karakteristik özellikleri...	57
<b>Tablo 3.2:</b> Biyodizel üretiminde kullanılan yağların yağ asidi kompozisyonları. ....	58
<b>Tablo 3.3:</b> Cannon-Fenske viskozitemetre tüpü çeşitleri ve ölçüm aralıkları .....	68
<b>Tablo 4.1:</b> Test motorunun teknik özellikleri.....	73
<b>Tablo 4.2:</b> Dinamometrenin teknik özellikleri. ....	74
<b>Tablo 4.3:</b> Gaz analiz cihazının teknik özellikleri.....	76
<b>Tablo 4.4:</b> Test yakıtlarının Diesel-RK kütüphanesindeki özellikleri.....	83
<b>Tablo 5.1:</b> Bitkisel yağ biyodizellerinin ester içeriği değerleri. ....	93
<b>Tablo 5.2:</b> Bitkisel yağ biyodizellerinin biyodizel verim değerleri. ....	95
<b>Tablo 5.3:</b> Bitkisel yağ biyodizellerinin yoğunluk değerleri.....	97
<b>Tablo 5.4:</b> Bitkisel yağ biyodizellerinin viskozite değerleri. ....	99
<b>Tablo 5.5:</b> Farklı KOH oranları için AAYB ester içeriği değerleri. ....	101
<b>Tablo 5.6:</b> Farklı KOH oranları için AAYB verimi değerleri.....	104
<b>Tablo 5.7:</b> Farklı KOH oranları için AAYB yoğunluk değerleri. ....	106
<b>Tablo 5.8:</b> Farklı KOH oranları için AAYB viskozite değerleri.....	107
<b>Tablo 5.9:</b> AYB, KYB, SYB ve motorinin detaylı yakıt özellikleri .....	109
<b>Tablo 5.10:</b> Biyodizellerin yağ asidi metil esteri içerikleri dağılımı.....	111
<b>Tablo 5.11:</b> AYB'nin molekül ağırlığı ve kapalı kimyasal formülünün hesaplanması. ....	112
<b>Tablo 5.12:</b> Biyodizel yakıtlarının motorine kıyasla $b_e$ % farkları. ....	117
<b>Tablo 5.13:</b> Biyodizel yakıtlarının motorine kıyasla $\eta_e$ % farkları. ....	118
<b>Tablo 5.14:</b> Biyodizel yakıtlarının motorine kıyasla EGS % farkları. ....	122
<b>Tablo 5.15:</b> Biyodizel yakıtlarının motorine kıyasla HC emisyonu % farkları. ....	124

<b>Tablo 5.16:</b> Biyodizel yakıtlarının motorine kıyasla CO emisyonu % farkları. ....	125
<b>Tablo 5.17:</b> Biyodizel yakıtlarının motorine kıyasla CO <sub>2</sub> emisyonu % farkları. ....	127
<b>Tablo 5.18:</b> Biyodizel yakıtlarının motorine kıyasla NO <sub>x</sub> emisyonu % farkları. ....	129

## SEMBOL LİSTESİ

<b>İYM</b>	: İçten yanmalı motorlar
<b>EPDK</b>	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
<b>YEGM:</b>	: Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü
<b>TUİK</b>	: Türkiye İstatistik Kurumu
<b>AB</b>	: Avrupa Birliği
<b>EN 14214</b>	: Avrupa Birliği biyodizel standartları
<b>SYA</b>	: Serbest yağ asidi
<b>NaOH</b>	: Sodyum hidroksit
<b>KOH</b>	: Potasyum hidroksit
<b>CH<sub>3</sub>ONa</b>	: Sodyum metoksit
<b>CH<sub>3</sub>OK</b>	: Potasyum metoksit
<b>f</b>	: Frekans
<b>ε</b>	: Bağıl geçirgenlik
<b>ε'</b>	: Dielektrik sabiti
<b>ε''</b>	: Dielektrik kayıp faktörü
<b>tanδ</b>	: Tanjant kayıp faktörü
<b>μ</b>	: Dipol moment değerleri
<b>AYB</b>	: Ayçiçek yağı biyodizeli
<b>KYB</b>	: Kanola yağı biyodizeli
<b>SYB</b>	: Soya yağı biyodizeli
<b>AAVB</b>	: Atık ayçiçek yağı biyodizeli
<b>ÜÖN</b>	: Üst ölü nokta
<b>AÖN</b>	: Alt ölü nokta
<b>ID</b>	: Alt ısı değer
<b>n</b>	: Motor hızı (devir sayısı)
<b>K<sub>d</sub></b>	: Motor güç düzeltme faktörü
<b>P<sub>e</sub></b>	: Efektif motor gücü
<b>B<sub>e</sub></b>	: Kütleli yakıt tüketimi
<b>KMA</b>	: Krank mili açısı
<b>EGS</b>	: Egzoz gaz sıcaklığı
<b>CO</b>	: Karbon monoksit

<b>CO<sub>2</sub></b>	: Karbon dioksit
<b>HC</b>	: Hidrokarbon
<b>NO</b>	: Azot monoksit
<b>NO<sub>2</sub></b>	: Azot dioksit
<b>NO<sub>x</sub></b>	: Azot oksit
<b>PM</b>	: Partikül madde
<b>PAH</b>	: Poliaromatik hidrokarbon
<b>K</b>	: Buharlaşma katsayısı
<b>CN</b>	: Setan sayısı
<b>φ<sub>1</sub>, φ<sub>2</sub>, φ<sub>3</sub></b>	: Yanmanın tamamlanma miktarını ifade eden fonksiyonlar
<b>x</b>	: Yanmış yakıt oranı
<b>C</b>	: Isı transferi artırma katsayısı
<b>S<sub>p</sub></b>	: Piston hızı
<b>P<sub>maks</sub></b>	: Maksimum silindir içi gaz basıncı
<b>IYO</b>	: Isı yayılım oranı
<b>IYO<sub>maks</sub></b>	: Maksimum ısı yayılım oranı
<b>HAD</b>	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği

## ÖNSÖZ

Başta değerli yardım ve katkılarından dolayı tez danışman hocam Doç. Dr. Nadir İLTEN ve ilk tez danışman hocam, emekli öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Hayrettin YÜKSEL'e derin hürmet ve şükranlarımı sunarım. Ayrıca, çalışmalarım boyunca sahip olduğu engin vizyon ve akademik tecrübesiyle rehberlikte bulunan Prof. Dr. Hakan Serhad SOYHAN'a, yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Prof. Dr. Bedri YÜKSEL'e, verdiği emeklerden dolayı saygıdeğer Doç. Dr. Cenk ÇELİK'e, deney ve analizlerdeki yardım ve katkılarından dolayı dostum Yrd. Doç. Dr. Hasan KÖTEN ve değerli hocam Prof. Dr. M. Zafer GÜL'e gönülden teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında karşılaştığım tüm maddi-manevi sorun ve sıkıntılarda her zaman yanımda olan ve samimi desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen sevgili eşim ve aynı zamanda en yakın arkadaşım olan Tuğba DEMİR'e, moral ve motivasyon kaynağım biricik oğlum Mehmet Yusuf DEMİR'e, doğumumdan bugüne en büyük fedakarlıklarla beni yetiştiren ve haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim canım annem Sema DEMİR ve babam Mehmet Can DEMİR'e teşekkürlerimi sunar, Rabbim'e bu kocaman aileye sahip olduğum için şükrederim...



# 1. GİRİŞ

Dünya genelinde toplam enerji tüketiminin büyük bir kısmını, ulaşım sektöründe içten yanmalı motorlarda (İYM) yakılan fosil kökenli yakıtlar (benzin, motorin, d.gaz vb.) oluşturmaktadır. 2016 BP Dünya Enerji İstatistikleri Raporu [1], dünyadaki en temel enerji kaynağı olan ve rafine edilmesiyle motorin, LPG, benzin, jet yakıtı ve fueloil gibi yakıtlar, üretilen petrolün tüm dünyadaki enerji ihtiyacının % 32.9'unu tek başına karşıladığını belirtmektedir.

2035 yılında dünya çapındaki toplam ticari taşıt ve binek otomobil filosunun çok büyük bir artışla 1.2 milyar adetten 2.4 milyar adete çıkması ve bu taşıtların büyük çoğunluğunda İYM'lar kullanılmasının devam etmesi beklenmektedir [2]. Taşıt sayısında beklenen bu hızlı yükselişin, dünya genelinde petrole olan ihtiyacın artacak olmasında en önemli faktör olacağı net bir şekilde anlaşılmaktadır. TÜİK Motorlu Kara Taşıtları İstatistikleri verilerine göre; son on yıl içerisinde Türkiye'deki motorlu karayolu taşıt sayısı, dünyayla paralel olarak çok ciddi bir artış göstererek iki katına çıkmıştır. 2016 yılındaki dizel motorlu taşıt sayısı 2004 yılına göre yaklaşık üç kat artarken benzinli taşıt sayısında önemli bir artış yaşanmamıştır [3]. Türkiye Petrolleri Ham Petrol ve Doğal Gaz Sektör Raporuna (Mayıs 2016) göre 2000-2014 yılları arasında Türkiye'nin birincil enerji tüketimi (2008 yılı dışında) sürekli artarken, petrol ve doğal gazın birincil enerji tüketimi içindeki payı %60'lar seviyelerinde seyretmiştir. 2014 yılında ise petrol ve doğal gaz tüketiminin birincil enerji içindeki payı %62 olarak kaydedilmiştir. 2015 yılında Türkiye'de yaklaşık olarak 51 bin varil/gün ham petrol üretimi yapılmış, buna karşılık 796 bin varil/gün ham petrol tüketilmiş; 503 bin varil/gün düzeyinde ham petrol ithalatı, 242 bin varil/gün düzeyinde ise işlenmiş ürün ithalatı gerçekleştirilmiştir. 2014 yılıyla kıyaslandığında ise işlenmiş ürün ithalatı düşüş gösterirken, ham petrol ithalatı ve tüketilen ham petrol miktarı artmıştır. 2015 yılında yerli ham petrol üretiminin toplam tüketime oranı %6.4 olarak gerçekleşmiştir [4]. Petrolde dışa olan bağımlılığımız, bahsi geçen veriler ile net olarak görülebilmektedir.

Petrol, ülkemiz ve dünya genelinde elzem bir ihtiyaç halindeyken, petrolün rezerv miktarı ve dağılımı coğrafi konuma göre büyük değişiklikler göstermektedir. Örneğin, Ortadoğu bölgesi dünya petrol rezervlerinin %47.7'lik bölümüne sahiptir. Ortadoğu'yu %19.4 ve %13.7'lik rezerv miktarları ile Orta - Güney Amerika ve Kuzey Amerika takip etmektedir. Daha sonra sırası ile Avrasya %8.4, Afrika %7.6, Asya ve Okyanusya %2.5 ve Avrupa %0.7'lik paya sahiptir [4]. Tahmin edilen dünya petrol rezerv ömrünün 2015 yılı için 2014'e göre 1.2 yıl azalarak 51 yıla düştüğü rapor edilmektedir [5]. Petrol rezervlerinin tükenme riskinin, enerji arzında mevcut birincil enerji kaynaklarının kullanım oranları düşünüldüğünde önlem alınması gereken önemli bir sorun olduğu anlaşılmaktadır.

Petrol kökenli yakıtların kullanılmasında karşılaşılan diğer önemli sorun ise artan çevre kirliliği ve iklim değişikliğidir. Yapılan çalışmalarda, motorlu taşıtlardan kaynaklanan hava kirliliğinin toplam hava kirliliğine oranı; ABD'de %40, Almanya'da %47, Türkiye (İstanbul)'de %72 olarak bildirilmiştir [6, 7]. Günümüzün en önemli sorunlarından küresel ısınmaya neden olan sera gazı emisyonlarının yaklaşık %19'u yine ulaştırma sektöründen kaynaklanmaktadır [8]. Petrol kökenli yakıtların kullanımı sonucu insan solunum sistemi, sinir sistemi ve çeşitli deri hastalıklarına yol açan CO, CO<sub>2</sub>, HC, İS-PM, NO<sub>x</sub> ve SO<sub>x</sub> gibi zararlı ve kirlenici emisyon gazları oluşmaktadır [9]. Ayrıca, atmosferde uzun süre kalmaları durumunda fotokimyasal sis ve asit yağmurlarına sebep olmaları, taşıt egzozu emisyon gazlarını diğer emisyon kaynaklarına göre daha önemli yapmaktadır [10]. Hava kirliliği, küresel ısınma ve iklim değişikliği problemleri ülkeleri Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi ve Kyoto Protokolü gibi zararlı emisyon salınımlarının azaltılmasına zorlayıcı ve çevreci üretim teknolojilerini destekleyen uluslararası taahhütler ortaya koymaya mecbur bırakmıştır. Türkiye de, 5 Şubat 2009'da Türkiye Büyük Millet Meclisi'nce kabulü ve 13 Mayıs 2009 tarih ve 2009/14979 Sayılı Bakanlar Kurulu kararının ardından Kyoto protokolünde emisyon azaltım yükümlülükleri taahhüdünü veren ülkeler arasına dahil olmuştur [4].

Yukarıda ifade edilenler ışığında, sınırlı rezerv miktarlarının yanında petrole olan ihtiyacın artarak devam ediyor olması, karşılaşılan çevresel sorunlar ve artan küresel ısınma, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini Türkiye dâhil tüm ülkeler için gün geçtikçe daha da artırmaktadır. Yenilenebilir enerji, sürekli faaliyet gösteren

doğal süreçlerde var olan enerji akışının kullanılmasıyla elde edilen, dolayısıyla tükenme gibi bir riski olmayan bir enerji türüdür. Yenilenebilir enerjinin çevreye olumsuz etkisi yok denecek kadar azdır. En önemli yenilenebilir enerji kaynakları jeotermal, rüzgâr, güneş, hidroelektrik ve biyokütledir [11]. Günümüzde ülkeler ya da uluslararası topluluklar sahip oldukları ekonomik, coğrafi ve sosyal özellikleriyle ilintili olarak kendilerine en uygun yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranının artırılması yönünde teşvik edici yasal düzenlemeler yürürlüğe koymakta ve Ar-Ge çalışmalarına destek vermektedir. Örneğin Avrupa Birliği (AB), enerji arz güvenliğini artırmak ve enerji üretim/kullanımının çevresel etkilerini asgari düzeye azaltmak adına 1990 yılından itibaren enerji politikalarının özelleştirilmesi ve rekabetçi bir piyasa oluşturulması yönünde çalışmalar yapmaktadır. AB’de enerji politikaları 1995 yılından itibaren Beyaz Kitap, Kyoto Protokolü ve Yeşil Kitap raporlarına göre belirlenmiştir. İklim değişikliklerini önlemek amacıyla 17 Aralık 2008 tarihinde 20-20-20 diye bilinen bir paket Avrupa Parlamentosunda kabul edilmiştir. Hazırlanan pakete göre AB’de 2020 yılına kadar kullanılan enerjinin %20’sinin yenilenebilir enerjilerden sağlanması ve sera gazı salınım düzeyinin 1990’daki değerinden %20 oranında azaltılması kararlaştırılmıştır [12].

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında biyokütle en büyük enerji potansiyeline sahip olanıdır [13]. Biyokütle enerji kaynakları kullanılarak biyogaz, biyodizel ve biyoetanol olmak üzere üç temel biyoyakıt üretilebilmektedir. Konvansiyonel İYM’lerde en çok kullanılan yenilenebilir alternatif yakıtlar sırasıyla biyoetanol ve biyodizeldir [8]. Ulaşım sektörünün genelinde en yaygın kullanılan İYM olan sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda (dizel motorlar), konvansiyonel yakıt olarak kullanılan petrol dizeline (motorin) alternatif en uygun yenilenebilir yakıt biyodizeldir. Genellikle bitkisel yağ gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen biyodizel, doğada toksik bir etki yaratmayan ve HC, CO, PM, PAH ve SO<sub>x</sub> gibi zararlı ve küresel ısınmaya neden olan emisyonlarda motorine göre büyük azalma sağlayan bir biyoyakıt çeşididir [14-16]. Biyodizelin alternatif yakıt olarak dizel motorlarda kullanılabilirliği birçok araştırmacı tarafından incelenmiş olup halen farklı hammaddelerden üretilen biyodizellerin mevcut ya da geliştirilen motorlardaki motor performansı, yanma karakteristiği ve egzoz emisyonu değerleri gerçekleştirilen deneysel ve nümerik çalışmalar ile araştırılmaya devam etmektedir [17-20].

Yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarından üretilmesi, motorine oranla kirletici emisyonlarda sağladığı iyileştirmeler gibi önemli avantajları olmasına rağmen biyodizelin yeteri düzeyde yaygınlaşmasında en büyük engel yüksek üretim maliyetleridir (motorinin yaklaşık 1.5 katı) [21]. Biyodizel üretiminde karşılaşılan bu sorunların çözümü için alternatif hammadde (atık yağ çeşitleri, mikroalgler, hayvansal yağ vd.) arayışları [22, 23] ve üretim proseslerinde daha verimli yeni teknolojilerinin (mikrodalga, ultrasonik ısıtma vd.) kullanımı [24] özellikle son yıllarda büyük önem kazanmıştır.

Bu tez çalışmasının öncelikli amacı, laboratuvar ölçekli biyodizel üretimlerinde konvansiyonel ısıtma sistemlerine göre verim artışı ve çok daha kısa sürede sentez reaksiyonlarının (transesterifikasyon) tamamlanmasını sağlayan mikrodalga teknolojisini kullanarak bitkisel yağlardan yüksek hacimde biyodizel üretilmesi olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda gerekli hesaplamalar yapılarak pilot ölçekli mikrodalga destekli biyodizel reaktörü tasarım ve imalatı gerçekleştirilmiştir. İmal edilen reaktörde bitkisel yağ olarak Türkiye’de en fazla üretimi gerçekleştirilen ayçiçek yağı, global biyodizel üretiminde en çok tercih edilen yağ çeşitleri olan kanola ve soya yağları ve atık ayçiçek yağı kullanılarak transesterifikasyon yöntemiyle EN14214 standartlarına uygun biyodizel üretilmeye çalışılmıştır. Gerçekleştirilen optimizasyon çalışması ile ideal reaksiyon parametreleri belirlenmiş, bu şartlar altında üretilen biyodizel numunelerinin yakıt özellikleri analiz edilerek mikrodalga destekli üretim ile konvansiyonel üretim metotlarının mukayesesi yapılmıştır. Üretilen biyodizeller farklı oranlarda motorinle karıştırılarak bu yakıtlarının motor performansı ve egzoz emisyonları üzerine olan etkisinin incelenmesi için bir dizel motorda sabit devir-değişken yük motor testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, yapılan sayısal modelleme ile motor testlerinde belirlenen ideal biyodizel karışımı için Diesel-RK programı kullanılarak çok bölgeli sanki boyutlu yanma simülasyonları oluşturulmuştur. Böylece simülasyonlarda test yakıtlarına ait yanma analizleri ve duman koyuluğu - PM emisyon salınım değerleri yapılan tahminlerle belirlenmeye çalışılmıştır.

Hazırlanan tezin “GİRİŞ” ana başlığı, yapılan çalışmaların teorisini ve ilgili bölümlerin literatür derlemelerini kapsamaktadır. Tezin ikinci ana başlığı olan “MİKRODALGA DESTEKLİ BİYODİZEL REAKTÖRÜ TASARIMI VE

İMALATI” altında, pilot ölçekteki mikrodalga destekli biyodizel reaktörünün tasarım ve imalat süreçleri aktarılmıştır. “BİYODİZEL ÜRETİMİ” ana başlığında gerçekleştirilen biyodizel üretimleri aşama aşama anlatılmıştır. “MOTOR TESTLERİ VE SİMÜLASYONU” ana başlığında, üretilen biyodizeller kullanılarak gerçekleştirilen motor performans-egzoz emisyon testleri ve Diesel-RK programı kullanılarak tasarlanan simülasyon modeli alt başlıklar altında anlatılmıştır. “BULGULAR” ana başlığında, elde edilen biyodizel üretim, motor testleri ve simülasyon verileri nedenleriyle birlikte irdelenerek yorumlanmıştır. Son ana başlık olan “SONUÇ VE ÖNERİLER” ile de bu çalışma sonunda elde edilen sonuçlar özet olarak aktarılmış ve çalışmamızla ilintili yapılabilecek yeni araştırmalar için önerilerde bulunulmuştur.

## 1.1 Biyodizele Genel Bakış

Biyodizel genellikle bitkisel, hayvansal veya atık yağların katalizör eşliğinde mono hidrik bir alkol ile (metanol, etanol vb.) tepkimeye sokulması sonucu elde edilen yağ asidi zincirinin mono alkil esteri olarak tanımlanmaktadır. “Biyo” kelimesi yakıtın yenilenebilir ve biyolojik olduğunu, “dizel” kelimesi ise dizel motorlarda kullanılabilirliğini ifade eder. Biyodizel, üretiminde kullanılan alkol çeşidine göre reaksiyona sokulan hammaddenin (yağ kaynağı) esteri olarak tanımlanır (metil alkol kullanılmış ise hammaddenin metil esteri, etil alkol kullanılmış ise etil esteri). Örneğin kanola yağı metil esteri, soya yağı metil esteri, kanola yağı etil esteri, soya yağı etil esteri vb. [25, 26]. Biyodizel, dizel motorlarda saf halde veya motorin ile çeşitli oranlarda karışım olarak kullanılabilir. Karışımdaki biyodizel yüzdesi "BXX" olarak gösterilmektedir. Buradaki "XX", karışımda kullanılan biyodizelin hacimsel yüzde miktarıdır. Örneğin B20; hacimce %20 biyodizel ile %80 motorinden oluşan karışımı, B100 saf biyodizeli, B0 ise motorini ifade etmektedir [25]. Genel olarak biyodizel dizel motorlarında hiçbir değişiklik yapılmadan kullanılabilen alternatif, yenilenebilir, temiz ve çevreci bir dizel yakıttır. Biyodizel, motorine göre emisyonlar, setan sayısı ve parlama noktası bakımından daha üstün bir yakıttır. Biyodizelin yağlayıcılığı da önemli özelliklerinden bir tanesidir. Düşük sülfürlü dizel yakıtlarında azalan yağlayıcılığı biyodizel kullanarak arttırmak mümkündür. Ayrıca biyodizel,

Türkiye gibi tarım ülkelerinde özellikle kırsal kesimin ekonomik yapısının güçlenmesi ve iş imkânlarının yanı sıra yan sanayinin de gelişmesine katkıda bulunabilecek stratejik bir yakıttır [14].

### 1.1.1 Biyodizelin Yakıt Özellikleri

Biyodizel büyük oranda motorine benzese de fiziksel ve kimyasal yapı farklılıklarından dolayı bazı temel yakıt özelliklerinde ufak değişiklikler göstermektedir. Örnek vermek gerekirse, bileşiminde bulunan oksijen dolayısıyla biyodizelin ısı değeri motorine göre bir miktar düşüktür. Bu durum, motordaki yanma sonunda güç kaybına ve özgül yakıt tüketim değerlerinde artışa neden olmaktadır. Biyodizelin yoğunluğu ve viskozitesi ise motorine göre bir miktar daha yüksektir. Yakıtın yoğunluk ve viskozitesinin yüksek olması enjeksiyon ucundaki püskürtme hızı ve yakıtın parçalara ayrılması yani atomizasyonu dolayısıyla da yanmayı olumsuz şekilde etkiler. Bunun yanında biyodizelin yoğunluğunun ve viskozitesinin nispeten yüksek olması, yanma odasına daha fazla yakıt alınmasını böylece biyodizel – motorin ısı değeri farkına kıyasla motorda daha az güç kaybının yaşanmasını sağlamaktadır [27]. Biyodizelin setan sayısı motorine göre daha yüksektir. Bu durum, biyodizelin kendi kendine tutuşma kabiliyetinin motorine oranla daha yüksek olmasını sağlar. Biyodizelin oksijen içeren yapısı ve setan sayısının yüksek olması, motorine göre yüksek olan yoğunluk ve viskozitenin atomizasyon ve yanmadaki olumsuz etkilerini dengeler ve yanma verimini artırır. Böylece biyodizelin motorinle eşdeğer sayılabilecek bir yanma karakteristiğine sahip olmasına sebep olur [28]. Biyodizelin motorine kıyasla üstün özelliklerinden biri de parlama noktasının oldukça yüksek olmasıdır. Parlama noktası genelde yakıtın depolanması ve güvenliği ile ilgilidir ve motor performansı üzerinde etkin bir değişiklik meydana getirmemektedir [29]. Biyodizel kullanımında karşılaşılan en önemli sorunlar, biyodizelin çözücü etkisinin olması, düşük oksidasyon kararlılığı ve soğuk akış özellikleri gibi yapısal özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Biyodizel yakıtına eklenecek doğal ve sentetik katkı maddeleriyle bu özelliklerin birçoğu iyileştirilip motora karşı olumsuz etkileri ortadan kaldırılabilmektedir [30].

### 1.1.2 Biyodizel Yakıt Standartları

Modern dizel motorlarının çoğunda direkt püskürtmeli yakıt sistemleri mevcuttur. Bu motorlar yakıt demetinin kalitesine karşı endirekt püskürtmeli motorlara göre daha hassastırlar. Bunun için kullanılacak biyodizelin yakıt özellikleri bakımından mümkün olduğunca motorine yakın olması istenir [41].

**Tablo 1.1:** Uluslararası biyodizel ve dizel yakıtı (motorin) standartları.

Özellik	Birim	EN14214 (Biyodizel)	EN590 (Motorin)
Yoğunluk	kg/m <sup>3</sup> (15°C)	860-900	820-845
Kinematik viskozite	mm <sup>2</sup> /s (40°C)	3.5-5.0	2-4.5
Parlama noktası	°C	101 min	55 min
Sülfatlanmış kül içeriği	kütleli %	0.02 maks	0.01
Soğuk filtre tıkanma noktası	°C	-	-15 Kış, +5 Yaz
Kükürt	mg/kg	10 maks	10 maks
Karbon kalıntısı	kütleli %	0.30 maks	0.30 maks
Setan sayısı	-	51 min	51 min
Toplam kirlilik	mg/kg	24 maks	24 maks
Bakır şerit korozyonu	3 saat (50°C)	No.1 maks	No.1 maks
Oksitlenme kararlılığı	saat (110°C) g.m <sup>3</sup> , saat	8.0 min	20-25
Su	mg/kg	500 maks	200 maks
Asit değeri	mg KOH/g	0.50 maks	-
İyot sayısı	-	120 maks	-
Monogliserit içeriği	kütleli %	0.7 maks	-
Digliserit içeriği	kütleli %	0.2 maks	-
Trigliserit içeriği	kütleli %	0.2 maks	-
Serbest gliserol	kütleli %	0.02 maks	-
Toplam gliserol	kütleli %	0.25 maks	-
Ester içeriği	kütleli %	96.5 min	7 maks (V/V)
Linolenik asit metil esteri	kütleli %	12 maks	-
Fosfor içeriği	mg/kg	10 maks	10 maks
1.Grup Metaller (Na + K)	mg/kg	5 maks	5 maks
2.Grup Metaller (Ca + Mg)	mg/kg	5 maks	-

Biyodizelin dizel motorlarda sorunsuz bir şekilde kullanılabilmesi için çeşitli uluslararası kalite standartları oluşturulmuştur. Dünyada en yaygın kullanılan biyodizel standartları EN 14214 (AB) ve ASTM D6751 (ABD)'dir. Ülkemizde 2005 yılında AB biyodizel standartları aynen kabul edilmiştir. 2014 yılında güncellenen bu standart (TS EN 14214+A1), "Dizel Motorlarda ve Isıtma Uygulamalarında Kullanılan Yağ Asidi Metil Esterleri (YAME/Biyodizel)" olarak adlandırılmış ve biyodizel, ısıtma ve oto-biyodizelinin her ikisini de kapsayan tek bir yakıt türü olarak tanımlanmıştır. Tablo 1.1'de, EN 14214 biyodizel standartları ile AB ve Türkiye'de geçerli olan EN 590 dizel yakıtı (motorin) standartları (maks %7 biyodizel içeren) karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

### **1.1.3 Dünyada Biyodizelin Durumu**

Biyodizel üretiminin yerli kaynaklar ile sürdürülebilmesi için en önemli etken hammadde teminidir. Dünyanın en büyük biyodizel üreticisi olan ülkeler incelendiğinde, biyodizel üretiminde kullandıkları hammaddeyi kendi ülkelerinde en çok yetiştirilen ve gıda arzı fazlası olan yağlardan seçtikleri görülmektedir. Bu başlıkta, biyodizel üretiminde söz sahibi olan ve sektörü yönlendiren AB, ABD ve bu sektörde hızla gelişmekte olan diğer ülkelerdeki biyodizelin durumu özetle incelenmiştir.

Dünyada en büyük biyodizel üreticisi konumunda olan AB'de yayımlanan 2003/30/EC sayılı biyoyakıt direktifi ile 2010 yılında AB genelinde ulaştırma sektöründe kullanılan yakıtın %5.75'inin biyoyakıtlardan karşılanması hedeflemiştir. 2009 yılında yeni bir direktifle bu hedef 2020 yılı için %10 olarak revize edilmiştir. Bu hedeflere ulaşabilmek için AB ülkelerinde, hem enerji tarımı ekonomik olarak desteklenmekte, hem de biyodizel yakıtına vergi indirimi uygulanmaktadır [31]. AB'de hazırlanan teşviklerle birlikte 2006-2009 yılları arasında %360 artış yaşayan biyodizel üretim kapasitesi, 2010 ve sonrasında ortalama %4-5 oranında artış göstermiştir. 2008'den bu yana düşen ham petrol fiyatları, yükselen bitkisel yağ fiyatları, artan ithalat ve finansal kriz bu düşüşün nedenleri olarak gösterilmektedir. Biyodizel üretim hızındaki artış bir miktar azalsa da, yıllar içerisinde AB biyodizel üretim kapasitesi devamlı artmıştır ve artmaya da devam etmektedir. Sunulan son



veriler 2015 yılına kadardır ve AB'nin son 10 yıllık biyodizel üretimine bakıldığında 2006 yılında 3,673,700 ton eşdeğer petrol olan yıllık üretim, 2015 yılında 11,076,800 ton eşdeğer petrole kadar yükselmiştir. 28 üyesi olan AB ülkeleri içerisinde en büyük biyodizel üreticisi olan Almanya, 2015 yılında AB toplam biyodizel üretiminin %24.97'sini tek başına gerçekleştirmiştir [32]. AB'de en yaygın kullanılan biyodizel hammaddesi kanola (kolza) yağıdır [33].

2005 yılında ABD'de Enerji Politikası Kanunu düzenlemesi ile motorin ile harmanlanan biyodizele litre başına 0.264 \$ vergi indirimi teşviki uygulanmaya başlanmıştır. 2007 yılında ise yürürlüğe koyulan Enerji Bağımsızlığı ve Güvenliği Kanunu ile 2022 yılında 136 milyar litre biyoyakıtın karayolu taşımacılığında kullanılması hedefi resmileştirilmiştir [31]. ABD Enerji Bilgilendirme Yönetimi (EIA, Mart 2017)'nin son verilerine göre; ABD biyodizel üretimi 2015 yılında 1.268 milyon galon (4.793 milyon litre), 2016 yılında ise 1.568 milyon galon (5.927 milyon litre) olarak gerçekleşmiştir. Yayımlanan rapora göre; soya, mısır ve kanola yağları biyodizel üretiminde çoğunlukla kullanılan bitkisel yağlardır. Bunların dışında tavuk yağı, diğer hayvansal yağlar (iç yağı vb.), kullanılmış kızartma yağları gibi yağlar da kullanılmaktadır. Bu hammaddeler içerisinde soya yağı, 2015 yılında toplam biyodizel üretiminde kullanılan yağların %52.45'ini, 2016 yılında ise %55.16'sını tek başına oluşturmaktadır [34].

Dünyanın en hızlı gelişen ve nüfusu artan ülkelerinden olan Hindistan'da 2003 yılında yürürlüğe giren Ulusal Biyodizel Programı ile yerli üretim jojoba bitkisinden biyodizel üretimi teşvik edilmeye başlanmıştır. Yapılan düzenleme ile 2003-2007 yılları arasında 400 bin, 2007-2012 yılları arasında ise daha fazla alanda jojoba ekimi yapılarak üretilen biyodizelin motorin ile %20 oranında harmanlaması hedeflenmiştir. Ayrıca jojoba kökenli biyodizel yakıtı tüm vergilerden muaf tutulmuştur [35]. Biyoyakıt sektöründe en önemli ülkelerin başında gelen Brezilya'da 2005 yılında yürürlüğe giren Biyodizel Kanunu'nda biyodizelin motorin ile 2008 yılında %2, 2013 yılında ise %5 harmanlanması kararlaştırılmıştır. Dünyanın en büyük palm yağı üreticisi olan Endonezya'da 2009 yılından itibaren motorine %1 biyodizel harmanlama zorunluluğu getirilmiştir. Malezya'da ise ulaştırma sektöründe kullanılan dizel yakıtının %5 oranında palm yağından üretilen biyodizel içerme zorunluluğu mevcuttur [31].

#### 1.1.4 Türkiye’de Biyodizelin Durumu

Türkiye biyodizel üretim kapasitesine dair tutarlı ve yeterli veri bulunmamaktadır ancak bazı devlet kurumları ve üretici birlikleri tarafından kapasite bilgileri sunulmaktadır. EPDK verilerine göre biyodizel işletme lisansına sahip işletmelerin son yıllarda giderek azaldığı görülmektedir. 2011 yılı için işletme lisansı bulunan işletme sayısı 36 iken 2012 yılında bu sayı 25'e düşmüştür. YEGM verilerinde Türkiye’de 2015 yılı için toplam 24 kayıtlı biyodizel işletmesi bulunduğu belirtilmiş ancak toplam kapasite hakkında bilgisi verilmemiştir. ALBİYOBİR’in yayımladığı sektör raporuna göre ise 2015 yılında toplam kurulu biyodizel üretim kapasitesi 1.5 milyon ton civarındadır. Bu rapora göre, lisansı bulunan 24 firmadan sadece üçünde kayda değer toplu üretim potansiyeli ve kapasitesine sahip üretim gerçekleştirilmektedir. Bu firmalar faal yıllık üretim kapasiteleriyle birlikte; DB Tarımsal - 100,000 ton, Aves A.Ş. - 55,000 ton ve DEHA Tarımsal - 50,000 ton şeklindedir. Türkiye’nin biyodizel market ve ihracat/ithalat oranı verilerine göre 2012 yılında 24 lisanslı işletme bulunmasına rağmen yalnızca 1 işletme tarafından 17,729 ton biyodizel üretimi yapılmış, dağıtıcı lisansı sahiplerine ise 18,336 ton oto biyodizel satışı gerçekleştirilmiştir. 2012 yılı için akaryakıt dağıtım şirketleri tarafından toplam 24,620 ton biyodizel ithalatı yapılmıştır. 2013 yılı verilerine göre toplam 21,876 ton biyodizel üretimi yapılmış, dağıtıcı lisans sahiplerine ise 21,595 ton biyodizel satılmıştır. EPDK aylık raporları verilerine göre rafinerici ve dağıtıcı lisansı sahiplerinin temin ettikleri biyodizel miktarı Ocak 2014 için 1,690 ton, Ocak 2015 için ise 3,109 ton olarak gerçekleşmiştir. Bu veriler doğrultusunda, sektör hacminin son yıllarda yeniden artışa geçtiği görülmektedir [11].

EPDK’nın düzenlediği ve 27 Eylül 2011 tarihli Resmi Gazetede yayımlanarak yürürlüğe giren tebliğ ile 01.01.2014 tarihinde başlamak üzere motorine yerli tarım ürünlerinden elde edilen biyodizelin en az %1 (hacimsel bazda) oranında katılması zorunluluğu getirilmiştir. Bu oran 2015 ve 2016 yılları için sırasıyla en az %2 ve %3 olarak belirlenmiştir. Türkiye’de yağ tüketiminin büyük oranda ithalat yoluyla karşılanması sebebiyle duyulan endişe ve itirazlar, EPDK’nın 25 Haziran 2013 tarihli tebliği ile bu zorunluluğu uygulamaya geçirmeden yürürlükten kaldırmasına neden olmuştur. Biyodizel için nihai ürün desteği, 05 Haziran 2007 tarihli Bakanlar Kurulu kararı ile yerli tarım ürünlerinden üretilen oto biyodizelin motorine %2 oranında

harmanlanması ile bu kısmın ÖTV'den muaf tutulması şeklindedir. Bu indiriminden yalnızca rafinerici ya da dağıtıcı firma faydalanabilmektedir. Motorin-biyodizel karışımlarında harmanlama oranı %2 den fazla olan yakıtlar için sadece %2'lik kısımda ÖTV indirim geçerlidir. 31 Aralık 2013 tarihli resmi gazetede yayımlanan Özel Tüketim Vergisi Genel Tebliği'ne göre atık bitkisel kızartma yağlarından ve son kullanma tarihi geçmiş bitkisel yağlardan üretilen biyodizelin de yerli tarım ürünü kaynaklı biyodizel gibi %2'ye kadar ÖTV indiriminden yararlanması kararlaştırılmıştır. Son olarak EPDK, 16 Haziran 2017 tarihli resmi gazetede (Sayı: 30098) dizel yakıtı türlerine biyodizel harmanlanması hakkında 01 Ocak 2018 tarihinden itibaren yürürlüğe girecek bir tebliğ yayımlamıştır. Bu tebliğe göre; dağıtıcı lisansı sahipleri tarafından bir takvim yılı içerisinde ithal edilen ve kara tankeri dolum üniteleri hariç rafinericiden temin edilen motorininin toplamına en az %0.5 (hacimce) oranında yerli tarım ürünlerinden ve/veya bitkisel atık yağlardan üretilmiş biyodizelin harmanlanmış olması zorunluluğu getirilmiştir.

## **1.2 Biyodizel Üretimi**

### **1.2.1 Bitkisel Yağlar ve Özellikleri**

Biyodizel hammaddesi olarak bitkisel yağlar, hayvansal yağlar, alg ve bakteriler, atık yağlar ve yağ rafinasyon atıkları kullanılmaktadır. Bu hammaddeler içerisinde en çok tercih edilen bitkisel yağlardır [36]. Biyodizelin atık, yenilemeyen ve hayvansal yağlardan üretilmesi biyodizel hammadde maliyeti bakımından bitkisel yağların kullanılmasına göre avantajlıdır. Ancak bu yağlardan biyodizel üretimi prosesi, genellikle birçok ilave işlem ve maliyet içeren önışlem (esterifikasyon) gerektiği için bitkisel yağlardan biyodizel üretimine göre daha zordur. Ayrıca, üretilen biyodizelin ilgili yakıt standartlarına uygun olmama ihtimali vardır [17].

Biyodizel standartları hazırlanırken, o ülkede en fazla üretimi gerçekleştirilen yağlı tohumlar baz alındığı için (kanola, soya yağı vb.) üretilen biyodizelin yakıt performansı ve soğuk akış özellikleri de daha çok bu yağ kaynaklarına dayandırılmıştır. Biyodizel üretiminde farklı yağ çeşitleri kullanılsa da yağların

kimyasal yapıları birbirleriyle benzeşmekte çünkü yağların temel yapısı %90-98 oranında trigliserit, az miktarda di ve monogliserit ve gliserolden oluşmaktadır. Farklı hammaddelerden üretilmiş biyodizellerin yakıt özellikleri, önemli ölçüde kullanılan hammadde yağ asitlerinin karbon zincir uzunlukları ve doymamışlık oranlarında göre değişmektedir [36]. Trigliserit, 3 mol yağ asidinin 1 mol gliserol ile esterleşmesiyle; benzer olarak digliserit ve monogliserit ise sırasıyla 2 mol ve 1 mol yağ asidinin 1 mol gliserol ile esterleşmesiyle meydana gelir. Yağ asitleri bağ yapmayıp serbest halde iseler serbest yağ asidi (SYA) olarak adlandırılır. Ortalama olarak bir trigliserit molekülünde gliserol kütlesi 41 g, yağ asidi radikallerinin kütleleri ise 650-790 g civarında değişmektedir. Dolayısıyla trigliserit moleküllerinin kütlece %94-%96'sını oluşturan yağ asidi radikallerinin, yağların fiziksel ve kimyasal özelliklerini önemli ölçüde etkileyeceği söylenebilir [8]. Biyodizelin yağ asit kompozisyonu oranına göre değişkenlik gösteren en önemli yakıt özellikleri setan sayısı, viskozite, soğuk akış özellikleri, oksidasyon kararlılığı ve yağlayıcılıklarıdır [37].

Bitkisel yağların temel yapı elemanları olan yağ asitleri, kapalı formülü R-COOH ve çoğunlukla uzun zincirli olan mono karboksilik asitlerdir. Yağ asitleri genellikle düz zincirlidir ve çift sayıda karbon içermektedirler. Yağ asitlerinin karbon uzunlukları 2 ila 6 aralığında ise kısa zincirli, 8 ila 10 aralığında ise orta uzunlukta zincirli, 12 ila 24 aralığında ise uzun zincirli yağ asitleri olarak tanımlanırlar. Yalnızca tek bir çift bağ içeren yağ asitlerine tekli doymamış, birden fazla çift bağ içeren yağ asitlerine ise çoklu doymamış yağ asitleri denir. Doymuş yağlar çift bağ içermezler. Yağ asitleri genellikle kısa semboller ile ifade edilmektedirler. Örnek olarak palmitoleik asit 16:1 şeklinde sembolize edilmektedir. Bu ifadede 16 karbon sayısını, :1 ise çifte bağ sayısını tanımlar [38]. Genel itibarıyla biyodizelin setan sayısı, ısı değeri, erime noktası ve viskozitesi biyodizelin yağ asidi bileşiminin bağ uzunluğunun artmasıyla artar, doymuşluğun azalmasıyla azalır. Doymuş yağ asidi içeriği yüksek olan biyodizelin fakir düşük sıcaklık özelliklerine sahip olması, bu yakıtın dizel motorlarında kullanımını sınırlandırmaktadır. Bundan dolayı hayvansal yağlar gibi doymuşluk oranı yüksek yağlar, doymamışlık oranı yüksek bitkisel yağlar ile karıştırılarak biyodizele dönüştürülmekte, böylece yakıtın soğuk akış özellikleri iyileştirilebilmektedir [39]. Tablo 1.2 ve Tablo 1.3'te biyodizel üretiminde yaygın kullanılan bitkisel yağların yağ asidi kompozisyonları ve bazı özellikleri sunulmuştur [40].

**Tablo 1.2:** Bazı bitkisel yağların asit kompozisyonları [40].

Yağ Çeşidi	Yağ asit kompozisyonu (kütlesel %)									
	14:0	16:0	18:0	20:0	22:0	24:0	18:1	22:1	18:2	18:3
Ayçiçek	0	6	3	0	0	0	17	0	74	0
Kolza	0	3	1	0	0	0	64	0	22	8
Soya	0	12	3	0	0	0	23	0	55	6
Mısır	0	12	2	-	0	0	25	0	6	-
Pamuk	0	28	1	0	0	0	13	0	58	0

**Tablo 1.3:** Bazı bitkisel yağlara ait özellikler [40].

Yağ Çeşidi	Viskozite (38°C,mm <sup>2</sup> /s)	Isıl değer (Mj/kg)	Akma Nok. (°C)	Parlama Nok. (°C)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
Ayçiçek	33.9	39.6	-15.0	274	0.9161
Kolza	37.0	39.7	-31.7	246	0.9115
Soya	32.6	39.6	-12.2	254	0.9138
Mısır	34.9	39.5	-40.0	277	0.9095
Pamuk	33.5	39.5	-15.0	234	0.9148

### 1.2.1.1 Bitkisel Yağlar

Biyolojik maddeler içinde biyodizel, yağ asitleri ve bunları içeren yağlar en yüksek ısıl değere sahip olanlardır. Bu nedenle bitkisel yağlar konvansiyonel sıvı yakıtlara en yakın biyolojik maddelerdir ve yağsız biyolojik maddelere nazaran daha yüksek ısı enerjisine sahiptirler. Yağlı biyolojik maddeler, yenilenebilir yapısıyla sürdürülebilir bir biyodizel üretimini mümkün kılarlar. Biyodizel kaynakları olarak yağlı tohum bitkilerinin birçok iklim kuşağında yetiştirilebilmeleri, işleme kolaylıkları, işlemeden sonra oluşan artıkların ve yan ürünlerin değerlendirilmesi bitkisel yağların diğer avantajları arasında sayılabilir. Dünya genelinde 4000'den daha fazla yağı çıkarılan bitki çeşidi bulunmaktadır. Bu ürünler tarımsal girdiler ve yetiştirme tekniklerine göre farklılıklar arz etmektedirler. Biyodizel üretimine en

uygun ve ticari olarak en çok tercih edilen bitkisel yağlar genellikle tekli doymamış yağ asidi içeren soya, kanola, ayçiçeği, palm ve pamuk yağdır.

**Tablo 1.4:** Motorin ve bazı bitkisel yağların temel bileşenleri [41].

	<b>Birim</b>	<b>Motorin</b>	<b>Kolza (Kanola)</b>	<b>Soya</b>	<b>Ayçiçeği</b>
Karbon (C)	%	86	77.7	77.8	77.6
Hidrojen (H)	%	13	12.0	11.8	11.7
Oksijen (O)	%	0.4	10.9	10.7	11.1
Kükürt (S)	%	0.3	-	-	-
Isıl Değeri	Mj/kg	41.6-45.2	35.8	36.1	36.2

Tablo 1.4'te bazı bitkisel yağların ve motorinin karbon, hidrojen, oksijen ve ısıl değerleri sunulmuştur. Buna göre bitkisel yağların karbon ve hidrojen içeriğinin motorine benzer olduğu, oksijenin ise daha yüksek olduğu görülmektedir. Biyodizellerin motorine kıyasla daha düşük olan ısıl değerleri, bu bileşen oranı farklılıklarından kaynaklanmaktadır [41].

Dünya genelinde biyodizel üretiminde çok yaygın kullanılan ve yapılan bu çalışmada biyodizel hammaddesi olarak seçilen ayçiçek, soya ve kanola yağlarını kısaca tanıtmak gerekirse:

Ayçiçek yağı, dane yağ oranı %35-50 aralığında olan *Helianthus annuus* bitkisinin tohumlarından elde edilen bir yağ çeşididir. Dünya genelinde en çok ayçiçek ekimi yapan ülkeler Rusya, Ukrayna, Arjantin, Macaristan, Fransa, İspanya, Hindistan ve Türkiye'dir. Türkiye'de ayçiçek bitkisinin tarımı yoğunlukla Trakya ve Marmara bölgelerimizde gerçekleştirilmektedir. Ayçiçek yağının yağ asit bileşimi genetik yapı, ekim zamanı, yetiştirilme bölgesi-iklim koşulları, hasat zamanı ve bitkinin beslenme durumuna göre değişiklik gösterir. Ülkemizde ayçiçek yağı, fiyatının düşük ve teminin kolay olması dolayısıyla en çok tüketilen yağ çeşididir. Ayçiçek yağı dünya sıralamasında soya ve palm (palmiye) yağlarından sonra en çok üretilen ve tüketilen üçüncü yağdır [42].

Soya yağı, dane yağ oranı %18-20 aralığında olan soya fasulyesi tohumlarından üretilir. Dünya genelinde geniş bir tüketici yelpazesine sahiptir. ABD ve Avrupa'daki toplam sıvı yağ pazarının %50'sini, Kanada'dakinin ise %80'nini soya yağı oluşturmaktadır [42]. ABD'de biyodizel hammaddesi olarak en çok kullanılan yağ soya yağıdır [34]. Türkiye'de soya fasulyesi genellikle Adana - Çukurova bölgesinde üretilmektedir [42]. Üretimin artırılması adına gerçekleştirilecek iyi bir planlama ve ekim nöbeti sistemi ile Türkiye'de 400 bin ha alanda soya bitkisi tarımı yapılma potansiyeli vardır. Soya bitkisi Karadeniz, Trakya, Marmara, Ege, Akdeniz ve Güneydoğu Anadolu Bölgelerinde ana ürün olarak; Ege, Akdeniz ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde ise sulanır tarım alanlarında ikinci ürün olarak yetiştirilebilmektedir [43].

Kanola (kolza) yağı, kolza bitkisinin dane yağ oranı %30-42 aralığında olan tohumlarından elde edilmektedir. %5'ten az erüsik asit içeren kolza yağının erüsik asit içerik oranı, B. napus ve B. rapatürlerinin ıslah edilmesi sonucu % 2'den daha düşük seviyelere indirilmiştir. Kanola yağı %93'lük doymamış yağ oranı ile tüm sıvı yağlardan daha yüksek doymamış yağ oranına sahiptir. Kanola yağı fiyatın nispeten düşük olması ve sağlıklı bir yağ çeşidi oluşu nedeniyle dünya genelinde çokça tüketilmektedir. Kışlık ve yazlık çeşitlerinin olması, yetiştirme devresinin çok kısa sürmesi, birim alandan diğer yağ bitkilerine kıyasla daha yüksek ürün elde edilmesi kanola bitkisinin diğer yağlık bitkilere göre en önemli üstünlükleri olarak kabul edilebilir. Yağ asit bileşimi % 6.3 doymuş, % 62.4 tekli doymamış ve % 31.3 çoklu doymamış yağ asitlerinden meydana gelmektedir. Bu kompozisyon içeriği, kanola yağı biyodizelinin soğuk akış özelliklerinin diğer bitkilerden elde edilen biyodizellere göre daha iyi olmasını sağlamaktadır [42]. Kanoladan üretilen biyodizelin biyodizel yakıt standartları değerlerine uygun olması, kanolayı Avrupa'da biyodizel üretiminde en çok kullanılan yağ yapmıştır [17]. Kanola, ülkemizin iklim şartlarına ve toprak özelliklerine uyum gösteren bir bitkidir. Yaz ve kış ekimi gerçekleştirilebilen kanola bitkisi, ülkemizde genellikle Trakya ve İç Anadolu Bölgeleri'nde yetiştirilmektedir. Bunun yanında, Güneydoğu Anadolu Projesi'nde (GAP) de sulu tarım potansiyeli olan 10 milyon dekarlık alanda kanolanın pamuk ile dönüşümlü olarak yetiştirilmesi mümkündür. GAP Bölgesi'nde kanola yetiştirilmesi ile yıllık 1.5 milyon ton biyodizel üretilir [41].

### 1.2.1.2 Türkiye Bitkisel Yağ Üretimi

TUIK 5 yıllık Türkiye yağlık bitki üretim verileri Tablo 1.5’te verilmiştir [44]. Bu verilere göre ayçiçek ve pamuk üretiminin birbirine yakın seviyelerde olduğu ancak son yıllarda ayçiçeğin artış göstererek Türkiye’de en çok yetiştirilen yağlı tohum bitkisi konuma geldiği görülmektedir. Mevcut durum için; biyodizel endüstrisinde dünya çapında en yaygın kullanılan soya ve kanola bitkilerinin üretiminde bir miktar artışın yaşandığı ancak bu değerlerin Türkiye potansiyelinin çok altında kaldığı, palm yağının ise iklim şartları dolayısıyla üretilmediği yorumu yapılabilir.

**Tablo 1.5:** Türkiye yağlık bitki üretimi [44].

Bitki Çeşidi	Yıllara göre üretim verileri (ton)					
	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Aspir	18,228	19,945	45,000	62,000	70,000	58,000
Ayçiçek (Yağlık)	1,170,000	1,200,000	1,380,000	1,480,000	1,500,000	1,500,000
Kanola	91,239	110,000	102,000	110,000	120,000	125,000
Pamuk (çiğit)	1,527,360	1,373,440	1,287,000	1,391,200	1,213,600	1,260,000
Soya	102,260	122,114	180,000	150,000	161,000	165,000

Ülkemiz, işlenebilir tarım alanları bakımından dünyada ilk 10 ülke arasında olup hem tarım alanları hem de tarla bitkileri alanları açısından Avrupa ve Ortadoğu’nun en büyük arazi payına sahiptir. Türkiye’de işlenebilir 26 milyon hektar tarım arazisi bulunmakta olup tarım genellikle kurak şartlarda yapılmaktadır. Ayrıca ülkemizde 4-5 milyon hektarlık nadas alanı mevcuttur. Türkiye’de yenilenebilir enerji bitkileri yağ ihtiyacının yerli kaynaklardan temininin; 1 milyon 900 bin hektar marjinal tarım arazisinin, 5 milyon hektar nadas alanının ve şekerpancarı ile tütüne kota uygulanan arazilerin değerlendirilmesi ile fazlasıyla sağlanılabileceği düşünülmektedir [43].

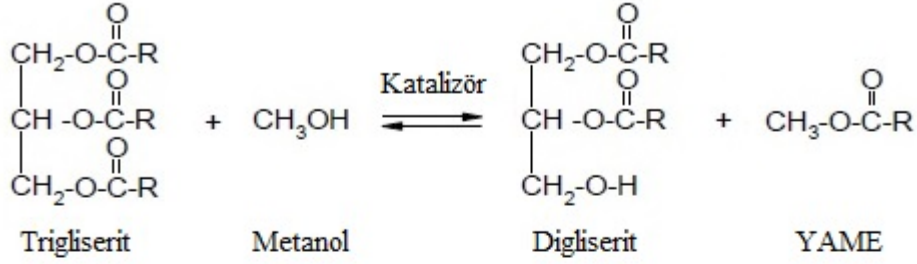


## 1.2.2 Transesterifikasyon Yöntemi

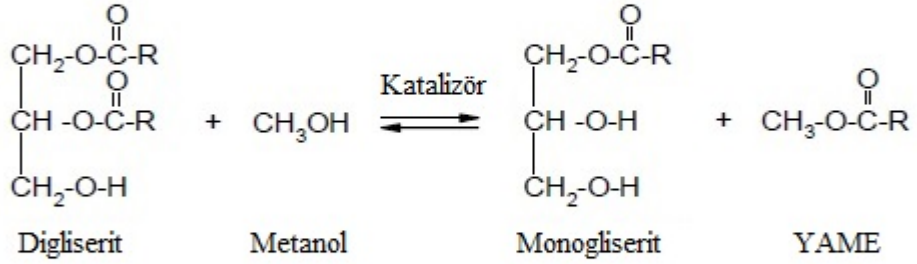
Yağlardan yenilenebilir dizel yakıtı eldesinde genellikle; yağların doğrudan kullanımı, mikroemülsiyon, piroliz (ayırıştırma) ve transesterifikasyon (yeniden esterleşme) ile biyodizel üretimi yöntemleri kullanılmaktadır. Biyodizel üretiminde en yaygın tercih edilen yöntem, katalizör varlığında gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonudur. Bunun başlıca sebepleri aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir [45]:

- Düşük basınç ve sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi,
- Kısa reaksiyon sürelerinde yüksek dönüşüm sağlaması,
- Ara/yan bileşenler olmadan direk biyodizel elde edilmesidir.

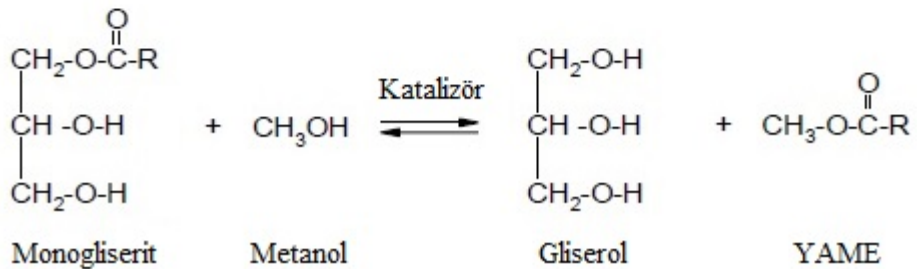
### 1. Basamak



### 2. Basamak



### 3. Basamak



Şekil 1.1: Transesterifikasyon reaksiyonunun gelişimi.

Üç basamaklı transesterifikasyon reaksiyonu ile teorik olarak, 3 mol metanol ve katalizör varlığında 1 mol trigliseritten sırasıyla; 1 mol digliserit + 1 mol yağ asidi metil ester (YAME), 1 mol monogliserit+1 mol YAME ve 1 mol gliserol ve 1 mol YAME elde edilir (Şekil 1.1). Transesterifikasyon reaksiyonu ile yağın temel bileşeni trigliseridin parçalanarak yüksek viskoziteli ve yapışkan yapılı gliserolün yağın yapısından uzaklaştırılması ve yağ asitlerinin metanol gibi kısa zincirli bir alkol ile yeniden ester oluşturması sağlanır. Transesterifikasyonda reaksiyonu hızlandırmak için katalizör kullanılır. Sonuç olarak gliserol esaslı triesterler; moleküler ağırlığı üç kat, viskozitesi ise yaklaşık sekiz kat oranında azaltılmış olan YAME diğer adıyla biyodizele dönüştürülür. Ayrıca reaksiyon ile uçuculuk özelliği de bir miktar iyileştirilir [46]. Şekil 1.1’de de görüldüğü üzere teorik bir transesterifikasyon reaksiyonunda 3:1’lik molar oran yeterlidir. Ancak transesterifikasyon tersinir bir denge reaksiyonu olduğundan, reaksiyonu ürünler tarafına ilerletebilmek için ya teoride olandan daha fazla alkol kullanmak ya da ürünlerden birini reaksiyon karışımından uzaklaştırmak gerekir. Bu nedenle transesterifikasyon reaksiyonlarında genellikle 3:1’den daha büyük molar oranda alkol kullanılır. Literatürdeki çalışmalarda %100 fazla alkol (6:1 molar oran) kullanıldığında reaksiyon oranı ve ester dönüşümünün en üst seviyeye çıktığı, alkol oranının belirli bir değerden daha fazla artırmanın ise ester dönüşümünü geliştirmediği gibi gliserolün ayrışmasını zorlaştırdığı ve reaksiyon sonunda artık alkolü üründen uzaklaştırmak için ekstra işlem ve maliyet gerektirdiği belirtilmektedir [47-49].

Transesterifikasyon reaksiyonunda düşük maliyeti ve fiziksel-kimyasal avantajlarından dolayı (polar ve en kısa zincirli alkol) en sık tercih edilen alkol, metil alkol olarak da adlandırılan metanoldür. Metanol, trigliseritlerle hızlı bir şekilde reaksiyona girer ayrıca reaksiyonda kullanılan katalizörler metanol içinde diğer alkollere nispeten daha kolay çözünürler. Transesterifikasyonda metanol dışında etanol, bütül alkol ve izopropil alkol gibi farklı alkol çeşitleri de kullanılabilir. Ancak farklı alkol varlığında genellikle reaksiyon şartlarının değiştiği ve biyodizel üretiminin zorlaştığı belirtilmektedir. Bunun yanında, farklı alkollerden üretilen biyodizellerin motor performansında belirgin bir farklılık oluşturmadığı tespit edilmiştir [50, 51].

Transesterifikasyonda katalizör olarak baz (NaOH, KOH, alkali metal alkositleri), asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl) ya da enzimatik katalizörler kullanılabilir. Asit ve enzim

katalizörler, baz katalizörlere oranla çok daha yavaşırlar. Bitkisel yağların metil alkol ile transesterifikasyonunda katalizör olarak aynı miktarda asit ve baz katalizör kullandığında, reaksiyon baz katalizör için 4000 kata kadar daha hızlı gerçekleşebilmektedir [48]. Baz katalizörlerin tüm bu avantajlarının yanında eğer SYA içeriği %0.5'in (asit değeri karşılığı 1 mgKOH/g) üzerinde ise baz katalizör kullanılmamalıdır. Çünkü SYA'lar baz katalizör ile reaksiyona girdiğinde katalizörü tüketip ester dönüşümünü azaltan ve ester, gliserol ve yıkama suyunun ayrışmasını engelleyen sabun oluşumuna neden olurlar. Ayrıca oluşan sabunlar viskoziteyi artırır ve jel oluşumuna yol açar [52]. Bu durumlarda yağa ön iyileştirme işlemi (esterifikasyon) uygulanır. Ön iyileştirme işlemiyle yağın SYA değeri %0.5'in altına düştüğünde ise yüksek hızda biyodizel üretimi için transesterifikasyon prosesine geçilir [53]. Transesterifikasyonda, sıcaklık da reaksiyon üzerinde etkili bir parametredir. Transesterifikasyon sıcaklığının, reaktan olarak kullanılan alkolün kaynama noktasına yakın değerlerde olması önerilmektedir [54].

Transesterifikasyon reaksiyonu tamamlandığında gliserol ve ham biyodizelden oluşan iki fazlı bir karışım elde edilir. Dinlendirme işlemiyle oluşan bu iki faz, yoğunluk farkı ile birbirinden ayrıştırılır. Daha yoğun olan gliserol karışımından uzaklaştırılarak ham biyodizel elde edilir [50]. Elde edilen ham biyodizel içerisinde bulunabilecek sabun, gliserol, mono-di-tri gliseritler ve tuz gibi istenmeyen maddelerin uzaklaştırılması için yıkama işlemi yapılması gerekmektedir. Biyodizel standartlarında sınırlandırılan  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$  iyonları biyodizel içeriğinde istenmediği için yıkamada kullanılan suyun demineralize (yumuşak ya da saflaştırılmış) olması gerekir [38]. Sulu yıkamanın 50-60<sup>0</sup>C sıcaklık aralığında yapılması tavsiye edilmektedir. Yıkama suyu, ham biyodizel içerisinden geçerken temas ettiği noktalardaki sabun, gliserol, mono-di-tri gliseritler ve tuzları absorbe ederek biyodizelden uzaklaştırır. Yıkamadan sonra karışım dinlendirilir ve yoğunluk farkıyla çökelen su karışımından ayrıştırılır [26]. Son işlem olarak biyodizel içinde kalmış olabilecek su ve metanolün buharlaştırılması için biyodizel ısıtılarak kurutulur ve daha sonra filtre edilerek stoklanır [50]. Sulu yıkama en çok tercih edilen saflaştırma yöntemi olsa da magnesol, iyon reçine vb. ile gerçekleştirilen alternatif saflaştırma yöntemleri de biyodizel üretimlerinde kullanılmaktadır [55]. Biyodizel veriminin artırılması için yeni ve alternatif biyodizel saflaştırma teknikleri ile ilgili araştırmalar güncel Ar-Ge çalışma konularındandır.

### 1.2.3 Konvansiyonel Metotlar ile Biyodizel Üretimi

Bu başlık altında, ticari biyodizel üretiminde yüksek verim ve düşük maliyetlerinden dolayı en çok tercih edilen alkol (metanol) ve bazik katalizörler (NaOH, KOH, CH<sub>3</sub>ONa, CH<sub>3</sub>OK) kullanılarak konvansiyonel metotlar ile (termal ısıtma ile) gerçekleştirilmiş biyodizel üretim çalışmaları özetlenmiştir.

Dias vd. [56], farklı baz katalizör türlerinin (KOH, NaOH ve CH<sub>3</sub>ONa); rafine ayçiçek, soya ve atık kızartma yağlarından transesterifikasyon metodu ile ürettikleri biyodizel numunelerinin yakıt kaliteleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Genel olarak tüm katalizör türleri için rafine yağlarda ürün eldesinin (en yüksek %97), atık kızartma yağına (en yüksek %92) göre daha fazla olduğu görülmüştür. Deney sonuçlarına göre; 5 mm<sup>2</sup>/s'lik EN 14214 standardı viskozite sınır değerinin sağlanabilmesi için rafine yağlarda kütlece %0.6 KOH kullanılması yeterli olurken, bu oran atık kızartma yağında %0.8 KOH'e yükselmiştir. Bununla birlikte, istenen viskozite değerinin elde edilebilmesi için rafine yağlarda %0.4 NaOH ya da CH<sub>3</sub>ONa kullanımının yeterli olduğu, atık kızartma yağı için ise her iki katalizörün de %0.6 oranında kullanılması gerektiği rapor edilmiştir. Deneylerde en yüksek ester içeriği %1.2 KOH kullanımında elde edilmiştir.

Fedai [57] yaptığı çalışmada kanola yağını kullanarak gerçekleştirilen biyodizel üretimleri için optimum reaksiyon koşullarını tespit etmeye çalışmıştır. Bunun için üretilen numunelerin ester içeriği, linolenik, mono-, di-, trigliserit, serbest ve toplam gliserol miktarları, viskozite, yoğunluk, soğukta filtre tıkanma noktası ve alevlenme noktası analizleri yapılarak bu değerlerin reaksiyon parametrelerine göre değişimi incelenmiştir. Çalışma sonucuna göre kanola yağı metil esteri üretimindeki optimum reaksiyon koşullarının 55°C sıcaklık, %25 (hacimce) metanol, %1.05 (kütlece) NaOH ve 1 saat reaksiyon süresi olduğu belirlenmiştir. Bu koşullarda üretilen biyodizeldeki ester miktarının %99.22 olduğu rapor edilmiştir.

Vicente vd. [58], ayçiçek yağı ve NaOH, KOH, CH<sub>3</sub>ONa ve CH<sub>3</sub>OK'nin kullanıldığı transesterifikasyon reaksiyonlarının tümünde %100'e yakın ester içeriğine sahip biyodizel numuneleri elde etmişlerdir. Araştırmacılar, biyodizel ürün veriminde sadece metoksit halinde bulunan katalizörlerin (CH<sub>3</sub>ONa ve CH<sub>3</sub>OK) %100'e yakın ürün verimi sağladığını, KOH ve NaOH kullanımında ise sabunlaşma gibi yan

reaksiyonlardan dolayı ürün veriminin bir miktar daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Deneyleerde en hızlı tamamlanan reaksiyon 65°C sıcaklıkta, 6:1 molar metanol ve kütlece %1 NaOH kullanılmasıyla 30 dakika sürmüştür.

Çildir ve Çanakçı [59]; ayçiçek, mısır ve kolza yağı gibi çeşitli bitkisel yağlarının transesterifikasyon reaksiyonlarında alkol ve katalizör miktarlarının ester dönüşüm verimi, kinematik viskozite, yoğunluk, akma noktası, asit değeri ve parlama noktası üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarda alkol olarak metanol ve katalizör olarak NaOH kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre en yüksek ester dönüşüm oranının (%99.65 mısır yağı metil esteri) 60°C sıcaklık, 6:1 metanol:yağ molar ve %0.3 NaOH katalizör oranı kullanılarak 60 dak sürdürülen reaksiyonda elde edildiği belirlenmiştir. Ayrıca mısır, kolza ve ayçiçek yağı metil esterleri üretiminde alkol/yağ molar oranı arttıkça esterlerin viskozitelerinin ve parlama noktalarının azaldığı, katalizör miktarının artışı ile yoğunluğun azaldığı ancak %1'in üzerine çıkıldığında sabunlaşmanın fazlaştığı tespit edilmiştir.

Azcan ve Danışman [60], pamuk yağından transesterifikasyon metoduyla biyodizel üretimini hem ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda konvansiyonel metot ile hem de mikrodalga sentez ünitesi kullanarak mikrodalga ışına altında gerçekleştirmişlerdir. Mikrodalga sentez ünitesinde en yüksek dönüşüm verimi (%92.7) ve en yüksek ester içeriği (%99.7) 60°C, 1.5 % KOH ve 6:1 molar metanol:yağ varlığında gerçekleştirilen reaksiyon ile elde edilirken; aynı reaksiyon koşullarında konvansiyonel metotlar ile % 91.4 dönüşüm verimi ve %99.9 ester içeriğine ulaşılabilmiştir.

Yıldız [55], pilot ölçekli biyodizel üretimleri yaptığı çalışmada 50 L hacimli bir biyodizel reaktörü kullanmıştır. Bu çalışmada, atık restoran yağları ön iyileştirme işlemine tabi tutularak SYA değerleri transesterifikasyon için uygun seviyeye düşürülmüştür. Elde edilen yağ, transesterifikasyon reaksiyonunda ağırlığının %20'si kadar metanol (ort. 6:1 molar metanol:yağ) ve kütlece %1 oranında CH<sub>3</sub>ONa ile 58°C'de 1 saat reaksiyona sokulmuştur. Farklı saflaştırma işlemlerinden sonra gerçekleştirilen yakıt analizlerde, saf suyla gerçekleştirilen saflaştırma işleminden sonra üretilen biyodizelin 885 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk ve 4.4088 mm<sup>2</sup>/s viskozite değerlerinin EN 14214 standartlarına uygun olduğu, %95.6'luk metil ester içeriğinin ise standartta istenen değer altında kaldığı tespit edilmiştir.

Meher vd. [61], yaptıkları çalışmada genellikle Asya gölgesinde üretimi gerçekleştirilen tropikal *Pongamia pinnata* yağından biyodizel üretimi için optimum reaksiyon koşullarını belirlemişlerdir. Çalışma çıktılarına göre optimum üretim verimi; 6:1 molar metanol ve %1 kütleli KOH kullanılarak gerçekleştirilen 180 dakikalık reaksiyon ile elde edilmiştir. Bu şartlar altında, *Pongamia pinnata* yağından %96 dönüşüm verimiyle biyodizel üretimi gerçekleştirilmiştir.

Özsezen [62], doktora çalışmasında 100 litre tank kapasiteli, elektrik rezistansı ile ısıtılan konvansiyonel bir biyodizel reaktörü tasarlamış ve bu reaktörde motor testlerinde kullanılmak üzere biyodizel üretimleri gerçekleştirmiştir. Çalışma kapsamında hammadde olarak atık palmye yağı kullanmıştır (50 kg). Çalışmada kullanılan reaktan ve üretim parametreleri alkol:yağ molar oranı 6:1 metanol (1134 g), yağın kütlece %1'i (500 g) kadar KOH, 60°C reaksiyon sıcaklığı ve 240 dakika reaksiyon süresi şeklindedir. 60°C'deki distile su ile dört kez yıkanarak saflaştırılan biyodizel numunesinin yakıt özellikleri 875 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk, 4.401 mm<sup>2</sup>/s viskozite ve %96.5 ester içeriği olarak ölçülmüştür.

Bouaid vd. [63], hardal yağından pilot ölçekte biyodizel üretimi için optimum transesterifikasyon parametrelerinin belirlenmesi üzerine yaptıkları çalışmada alkol olarak metanol, katalizör olarak ise KOH kullanmışlardır. Pilot ölçekteki tesisin reaktör tankı yaklaşık 200 litre hacminde tasarlanmıştır. Çalışma sonunda optimum reaksiyon verileri; kütlece %1.5 KOH, 6:1 metanol-yağ molar oranı, 25°C reaksiyon sıcaklığı ve 60 dak reaksiyon süresi olarak belirlenmiştir. Bu şartlar altında üretilen biyodizelin kütlece %97.1 metil ester içerdiği ayrıca viskozite, yoğunluk, su içeriği ve asit değeri gibi önemli yakıt özelliklerinin EN 14214 biyodizel standartlarına uygun olduğu görülmüştür.

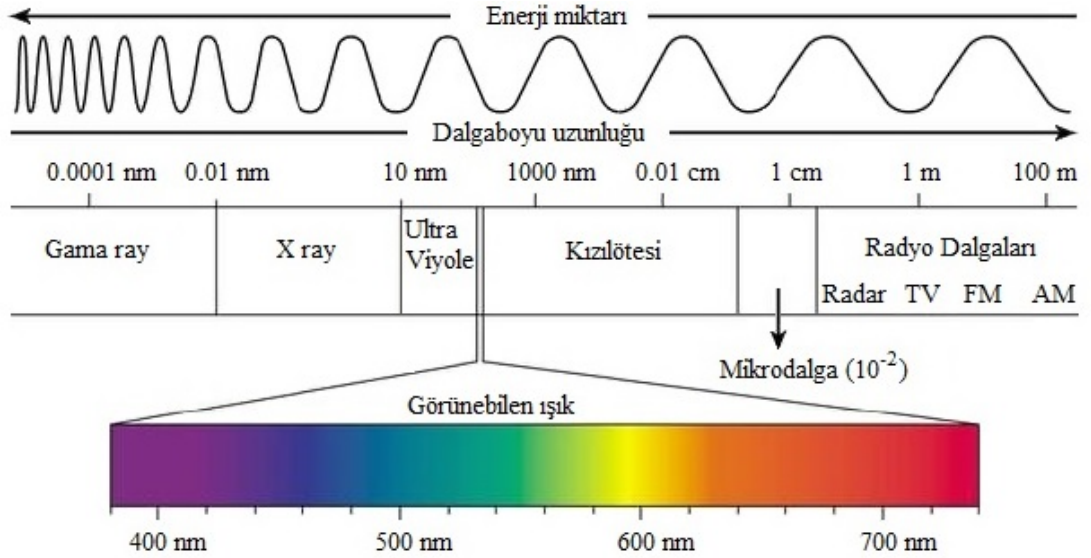
Alptekin vd. [22], pilot ölçekteki biyodizel reaktörlerinde farklı bitkisel ve hayvansal yağlardan transesterifikasyon metoduyla biyodizel üretimi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında atık yağlar ön iyileştirme işleminden geçirildikten sonra, mısır yağı ise direk olarak transesterifikasyon reaksiyonuna sokulmuştur. Rafine mısır yağından 60°C reaksiyon sıcaklığında, kütlece %1 KOH ve 6:1 molar metanol eşliğinde, 120 dak süren reaksiyon sonunda %91 dönüşüm verimiyle metil ester üretmişlerdir. Yapılan ölçümlerde üretilen yakıtın 15°C'de 886

g/cm<sup>3</sup> yoğunluğa, 40°C’de 4.18 mm<sup>2</sup>/s kinematik viskoziteye ve 39.878 kJkg<sup>-1</sup> alt ısııl değerine sahip olduğu belirlenmiştir.

### 1.3 Mikrodalga Teknolojisi ve Biyodizel

#### 1.3.1 Mikrodalga

Mikrodalga ışımaya, 0.01-1 m aralığında dalga boyu uzunluğuna ve 300-300,000 MHz frekans aralığına sahip olan bir elektromanyetik ışımaya türüdür. Kimyasal sentezlemede kullanılan mikrodalga reaktörleri ve tüm ev tipi mikrodalga fırınlar 2.25 cm dalga boyulu 2450 MHz frekans değerinde çalışırlar [64]. Mikrodalganın elektromanyetik dalga spektrumundaki yeri Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2: Elektromanyetik dalga spektrumu.

Mikrodalga gibi elektromanyetik ışımaların tümü, boşlukta aynı hızla yayılırlar ( $C=3.108 \text{ ms}^{-1}$ ) ve ışımının yayılma doğrultusunda birbirlerine dik elektriksel (E) ve manyetik (H) alan bileşenlerine sahiptirler. Elektrik alanının sinüs eğrisinin uzunluğu, dalga boyu uzunluğuna ( $\lambda$ ) eşittir. Elektromanyetik alanın maruz bırakıldığı madde ile

etkileşmesinde elektrik bileşenin rolü çok önemlidir. Manyetik bileşenin etkisi daha çok manyetik özelliği olan maddelerde zayıf bir etkileşim şeklinde göz önüne alınır [65].

Mikrodalga ısıtma ile maddelerin etkileşimi birbirlerinden farklıdır. Her madde mikrodalga ile ısıtmaya uygun değildir. Maddeler, mikrodalga ile etkileşimine göre üç kısımda sınıflandırılabilir [66]:

- Mikrodalgayı absorbe edenler: polar çözücüler ve polar maddeler,
- Mikrodalgayı geçirenler: plastik, kükürt, teflon, cam, seramik ve kağıt vb. mikrodalgayı geçirir ve ısınmazlar,
- Mikrodalgayı yansıtanlar: metallere gibi mikrodalgayı yansıtan maddeler mikrodalgayı yansıtır ve ısınmazlar.

Mikrodalga ısıtma, konvansiyonel (termal) ısıtmadan çok farklı bir mekanizmaya sahiptir. Mikrodalga ile ısıtmayı gerçekleştirebilmek için reaksiyon karışımındaki reaktanlardan en az birinin mikrodalgayı absorblaması gerekmektedir. Ayrıca, reaksiyonun gerçekleştirileceği hacmin duvarları mikrodalga ışınmayı geçiren maddeden yapılmalıdır; örneğin borosilikat camı, kuvarz, teflon vb. [67].

Mikrodalga ısıtmanın seviyesi, dalga boyu ve mikrodalgaya maruz kalan maddenin dielektrik özelliklerine bağlıdır. Maddelerin elektriksel - manyetik alanlar ile etkileşimi ve elektriksel akıma karşı direnci ile ilintili üç farklı dielektrik özelliği vardır. Bağlı geçirgenlik ( $\epsilon$ ), maddenin elektriksel alanla etkileşimini ifade eden dielektrik özelliğidir. Bu özellik, bir maddenin elektromanyetik enerjiyi depolama özelliğini gösterir.  $\epsilon$ , (1.1) nolu denklemde ifade edildiği üzere gerçek kısım (dielektrik sabiti,  $\epsilon'$ ) ve sanal kısım (dielektrik kayıp faktörü,  $\epsilon''$ ) olarak iki kısımdan oluşur.  $\epsilon'$  maddenin elektriksel alanda veya elektrik enerjisi ile molekülün polarize olma yeteneği,  $\epsilon''$  ise materyalin absorbe ettiği elektromanyetik enerjiyi ısıya dönüştürme kabiliyeti ile ilgilidir. Sanal kısım ile gerçek kısmın oranı ise kayıp açısının ( $\delta$ ) tanjant değerini ( $\tan\delta = \epsilon''/\epsilon'$ ) verir.  $\tan\delta$ , maddenin mikrodalga enerjisini ısı enerjisine dönüştürebilme faktörünün bir ölçüsüdür. Mikrodalga dielektrik ısıtma işlemi önemli ölçüde uygulanan maddenin  $\epsilon''$  veya  $\tan\delta$  değerine bağlıdır;  $\tan\delta$  veya  $\epsilon''$  değeri yüksek olan maddeler mikrodalga enerjisini absorbe edip ısıtılabilirler denebilir. Bazen bir maddenin dipol momenti yüksek olsa dahi eğer  $\tan\delta$  veya  $\epsilon''$  değeri düşükse



mikrodalga enerjisini absorblayamaz (örneğin asetonitril). Buna göre, bir reaksiyon karışımında  $\tan\delta$  değeri yüksek olan bir bileşen (reaktan veya çözücü) olmalıdır ya da reaksiyon karışımı iyonik olmalıdır. Maddelerin belli sıcaklıktaki dipol moment değerleri ( $\mu$ ) ile  $\varepsilon'$  değerleri kaynaklarda mevcut olsa da sıcaklığa bağlı  $\varepsilon''$  ve  $\tan\delta$  değerleri çoğunlukla mevcut değildir. Bu değerlerin tespiti çok güç ve masraflıdır, bu konu hakkında yeteri kadar çalışma olmayıp araştırmalar devam etmektedir [65].

$$\varepsilon = \varepsilon' - jx\varepsilon'' \quad (1.1)$$

$$\tan\delta = \varepsilon''/\varepsilon' \quad (1.2)$$

Mikrodalga ile ısıtma, mikrodalga enerjisinin madde içerisine nüfuz etmesiyle gerçekleşir. Bundan dolayı mikrodalga ısıtmada oluşturulan elektromanyetik enerji büyüklüğünden başka bu enerjinin madde içine nüfuzundaki dalma derinliği (penetrasyon) de önem arz eder. Elektromanyetik dalgalar, madde içinde yayılırken ısıya dönüşerek zayıflarlar. Dalma derinliği ( $D_d$ ), bir maddenin yüzeyine gelen elektriksel alan şiddetinin  $\approx \%37$ 'sini kaybettiği değere kadar düştüğü derinlik olarak tanımlanır ve (1.3) nolu eşitlik ile hesaplanır. Nüfuz etme olayı, mikrodalga için geçirgen maddelerde sonsuz, yansıtıcı maddelerde ise sıfırdır [65].

$$D_d = \frac{\lambda}{2 \times \pi \times \sqrt{\varepsilon'} \times \tan\delta} \quad (1.3)$$

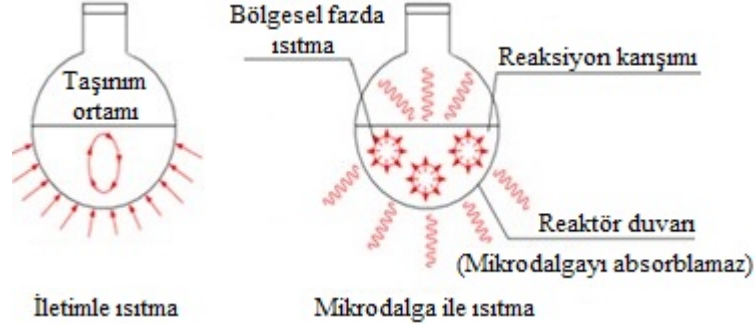
Dalma derinliği, mikrodalgaya maruz kalan maddenin boyutlarına göre büyük ise enerji madde içerisinden nerdeyse hiç kayba uğramadan geçer, eğer daha küçük ise ısınma yüzeyde olurken iç kısımlar ısınmaz. Orta değerdeki dalma derinliğinde maddenin yüzeyi ısınırken merkezi de büyük miktarda ısınır [68]. Bir cismin  $\varepsilon''/\varepsilon'$  oranı yani  $\tan\delta$  değeri ne kadar büyük ise mikrodalganın o maddeye nüfuz etmesi de o kadar zordur [65]. Bazı maddelerin 25°C sıcaklık ve 2.45 GHz frekanstaki dielektrik özellikleri ve dalma derinlikleri Tablo 1.6'da verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere maddelerin  $\tan\delta$  değeri büyüdükçe dalma derinlikleri azalmaktadır.

**Tablo 1.6:** Bazı materyallerin dielektrik özellikleri ve dalma derinliği değerleri [69].

Malzeme	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\tan\delta$	$D_d$
Alüminyum oksit	9	0.004	$4.44 \times 10^{-4}$	1460 cm
PVC	2.9	0.016	$5.52 \times 10^{-3}$	200 cm
Silikon karpit	10.4	0.9	$8.65 \times 10^{-2}$	7 cm
Tahta (%40, H <sub>2</sub> O)	5.1	1.12	$2.20 \times 10^{-1}$	4 cm
Su	77.4	9.2	$1.19 \times 10^{-1}$	1.8 cm

### 1.3.2 Mikrodalga Destekli Isıtma

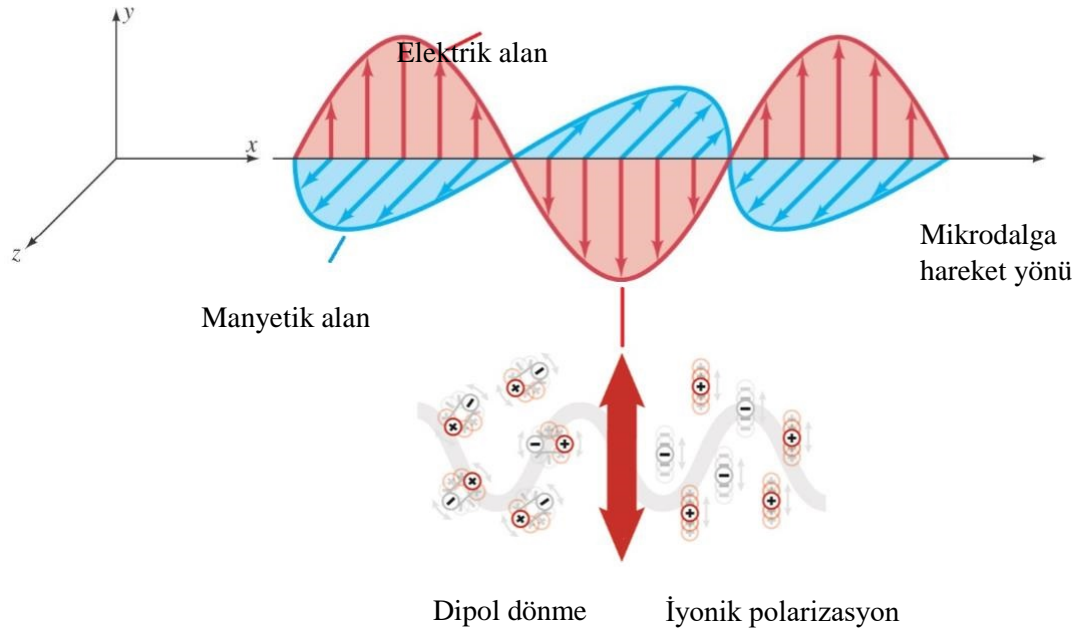
Konvansiyonel ısıtma yöntemlerinde ısı genellikle reaksiyon kabının duvarlarına, buradan da reaksiyon ortamına iletilir. Bu işlem oldukça yavaş gerçekleşmektedir. Mikrodalga ısıtmada ise reaksiyon ortamındaki maddeler mikrodalga enerjisini belirli koşullarda absorblamakta olup, sistemin içinden dışına doğru bir ısınma gerçekleşmektedir. Bu ısınma şekli, sistemin dışından içeriye doğru ısınmasını sağlayan iletim-taşınım ile ters olarak çalışmaktadır. Isıtmada, mikrodalga ışınımı reaksiyon ortamında eşit bir dağılım gösterir ve reaktanlar etkin şekilde karıştırılırsa bölgesel sıcaklık farklılıkları oluşmaz. Böylece mikrodalga ısıtma ile ısıtma kaynağının reaksiyon karışımıyla doğrudan temasta olmadığı, sıcak reaktör duvarları ile daha soğuk reaksiyon ortamı arasındaki sıcaklık değişiminin olduğu konvansiyonel sistemlerden çok daha hızlı ve verimli bir ısıtma gerçekleştirilmiş olur. Sonuç olarak ısıtmada enerji tasarrufu ve istenmeyen yan reaksiyonların en az seviyede oluşması sağlanır. Konvansiyonel ısıtma ve mikrodalga ile ısıtmada ışının akış şekli şematik olarak Şekil 1.3'te gösterilmiştir [70].



**Şekil 1.3:** Konvansiyonel ve mikrodalga ısıtma mekanizmaları [70].

Mikrodalga ile ısıtma işlemi, ısıtılacak madde içinde oluşan dipol dönme ve iyonik polarizasyon hareketleri kaynaklı ısı oluşum mekanizmaları (dielektriksel, iletimsel ısıtma) tarafından sağlanır. Şekil 1.4'te dipol dönme ile oluşan dielektrik ısıtma ve iyonik polarizasyon ile oluşan iletimsel ısıtma mekanizmaları, şematik olarak gösterilmiştir. Bunları incelemek gerekirse:

Dielektrik ısıtma olarak belirtilen mikrodalga ısıtma, mikrodalgaların elektrik alan bileşeni (E) tarafından gerçekleştirilir. Dışarıdan elektriksel alan uygulandığında; maruz bırakılan madde, uygulanan enerjiyi depolama özelliğine sahip ise bu maddeler dielektrik maddeler olarak tanımlanır. Dielektrik materyal, kalıcı dipoller ya da iki elektrot arasına kapasitör olarak yerleştirildiğinde indüklenmiş dipoller içerir. Moleküller ile doğrudan etkileşime giren mikrodalgalar, yüksek frekanslı elektriksel alanlar olarak ifade edilebilir. Elektrik alanın dipol moleküllerle etkileşmesi dipolar polarizasyon mekanizması olarak nitelendirilir. Dipoller dış elektriksel alana karşı hassastırlar, elektrik alanına maruz bırakıldıklarında dönerek elektriksel alan ile kendisini aynı hizada tutmaya çalışırlar. Dönme hareketi için gerekli enerji elektrik alan tarafından sağlanır. Dipoller, değişen elektrik alan yönü sonrasında kendini aynı düzene sokmak için yeniden yönlenerek alanı değiştirir. Böylece dipolün yönlendirmesiyle elektrik alanın yönlendirmesi arasında bir faz farkı meydana gelir. Oluşan faz farkı, moleküller sürtünme ve çarpışma nedeniyle enerjinin kaybolmasına ve dielektrik ısının artmasına sebep olur. Böylece sıcaklık değeri hızlı bir şekilde artar [65].



**Şekil 1.4:** Mikrodalga destekli ısıtma.

Diğer bir mikrodalga ısıtma formu, enerjiyi depolayan parçacıkların (iyon ya da elektronların) neden olduğu iletimsel ısıtmadır. Mikrodalga ışıma altındaki iyon veya elektronlar değişen elektrik alan ile etkileşir ve elektrik alan doğrultusunda çözeltide baştanbaşa hareket etmeye başlarlar. Böylece sürtünme kayıpları kaynaklı ısı açığa çıkar [71]. Sürtünme kaybı miktarı; kinetik enerjiyi ısıya dönüştüren iyonların büyüklüğüne, yüküne, iletkenlik derecesine ve iyonların çözücü ile etkileşimine bağlı olarak değişir. Bunun yanında iyonik bir çözeltilerin mikrodalgada ısınma hızı ve etkinliği, çözeltideki iyonların konsantrasyonuna da bağlıdır. Ayrıca maddenin sıcaklığı iyonik iletimi etkileyen başka bir faktördür. Sıcaklık artışıyla enerji transferi çok daha etkin olarak gerçekleştiğinden, iyonik çözeltiler ısındıklarında çok daha güçlü absorpsiyon yaparlar [65].

### 1.3.2.1 Mikrodalganın Kimyasal Reaksiyonlar Üzerindeki Etkileri

Mikrodalga kullanılarak gerçekleştirilen kimyasal reaksiyonlarda reaksiyon süresinin çok kısılması, yan reaksiyonları azalması, gelişmiş seçicilik (polar olmayan maddelerin mikrodalgaya inert olması) gibi birçok önemli avantaj elde edilmektedir. Bu avantajlarından dolayı, mikrodalga sistemlerinin giderek yaygınlaşması ve

geliştirilmesinin yanında mikrodalganın kimyasal reaksiyonlar için avantajlı olan etkilerin nasıl oluştuğu ve çalışma mekanizmalarının ne olduğu hâlâ tam olarak bilinmemektedir [72]. Araştırmacılar tarafından üzerinde en çok durulan mekanizmalar dört ana başlık altında tartışılmaktadır, bunlar şu şekildedir:

***Aşırı ısınma (super heating) etkisi:*** Çözücüler mikrodalga ışınlarıyla etkileştiğinde atmosferik basınçta konvansiyonel ısıtmaya (termal) göre normal kaynama noktalarından 13-25°C yüksek sıcaklıklarda kaynadıkları gözlenmiştir. Bu artışa sebep olan etki “aşırı ısınma etkisi (super heating)” olarak tanımlanmıştır. Aşırı ısınmanın, reaksiyon hızlarındaki artışın temel kaynağı olduğu düşünülmektedir [73].

Konvansiyonel ısıtmada ısı enerjisi genellikle önce reaksiyon kabının duvarına iletilir. Konvansiyonel kaynama olayı, kabarcıkların oluştuğu sıvı ile kabın iç yüzeyindeki oyuk/çiziklerin varlığıyla ilgilidir. Kap içerisindeki sıvı kütlesi, oyuklar içindeki hava kabarcıklarını tutmaktadır. Hava kabarcıklarındaki basıncın artması ile kabarcık büyümeğe başlar ve kabarcıkları zeminde tutan güçler bir kez yenilince kabarcıklar oyuktan ayrılır ve kaynama başlamış olur. Mikrodalga kullanılarak gerçekleştirilen ısıtmada ise kap içindeki maddenin tümü, mikrodalga enerjisini absorbe ederek ısınır. Kap çeperindeki kabarcık oluşumu, içerden dışarı doğru olan ısıtma (penetrasyondan dolayı) nedeniyle gecikir. Bundan dolayı sıvının sıcaklığı, normal kaynama noktasının üstüne çıkar ancak kaynama meydana gelmez. Bu şartlarda, ötelenen sıcaklıklarda oluşan kaynama başlangıcına gecikmiş kaynama noktası adı verilir. Örnek olarak, normal şartlarda konvansiyonel ısıtma ile 65°C sıcaklıkta kaynayan metanol, mikrodalga ışımada altında 84°C’de kaynamaya başlar. Bu değer, metanolün gecikmiş kaynama noktası olarak adlandırılır [74].

***Sıcak nokta (hot-point / hot-spot) etkisi:*** Sıcak nokta etkisi, aşırı ısınmanın neden olduğu termal mikrodalga etkisi olarak tanımlanmaktadır. Düşük sıcaklıklarda dahi reaksiyon karışımında lokal olarak devamlı oluşup kaybolan sıcak noktaların olduğu düşünülmektedir. Karışımın karıştırılmasıyla birlikte bu noktaların oluşumu bir miktar önlense de ortaya çıkmaya devam etmektedir. Bu noktalarda sıcaklık değeri artışından dolayı reaksiyon hızının arttığı varsayılmaktadır. Diğer yandan, sıcak nokta sıcaklıklarının ölçülememesinden dolayı bu etki henüz kanıtlanamamış bir varsayımdır ve bu etki ile ilgili matematiksel bir yaklaşım da henüz geliştirilmiş değildir [65].

Sıcak nokta varsayımı ile alakalı olarak Berlan, Diels-Alder reaksiyonlarının aynı sıcak değerinde mikrodalga ısıtma ile konvansiyonel ısıtmaya göre çok daha hızlı gerçekleştiğini göstermiş ve bu hız artışını reaksiyon karışımında oluşan sıcak noktalara ve çözücünün aşırı ısınmasıyla açıklamıştır [75]. Baghurst vd. [74] ise mikrodalğanın kimyasal reaksiyonları 6-40 kat hızlandırmasının nedenini çok sayıda iyonun sıcak noktalar oluşturması olarak göstermiştir.

**Kinetik etki (spesifik etki):** Termal olmayan mikrodalga etkilerinin varlığı ve bu etkilerin kaynakları hakkında birçok teori üretilmiştir. Örneğin; 560 W mikrodalga gücü ile yapılan bazı organik ve inorganik reaksiyonların hızının, konvansiyonel yöntemle aynı sıcaklıkta yapılan reaksiyonların hızından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Araştırmacılar bu artışın mikrodalga ışıma altında sıcaklığın yükselmesi ile elde edilemeyeceğini, mikrodalğanın reaksiyon üzerindeki etkisinin çok karmaşık olduğunu ve çoğunlukla bu etkinin kararsız sistemlerde gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Mikrodalğanın termal olmayan etkileri kinetik etkiler adı altında incelenmektedir [65].

Mikrodalgaların kimyasal reaksiyonları hızlandırma nedenin tespiti için özellikle son yıllarda termal olmayan etkilerin incelenmesi adına hassas sıcaklık ölçümleriyle gerçekleştirilen kinetik çalışmalar üzerinde yoğunlaşmıştır. Konu hakkında yapılan çalışmaların sonuçları değişkenlik arz ettiğinden, spesifik mikrodalga etkisinin varlığı hakkında net bir görüş birliği yoktur. Bunun nedeni, aynı sıcaklık değerlerinde mikrodalga ışıma altında termal koşullara göre daha hızlı ilerleyen reaksiyonlar olmasının yanında aynı sıcaklıklarda hem mikrodalgada hem de termal koşullarda eşit hızlarda ilerleyen başka reaksiyonların da mevcut olmasıdır. Mikrodalga ve termal yöntem ile yapılan reaksiyonların kıyaslanması için bütünüyle eşit şartlarda olması gerekliliği görülmüştür. Bunun için son yıllarda izotermal sistemlerin kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalar hız ve önem kazanmıştır [65].

**Mikrodalga enerjisini perdeleme etkisi (kafes etkisi):** Yapılan bir çalışmada, azobisisobütironitril (AIBN)'nin bozunma reaksiyonları için reaksiyon karışımına ortamının polaritesini ( $\epsilon''$  değerini) artıran bir çözücü ilave edilmiştir. İlave edilen çözücü tarafından sarılan AIBN molekülleri, mikrodalgayı çözücünün büyük oranda absorbe etmesi sebebiyle daha az absorbe edebilmiş böylece reaksiyon, ısınan çözücünün ilettiği ısı vasıtasıyla gerçekleşmiştir. Sonuç olarak mikrodalga ışıma altında da termal reaksiyon hızına yakın bir reaksiyon hızı oluşmuştur. Çözücünün

ilave edildiği farklı kimyasal reaksiyonlarda farklı mikrodalga etkilerinin elde edilmesi ve farklı reaksiyon hızlarının oluşması, mikrodalgaların çözücü tarafından perdelenmesi olarak açıklanmıştır [76].

### 1.3.3 Mikrodalga Işıma Altında Biyodizel Üretimi

Bu başlık altında, ticari biyodizel üretiminde yüksek verim ve düşük maliyetlerinden dolayı en çok tercih edilen alkol (metanol) ve bazik katalizörler (NaOH, KOH, CH<sub>3</sub>ONa, CH<sub>3</sub>OK) kullanılarak mikrodalga ışımada gerçekleştirilmiş biyodizel üretim çalışmaları özetlenmiştir.

“1.2.3 Konvansiyonel Metotlar ile Biyodizel Üretimi” alt başlığında da ifade edildiği üzere Azcan ve Danışman [60] pamuk yağından transesterifikasyon metoduyla biyodizel üretimini hem ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda konvansiyonel metot ile hem de mikrodalga sentez ünitesi kullanarak mikrodalga ışımada gerçekleştirmişlerdir. Mikrodalga sentez ünitesinde en yüksek dönüşüm verimi (%92.7) ve en yüksek ester içeriği (%99.7) 60°C reaksiyon sıcaklığında, %1.5 KOH ve 6:1 molar metanol:yağ varlığında gerçekleştirilen reaksiyon ile elde edilirken; aynı reaksiyon koşullarında konvansiyonel metotlar ile %91.4 dönüşüm verimi ve %99.9 ester içeriğine ulaşılabilmiştir.

Azcan ve Danışman [77], yaptıkları diğer bir çalışmada ise kolza (kanola) yağında mikrodalga ısıtma sistemi kullanarak transesterifikasyon metoduyla biyodizel üretiminde katalizör oranı, reaksiyon sıcaklığı ve süresinin etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucu olarak %93.7 dönüşüm verimi ve %97.8 ester içeriğinin elde edildiği optimum reaksiyon koşulları; yağın ağırlıkça %1.0'ı kadar bazik katalizör, 6:1 molar oranda metanol, 50°C reaksiyon sıcaklığı ve 5 dak reaksiyon süresi olarak belirlenmiştir.

Duz vd. [78], “Start lab station” laboratuvar tip kimyasal sentez reaktöründe mikrodalgada ısıtma kullanarak kütlece %1.0 NaOH, 1:10 yağ:metanol molar oranı metanol ve 6 dak reaksiyon süresinde gerçekleştirdikleri transesterifikasyon prosesi sonucunda aspir yağında %98.4 metil ester içeriğine sahip ve yoğunluk, viskozite,

parlama noktası, bulutlanma noktası, setan sayısı gibi temel yakıt özellikleri EN ve ASTM standartlarına uygun biyodizel elde etmişlerdir.

Sherbiny vd. [79], SYA değeri yüksek olan jatropha yağından mikrodalga sentez ünitesinde jatropha metil esteri üretmişlerdir. Araştırmacılar çalışmalarında, öncelikle jatropha yağının transesterifikasyonda kullanımına uygun hale getirilmesi için ön iyileştirme yöntemi olan esterifikasyon metodunu kullanmışlardır. Çalışmanın ikinci aşamasında, SYA değeri iyileştirilen yağdan reaktan miktarları 1:7.5 yağ:metanol molar oranı ve %1.5 KOH olan transesterifikasyon reaksiyonuyla 65°C sıcaklıkta 2 dakikada biyodizel üretimini tamamlamışlardır. Aynı reaksiyon koşullarında konvansiyonel ısıtma metotları kullanılarak yapılan deneylerde ise benzer yakıt özelliklerine sahip biyodizeli ancak 60 dakikada üretebilmişlerdir.

Kumar vd. [80], laboratuvar koşullarında pongamia pinnata yağından mikrodalga ısıtma sistemi kullanarak 1:6 yağ:alkol molar oranında, 60°C reaksiyon sıcaklığında ve farklı katalizör oranları ve reaksiyon sürelerinde biyodizel üretimi gerçekleştirilmişlerdir. Araştırmacılar, kütlece %1 KOH kullanımı ve 10 dak reaksiyon süresinde %97 oranında, %0.5 NaOH kullanımı ve 5 dakikalık reaksiyon süresinde ise %96 oranında dönüşüm veriminin elde edilebildiğini belirtmişlerdir.

Encinar vd. [81], soya fasulyesinden biyodizel üretiminde konvansiyonel ısıtma ve mikrodalga ışımayla gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonlarını karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar, ısıtıcı tabla üzerinde 6:1 molar oranında metanol, kütlece %1 KOH kullanarak 60 dak sonunda %96.6 ester muhteva eden, 0.879 g/cm<sup>3</sup> yoğunlukta ve 4.23 mm<sup>2</sup>/s viskoziteye sahip biyodizel üretirken; mikrodalga ünitesinde, 200W çıkış gücüyle 3 dak reaksiyon sonucunda benzer özelliklerde (%96.5 ester içeriği, 0.881 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk ve 4.41 mm<sup>2</sup>/s viskozite) biyodizel üretmeyi başarmışlardır.

Pongamia pinnata yağından mikrodalga destekli ısıtma kullanılarak gerçekleştirilen bir başka biyodizel üretim çalışması Kamath vd. [82] tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada öncelikle yüksek SYA değerine sahip yağ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> kullanılarak ön iyileştirilmeye tabi tutulmuş, uygun SYA değerine ulaşan yağ KOH ve metanol varlığında biyodizele dönüştürülmüştür. Sonuç olarak, optimum reaksiyon



koşulları (%89.9 dönüşüm verimi); 9.3:1 metanol:yağ molar oranı, kütlece %1.33 KOH ve 150 saniye reaksiyon süresi olarak belirlenmiştir.

Chen vd. [83], atık yemeklik yağdan biyodizel üretimini mikrodalga sentez ünitesi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları parametrik çalışmada %97.7 dönüşüm veriminin elde edilmesi için 6:1 molar oranında metanol, kütlece %0.75 oranında CH<sub>3</sub>ONa, 3 dak boyunca mikrodalga ışıma altında atık yağ ile reaksiyona sokulmuştur. Aynı reaksiyon koşullarında gerçekleştirilen konvansiyonel üretimde ise en yüksek dönüşüm verimi (%96.6) 90 dakikada elde edilmiştir.

Hernando vd. [84], kontinü akışlı mikrodalga sentez ünitesinde gerçekleştirdikleri transesterifikasyon reaksiyonunda kolza (kanola) ve soya fasulyesinden metil esterler üretmişlerdir. Yapılan çalışmayla en yüksek biyodizel ürün veriminin (%97) elde edilebilmesi için reaksiyon şartlarının 60°C reaksiyon sıcaklığı, %1.13 NaOH, 15:1 molar oranında metanol ve 1 dak reaksiyon süresi olması gerektiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar, kıyaslama yapabilmek için benzer şartlarda konvansiyonel metotlarla da biyodizel üretimi gerçekleştirmişler ve çıkan sonuçlara göre mikrodalga teknolojisinin biyodizel üretiminde çok daha hızlı ve efektif bir metot olduğunu rapor etmişlerdir.

Kanitkar vd. [85], yaptıkları çalışmada, kesikli mikrodalga sistemi kullanarak soya fasulyesi ve pirinç kabuğu yağından biyodizel üretimi için optimum reaksiyon parametreleri ve reaktan türünü belirlemeye çalışmışlardır. İki kısa zincirli alkol olan etanol ve metanol; 60, 70 ve 80°C reaksiyon sıcaklıklarında; 5, 10, 15 ve 20 dak reaksiyon sürelerinde, kütlece %0.15–0.18 katalizör varlığında mukayese edilmiştir. Tüm reaksiyonlarda min %96 dönüşüm oranı elde edilmiştir. 80°C reaksiyon sıcaklığında gerçekleştirilen 20 dakikalık transesterifikasyon reaksiyonuyla en yüksek oranda yağdan biyodizele dönüşüm gerçekleştirilmiş, yapılan ölçümlerle elde edilen yakıtın ASTM standartlarına uygun olduğu tespit edilmiştir. Bu reaksiyon parametrelerinde soya fasulyesi yağı metanol ile %98.64, etanol ile %98.32; pirinç kabuğu yağı ise metanol ile %98.82, etanol ile %97.78 oranında biyodizele dönüştürülmüştür. Yapılan çalışma sonunda, mikrodalgayla biyodizel üretiminde metanolün daha yüksek dönüşüm verimi sağlaması ve daha düşük maliyetinden dolayı etanolden daha uygun bir alkol çeşidi olduğu anlaşılmıştır.

#### **1.4 Mikrodalga Destekli ve Konvansiyonel Biyodizel Üretim Metotlarının Kıyaslanması**

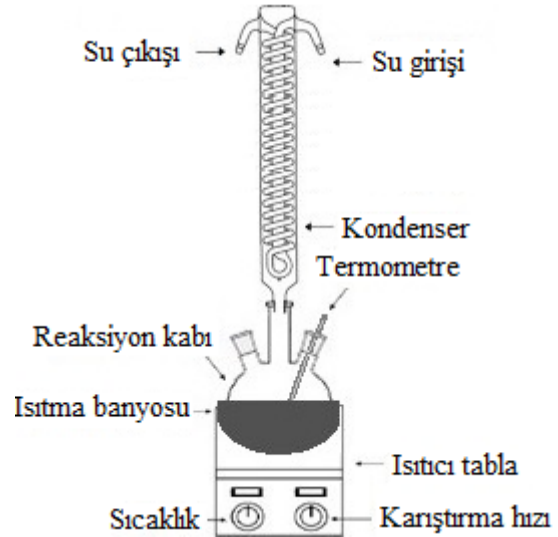
Tablo 1.7’de, 1.2.3 ve 1.3.3 nolu alt başlıklarda özetlenmiş olan konvansiyonel ve mikrodalga üretim metotları ile gerçekleştirilen biyodizel üretim çalışmaları karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Benzer reaksiyon parametrelerine sahip çalışmaların mukayesesi için reaksiyon süresine bağlı olarak değişen ve transesterifikasyon reaksiyonunun tamamlanma oranını gösteren biyodizel ester içeriği ya da verim ( $m_{\text{yağ}}/m_{\text{biyodizel}}$ ) değerleri dikkate alınmıştır.

**Tablo 1.7:** Konvansiyonel ve mikrodalga destekli biyodizel üretim çalışmaları.

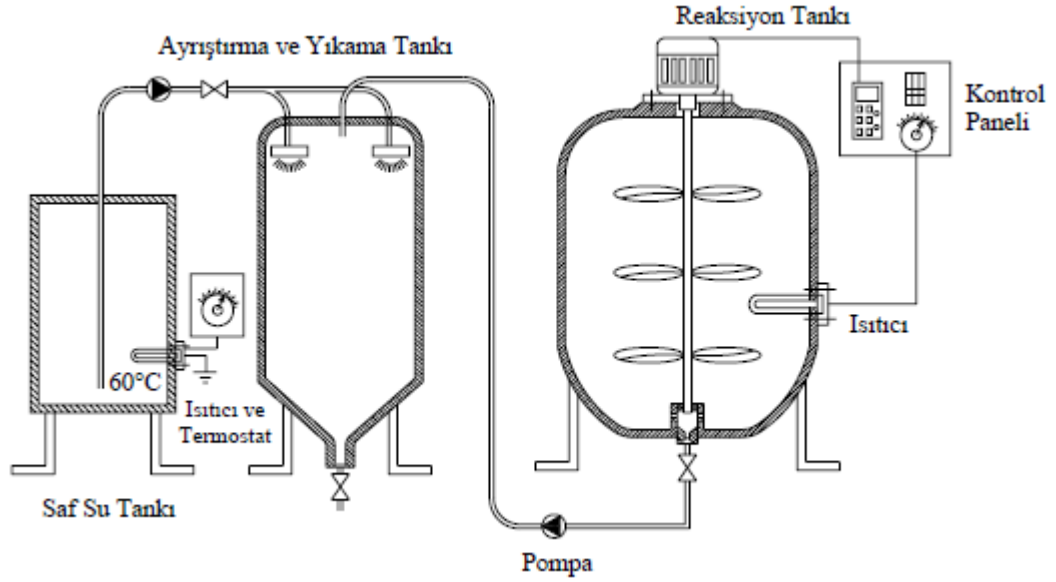
	<b>Kaynak</b>	<b>Yağ çeşidi</b>	<b>Katalizör (kütlesel %)</b>	<b>Metanol:yağ (molar oran)</b>	<b>Sıcaklık (°C)</b>	<b>Süre (dak)</b>	<b>Sonuc V (%Biyodizel verimi) E (%Ester içeriği)</b>
<b>Konvansiyonel Üretim</b>	Dias vd. [56]	Ayçiçek ve Soya	0.6 NaOH (Ayç.) 0.8 NaOH (Soya)	6:1	60	60	Yaklaşık %97 V
	Fedai vd. [57]	Kanola	1.05 NaOH	%25 yağ (hacimce)	55	60	99.2 V
	Pullen vd. [58]	Kanola	1.0 NaOH	6:1	60	60	>97.5 E
	Çildir ve Çanakçı [59]	Mısır	0.3 NaOH	6:1	60	60	99.65 V
	Azcan ve Danışman [60]	Pamuk	1.5 KOH	6:1	60	60	91.4 V 99.9 E
	Yıldız [55]	Atık yemek yağı	1.0 CH <sub>3</sub> ONa	%20 yağ (kütlece)	58	60	95.6 E
	Alptekin vd. [67]	Mısır	1.0 KOH	6:1	60	60	91% V
	Meher vd. [61]	Pongamia pinnata	1.0 KOH	6:1	65	180	96 V
	Özsezen [62]	Atık yemek yağı	1.0 KOH	6:1	60	240	96.5 E
<b>Mikrodalga Destekli Üretim</b>	Hernando vd. [84]	Kanola ve Soya	1.3 NaOH	15:1	60	1	97.0 V
	Kamath vd. [82]	Pongamia pinnata	1.33 KOH	9.3:1	-	1.5	89.9 V
	Sherbiny vd. [79]	Jatropha oil	1.5 KOH	7.5:1	65	2	97.4 V
	Encinar vd. [81]	Soya	1.0 KOH	12:1	70	2	99.7 E
	Chen vd. [83]	Atık yemek yağı	0.75 NaOCH <sub>3</sub>	6:1	-	3	97.9 V
	Kumar vd. [80]	Pongamia pinnata	1.5 KOH	6:1	60	5	96.0 V
	Azcan ve Danışman [77]	Kanola	1.0 KOH	6:1	40	5	93.7 V 97.8 E
	Duz vd. [78]	Aspir	4.0 NaOH	10:1	60	6	98.4 E
	Azcan ve Danışman [60]	Pamuk	1.5 KOH	6:1	60	7	92.7 V 99.7 E
	Kanitkar vd. [85]	Soya ve Pirinç kabuğu	0.15–0.18 NaOH	5:1	80	20	Soya: 98.64 E Pir. Kab.: 98.82 E

Tablo 1.7'deki verilere göre konvansiyonel metotla biyodizel üretiminde transesterifikasyonun tamamlanabilmesi (>%96.5 ester içeriği) ve istenen ürün dönüşüm veriminin (>%90 dönüşüm verimi) elde edilebilmesi için 60 ila 240 dak aralığında bir reaksiyon süresine ihtiyaç duyulduğu anlaşılmaktadır. Mikrodalga ışımanın kimyasal reaksiyonları hızlandırıcı etkisiyle ise benzer reaksiyon şartlarında bu süre 1 ila 20 dakika mertebelerine kadar düşmüştür. Konvansiyonel ve mikrodalga destekli üretimlerde kullanılan sistemlerden örnekler aşağıda incelenmiştir.

Laboratuvar tipi küçük veya pilot ölçekli büyük hacimli konvansiyonel biyodizel üretim sistemlerinin çalışma prensipleri birbirlerine oldukça benzerdir. Reaksiyon karışımının sıcaklığı genellikle elektrikli ısıtıcılar vasıtasıyla termal ısıtma uygulanarak artırılmaktadır. İletim ve taşınım ile ısı transferinin gerçekleştiği bu sistemlerde, elektrikli ısıtıcılar reaktanları reaktör duvarlarını ısıtarak dolaylı olarak (Örn. Şekil 1.5) ya da reaktör içinde direkt temas halinde (Örn. Şekil 1.6) ıken ısıtırlar. Ayrıca, reaktör içerisindeki karışım sıcaklığının homojen olması ve reaktanların birbiriyle yeterince temas edebilmeleri için reaksiyon boyunca karıştırma işlemi gerçekleştirilir. Şekil 1.5 ve Şekil 1.6'da laboratuvar ve pilot ölçekli konvansiyonel biyodizel üretim sistemlerine ait örnekler gösterilmiştir.



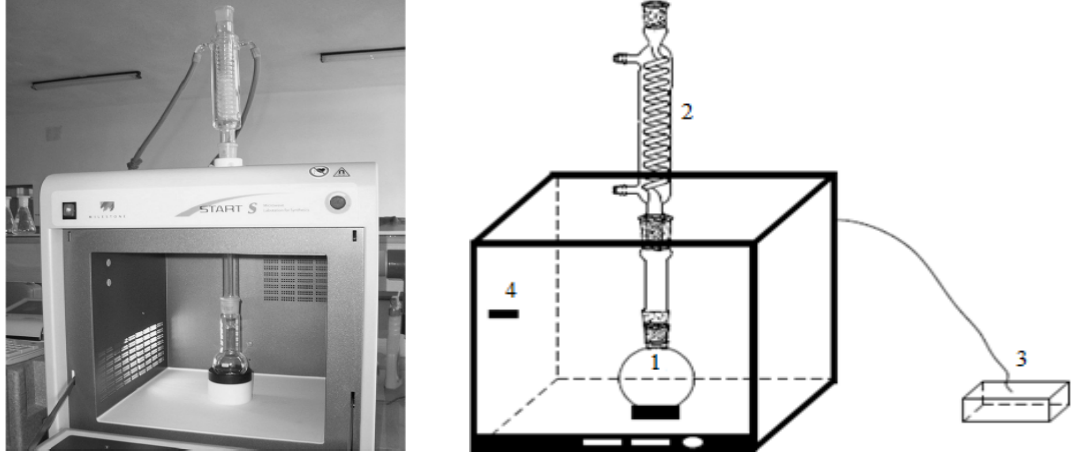
**Şekil 1.5:** Laboratuvar ölçekli konvansiyonel biyodizel üretim sistemi.



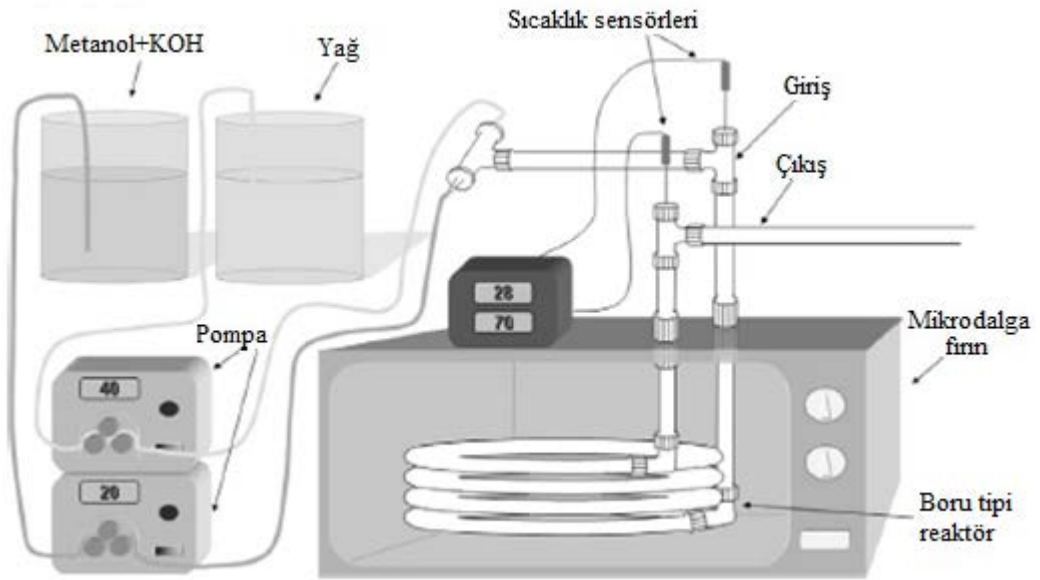
**Şekil 1.6:** Pilot ölçekli biyodizel reaktörü [62].

Literatürde bulunan mikrodalga teknolojisinin kullanıldığı biyodizel üretim çalışmalarında, transesterifikasyon reaksiyonları genellikle laboratuvar sentez ünitelerinde (Örn. Şekil 1.7) ya da ev tipi modifiye edilmiş mikrodalga fırınlarda (Örn. Şekil 1.8) gerçekleştirilmiştir. Şekil 1.7’de Azcan ve Danışmanın [60] çalışmalarında kullandığı laboratuvar ölçekli Smart S marka mikrodalga sentez ünitesi görülmektedir. Sistemde homojen bir karışım sağlayan manyetik karıştırıcı ile sabit sıcaklık kontrolü

sağlanabilmesi için sıcaklık algılayıcı mevcuttur. Deneysel çalışmalar için uygun sıcaklık değeri kontrol ünitesi yardımı ile üniteye girilmektedir.



Şekil 1.7: Mikrodalga sentez ünitesi (1-cam reaktör, 2-kondenser, 3-kontrol ünitesi) [79].



Şekil 1.8: Mikrodalga fırından dönüştürülmüş biyodizel üretim sistemi [81].

Şekil 1.8’de ise modifiye edilmiş mikrodalga fırından elde edilen laboratuvar ölçekli mikrodalga ısıtıcılı reaktörlere örnek olarak, Encinar vd. [81] çalışmalarında kullanmış olduğu sistem şematik olarak gösterilmiştir. Sistemde yağ ve metoksit karışımının mikrodalga enerjisini etkin bir biçimde absorbe edebilmesi için uzun ve sarmal yapıda olan boru tipi bir cam reaktör kullanılmıştır. Reaktörün temel sistem bileşenleri; sirkülasyon pompası, sıcaklık sensörleri ve PID kontrol ünitesinden oluşmaktadır.

Bu çalışma kapsamında yapılan literatür taramalarında görülmüştür ki; mikrodalga teknolojisi, büyük hacimlerin ısıtılması işleminde karşılaşılan kısıtlayıcı engeller nedeniyle sadece laboratuvar ölçekli biyodizel üretim araştırmalarında kullanılabilmiştir. Bu engellerden en önemlileri; mikrodalga'nın sınırlı dalma derinliğine sahip olması ve mikrodalga'nın metaller gibi yansıtıcı yüzeylerde veya anten etkisi yapabilecek sivri reaktör parçalarında ark oluşturma ihtimaliyle yaşanan güvenlik kaygısıdır. Mikrodalga ışınım ile kimyasal reaksiyonlarda güvenli, verimli ve homojen ısıtmanın sağlanması için bu kısıtlamaların önemle dikkate alınması önerilmektedir [86, 87].

## **1.5 Biyodizel Motor Test ve Simülasyonları**

Biyodizelin alternatif dizel yakıtları arasında dizel motorlara en uygun yakıt olması, motorlarda modifikasyon gerektirmeden kullanılabilmesi, kirletici emisyonlarda azalma sağlanması ve birçok yenilenebilir hammaddeden üretilebilmesi araştırmacıları farklı yağlardan biyodizeller üretmeye ve bu biyodizellerin motor testlerini incelemeye yönlendirmiştir. Biyodizel kullanılarak gerçekleştirilen motor test ve simülasyon çalışmalarından bazıları aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Da Silva vd. [88]; 6 silindirli, aşırı doldurmalı, 180 kW maks güç ve 900 Nm tork üreten bir dizel motorunda, ayçiçek yağından üretilmiş biyodizel ve motorin karışımlarının motor performans ve egzoz emisyon testlerini gerçekleştirmişlerdir. B0,

B5 ve B30 yakıtlarının karşılaştırıldığı çalışmada, biyodizel karışımlarının mevcut dizel motorunda herhangi bir modifikasyon gerçekleştirilmeden kullanılabilceği belirtilmiştir. Motorine biyodizel ilavesinin (hacimce %30'a kadar) motor performans ve özgül yakıt tüketimi değerlerinde kayda değer bir kötüleşmeye neden olmadığı ancak B30'dan daha fazla miktarda biyodizel ihtiva edecek karışımlarda bir miktar tork değerinde düşüş gözlenebileceği rapor edilmiştir. CO ve NO<sub>x</sub> emisyonları motor testlerinin büyük çoğunluğunda motorin ve motorin-biyodizel karışımları için birbirine yakın değerlerde ölçülmüş ancak yüksek motor yüklerinde biyodizel ilavesiyle CO emisyonlarında azalma oluştuğu tespit edilmiştir. Duman koyuluğu ise biyodizel ilavesiyle azalmıştır. Sonuç olarak konvansiyonel dizel yakıtına biyodizel ilave edilmesiyle motor performans değerlerinin çok etkilenmediği ancak çevreye zararlı emisyonlarda azalma sağlandığı görülmüştür.

Kawano vd. [89], kanola yağından ürettikleri biyodizelin emisyon salınım değerlerini araştırmışlardır. Deneylerde 4 silindirli, 4 litre hacimli turbo aşırı beslemeli bir dizel motoru kullanılmıştır. B0, B5, B20, B80 ve B100 yakıtlarının emisyon değerlerine göre; motorin-biyodizel karışımlarında biyodizel miktarı artışına paralel olarak NO<sub>x</sub> emisyonlarında artışın, CO ve HC emisyonlarında ise azalmanın meydana geldiği gözlemlenmiştir. B5 ve B20 karışımlarında PM emisyonları azalırken, B80 ve B100'de ise B0'a göre artış tespit edilmiştir. Oksijen içeren yapısı nedeniyle B5 gibi düşük hacimli karışım oranlarında dahi biyodizel kullanımının is emisyonlarında %15 mertebelerinde düşüş sağladığı rapor edilmiştir.

Çelikten ve Arslan [90], yapmış oldukları çalışmada kanola yağı ve soya yağından üretilmiş metil esterler ile motorini 4 silindirli, 46 kW güç ve 216 Nm maks tork değerine sahip direk püskürtmeli bir dizel motorunda test ederek bu yakıtların performans ve emisyon karakteristiklerini belirlemişlerdir. Yapılan deneylerde motorin kullanımında en yüksek motor momentini 1600 d/d'da 191 Nm, en yüksek güç ise 34.2 kW olarak ölçülmüşken; kanola ve soya yağı metil esterleri kullanımında en yüksek moment değerleri 1600 d/d'da sırasıyla 182 Nm ve 175 Nm, en yüksek güç değerleri ise 2400 d/d'da 33.4 kW ve 31.7 kW olarak ölçülmüştür. Tork değerlerindeki ortalama azalma miktarı, kanola metil esterinde %4.3, soya yağı metil esterinde ise



%8.5 olarak hesaplanmıştır. Güç değerlerindeki ortalama azalma miktarı kanola metil esterinde %4, soya yağı metil esterinde ise %8.4 olarak bulunmuştur. Özgül yakıt tüketimi değerleri ise motorine göre kano yağı metil esteri kullanımında %10.1, soya metil esteri kullanımında %17.5 oranında artmıştır.

Özer [16], atık yemeklik yağlarından üretilen biyodizelleri %5 ve %10 oranında motorin ile karıştırmış ve tek silindirli, direk enjeksiyonlu, doğal emişli, 5.6 kW gücündeki bir dizel motorunda 2200 d/d sabit motor devrinde dört farklı yük altında test etmiştir. Yapılan detaylı yanma ve performans analizlerine göre, sahip olduğu yüksek setan sayısı nedeniyle daha erken tutuşan biyodizelin yakıt karışımındaki oranın artmasıyla, tüm motor yüklerinde tutuşma gecikmesinin azaldığı anlaşılmıştır. Ayrıca, araştırmacılar biyodizel ilavesinin maks yanma basıncı ve ısı yayılımını azaltırken yanma periyodunu arttırdığını da gözlemlemişlerdir.

An vd. [15], atık yemeklik yağdan üretilmiş biyodizel ve karışımlarını (B10, B20, B50 ve B100) dört silindirli, direk püskürtmeli, maks gücü 75 kW olan bir dizel motorda kullanmışlardır. Sabit devir (1400 d/d) ve farklı yüklerde (%25, %50, %75 ve %100) gerçekleştirilen deneylerde yakıtların performans, yanma ve emisyon karakteristikleri incelenmiştir. Düşük kalorifik değerinden dolayı tüm yüklerde biyodizelin özgül yakıt tüketimi motorine göre yüksek çıkmıştır. Özellikle efektif verimin düşük yüklerde daha da düşmesinden dolayı biyodizelin düşük yüklerdeki özgül yakıt tüketim değeri yüksek yük oranlarına göre çok daha fazla bulunmuştur. Silindir içi basınç değerleri tüm yüklerde biyodizel için bir miktar daha düşük ölçülmüştür. Isı yayılım oranları basınç değerleriyle benzer şekilde bulunurken, B100 kullanımında motorine göre daha belirgin gözlemlenen bu düşüşün artan motor yüklerinde daha da fazla olduğu görülmüştür. Emisyon değerleri incelendiğinde, düşük yükler için CO emisyonu biyodizel oranının artması ve motor hızının düşmesi ile azalmış, yüksek yüklerde ise tam tersi olarak azalan biyodizel oranı ve motor hızının artışı artmıştır. NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri genel olarak biyodizel oranının artmasıyla ve kısmi yüklerde motor yükünün, tam yükte ise motor hızının artmasına paralel olarak artış göstermiştir. HC emisyonları Euro 5 common-rail motor kullanımından dolayı tüm yüklerde çok düşük seviyelerde seyretmiştir. Oldukça kararsız ölçüm

değerlerinden dolayı biyodizel-HC emisyonu ilişkisi kurulamamış ancak genel olarak artan biyodizel ilavesinin HC emisyonlarında düşüş sağladığı gözlemlenmiştir.

Özsezen [62]; dört silindirli, doğal emişli, endirekt püskürtmeli bir dizel motorda, atık palmye yağından ürettiği biyodizel ve biyodizel karışımlarını (B5, B20, B50, B100) test ederek motorin ile kıyaslamıştır. Testlerde yakıt numunelerinin tam, 60 Nm, 40 Nm, 20 Nm motor yüklerinde ve değişik devirlerde iken motor performans, yanma, püskürtme ve egzoz emisyon karakterleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre biyodizel ve karışımları motorine göre özgül yakıt tüketiminde artış, motor performansında ise hafif bir düşüş göstermiştir. Biyodizel ve biyodizel- motorin karışımlarının dizel motorda silindir gaz basıncını motorine göre yükselttiği ve üst ölü noktaya biraz daha yaklaştırdığı anlaşılmıştır. Ayrıca tüm test şartlarında biyodizel kullanımıyla tutuşma gecikmesi kısalmış ve püskürtme başlangıcı motorine göre daha önce başlamıştır. Biyodizelin oksijen içeren yapısı nedeniyle genel olarak HC, CO ve duman koyuluğu emisyonlarında önemli iyileştirmeler gözlemlenirken NO<sub>x</sub> emisyonlarında artış görülmüştür.

Rao vd. [91], biyodizel üretimlerinde hammadde olarak jatropha yağı kullanmışlardır. Elde ettikleri jatropha metil esterlerini motorin ile karıştırarak B0, B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarını hazırlamışlardır. Motor performans ve emisyon deneyleri tek silindirli, doğal emişli, 4.4 kW gücündeki bir dizel motorda sabit devir-değişken yük (%0, %25, %50, %75, %100) altında gerçekleştirilmiştir. Yakıtlara ait yanma parametreleri, krank açısına göre değişen silindir içi basıncın ölçülmesi ile belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre tutuşma gecikmesi süresinin tüm yükleme oranlarında biyodizel ilavesiyle ve bütün yakıtlarda yükleme miktarının artmasıyla azaldığı tespit edilmiştir. En büyük basınç yükselme oranlarının yakıtlardaki biyodizel oranının artması ile azaldığı, ayrıca tüm yakıt numunelerinde motor yükünün artmasıyla maks basıncın arttığı gözlemlenmiştir. Tam yükteki ısı yayılım oranlarında biyodizel miktarı arttıkça yakıtların maks ısı yayılım oranı değerlerinin azaldığı, bu azalmanın biyodizelin motorine göre daha erken yanmaya başlamasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Yakıtların özgül yakıt tüketim değerlerinin tüm yakıtlarda yükleme oranının artışıyla azaldığı, biyodizel oranının

artmasıyla ise arttığı görülmüştür. Egzoz gazı sıcaklıkları genel itibariyle biyodizel ve yükleme oranlarının artışıyla yükselmiştir. Egzoz gazı emisyon değerleri ise HC için yükleme oranının artmasıyla beraber yükselmiş, biyodizel oranının artması ile azalmıştır. CO emisyonu düşük yüklerde B20 ve motorin için oldukça benzer değerlerde seyrederken biyodizel oranının artmasıyla azalmış, tüm yakıtlarda yük oranının artmasıyla önemli miktarda artmıştır. NO<sub>x</sub> emisyonu yük ve biyodizel oranıyla paralel olarak tüm yakıtlar için artış göstermiştir.

Qi vd. [92], yaptıkları araştırmada tek silindirli, direk püskürtmeli, 11.03 kW güç üretebilen bir dizel motorunda soya fasulyesi yağından elde ettikleri biyodizelin motor performans, emisyon ve yanma karakteristiklerini analiz etmişlerdir. Araştırmacılar bu çalışma neticesinde, dizel motorlarda biyodizel kullanımının düşük yüklerde maks silindir içi basıncı motorine göre yükselttiğini, yüksek yüklerde ise her iki yakıt için silindir içi basıncın oldukça benzer değerlerde çıktığını rapor etmişlerdir. Ayrıca tüm yüklerde biyodizelin motorine göre daha erken yandığını ve tutuşma gecikmesi süresinin daha kısa olduğunu gözlemlemişlerdir. Isı yayılımı oranlarında ise düşük yüklerde motorinin ısı yayılımının biyodizele göre bir miktar daha az olduğu ancak yüksek yüklerde biyodizele göre fazla olduğu tespit edilmiştir. Yaptıkları emisyon ölçümlerinde genel olarak biyodizelin CO, HC ve is emisyonlarında ciddi bir azalma sağladığını açıklamışlardır.

Rahim vd. [93]; motorin, bitkisel yağ ve biyodizel- motorin karışımlarının (B5 ve B20) dizel motordaki motor performansını nümerik olarak incelemişlerdir. GT Power yazılımında gerçekleştirilen simülasyonlarda dört silindirli dizel motorun tork, güç, özgül yakıt tüketimi ve volümetrik verim değerleri hesaplanmıştır. Simülasyon verilerine göre, literatürde bulunan deneysel motor testleriyle benzer olarak B5 ve motorinin motor performansları oldukça benzer bulunurken, B100 ve bitkisel yağ kullanımında tork, güç ve volümetrik verimlerinde düşüş, yakıt tüketiminde ise artış gözlemlenmiştir.

Said vd. [94], GT-Power motor simülasyon programını kullanarak biyodizel yakıtının motor performans ve yanma karakteristiklerini nümerik metotla

hesaplamışlar, elde ettikleri sonuçları gerçekleştirdikleri motor testleri ile mukayese etmişlerdir. Çalışmada, programın kütüphanesine yakıt olarak palmye yağı bazlı biyodizel eklenmiş ve motor bileşenlerinin geometrileri basitleştirilmiş olarak programa girilerek simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ile elde edilen ısı yayılım ve motor performans eğrileriyle fiziki deneysel verileri büyük oranda eşleşmiştir. Araştırmacılar bu çalışmalarlarıyla, HAD programlarına göre çok daha hızlı ve pratik olan tek boyutlu yanma simülasyonlarının başarıyla motor yanma modellemelerinde kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Al-Dawody ve Bhatti [95], farklı miktardaki soya yağı biyodizeli-motorin karışımlarının motor performans, yanma analizi ve egzoz emisyonu ölçümlerini gerçekleştirdikleri motor testleri ve Diesel-RK programını kullanarak oluşturdukları simülasyonlarda incelemişlerdir. Testlerde kullanılan ve Diesel-RK'da modellenen; 4 zamanlı, tek silindirli, 4.4 kW gücünde Kirloskar TAF-1 marka bir dizel motordur. Araştırmacılar, yaptıkları doğrulama (validasyon) sonunda simülasyon ile motor test verilerinin birbirlerine oldukça yakın olduğunu belirtmişlerdir. Simülasyon sonuçlarına göre tüm biyodizel karışımları NO<sub>x</sub> emisyonunu bir miktar arttırmış, özgül yakıt tüketimi ve efektif verimi ise düşürmüştür. Biyodizel kullanımı ile Bosch duman koyuluğunda büyük ölçüde iyileşme sağlandığı tespit edilmiştir. Buna göre duman koyuluğu değerleri B20, B40 ve B100 kullanımında motora kıyasla sırasıyla %25.27, %36.93 ve %52.96 oranında azalmıştır.

Datta vd [96]; tek silindirli, doğal hava emişli, direk püskürtmeli, 3.5 kW gücündeki bir dizel motorunda farklı orandaki biyodizel alkol karışımlarının kullanılmasının motor performans ve emisyon üzerindeki etkilerini nümerik olarak Diesel RK motor simülasyon programında incelemişlerdir. Çalışmada, palm sterain biyodizel yakıtına metanol ve etanol alkollerinin ilavesinin etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; biyodizel-alkol karışımlarında, saf biyodizel kullanımına göre NO<sub>x</sub> emisyonlarında önemli bir iyileştirme sağlanmış ancak özgül yakıt tüketimi, tutuşma gecikmesi, PM ve is emisyonlarında bir miktar artış; maks silindir içi basınçlarında ise düşüş yaşanmıştır. Validasyon için gerçekleştirilen fiziki motor testleri sonunda, simülasyon programının efektif verim ve NO<sub>x</sub> değerlerini çok yüksek

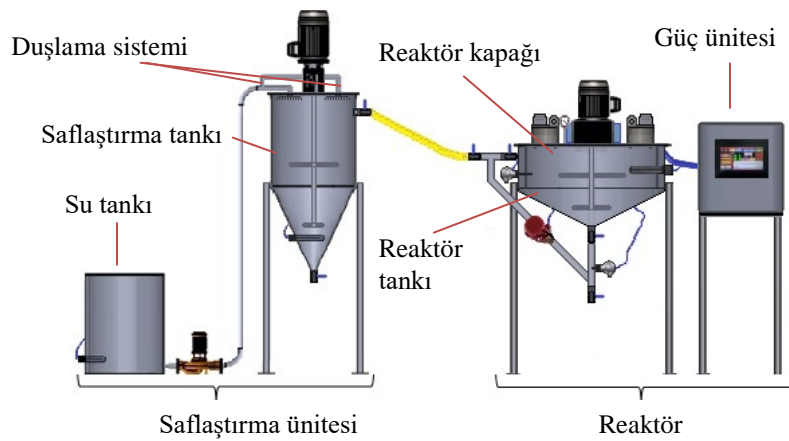
hassasiyetle, maks silindir basıncını ise kabul edilebilir bir hata payıyla (%4.8) tahmin ettiği görülmüştür.

Paul vd. [97], motorin ile jatropha yağından üretilen biyodizelin sabit hız (1500 d/d), değişken yük altındaki motor performans ve emisyon karakteristiklerini; iki silindirli, direk püskürtmeli, 7.35 kW gücündeki motoru simüle ederek kıyaslamışlardır. Diesel RK yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen ön simülasyonlarda B0 ve B100 yakıtlarının özgül yakıt tüketim değerleri, efektif verimleri ve NO<sub>x</sub> emisyonları hesaplanmış, çıkan veriler gerçekleştirilen motor testleriyle doğrulanmıştır. Deneysel testlerde efektif verim B0 için maks %29.6, B100 için ise maks %21.2 bulunurken, simülasyonlarda B0 için maks %30.3, B100 için maks %27.5 olarak elde edilmiştir. Simülasyonlarda elde edilen özgül yakıt tüketim değerleri deneysel verilere göre daha düşük çıkmıştır. Düşük yük simülasyonlarında motorin için 0.4209 kg/kWh olarak bulunan bu değer, deneysel olarak 0.531 kg/kWh ölçülmüştür. Aynı deney şartlarında biyodizel kullanımında simüle edilen özgül yakıt tüketimi 0.60 kg/kWh, deneysel olarak ölçülen değer 0.73 kg/kWh olarak bulunmuştur. Yüksek yüklerde motorin ve biyodizel için simülasyon ve deneysel verileri birbirlerine çok yaklaşmış, sırasıyla bu değerler; B100 için 0.4529 kg/kWh ve 0.49 kg/kWh, motorin için ise 229 kg/kWh ve 0.313 kg/kWh olarak ölçülmüştür. Emisyon karakteristikleri incelendiğinde, NO<sub>x</sub> emisyonlarının hem simülasyon hem de deneysel çalışmalarda artan yük ve biyodizel oranıyla arttığı görülmüştür. Doğrulama işleminde, elde edilen deneysel ve simülasyon verilerinin benzer olduğu tespit edildikten sonra deneysel olarak ölçülmeyen diğer motor performans ve emisyon karakteristikleri, ayrıca deneysel olarak test edilmeyen B50 yakıtının tüm motor test değerleri simüle edilmiştir. Çalışma tamamlandığında nihai olarak; yakıtlardaki biyodizel oranının artmasıyla maks silindir içi basıncının arttığı, tutuşma gecikmesinin kısaldığı emisyon gazları bakımından ise NO<sub>x</sub> ve CO<sub>2</sub>'nin arttığı, PM ve is'in ise azaldığı sonucuna varılmıştır.

## 2. MİKRODALGA DESTEKLİ BİYODİZEL REAKTÖRÜ TASARIMI VE İMALATI

Literatürde belirtildiği üzere, biyodizel üretiminin gerçekleştirildiği birçok çalışmada mikrodalga ısıtma sistemi kullanılmasıyla transesterifikasyon süresi konvansiyonel sistemlere göre önemli ölçüde azaltılmış, ayrıca ürün eldesinde verim artışı sağlanmıştır. Ancak elde edilen bu iyileştirmeler sadece küçük/laboratuvar ebatlı üretimlerde sınırlı kaldığı ve henüz ticari biyodizel üretimine entegre edilemediği için endüstride katma değere dönüştürülememiştir. Çalışmamızın bu bölümü, mikrodalga teknolojisi kullanılarak pilot ölçekte biyodizel üretiminin yapılabileceği bir biyodizel reaktörünün tasarım ve imalat aşamalarını içermektedir.

Pilot ölçekli (60 Litre) kesikli tip biyodizel reaktörü, endüstriyel ölçekli biyodizel üretim sistemlerine örnek teşkil edebilecek şekilde ve kendi yakıtını üretmek isteyen çiftçi ve küçük-orta ölçekli işletmecilere yönelik olarak tasarlanmıştır. Şekil 2.1'de tasarlanan biyodizel reaktörü ve reaktöre bağlanmış saflaştırma ünitesinin ana bileşenleri şematik olarak görülmektedir.

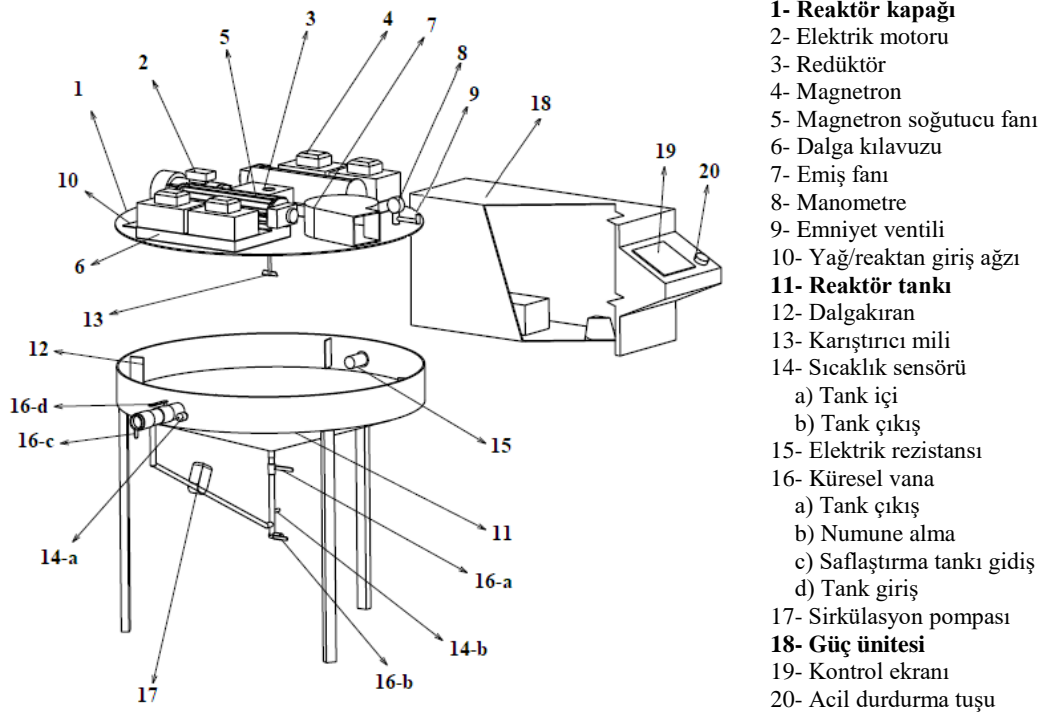


Şekil 2.1: Biyodizel reaktörü ve saflaştırma ünitesi bileşenlerinin şematik gösterimi.

Sistemde bulunan saflaştırma ünitesi, konvansiyonel biyodizel üretim sistemlerinde sıklıkla kullanılan ünitelere benzer olarak saflaştırma ve su tanklarından meydana gelmektedir. Bu sistemde saflaştırma işlemi, sulu yıkama tekniği kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bunun nedeni, sıcak su (50-60°C) ile yıkama yönteminin biyodizelin saflaştırılması için en etkili yöntemlerden birisi olarak gösterilmesi ve sulu yıkama saflaştırma ünitelerinin kurulumunun basit ve düşük maliyetli olmasıdır [98]. Sistemde yıkama işlemi, su tankında ısıtılan su (55°C) ile saflaştırma tankı içindeki ham biyodizelin duşlama yöntemiyle yıkanması şeklinde gerçekleştirilir. Duşlama ile püskürtülen suyun biyodizelin tamamına temas edebilmesi için püskürtülme ile eşzamanlı olarak karışımın karıştırılması da sağlanmaktadır. Karıştırma işlemi mekanik karıştırıcı ile gerçekleştirilmektedir ve karıştırma hızı sabun oluşumunu önlemek için sabit düşük bir hızda (15 d/d) tutulmaktadır. Kurutma işlemi ise yıkanan biyodizelin saflaştırma tankındaki elektrikli rezistans ile ısıtılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Mevcut sistemde saflaştırma işlemi için sulu yıkama metodu kullanılsa da saflaştırma ünitesi reaktörden ayrılabilir. Böylece reaktöre ilave edilebilecek ek bir ünite ile sistemin magnesol ya da iyon reçine gibi alternatif saflaştırma yöntemleri ile de kullanılabilmesi sağlanmıştır.

### **2.1.1 Reaktörün Tasarım ve İmalat Aşamaları**

Kimyasal reaktörler hacim ve kullanılan metotlar bakımından kesikli ve sürekli (kontinü) sistemler olarak iki sınıfa ayrılır. Küçük ve pilot ölçekli (130 m<sup>3</sup>/ton) biyodizel reaktörlerinde genellikle kurulumu en basit ve yatırım maliyeti en düşük olan kesikli yöntem tercih edilmektedir [99, 100]. İmal edilecek pilot ölçekli biyodizel reaktörü kendi yakıtını üretecek çiftçi ve küçük-orta ölçekli işletmecilere yönelik olduğu için mikrodalga destekli reaktör kesikli tip olarak tasarlanmıştır. Reaktör üç ana kısma ayrılmıştır: reaktör kapağı, reaktör tankı ve güç ünitesi. Tasarımı yapılan reaktör bileşenleri ile birlikte Şekil 2.2'de şematik olarak verilmiştir.



**Şekil 2.2:** Reaktör ve bileşenlerinin şematik gösterimi.

Mikrodalga ısıtma sistemlerinin büyük hacimli reaktörlerde etkin olarak kullanılamamasının temel nedeni, reaktanların sahip oldukları sınırlı mikrodalga dalma derinlikleridir. Biyodizel üretiminde en çok tercih edilen hammadde bitkisel yağlar olduğu için reaktör tank tasarımı bitkisel yağların 2.45 GHz mikrodalga ışıma frekansı altındaki dalma derinliği göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Tablo 2.1’de 2.45 GHz frekanslı mikrodalga ışıma altında genel olarak sıvı bitkisel yağların 25°C ve 60°C sıcaklıktaki ortalama dielektrik özellik ve dalma derinliği değerleri verilmiştir.

**Tablo 2.1:** 2.45 GHz mikrodalga ışıma altında bitkisel yağların ortalama dielektrik özellikleri [101].

Sıcaklık	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$d_d$ (cm)
25°C	2.5	0.1	23.7
60°C	2.6	0.2	19.5

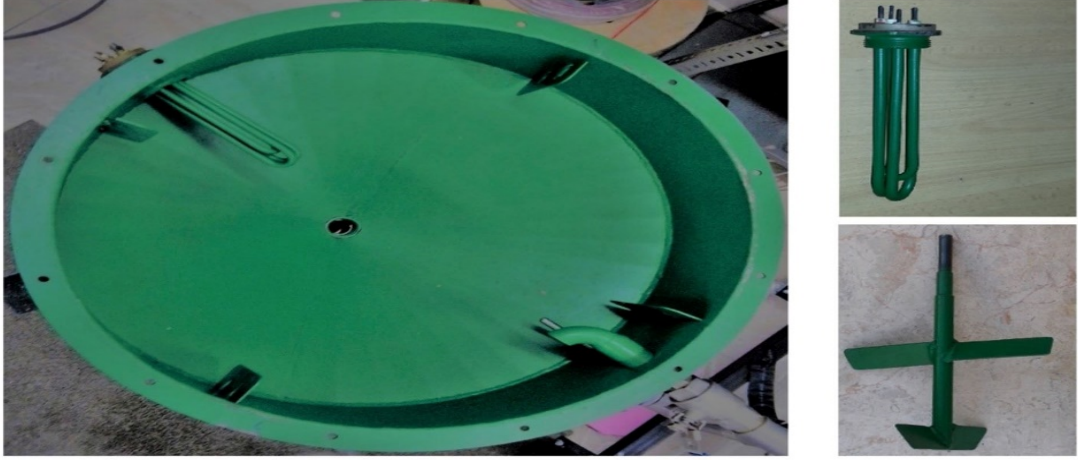


Bu değerler göz önüne alınarak reaktör tam kapasite doldurulduğunda tank içi sıvı yüksekliği 25 cm olacak Şekilde tasarlanmıştır. Şekil 2.3'te reaktör tankının imalat fotoğrafları görülmektedir.

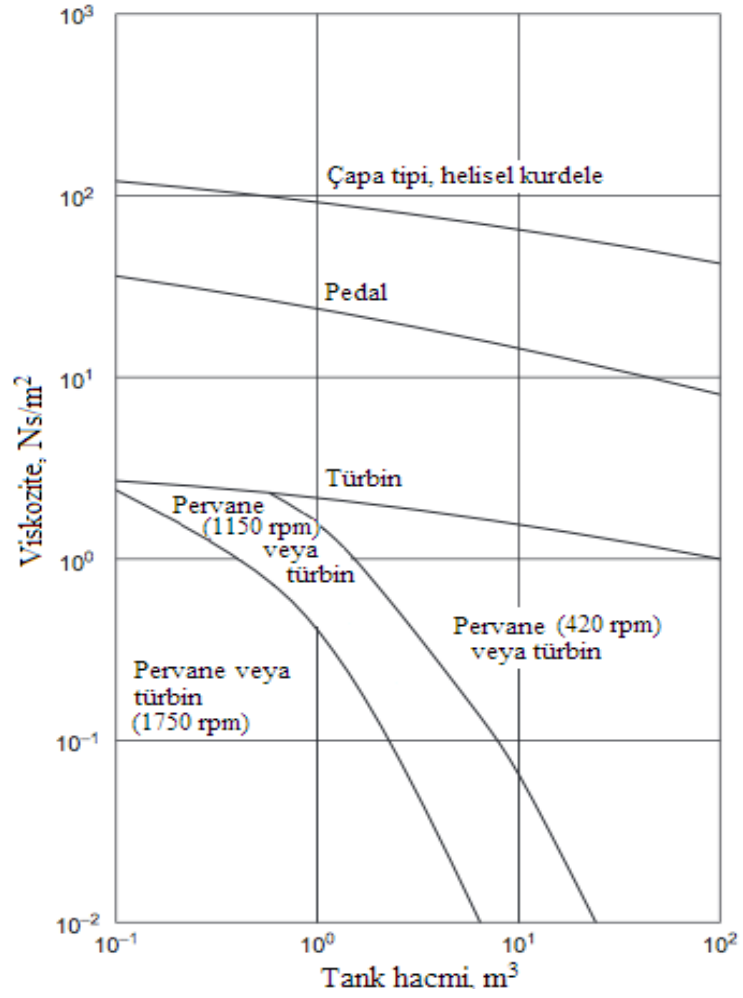


**Şekil 2.3:** Reaktör tankı imalatı.

Reaktör tankı, elik esaslı sac malzemedен (DKP-Kalite no: 6112) imal edilmiştir. Tank tasarımında mikrodalga ışıma altında ark oluşumuna neden olabilecek sivri köŐe ve uzantılardan kaçınılmıŐ, imalat sonrasında ise kaynaklı birleŐim yerleri hassas Şekilde taŐlanarak birleŐim yerlerinde yumuşak geçiŐler elde edilmiştir. Ayrıca, mikrodalğanın metal malzemeye çarparak yansımaları esnasında ark oluşumunu engellemek için mikrodalğanın temas ettiği tüm reaktör bileşenleri mikrodalga için geçirgen olan ve yaygın kullanım adı teflon olarak bilinen politetrafloroetilen polimer malzeme ile kaplanmıŐtır. Teflon, florlanmıŐ etilen polimeri olan termoplastik bir politetrafloroetilendir. Flor atomlarıyla doymuş uzun ve düz bir karbon zincirinden meydana gelmiş moleküler yapı, atomlar arasındaki kuvvetli bağlar sebebiyle oldukça inert özelliklere sahiptir. Isıya, kimyevi maddelere, neme, elektrik atlamasına (dielektrik), sürtünmeye dayanıklı olan teflon hiçbir maddeye yapıŐmaz ve sürtünme katsayısı çok küçüktür [102]. Şekil 2.4'te teflon malzeme (Whitfort Xylan® cf 8840) ile kaplanmış reaktör i yüzeyi ve bazı reaktör bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Teflon ile kaplanmış reaktör tankı iç yüzeyi ve reaktör bileşenleri.



Şekil 2.5: Akışkan viskozitesine bağlı karıştırıcı tipleri [103].

Reaktörde karıştırıcı kanat tipi, karışımı yapılacak akışkanın viskozite-hacim değerlerine göre önerilen grafik dikkate alınarak (Şekil 2.5) seçilmiştir [103]. Buna göre bitkisel yağlara uygun kanat tipinin türbin tipi kanat olduğu tespit edilmiştir. Etkin bir karıştırma işlemi için mekanik karıştırıcı elemanlarının geometrik oranları standartlara göre belirlenmiştir. Tasarımda kullanılan geometrik oranlar aşağıdaki gibidir [103]:

$$\frac{D_A}{D_T} = \frac{1}{3}$$

$$\frac{H}{D_T} = 1$$

$$\frac{L}{D_A} = \frac{1}{4}$$

$$\frac{E}{D_A} = 1$$

$$\frac{W}{D_A} = \frac{1}{5}$$

Burada;

B= Kanat sayısı,

$D_A$ = Karıştırıcı çapı,

H= Sıvı yüksekliği,

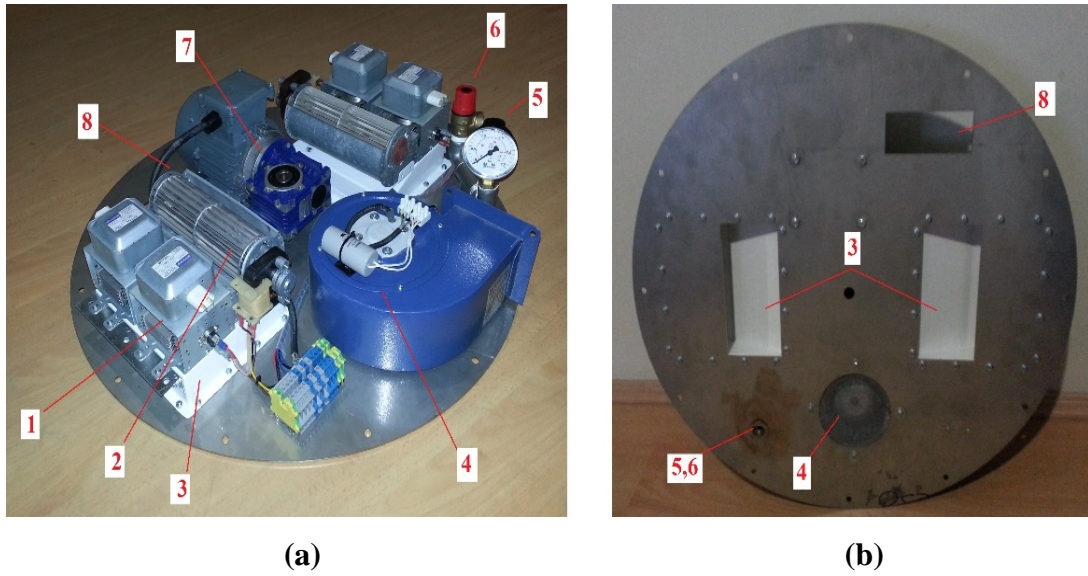
$D_T$ = Reaktör çapı,

E= Reaktör tabanından pervanenin yüksekliği,

L= Karıştırıcı bıçak uzunluğu,

W= Karıştırıcı bıçak genişliğidir.

Konvansiyonel biyodizel reaktörlerine göre yassı bir geometriye sahip olan reaktörde, reaktanların hızlı bir şekilde homojen karışım oluşturması ve mikrodalganın tüm karışıma etkiyebilmesi için karıştırma işleminin yüksek hızda ve yoğun olarak gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bunun için konvansiyonel biyodizel reaktörlerde genellikle tek bir karıştırma ünitesi yeterliyken, tasarlanan reaktörde mekanik karıştırıcı (280 d/d) ve sirkülasyon pompasının (60 L/d) eşzamanlı olarak çalışması uygun görülmüştür. Reaktörün konik kısmının en alt noktası ve reaktör tepe noktası arasına eklenen sirkülasyon hattı ile karıştırma hızının artırılması yanında transesterifikasyon gerçekleştirilirken oluşan gliserol fazının reaktörün alt kısmında birikmesinin engellenmesi ve karışım homojenliğinin artırılması da düşünülmüştür. Ayrıca, vorteks oluşturarak reaktanların daha iyi karıştırılabilmesi için reaktör tankı içine 4 adet dalgakıran monte edilmiştir.



Şekil 2.6: Reaktör kapağı: (a) üst görünüş, (b) alt görünüş.

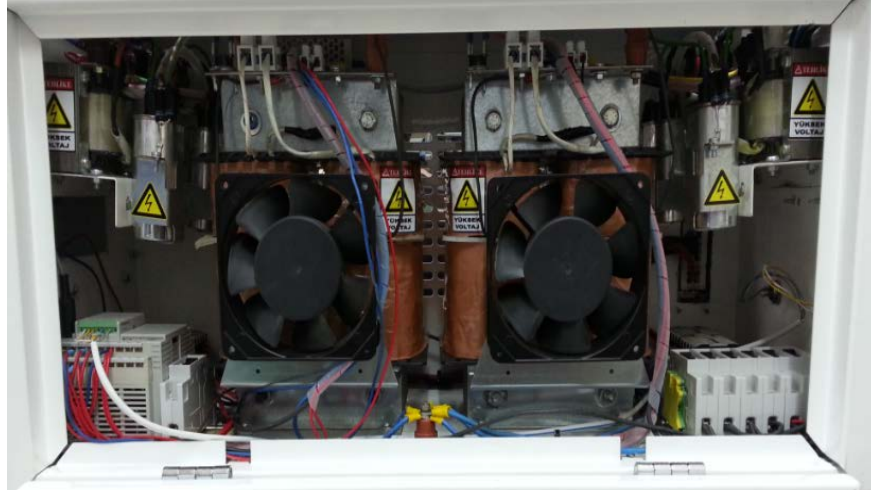
**Reaktör kapağı:** Reaktör kapağı, temel reaktör elamanlarının konumlandırıldığı parça olarak tasarlanmıştır. Şekil 2.6'daki reaktör kapağının üst ve alt görünüş fotoğraflarında, kapak üzerinde bulunan reaktör elemanları gösterilmiştir.

Buna göre 1) Magnetron, 2) Magnetron soğutma fanı, 3) Dalga kılavuzu, 4) Emiş fanı, 5) Manometre, 6) Emniyet ventili, 7) Mekanik karıştırıcı (Elektrik motoru ve redüktör) ve 8) Yağ/reaktan giriş ağızı şeklindedir.

Reaktörde, kapak kısmına yerleştirilmiş maks 0.9 kW çıkış gücüne sahip 2.45 GHz frekanslı 4 adet magnetron bulunmaktadır. Mikrodalga reaktörlerde 220 V/380 V'luk şebekeden çekilen normal elektrik dalgaları; reaktör içerisinde bulunan yüksek gerilim transformatörü, yüksek gerilim diyotu, kondansatör ve magnetron vasıtasıyla kısa dalga boylu yüksek frekansa çevrilir. Magnetronlar yüksek frekanslı elektromanyetik dalga (mikrodalga) üreten elemanlardır. Yüksek gerilim transformatörünün primerine 220/380 V alternatif akım uygulanır. Sekonder sargının birinden 3.3 V değerinden 4000 V gerilim çıkar. 3.3 V gerilim magnetron bakırdan yapılmış katot uçlarına bağlanır. Katot üzerinden geçen akım, katodu akkor hale getirir. Katodun çevresinde dilimli anot vardır. Transformatörün 4000 V'luk sargısının bir ucu diyottan geçirilerek doğrultulur ve (+) ucu anoda bağlanır. 4000 V'luk sargının diğer ucu ise katoda bağlanır. Anot-katot arasında bir çekim oluşur. Akkor hele gelen katottaki fırlamaya hazır elektronlar elektrostatik çekim alanına uyarak katottan anoda hava boşluğundan geçerek ulaşır. Elektronların bu hareketi anot dilimleri arasında kutuplaşmaya ve alternatif akımın meydana gelmesine neden olur. Bunun sonucunda yüksek frekanslı yoğun elektron hareketi başlar. Yüksek frekanslı (2.45 GHz) elektron hücresi anoda bağlanmış antenle reaktör içine gönderilir [104]. Tasarlanan reaktörde magnetronlar tarafından üretilen mikrodalgalar karıştırma mili kanatlarına doğru konumlandırılmış dalga kılavuzları ile reaktör boşluğuna yönlendirmektedir. Böylece yüksek hızda dönen mekanik karıştırıcı kanatlarına çarparak yansıyan mikrodalgalar, reaktör içinde homojen şekilde dağıtılmaktadır. Magnetronların çıkış güçleri reaktör kontrol ekranından ayarlanabilmektedir.

Reaktörde mikrodalga ısıtma sistemi dışında bir de konvansiyonel ısıtma sistemi bulunmaktadır. 2.7 kW gücündeki elektrik rezistansı reaktör tankı içine daldırılmış konumdadır ve gücü reaktör ekranından kontrol edilebilmektedir. Elektrik rezistansı, aynı reaksiyon koşullarında gerçekleştirilen mikrodalga destekli ve konvansiyonel üretim metotlarının karşılaştırılması ayrıca mikrodalga sisteminin

arızası durumunda alternatif ısıtma sistemi olarak kullanılmak üzere reaktöre eklenmiştir.



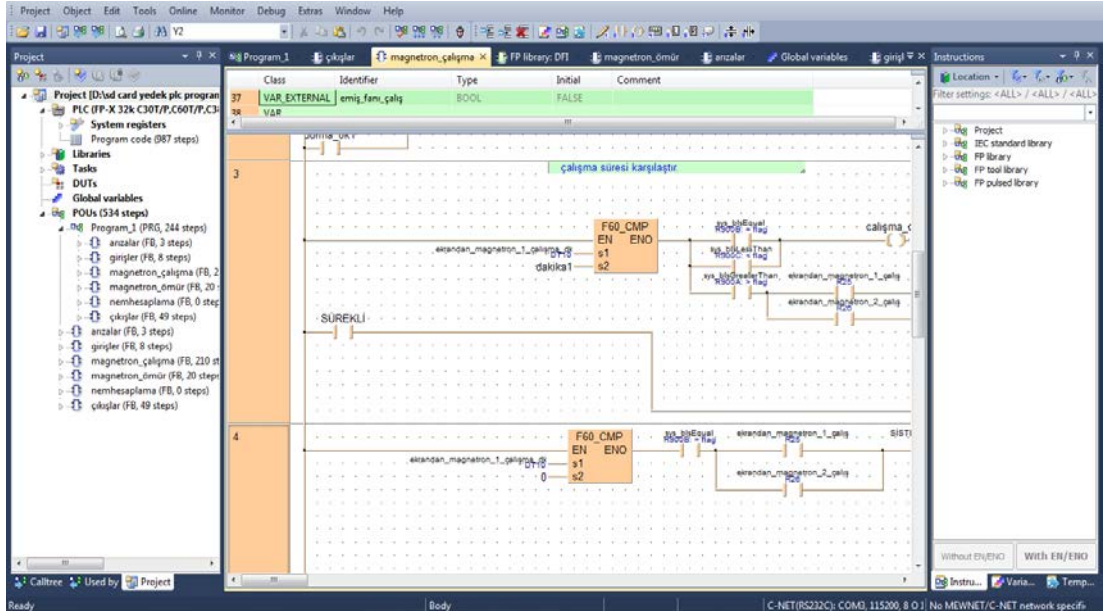
Şekil 2.7: Reaktör güç merkezi.



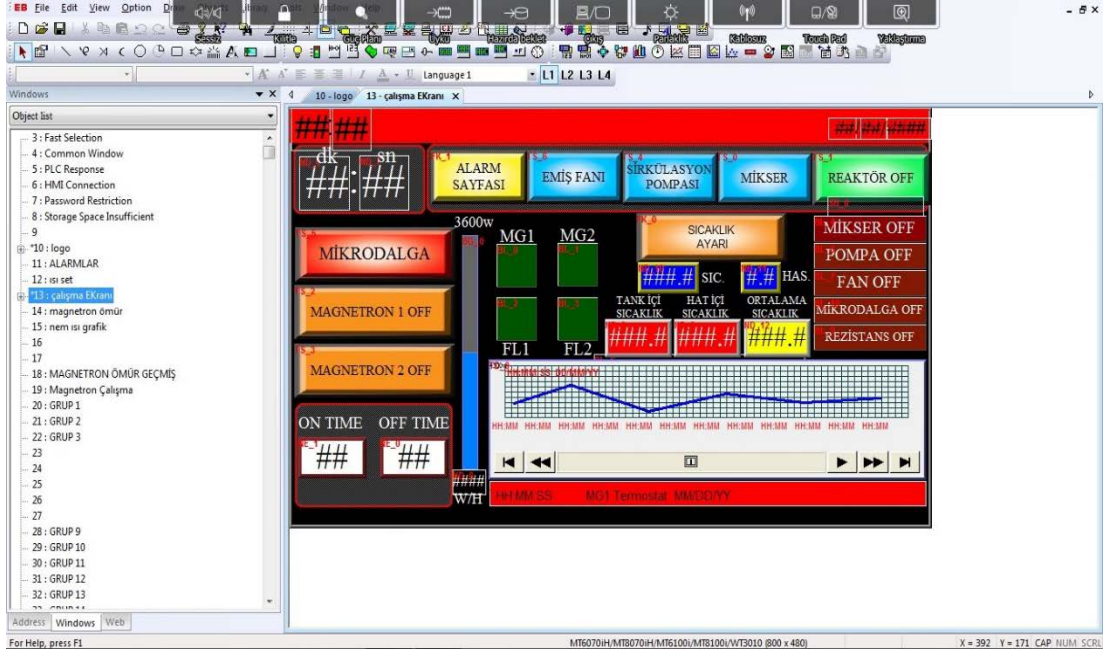
Şekil 2.8: Reaktör kontrol ekranı.

**Güç ünitesi:** Biyodizel reaktörünün güç ünitesinde yüksek gerilim transformatörleri, yüksek gerilim diyotları, kondansatörler, kontaktörler ve Panasonic marka Fp-c30 PLC sisteminden oluşan güç merkezi ve reaktör kontrol ekranı bulunmaktadır. Sistemin kontrolü bu merkezden sağlanmaktadır. Reaktör güç ünitesi bileşenleri olan güç merkezi ve kontrol ekranı Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’de gösterilmiştir.

Reaktör sıcaklık değerlerinin takibi (tank içi sıcaklık, tank çıkış sıcaklığı ve ikisinin ortalaması) ve reaktör çalışma sıcaklığının tayini, ısıtma sistemlerinin seçimi, mikrodalga ısıtma sistemi çıkış gücünün belirlenmesi, magnetronların çalışma sıcaklıklarının takibi, karıştırma sistemlerinin ve emiş fanı kontrolü, reaktör zamanlayıcısının çalıştırılması (zamana bağlı sistemlerin kontrolü), reaktörün çalışma saatlerinin ve zamana bağlı güç tüketiminin grafiksel olarak takibi ve alarm sayfasından sistem arızalarının okunması gibi işlemler reaktör kontrol ekranından yapılmaktadır. Reaktörden toplanan veriler (sıcaklık, güç değerleri vb.) PLC işlem merkezinde değerlendirilmekte ve operatörün kontrol ekranından belirlediği girdilerine göre reaktör çalışma parametreleri ayarlanmaktadır. Hazırlanan PLC kontrol sistemi akış şeması ve reaktör kontrol ekranı menüsü Şekil 2.9 ve Şekil 2.10’daki gibidir.



Şekil 2.9: PLC sisteminin programlaması.



**Şekil 2.10:** Reaktör kontrol ekranı ara yüzünün tasarlanması.

İmalat işlemleri sonrasında, Balıkesir Üniversitesi Makine Mühendisliği Biyoyakıt Laboratuvarına kurulan pilot ölçekteki 60 L kapasiteli mikrodalga destekli biyodizel reaktörünün fotoğrafları Şekil 2.11 ve Şekil 2.12’de gösterilmiştir.



**Şekil 2.11:** Mikrodalga destekli biyodizel reaktörünün önden görünümü.





**Şekil 2.12:** Mikrodalga destekli biyodizel reaktörünün üstten görünümü.

Tasarımı gerçekleştirilen biyodizel üretim sisteminin imalatında destek alınan firmalar: reaktör tank gövdesi ve diğer çelik konstrüksiyon imalatları için Altar Altuntaş Tarım Makineleri San ve Tic (Balıkesir), reaktör güç ünitesi ve mikrodalga ısıtma sistemi kurulumu için Mikromak Endüstriyel Mikrodalga Fırınlar Ltd Şti (İzmir), reaktör iç yüzeyinin ve reaktör bileşenlerinin teflon ile kaplanması için Atk Kaplama İzolasyon San Tic Ltd Şti (İzmir) ve Baliteknik Ltd Şti (İstanbul)'dır.

Tasarlanan reaktör “Türk Patent ve Marka Kurumu” tarafından faydalı model buluşu olarak kabul edilmiş ve tescillenmiştir. Faydalı model belgesi, çalışmanın EKLER bölümünde mevcuttur (EK-A).

### 3. BİYODİZEL ÜRETİMİ

Bu çalışmanın en önemli amaçlarından bir tanesi, tasarlanan mikrodalga destekli biyodizel reaktörü ile konvansiyonel yöntemlere göre daha hızlı ve verimli şekilde EN 14214 standartlarına uygun biyodizel üretmektir. Biyodizel üretimlerinde tek kademeli bazik transesterifikasyon yöntemi kullanılmıştır. Deneysel farklı hammaddeler (rafine ve atık bitkisel yağlar) ve reaksiyon parametreleri kullanılarak optimum transesterifikasyon şartlarının ve süreye bağlı olarak transesterifikasyon reaksiyonunun tamamlanma derecesinin belirlenmesine çalışılmıştır. Bunun için transesterifikasyon reaksiyonu devam ettirilirken reaktörden belirli zaman aralıklarında biyodizel numuneleri alınmış, ardından saflaştırma işleminden geçirilen numunelerin analizleri yapılarak yakıt özellikleri tespit edilmiştir. Optimizasyon çalışması sonunda belirlenen reaksiyon şartlarında bitkisel yağlardan yeniden biyodizel üretilmiş, üretilen yakıtlar kullanılarak ile de motor testleri gerçekleştirilmiştir.

#### 3.1 Hammadde (Yağlar) ve Kimyasal Malzemeler

Biyodizel üretiminde bitkisel yağ olarak ülkemizde ve dünya genelinde en yaygın üretimi gerçekleştirilen ayçiçek (Türkiye), kanola (Avrupa) ve soya (Kuzey Amerika) yağları; atık yağ olarak ise Balıkesir yöresinde çokça tüketilen lokma adlı hamur işi yiyeceğin kızartma işleminde kullanılan atık ayçiçek yağı (AAY) kullanılmıştır. Ayçiçek yağı (Kula marka), Balıkesir Kula Yağ ve Emek Yem Sanayi Ticaret A.Ş.; kanola yağı (Orkide marka), Küçükbay A.Ş.; soya yağı (İthal, markasız), Camyağ Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmalarından satın alınmıştır. Balıkesir merkez ilçeleri içinde Fırıncılar ve Unlu Mamuller İmalatçıları Esnaf ve Sanatkarları Odasına kayıtlı 11 adet lokma üreten işletme mevcuttur. AAY, bu işletmelerden yıllık ortalama 43300

L atık yağ üreten Lokmacı Ali Usta firmasından temin edilmiştir [39]. Yağlara ait bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

**Tablo 3.1:** Biyodizel üretiminde kullanılan yağların bazı karakteristik özellikleri.

Özellik	Birim	Yağ çeşidine göre ölçülen değerler			
		Ayçiçek	Kanola	Soya	AAY
Yoğunluk (15°C)	g/cm <sup>3</sup>	0.921	0.919	0.923	0.925
Viskozite (40°C)	mm <sup>2</sup> /s	32.57	36.17	31.45	36.47
Asit değeri	mgKOH/g	0.26	0.29	0.29	0.69
Alt ısıt değeri	kJ/kg	39482	39453	39415	39212
Su içeriği	mg/kg	264	296	288	356

Ayçiçek ve kanola yağlarının yağ asit kompozisyonları bu yağları üreten firmaların laboratuvarlarında, soya yağı ve AAY’ninkiler ise TÜBİTAK MAM Gıda Enstitüsü laboratuvarlarında belirlenmiştir (bkz. EK-B ve EK-C). Deneylerde kullanılan yağların yağ asit kompozisyonları ve ortalama mol kütleleri Tablo 3.2’de verilmiştir. Biyodizel üretiminde kullanılacak yağların (trigliserit) ortalama molekül kütlesi (3.1) nolu denkleme göre hesaplanmıştır [105] :

$$M_{a_{tri}} = 3M_{a_{SYA}} + M_{a_{gls}} - 3M_{a_{su}} \quad (3.1)$$

$M_{a_{tri}}$  = Trigliseridin molekül ağırlığı,

$M_{a_{SYA}}$  = Serbest yağ asitlerinin ortalama molekül ağırlığı,

$M_{a_{gls}}$  = Gliserolün (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub>) molekül ağırlığı,

$M_{a_{su}}$  = Suyun (H<sub>2</sub>O) moleküler ağırlığı,

**Tablo 3.2:** Biyodizel üretiminde kullanılan yağların yağ asidi kompozisyonları.

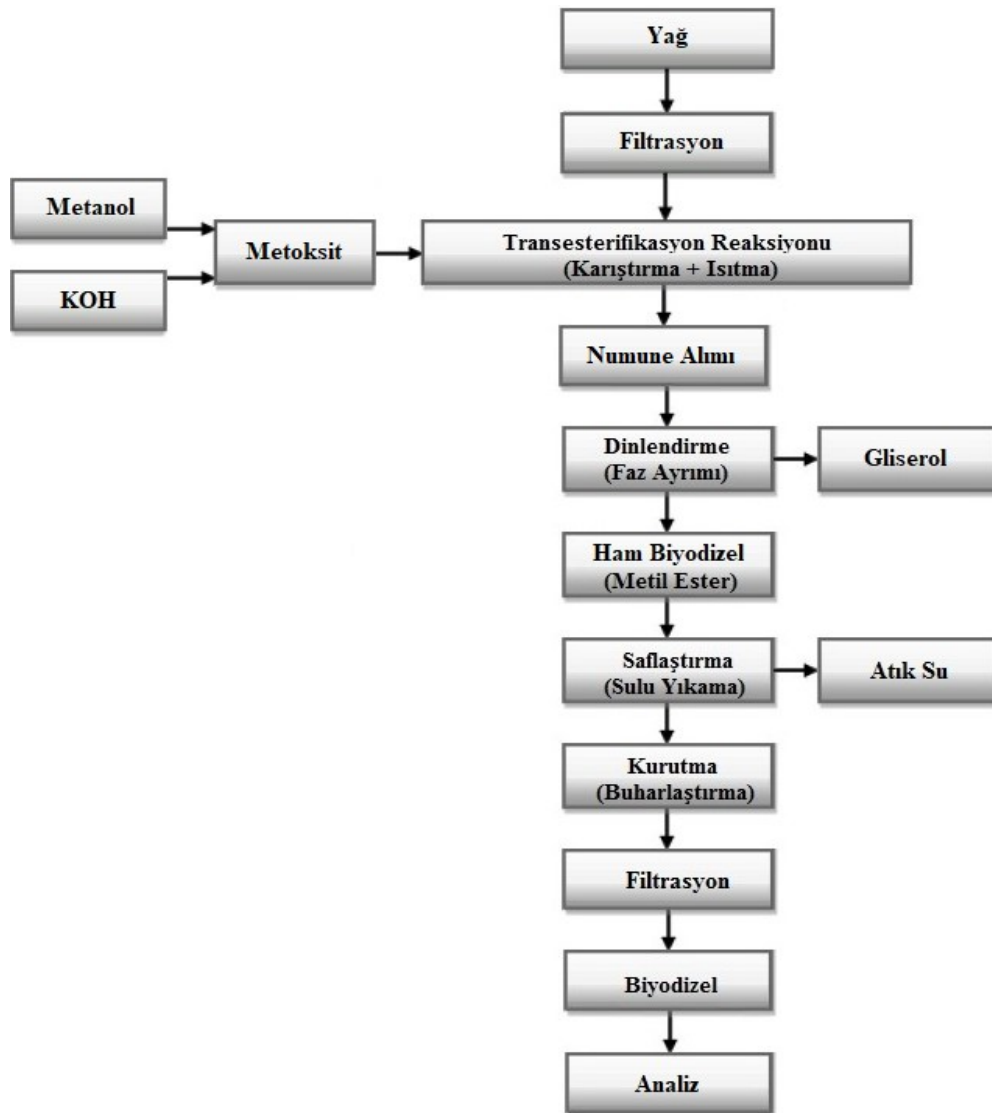
				Yağ çeşidi			
				Ayçiçek	Kanola	Soya	AAV
Yağ Asidi	Lipit Sayısı	Kimyasal Formül	Molekül Ağırlığı	Kütlesel (%)			
Mistirik	C14:0	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	228.37	0.09	0.05	0.07	0.07
Pentadekanoik	C15:0	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	242.40	-	-	0.01	-
Palmitik	C16:0	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	256.42	5.33	4.61	10.17	6.29
Palmitoleik	C16:1	C <sub>16</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	254.41	0.12	0.25	0.07	0.10
Heptadekanoik	C17:0	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	270.45	0.14	0.04	0.08	0.03
Heptadesenoik	C17:1	C <sub>17</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	268.44	0.09	0.07	-	-
Stearik	C18:0	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	284.48	3.46	1.71	4.58	3.91
Oleik	C18:1	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	282.46	37.13	62.13	21.85	28.58
Linoleik	C18:2	C <sub>18</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	280.45	52.01	20.97	53.32	57.04
Linolenik	C18:3	C <sub>18</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	278.43	0.43	7.86	7.18	0.05
Araşidik	C20:0	C <sub>20</sub> H <sub>40</sub> O <sub>2</sub>	312.53	0.17	0.54	0.32	0.27
Gadoleik	C20:1	C <sub>20</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	310.51	-	1.15	0.20	0.13
Eikosadienoik	C20:2	C <sub>20</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	308.50	-	-	0.03	-
Behenik	C22:0	C <sub>22</sub> H <sub>44</sub> O <sub>2</sub>	340.58	0.66	0.30	0.32	0.71
Erusik	C22:1	C <sub>22</sub> H <sub>42</sub> O <sub>2</sub>	338.57	-	0.07	-	-
Trikosanoik	C23:0	C <sub>23</sub> H <sub>46</sub> O <sub>2</sub>	354.61	-	-	0.03	-
Lignoserik	C24:0	C <sub>24</sub> H <sub>48</sub> O <sub>2</sub>	368.64	0.14	0.12	0.03	0.24
Nervonik	C24:1	C <sub>24</sub> H <sub>46</sub> O <sub>2</sub>	366.62	-	0.13	-	-
<b>Ortalama moleküler ağırlık, <math>M_a</math> (g/mol)</b>				<b>879.59</b>	<b>882.11</b>	<b>874.64</b>	<b>879.14</b>

Biyodizel ana başlığında bahsedildiği üzere bazik katalizörler ve metanol trigliseritler ile gerçekleştirdikleri transesterifikasyon reaksiyonunda sağladıkları yüksek reaksiyon verimi ve düşük maliyetlerinden dolayı biyodizel üretimlerinde en çok tercih edilen reaktanlardır. Ayrıca metanol, mikrodalgayı yüksek derecede absorblama yeteneğine sahiptir ve mikrodalga ışıma altında metanolün yağda çözünmesi artmakta, böylece transesterifikasyon reaksiyonu iyileşmektedir [106]. Bu

nedenlerden dolayı biyodizel üretiminde alkol olarak %99.8 saflıktaki Sigma–Aldrich marka metanol; katalizör olarak ise % 99 saflıkta, payet tipi Sigma–Aldrich marka KOH tercih edilmiştir.

### 3.2 Biyodizel Üretim Yöntemi

Biyodizel üretiminde takip edilen yol Şekil 3.1’teki akış şemasında gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Biyodizel üretimi akış şeması.

### **3.2.1 Filtrasyon**

Transesterifikasyon veriminin yüksek olması için kullanılan hammaddenin (yağın) homojen olması ve yabancı madde içermemesi önemlidir. Deneylerde kullanılan rafine ayçiçek, kanola ve soya yağlarına herhangi bir ön işlem uygulanmamış ancak AAY reaksiyona sokulmadan önce içeriğinde bulunan yabancı maddelerin (kızarmış gıda ürünleri, tortu parçaları vb.) uzaklaştırılması için filtrasyon işlemine tabi tutulmuştur.

### **3.2.2 Metoksit Karışımının Hazırlanması**

Transesterifikasyonda kullanılacak metanol ve KOH miktarı, her deney için belirlenen metanol:yağ molar oranı ve kütleli katalizör:yağ oranına göre hesaplanmış ve hassas terazide tartılarak hazırlanmıştır. Metoksit karışımının elde edilmesi için tartımı yapılan KOH, metanol içine dökülerek çözünmesi için karıştırma işlemi uygulanmıştır. Homojen bir metoksit karışımı elde edilene kadar karıştırma işlemi devam ettirilmiştir.

### **3.2.3 Transesterifikasyon**

Yapılan analizlerde atık yağ da dahil tüm hammaddelerin SYA değeri 1 mgKOH/g'ın, su içeriği ise 500 mg/kg'ın altında bulunduğu için (Tablo 3.1) biyodizel üretiminde kullanılacak tüm yağların ön iyileştirme işlemi uygulanmadan direkt transesterifikasyon reaksiyonuna sokularak metil esterlerine dönüştürülmelerine karar verilmiştir. Literatürdeki bir çok çalışmada rafine veya ham bitkisel yağlar ile SYA değeri düşük olan atık bitkisel yağların biyodizel dönüşümünde 6:1 molar oranın en yüksek dönüşüm oranı verdiği, daha düşük molar oranlı reaksiyonlarda reaksiyonun tam olarak tamamlanamadığı ve net bir faz ayrımının (biyodizel-glisero) oluşmadığı aktarılmaktadır [107-109]. Ayrıca endüstriyel proseslerde %98'den fazla ester verimi

elde etmek için genellikle 6:1 alkol/yağ molar oranı kullanılmaktadır [40]. Katalizör olarak baz katalizörlerin tercih edildiği tek kademeli transesterifikasyon reaksiyonlarında yağın %1'i kadar katalizör kullanımıyla yüksek verimde ve EN 14214 standartlarında biyodizel üretilebildiği belirtilmektedir [49, 77, 81]. Bazik katalizörler SYA'lar ile reaksiyona girerek sabun oluştururlar. Reaksiyonda oluşan sabun reaksiyon verimini düşürür, katalizörün tükenmesine neden olur ve biyodizelin gliserolden ayrılmasını güçleştirir [110]. Dolayısıyla SYA değeri ham ve rafine bitkisel yağlardan daha yüksek olan atık yağların transesterifikasyonunda daha fazla bazik katalizör kullanımı ve daha fazla reaksiyon süresi gerekebilmektedir [26]. Bu bilgiler doğrultusunda tasarlanan deneylerde transesterifikasyon reaksiyonları rafine yağlar için molar 6:1 metanol:yağ ve kütlesele %1 KOH oranları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon sıcaklığı metanolün kaynama sıcaklığının (65°C) biraz daha altında bir değer olarak 60°C seçilmiştir. Tablo 1.7'de görüldüğü gibi, konvansiyonel üretimlerde transesterifikasyon süresi genellikle 60 dak sürmektedir. Bunun için ısıtma sistemi olarak mikrodalganın kullanıldığı biyodizel üretimlerinde reaksiyon süresi maks 60 dak seçilmiştir. Numune alma aralığı, ilk dört numune için 5 dak olarak belirlenmiştir. Çünkü yapılan literatür taramasında, mikrodalga destekli transesterifikasyonların genellikle 5 ila 10 dak aralığında tamamlandığı [60, 77, 78], en uzun reaksiyonun ise 20 dakika sürdüğü görülmüştür [85]. Bunun dışında reaksiyonun ilerleyişinin ve yakıt özelliklerindeki değişimin gözlemlenmesi için 30., 45. ve 60. dakikalarda üç numune daha alınmıştır. Elektrikli rezistans kullanılarak ısıtmanın sağlandığı konvansiyonel biyodizel üretimi ile mikrodalga destekli biyodizel üretiminin mukayesesinin yapılabilmesi için transesterifikasyonlar aynı hammadde (ayçiçek yağı) ve aynı reaksiyon parametreleri (metanol, katalizör oranları ve sıcaklık) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ancak konvansiyonel metotlarda dönüşüm daha uzun reaksiyon sürelerinde gerçekleştiği için numune alma zamanları reaksiyonun 15., 30., 45. ve 60. dakikası olarak belirlenmiştir. AAY ile gerçekleştirilen mikrodalga destekli biyodizel üretimlerinde, metanol molar oranı (6:1) ve reaksiyon sıcaklığı (60°C) sabit tutularak farklı katalizör (KOH) oranlarının (kütlece yağın %0.5, %1.0, %1.5 ve %2.0'i) biyodizel verimi ve yakıt özellikleri üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Bu üretimlerde biyodizel numuneleri reaksiyonun 5., 10., 15., 20., 30., 45. ve 60.

dakikalarında alınmıştır. Pilot ölçekteki reaktörde gerçekleştirilen deneylerde, reaktan miktarları 33 kg yağın kullanımına göre belirlenmiştir. Reaksiyonda kullanılan hammadde ve kimyasal madde oranlarının hesaplanmasına örnek olarak ayçiçek yağının 6:1 molar metanol ve %1 KOH varlığındaki transesterifikasyon reaksiyonu verilirse:

Ayçiçek yağı mol sayısının ( $n_a$ ) hesaplanması:

$$n_{ay} = \frac{m_{ay}}{M_{ay}} = \frac{33000}{879.59} = 37.52 \text{ mol}$$

Metanol mol sayısının ( $n_m$ ) ve kütlelerinin ( $m_m$ ) hesaplanması:

$$n_m = 6 \times n_{ay} = 6 \times 37.52 = 225.12 \text{ mol}$$

$$m_m = M_m \times n_m = 32.04 \times 225.12 = 7212.85 \text{ g}$$

KOH miktarının ( $m_{KOH}$ ) hesaplanması:

$$m_{KOH} = \frac{1}{100} \times m_{ay} = \frac{1}{100} \times 33000 = 333 \text{ g}$$

Biyodizel üretiminde belirlenen koşullarındaki transesterifikasyonun başlatılabilmesi için ilk işlem olarak yağ, reaktör tankına doldurulmuştur. Reaktör kontrol ekranından sıcaklık değeri  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  hassasiyet ile reaksiyon sıcaklığının birkaç derece üstünde olacak şekilde ayarlanmış ve yağın ısıtılması sağlanmıştır. Daha sonra oda sıcaklığında bulunan metoksit karışımı reaktörde bulunan ısıtılmış yağ içerisine ilave edilmiştir. Ardından reaktör sıcaklığı kontrol ekranından girilmiş ve yağ+metoksit karışımının birbiri ile tamamen etkileşme girmesi ve mikrodalganın karışım içinde homojen olarak absorbe edilebilmesi için karıştırma işlemi, sirkülasyon pompası ve mekanik karıştırıcının devreye alınmasıyla başlatılmıştır. Deneylerde,



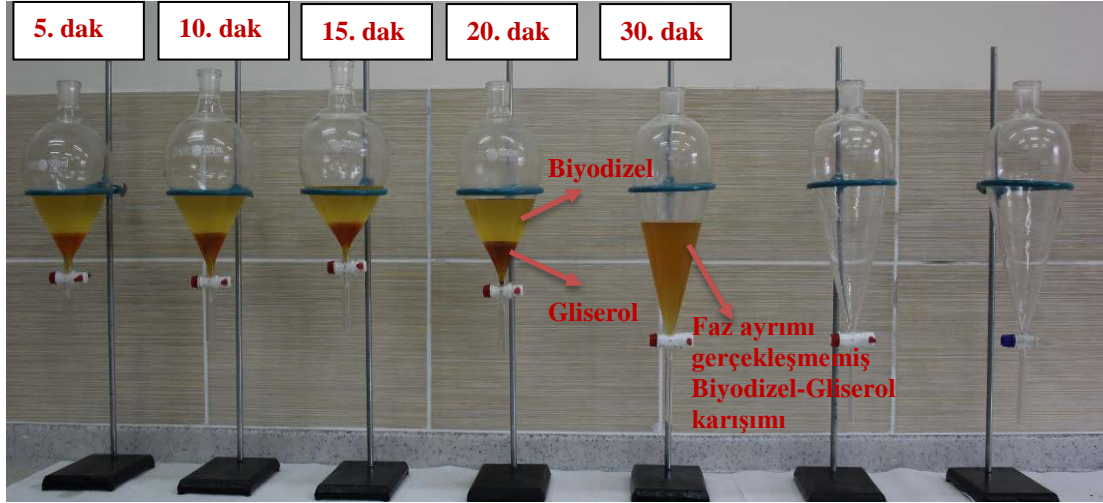
belirlenen reaksiyon sürelerinde reaktörün alt kısmında bulunan numune vanasından biyodizel numuneleri alınmıştır. Numune alınırken transesterifikasyon hızının düşmemesi için reaktör çalıştırılmaya devam ettirilmiştir.

#### **3.2.4 Numune Alma**

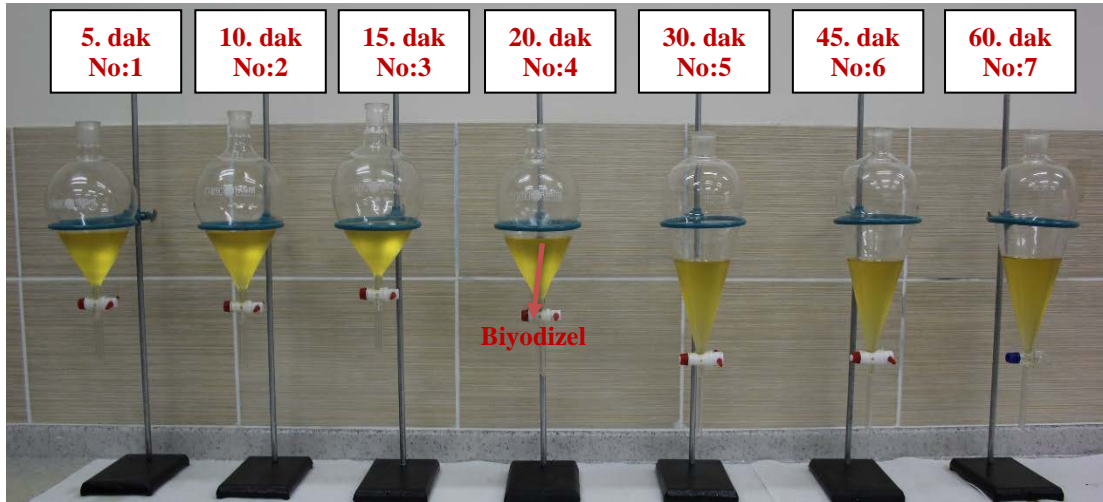
Belirlenen zaman aralıklarında biyodizel numuneleri (ort. 300 g) reaktörden alındıktan sonra numuneler içinde transesterifikasyon reaksiyonunun devam etmemesi ve süreye bağlı olarak reaksiyonun tamamlanma oranının daha hassas olarak belirlenebilmesi için numuneler, soğuk su banyosuna daldırılmış ve soğutulmuştur. Dinlendirme adımına geçmeden tüm numunelerin kütleleri ölçülmüş ve dönüşüm verim hesabında kullanılmak üzere kaydedilmiştir.

#### **3.2.5 Dinlendirme (Faz Ayrımı)**

Tartım işleminden sonra numuneler ayırma hunilerine alınarak dinlendirme adımına geçilmiştir. Şekil 3.2’te, mikrodalga ışıma altında ayçiçek yağı kullanılarak gerçekleştirilen üretimden alınan karışım halindeki biyodizel numuneleri, reaktörden alınma zamanlarına göre isimlendirilerek gösterilmiştir. Buradan görüldüğü üzere kısa bir sürenin ardından biyodizel-gliserol faz ayrışması oluşmuş; yoğunluğu biyodizelden daha yüksek olan gliserol ayırma hunisinin alt kısmına çökelmiş, biyodizel ise üst kısımda kalmıştır. Şekilde koyu renkli ve altta olan kısım gliserol, açık renkli ve üstte olan kısım ise ham biyodizeldir. Deneydeki tüm numuneler dinlendirildikten sonra çökelen gliserol fazı ayırma hunisinden çekilerek ham biyodizel elde edilmiştir. Şekil 3.3’te ayçiçek yağından üretilmiş ve gliserolden ayrılmış ham biyodizel numuneleri reaksiyon sürelerine göre isimlendirilerek gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Biyodizel-gliserol faz ayrımı.

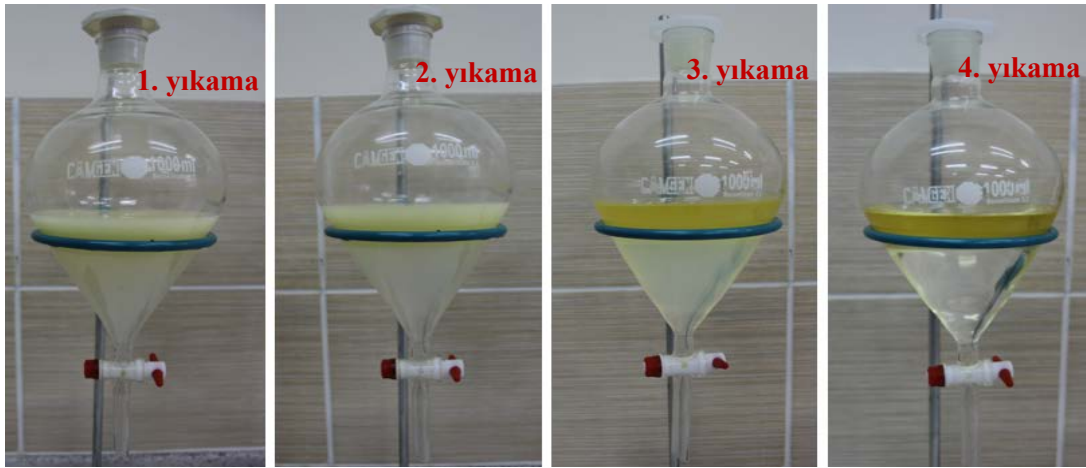


Şekil 3.3: Reaksiyon sürelerine göre biyodizel numuneleri.

### 3.2.6 Saflaştırma (Sulu Yıkama)

Dinlendirme işlemi sonrasında içerisinde artık metanol, katalizör, gliserol, su ve metil estere dönüşmemiş mono ve di gliseritler gibi safsızlıklar bulunan ham biyodizel elde edilmiştir. Biyodizel bu haliyle EN 14214 standartlarına uygun bir yakıt değildir ve motorlarda kullanılamaz. Ham biyodizelin saflaştırılma işlemi sulu yıkama

metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Literatürde önerildiği üzere [26, 111, 112]; ham biyodizel ağırlığının üçte biri kadar su, 55°C sıcaklığa kadar ısıtılmış ve ayırma hunisine dökülmüştür. Suyun biyodizelin tümüne temas etmesi için ayırma hunisi çalkalanarak karıştırılmıştır. Daha sonraki aşamada faz ayrımının oluşup suyun çökmesi için dinlendirme safhasında geçilmiştir. Yoğunluk farkıyla ayırma hunisin alt kısmında toplanan atık su, yıkanan biyodizelden uzaklaştırılmıştır. Biyodizel içindeki safsızlıkların en iyi şekilde temizlenebilmesi için sulu yıkama işlemi her numune için 4 defa tekrarlanmıştır. Her yıkamada sonunda, biyodizel içindeki safsızlıklar azaldığı için yıkama sonunda ayrılan atık suyun rengi, ilk yıkamadan son yıkamaya doğru beyazdan şeffaflığa doğru değişmiştir (Şekil 3.4). Son yıkama sonunda elde edilen temiz ve berrak atık su, biyodizelin yeteri kadar saflaştırıldığını göstermektedir.



Şekil 3.4: Biyodizelin yıkanma (saflaştırılma) işlemi.

### 3.2.7 Kurutma

Suyla yıkanmış biyodizel içinde su ve metanol artıklarının kalmış olması ihtimali nedeniyle tüm numuneler ETÜV fırınında 110°C’de kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Böylece su ve metanolün buharlaştırılarak biyodizelden uzaklaştırılması sağlanmıştır.

### 3.2.8 Filtrasyon

Üretimde son aşama olarak kurutulan numuneler, kaba filtre kâğıdından geçirilerek filtrelenmiş ve kütleleri ölçülerek ürün (biyodizel) verimleri bulunmuştur.

Farklı hammadde, metot ve reaksiyon sürelerinde üretilen biyodizeller bu özelliklerine göre tanımlanmışlardır. Buna göre mikrodalga altında üretilen ayçiçek yağı biyodizeli, AYB; kanola yağı biyodizeli, KYB; soya yağı biyodizeli, SYB; atık ayçiçek yağı biyodizeli, AAYB; konvansiyonel ısıtma sistemi ile üretilen ayçiçek yağı biyodizeli, AYB (KNV) olarak isimlendirilmiştir. Ayrıca her biyodizel çeşidi kendi içinde tâbi tutuldukları transesterifikasyon süresine göre No:1'den No:7'ye kadar numaralandırılmıştır.

### 3.3 Yağ ve Biyodizel Numunelerinin Karakterizasyonu

Biyodizel üretiminde kullanılan bitkisel yağların ve biyodizel numunelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri, Balıkesir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Biyoyakıt Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçümler ve TUBİTAK MAM ve Malatya Üniversitesi Akaryakıt ve Petrol Araştırma Laboratuvarlarında hizmet alımı vasıtasıyla yaptırılan analizler ile tespit edilmiştir.

Biyodizel üretimi optimizasyon çalışmasında, transesterifikasyon süresine bağlı reaksiyonun tamamlanma derecesi ve yakıt özelliklerinin EN 14214 standartlarına göre yeterliliğinin belirlenmesi için biyodizel numunelerin üç temel özelliği olan ester içeriği, yoğunluk ve kinematik viskozite ayrıca üretim sonunda hesaplanan dönüşüm verimi değerleri referans alınmıştır. Optimizasyonda bu yakıt özelliklerin seçilmesinin nedenleri ve yağ-biyodizel karakterizasyonunda kullanılan analiz yöntemleri ve hesaplamaları şu şekildedir:

***Ester içeriği (Saflık):*** Biyodizelin ester içeriği, biyodizelin saflık derecesini belirtir ve yakıt özellikleri ve motor performansı üzerinde önemli derecede etkiye

sahiptir. Özellikle biyodizel içerisindeki gliserol ve trigliseritlerin varlığı, motor test uygulamalarında ciddi problemlere neden olmaktadır [62, 113]. EN 14214 standartlarına göre safsızlıklarından (SYA, metanol, gliserol, su vb.) arındırılmış biyodizelin kütlece en az %96.5 metil ester içermesi gerekmektedir. Biyodizel üretiminde bu değerin sağlanabilmesi için transesterifikasyon reaksiyonunun tamamlanmış olması ve etkili bir saflaştırma işleminin uygulanması gerekmektedir. Üretilen biyodizel numunelerinin ester içerikleri EN 14103 deney yöntemine göre Malatya Üniv PAL laboratuvarlarında analiz ettirilmiştir.

**Ürün verimi:** Biyodizel üretimi sonunda elde edilen ürün verimi değeri de transesterifikasyon reaksiyonunun tamamlanma derecesi hakkında bilgi vermektedir. Birçok araştırmacı transesterifikasyon başlatıldıktan sonra artan reaksiyon süresi ile transesterifikasyon tamamlanma oranının yükseldiğini böylece ürün veriminde artış sağlandığı ancak reaksiyon denge konumuna ulaşmış ve tamamlandıktan sonra reaksiyon süresi artırılsa dahi verim değerinde değişim olmadığını aktarmışlardır [58, 61, 77]. Bazı çalışmalarda, transesterifikasyon tamamlandıktan sonra devam ettirilen reaksiyonlarda gözlenen hidroliz reaksiyonu ile esterlerin SYA'lerine ve sabuna dönüşmesinden ve artan reaksiyon sıcaklığı ile gliserolün çözünürlüğünün artmasından dolayı ürün veriminde bir miktar düşüşün gözlemlendiği aktarılmıştır [83, 114]. Biyodizel üretimlerine ait ürün verimi (3.2) nolu denkleme göre hesaplanmıştır:

$$\text{Biyodizel (ürün) verimi (\%)} = \frac{m_{\text{biyodizel}}}{m_{\text{yağ}}} \times 100 \quad (3.2)$$

Denklemdaki  $m_{\text{biyodizel}}$  saflaştırılmış ve filtrasyona tabi tutulmuş biyodizelin kütlesini,  $m_{\text{yağ}}$  ise biyodizele dönüştürülen hammaddenin (yağın) kütlesini ifade etmektedir. Denkleme bulunan değer, kullanılan yağın yüzdesel olarak ne kadarının biyodizele dönüştüğünü göstermektedir.

**Kinematik viskozite:** Transesterifikasyonun reaksiyonun asıl amacı, yağların yüksek viskozitelerini düşürerek dizel motorlarda yakıt olarak kullanımlarında karşılaşılan zayıf atomizasyon, enjektörlerde birikinti oluşumu ve yakıt pompası-

enjektörlerin aşınması gibi sorunların bertaraf edilmesidir [115]. Transesterifikasyon reaksiyonu ile 30-40 mm<sup>2</sup>/s seviyesindeki yüksek viskozite değerleri EN 14214'te belirtilen 3.5-5 mm<sup>2</sup>/s aralığına düşürülebilmektedir [39, 62, 116].

Biyodizel üretiminde kullanılan bitkisel yağların ve biyodizel numunelerinin kinematik viskozite değerleri, Balıkesir Üniv. Mak. Müh. Böl. Biyoyakıt Laboratuvarında, EN ISO 310 deney yöntemine göre gerçekleştirilen ölçümlerle belirlenmiştir. Ölçümlerde öncelikle 40°C'de  $\pm 0.05^\circ\text{C}$  sıcaklık hassasiyetine sahip kinematik viskozite banyosu, cihazda belirtilen seviyeye kadar saf su ile doldurulmuştur. Sonrasında, yaklaşık 20 ml numune, kapiler viskozite tüpü içerisine alınmıştır. Viskozitemetre tüpleri sınırlı aralıktaki viskozite değerlerini ölçebilmektedir, bunun nedenle farklı maddeler için farklı tüpler kullanılmaktadır. Tablo 3.3'te cam Cannon-Fenske marka kapiler viskozitemetre tüplerinin sahip oldukları kalibrasyon sabiti ve ölçüm aralık değerleri gösterilmektedir.

**Tablo 3.3:** Cannon-Fenske viskozitemetre tüpü çeşitleri ve ölçüm aralıkları [117].

Çeşit	Kalibrasyon sabiti (C)	Ölçüm aralığı (mm <sup>2</sup> /s)
25	0.002	0.5 – 2
50	0.004	0.8 – 4
<b>75</b>	<b>0.008</b>	<b>1.6 – 8</b>
100	0.015	3 – 15
<b>150</b>	<b>0.035</b>	<b>7 – 35</b>
200	0.1	20 – 100
300	0.25	50 – 250

Analizlerde biyodizel numunelerinin viskozitelerini ölçmek için 75, yağ numunelerinin viskozitelerini ölçmek için ise 150 numaralı Cannon-Fenske viskozitemetre tüpleri kullanılmıştır. Banyo sıcaklık değeri 40°C'ye ayarlanmış, suyun sıcaklığı 40°C olduktan sonra tüp içerisindeki numunelerin de bu sıcaklığa ulaşması

için bir süre beklenilmiştir. Numune sıcaklığı 40°C'ye geldiğinde tüp içindeki numune par ile üst menüsküs çizgisini geçene kadar çekilmiştir. Ardından par çıkartılmış ve numunenin üst menüsküs üzerindeki iki çizgi arasından akması sağlanmış ve bu çizgiler arasından geçme süresi 0.001 saniye hassasiyetindeki dijital bir kronometre ile ölçülmüştür. Numunelerin 40°C'deki kinematik viskozite değerleri, analizlerde ölçülen süre ve viskozitemetre tüpünün kalibrasyon sabitinin çarpılmasıyla hesaplanmıştır. Her ölçüm üçer defa tekrar edilmiş ve ortalama değerler elde edilmiştir. Her deneyden sonra kapiler tüplerdeki numuneler boşaltılmış ve içerisinde numune kalmayacak şekilde tüpler hekzan ve toluen ile temizlenmiştir.

**Yoğunluk:** Yakıt özelliklerinden yoğunluk, motor performansı açısından önemli bir özelliktir çünkü dizel yakıt sistemleri yakıtı hacimsel olarak ölçerek motora enjekte eder. Dolayısıyla farklı yoğunluğa sahip yakıtlar, motora farklı kütlelerde enjekte edilmekte ve motorun çıkış gücü yakıt yoğunluğuna göre değişmektedir [111]. Ayrıca setan sayısı ve ısı değer gibi bazı önemli yakıt özellikleri yakıtın yoğunluk değerine bağlı olarak değişmektedir [118]. Motorine göre yoğunluğu yüksek olan bitkisel yağlar, transesterifikasyon ile içeriğindeki gliserolün uzaklaştırılması sonucunda daha az yoğun, daha çabuk buharlaşabilen ve daha kolay atomize edilebilen biyodizele dönüştürülür. Transesterifikasyon reaksiyonu ile 0.90-0.93 g/cm<sup>3</sup> seviyesindeki yoğunluk değerleri (15°C), EN 14214'te belirtilen 0.86-0.90 g/cm<sup>3</sup> aralığına düşürülebilmektedir [61, 62, 81].

Biyodizel üretiminde kullanılan bitkisel yağların ve biyodizel numunelerinin yoğunluk değerleri, Balıkesir Üniv. Mak. Müh. Böl. Biyoyakıt Laboratuvarında ISO 4787 standartlarında belirtildiği şekilde hassas terazi ve piknometre kullanılarak gerçekleştirilen ölçümler ve (3.3) nolu denklem kullanılarak yapılan hesaplar ile elde edilmiştir:

$$\rho_{numune} = \frac{m_{toplam} - m_{dara}}{m_{su}} \times \rho_{su} \quad (3.3)$$

Denklemdaki  $\rho_{\text{numune}}$ , yoğunluğu ölçülen numunenin belirlenmek istenen sıcaklıktaki (15°C seçilmiştir) yoğunluk değerini;  $m_{\text{toplam}}$ , numune ile dolu piknometrenin kütesini;  $m_{\text{dara}}$ , boş piknometrenin kütesini;  $m_{\text{su}}$ , piknometre içindeki suyun kütesini (saf su ile doldurulmuş piknometre kütesi ile piknometre darasının farkı);  $\rho_{\text{su}}$ , ise saf suyun ilgili sıcaklıktaki yoğunluk değerini temsil etmektedir.

**Diğer analizler:** Biyodizel üretiminde kullanılan bitkisel yağların ve biyodizel numunelerinin asit sayısı değerleri, Balıkesir Üniv. Mak. Müh. Böl. Biyoyakıt Laboratuvarında EN 14104 standartlarında uygun olarak titrasyon yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Eşit hacimlerde karıştırılmış dietil eter ve %95'lik etanol karışımından oluşan 100 mL'lik çözücü içerisine 0.3 mL fenolftalein (%95'lik etanolde 10 g/L'lik) ilave edilmiştir. Karışım rengi, 15 s süresince kalıcı ve belirgin bir renk değişimi geçirdiği dönüm noktasına ulaşana kadar, karışım üzerine etanol içerisinde çözülmüş, 0.1 mol/L derişimli KOH çözeltisi damlatılmıştır. Ardından titre edilen karışım içine asit sayısı belirlenecek numuneden 20 g ilave edilmiş ve karışım homojen olacak şekilde karıştırılmıştır. Elde edilen yeni karışım, çalkalanarak tekrardan KOH çözeltisiyle titre edilmiş ve harcanan çözücü miktarı kaydedilmiştir. Son olarak ilgili numunenin asit sayısı, mgKOH/g cinsinden (3.4) nolu denklem kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\text{Asit sayısı} = \frac{56.1 \times V \times C}{m} \quad (3.4)$$

Denklemden bulunan V, kullanılan KOH çözeltisinin hacmini (mL); C, KOH konsantrasyonunu (mol/L); m, deney numunesinin kütesini (g); 56.1 ise KOH'in mol kütesini (g/mol) ifade etmektedir.

Çalışmada bitkisel yağların ve biyodizel numunelerine ait verilen diğer tüm fiziksel ve kimyasal özellikler, TS EN ISO/IEC 17025:2012 standardına göre akredite olan Malatya Üniv Akaryakıt ve Petrol Araştırma Laboratuvarlarında, EN 14214 standartlarının ilgili deney yöntemlerine uygun olarak analiz edilerek tespit edilmiştir.



Tezin EKLER kısmında motor testlerinde kullanılan biyodizellere ait detaylı analiz raporları sunulmuştur (EK D,E,F).

## 4. MOTOR TESTLERİ VE SİMÜLASYONU

### 4.1 Motor Testleri

İYM'lerde farklı yakıtların performans ve emisyon karşılaştırmalarının yapılabilmesi için sabit hız-değişken yük testleri yaygın olarak kullanılan bir metottür. Bu testlerde motor hızı (devri) sabit bir değere ayarlanır ardından belirlenen kısmi yük değerlerinde motorun ürettiği tork sabitlenir ve bu koşullarda motorun kararlı halde çalışması sağlanarak istenilen ölçümler yapılır. Dizel motorlarda motor yükü, silindir içerisine gönderilen yakıt miktarı ile ayarlanmaktadır. Dolayısıyla dizel motorlarda gerçekleştirilen sabit hız-değişken yük testlerinde aynı motor hızı ve aynı motor torkunun elde edilebilmesi için silindir içerisine farklı yakıtlardan farklı miktarda püskürtme yapılmaktadır. Böylelikle test edilen farklı yakıtların mukayesesi kolaylıkla yapılabilmektedir.

Çalışmanın bu kısmında; ayçiçek, kanola ve soya yağlarından üretilmiş biyodizellerin bir dizel motorundaki motor performans ve egzoz emisyon salınımlarının incelenmesi, ayrıca bu biyodizellerin ve karışımlarının birbirleriyle ve motorin ile kıyaslanabilmesi için sabit hız-değişken yük motor testleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yapılan testler, motorda maks torkunun elde edildiği 1800 d/d motor hızında ve 4 farklı motor yükünde ( 16 Nm, 32 Nm, 48 Nm ve 64 Nm) yürütülmüştür.

#### 4.1.1 Test Yakıtları

Test yakıtları; Petrol Ofisi istasyonundan satın alınan motorin (B0), saf haldeki biyodizeller (B100) ve %5, %10, %20 oranında biyodizel içeren karışımlar (B5, B10, B20) olarak hazırlanmıştır. Şekil 4.1'de test yakıtları gösterilmiştir.



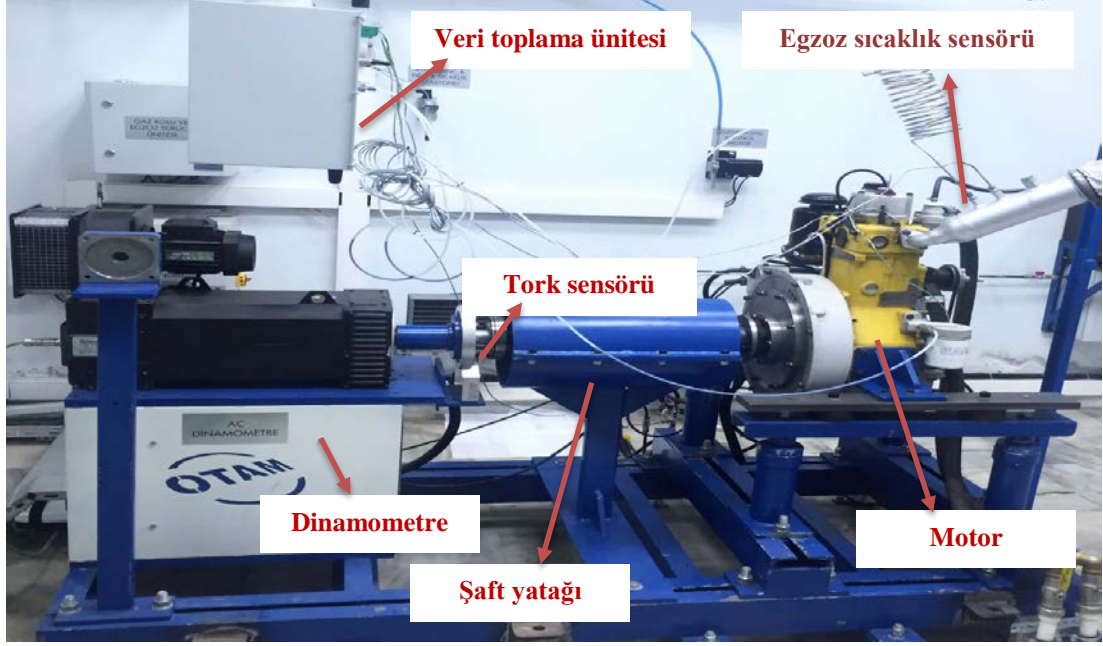
**Şekil 4.1:** Motor test yakıtlarının genel görünümü.

#### 4.1.2 Motor Test Sistemi

Motor testleri dört zamanlı, tek silindirli, doğal emişli ve direkt püskürtmeli Erin marka dizel motorda gerçekleştirilmiştir. Tablo 4.1’te motorunun teknik özellikleri, Şekil 4.2’de dinamometre bağlantısı yapılmış motor test düzeneğinin genel görünümü verilmiştir.

**Tablo 4.1:** Test motorunun teknik özellikleri.

Markası	Erin Motor
Tipi	4 zamanlı, doğal emişli, direk enjeksiyonlu
Silindir sayısı	1
Hacim (cm <sup>3</sup> )	1.16 L
Sıkıştırma oranı	14.6:1
Silindir çapı / Strok (mm)	108 / 127
Maks güç (kW) @ devir (d/d)	18 @ 2400
Maks tork (Nm) @ devir (d/d)	80 @ 1800
Emme supabı açılma/kapanma açısı (°)	54 / 74
Egzoz supabı açılma/kapanma açısı (°)	74 / 54



**Şekil 4.2:** Motor test düzeneği genel görünümü.

Motor test düzeneğinde tork yüklemesi için elektrikli dinamometre kullanılmıştır. Dinamometrede elastik kaplin ile motor şaftına bağlanmış 44 kW gücünde bir AC elektrik motoru kullanılmaktadır. Dinamometrenin teknik özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

**Tablo 4.2:** Dinamometrenin teknik özellikleri.

44 kW @4000-6400 d/d maksimum güç kapasitesi
0 -100 Nm @ 0 - 4000 d/d kapasitede moment ölçümü
Maksimum devir 6400 d/d
Temassız telemetrik ölçüm sistemi ile tork ölçümü
% 0.1 moment ölçüm hassasiyeti
±0.1 devir hassasiyeti
Nominal çalışma sıcaklık aralığı: 0 – 80°C
Besleme gerilimi; 3 faz, 400V AC

### 4.1.3 Motor Testlerinin Yapılışı

Tez kapsamında gerçekleştirilen motor testlerinde deney motoru üzerinde herhangi bir modifikasyon yapılmamıştır. Testlere başlamadan önce motor test düzeneğinin genel kontrolü yapılmış, motor yağı ve yakıt filtresi değiştirilmiş, kontrol sistemi donanımsal ve yazılımsal olarak kalibre edilerek hassas ölçümlerin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Testlerde, motor çalıştırıldıktan sonra yaklaşık 15-30 dakika beklenerek soğutma suyunun motordan çıkış sıcaklığı  $80^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşması ve motorun kararlı hale gelmesi sağlanmıştır. Her yakıt numunesi için ayrı ayrı yapılan testlerde öncelikle motor hızı maks tork değerini verdiği 1800 d/d hızına getirilmiş daha sonra motorun 16 Nm, 32 Nm, 48 Nm ve 64 Nm tork değerlerine yüklenmesiyle kısmi yüklerdeki performans ve emisyon ölçümleri alınmıştır. Ölçümler alınmadan önce 1 dakika kadar çalışarak belirlenen test şartları için motorun kararlı konuma gelmesi sağlanmış ve ardından veriler kaydedilmiştir. Yeni bir teste başlamadan önce motor soğumaya/dinlenmeye bırakılmıştır. Her yeni yakıt numunesinde, mevcut yakıt deposu boşaltılmış ve depoya yeni test yakıtı doldurulmuştur. Sonrasında, depodan enjektörlere kadarki yakıt hattının eski yakıttan tamamen temizlenmesi için 1 L yeni test yakıtı yakılmıştır. Bu adımlar her bir yakıt değişiminde tekrarlanmıştır.

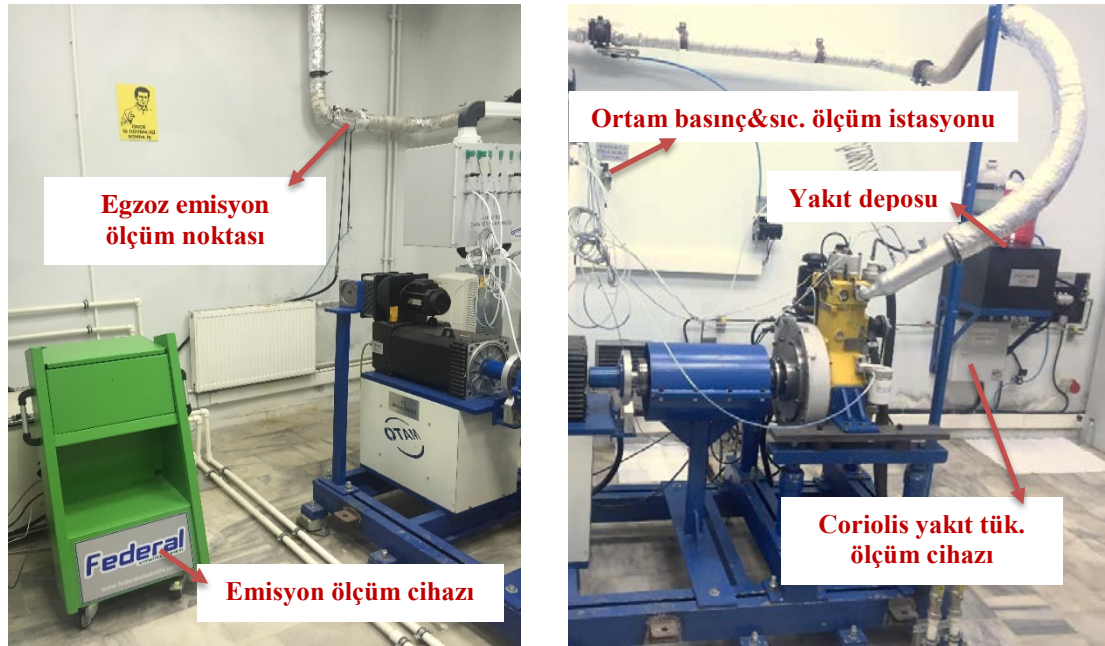
### 4.1.4 Ölçüm ve Hesaplamalar

Motorun hava tüketimi kütleli hava akış ölçer ile; emme havası, motor yağı, yakıt, egzoz, soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları ise K tipi termokupllar yardımıyla ölçülmüştür. Motor yakıt tüketim değerleri, ölçüm aralığı 0-50 kg/h olan coriolis kütleli akış ölçüm cihazıyla %0.1 hassasiyetle tespit edilmiştir. Motor test düzeneğinde dinamometre çıkış flanşına entegre edilen temassız telemetrik tork ölçüm sistemi (telemetrik alıcı-verici ve tork sensöründen oluşan) ile tork değerleri 0.1% hassasiyetle ölçülmüştür. Ölçüm sisteminde tork çıkışının yanında hız çıkışı da bulunmaktadır. Bu sayede aynı sistemden güç ölçümü değerleri de hesaplanmıştır. Egzoz emisyonları ( $\text{NO}_x$ , CO, HC), Federal marka egzoz emisyon cihazı ile

ölçülmüştür. Gaz analiz cihazının teknik özellikleri Tablo 4.3'te verilmiştir. Motor test düzeneğinde bulunan bileşenler Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

**Tablo 4.3:** Gaz analiz cihazının teknik özellikleri.

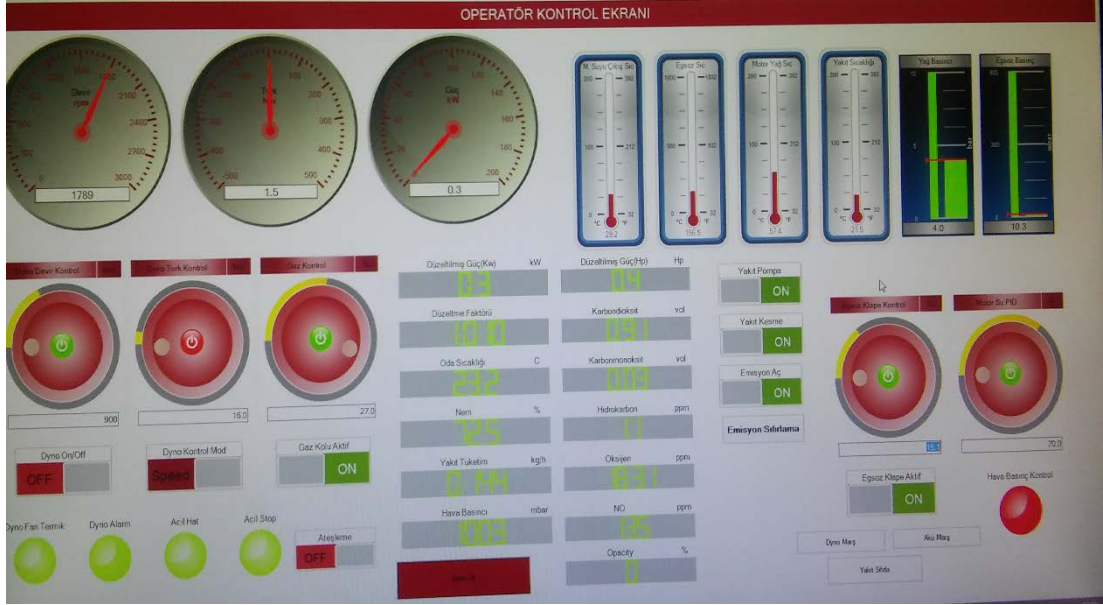
Parametre	Ölçme aralığı	Hassasiyet
HC (ppm)	0-20000	1
CO (%)	0-15	0.001
CO <sub>2</sub> (%)	0-20	0.1
NO <sub>x</sub> (ppm)	0-5000	1



**Şekil 4.3:** Motor test düzeneği bileşenlerinin görünümü.

Motor test düzeneğinde bulunan veri toplama ünitesi ve diğer ölçüm cihazlarından alınan ölçümler, operatör kontrol merkezinde bulunan bilgisayarda kurulu olan OTAM I-LAB yazılımı üzerinden takip edilebilmektedir. Motorun çalıştırılması, motorun ve dinamometrenin yük-devir değerlerinin ayarlanması, test

sisteminin arıza kontrolü, sistemin limit değerler içinde çalıştığının gözetimi, sonuçlarının alınması/kaydedilmesi ve raporlanması, yazılım bazında kullanıcı tanımlı kalibrasyonların yapılması ve diğer kontrol işlemleri bu kontrol yazılımı üzerinden gerçekleştirilmektedir. Kontrol yazılımı ekran görüntüsü Şekil 4.4'teki gibidir.



Şekil 4.4: OTAM I-LAB yazılımı ekran görüntüsü.

OTAM I-LAB yazılımında düzeltilmiş güç değerleri “TS 1231-İçten Yanmalı Motorlar-Muayene ve Deney Esasları” standardında belirttiği üzere hesaplanmaktadır. Standartta sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar (dizel motorlar) için deney atmosferik şartlarının sınırları ve güç düzeltme faktörü ( $K_d$ ), atmosferik faktör ( $f_a$ ), motor faktörü ( $f_m$ ) hesaplamalarında kullanılan eşitlikler aşağıdaki gibidir:

**Sıcaklık (T):** Deney ortamı sıcaklık değeri  $283\text{ K} < T < 313\text{ K}$  aralığında olmalıdır.

**Basınç (P):** Deney ortamı basınç değeri  $80\text{ kPa} < P < 110\text{ kPa}$  aralığında olmalıdır.

**Güç Düzeltme Faktörü ( $K_d$ ):** Standartta göre güç düzeltme faktörü (4.1) nolu eşitlikteki gibi hesaplanır:

$$K_d = f_a^{f_m} \quad (4.1)$$

$f_a$ : atmosferik faktörü,

$f_m$ : motor faktörüdür.

**Atmosferik faktör ( $f_a$ ):** Tabii emişli ve mekanik aşırı doldurmalı motorlarda atmosferik faktörü  $f_a$ , (4.2) nolu eşitlikteki gibi hesaplanır:

$$f_a = \left(\frac{99}{P}\right) \times \left(\frac{T}{298}\right)^{0.7} \quad (4.2)$$

**Motor faktörü ( $f_m$ ):** Motor ve ayarlama tipine bağımlı bir karakteristik parametredir. (4.3) nolu eşitlikteki gibi hesaplanır:

$$f_m = 0.036 \times q_c - 1.14 \quad (4.3)$$

$q_c = q/r$ ,

$q$  = çevrim başına, motor strok hacminin her litresi için yakıt sevki (mg/L çevrim),

$r$  = Kompresör çıkış ve girişi arasındaki basınç oranı (Tabii emişlilerde  $r=1$ ).

Yukarıdaki eşitlik  $q_c$ 'nin, 40 mg/(L çevrim) <  $q_c$  < 65 mg/(L çevrim) değerleri için geçerlidir.

$q_c < 40$  mg/(L çevrim) olduğunda  $f_m = 0.3$

$q_c > 65$  mg/(L çevrim) olduğunda  $f_m = 1.2$  sabit değerleri alınır.

Çalışmada gerçekleştirilen ölçümlere ilave olarak, yakıtlara ait motor performans değerlerinin daha detaylı analizi için aşağıda sunulan değerler de hesaplanmıştır.

**Özgül yakıt tüketimi ( $b_e$ ):** Özgül yakıt tüketimi, motorlarda harcanan yakıt karşılık krank şaft üzerinde üretilen gücün verimini ifade eder ve motorda birim güç elde etmek için tüketilen yakıt miktarının hesap edilmesiyle bulunur, birimi g/kWh'tır. Motor testlerinde yakıt numunelerine  $b_e$  değerleri (4.4) nolu eşitliğe göre bulunmuştur.



$$b_e = \frac{B_e}{P_e} \quad (4.4)$$

$B_e$ : Kütlesel yakıt tüketimi (g/h)

$P_e$ : Efektif motor gücü (kW)

**Efektif verim ( $\eta_e$ ):** Efektif verim, motorda yakılan yakıtın kimyasal enerjisinin faydalı işe dönüştürülme oranıdır. Hesabı, efektif gücün ( $P_e$ ) sisteme giren enerjiye bölünmesiyle gerçekleştirilir. Deneylerde yakıt numunelerine ait efektif verim değerleri ( $\eta_e$ ),  $B_e$  ve yakıtın alt ısıl değeri (ID) kullanılarak (4.5) nolu verilen eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$\eta_e = \frac{P_e}{B_e \times ID} \quad (4.5)$$

## 4.2 Motor Simülasyonu

İçten yanmalı motorlarda tasarım ve performans geliştirme amacı ile yapılan deneysel çalışmalar, hem çok yüksek maliyetlere ulaşmakta, hem de çok zaman almaktadır. Bilgisayar simülasyonları için geliştirilmiş yazılım ve kodlar son zamanlarda motorlardaki akış, ısı transferi, yanma ve emisyon problemlerinin çözümü için nümerik modelleme sırasında sıklıkla kullanılmaktadır. Böylece daha tasarım aşamasındayken problemler, sebepleriyle beraber görülerek deneme yanılma süreci ne girilmeden çözümler geliştirilip tasarım süreci kısaltılmakta ve optimize edilmiş ürünler piyasaya sürülerek rekabet şansı artırılmaktadır [119]. Motor çevrimlerinin çalışmasını anlamak, ilişkileri kurmak ve analiz etmek için birçok nümerik model geliştirilmiştir. Bu modellere örnek olarak yanma modeli, fiziksel özelliklerin modelleri, silindirin içine doğru, silindir içi ve silindirin dışına doğru akış modelleri verilebilir [120].

Motor simülasyonlarında kullanılan çevrim modelleri, çok boyutlu ve boyutsuz modeller olmak üzere sınıflandırılabilir. Termodinamik modeller olarak da adlandırılan boyutsuz çevrim modellerinde, motor silindiri ve seçime bağlı olarak manifoldlarını içeren açık sisteme motor çevrim süreçleri hesabı için termodinamiğin birinci kanunu uygulanır. Bu modellerde belirlenen aralıklar için ideal gaz olarak davrandığı varsayılan iş akışkanının termodinamik ve kimyasal özellikleri hesaplanır. Boyutsuz modeller de kendi içinde ikiye ayrılmaktadır: tek bölgeli ve çok bölgeli modeller. Tek bölgeli modellerde, yanma odasındaki iş akışkanı olan karışımın yapısının homojen, basınç ve sıcaklığının üniform olduğu kabul edilir. Tek bölgeli boyutsuz modeller çoğunlukla ısı transferi, ısı yayılımı ve silindir içi kütle akışlarının hesaplanmalarında kullanılır. Ancak motorlarda sıkıştırma zamanında silindir içindeki karışım, homojen kabul edilse de enjektörden püskürtme işlemi gerçekleştirildikten sonra yanma başlamakta ve silindir içi karışım yanmış ve yanmamış bölgelerden oluşan heterojen bir yapı haline dönüşmektedir. Sanki boyutlu model olarak da adlandırılan çok bölgeli modellerde yanma odası şekli ve alev yayılması dikkate alınır. Hesaplamalar bu modellerde hem yanmış hem de yanmamış bölge için yapıldığı için tek bölgeli modellere göre daha hassas sonuçlara ulaşılır. Boyutsuz ve sanki boyutlu modeller, tam motor modellerini içerirler ancak yanma odasının geometrisiyle açık bir bağlantıları yoktur. Bundan dolayı bu modeller, motor geliştirmeye ilgili parametrik çalışmalarda kullanılmaya uygundur. Modellemede yanma odası geometrisi/formu önemli ya da çokça değiştirilmesi gerekiyorsa, çok boyutlu modellerin kullanılması daha uygundur [121].

Çok boyutlu modeller (2B/3B) ile detaylı ve karmaşık geometriye sahip yanma odasının üç boyutlu ağ yapısı oluşturulur. Ağ üzerinde ayrıklaştırılan kütle, momentum ve enerji korunumu kısmi diferansiyel denklemleri ile akışkana ait hız bileşenleri (sıcaklık, basınç vd.) zamana ve konuma bağlı olarak hesaplanır. Çok boyutlu modeller, boyutsuz modellere göre daha hassas yanma analizi yapmakta ve emisyon çıktılarını daha iyi tahmin edebilmektedir. Ancak bu modellerin bilgisayar hesap/çözüm süreleri boyutsuz modellere kıyasla çok uzun sürmektedir.

Motor test düzeneğinde silindir içi basınç sensörü bulunmamasından ve emisyon cihazının sınırlı ölçüm kapasitesinden dolayı yapılan motor testlerinde silindir içi basınç değerleri ve duman koyuluğu-PM emisyonları ölçülememiştir. Çalışmanın bu kısmında, motorin ve biyodizel yakıtı olarak SYB20'nin 1800 d/d sabit motor hızı ve 4 farklı motor yükü (16 Nm, 32 Nm, 48 Nm, 64 Nm) koşullarındaki yanma karakteristiklerinin ve duman koyuluğu-PM emisyonu salınım miktarlarının tespiti için Diesel-RK programı ile çok bölgeli sanki boyutlu motor simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

#### **4.2.1 Diesel-RK**

Diesel-RK; A. Kuleshov, N. Razleytsev ve Bauman Moskova Teknik Üniversitesindeki diğer araştırmacılar tarafından geliştirilen ve halen geliştirilme süreci devam eden, internet üzerinden serbest erişime açık, tam çevrim termodinamiksel analiz yapan bir motor simülasyon programıdır. Diesel-RK ile farklı ateşleme tiplerine sahip iki veya dört zamanlı İYM'lerin çalışma proseslerinin optimizasyonu ve simülasyonunun yapılması mümkündür. Programda tasarlanan modeller ile yakıt tüketimi tahmini ve optimizasyonu, tork eğrisi ve diğer motor performans tahminleri, yanma analizi ve emisyon salınımları, EGR analizi ve optimizasyonu, dizel motorlarının gaz yakıtlı motorlar dönüştürülmesi gibi uygulamalar gerçekleştirilebilmektedir [122].

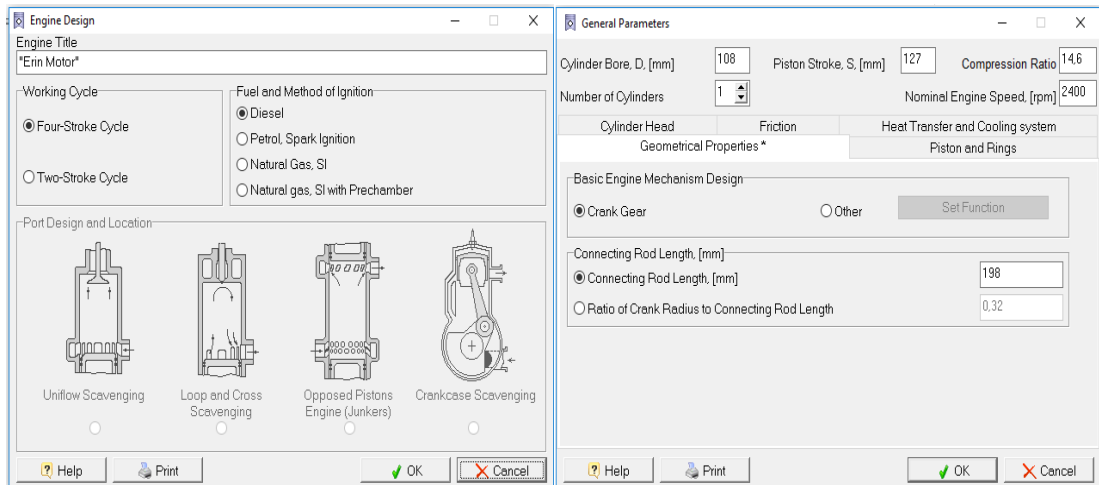
Diesel-RK farklı motor parametreleri (strok hacmi, avans miktarı vb.) ve yakıt çeşitleri için motor performansı, yanma karakteristiği ve egzoz emisyonları değerlerini 3 boyutlu HAD programlarına göre çok kısa işlem sürelerinde gerçeğe oldukça yakınsayan değerler aralığında tahmin edebilmektedir. Bunun için Diesel-RK özellikle akademik araştırmalarda motor konseptlerinin performans tahmini, çift yakıtlı motorlarda yakıt optimizasyonu, farklı/alternatif yakıtların kullanılabilirliği gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadır.

## 4.2.2 Modelin Oluşturulması ve Hesaplamalar

RK-model, Diesel-RK içindeki çok bölgeli yakıt sprey karışım oluşum ve yanma modelidir. RK-modelinde sprey modelleme genel esasları, yakıt demeti modeli, yakıt buharlaşma modeli ve ısı salınım modeli kullanılmaktadır. Ayrıca, oluşturulan ana model; ısı transferi modeli, emisyon modelleri ve EGR gibi ilave sistemlerin modellerini de içermektedir. Yapılan bu çalışmada, çok bölgeli motor simülasyonu için motorun tanımlanması, yakıt seçimi, RK-model ve hesaplamalarında kullanılmış olan temel alt model ve denklemleri aşağıdaki alt başlıklarda verilmiştir [122].

### 4.2.2.1 Motorun Tanımlanması

Modelin oluşturulabilmesi için test motorunun (Erin motor) fabrika verilerine göre temel tasarım prensipleri; enjeksiyon basıncı ve zamanı; supap boyut ve zamanlamaları; manifold uzunlukları; yanma odası geometrisi ve silindir çapı, strok uzunluğu, biyel kolu uzunluğu gibi boyutsal parametreleri programa girilerek motorun genel karakteristik ve yapısal özellikleri tanımlanmıştır.



Şekil 4.5: Motor karakteristik ve yapısal özelliklerinin tanımlanması.

#### 4.2.2.2 Yakıtların Seçilmesi

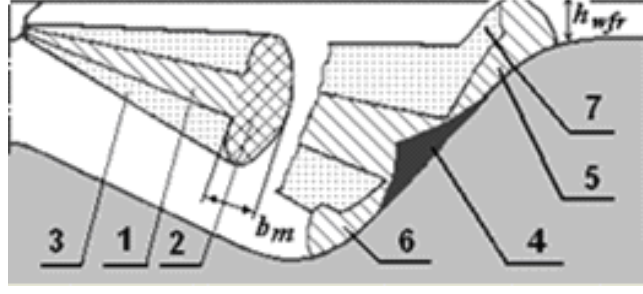
Uzun zamanlı biyodizel kullanımlarında, yüksek harman oranlı karışımların motor üzerinde oluşturabilecekleri muhtemel sorunlar nedeniyle maks B20 yakıt kullanılması tavsiye edilmektedir. BULGULAR başlığında bahsedileceği üzere genel olarak düşük yük motor testlerinde en iyi motor performansını biyodizel yakıtları içerisinde SYB sağlamıştır. Bu nedenlerden dolayı simülasyonlarda yakıt olarak Diesel-RK'da tanımlı olan motorin ve SYB20 kullanılmıştır. Test yakıtların Diesel-RK'nın kütüphanesinde bulunan yakıt özellikleri Tablo 4.4'te verilmiştir. Programda SYB20, SME B20; motorin ise Diesel No.2 olarak isimlendirilmektedir.

**Tablo 4.4:** Test yakıtlarının Diesel-RK kütüphanesindeki özellikleri.

Yakıt Özelliği	Birim	Motorin (Diesel No.2)	SYB20 (SME B20)
Formül	-	$C_{0.87}H_{0.126}O_{0.004}$	$C_{0.8496}H_{0.1245}O_{0.02591}$
Alt ısı değer	MJ/kg	42.50	41.18
Setan Sayısı	-	48	48.68
Yoğunluk (50°C)	g/cm <sup>3</sup>	0.830	0.841
Dinamik viskozite (50°C)	Pa.s	0.003	0.003343
Yüzey gerilim faktörü (50°C)	N/m	0.028	0.03122
Özgül Buharlaşma Isısı	kJ/kg	250	265.8
Yakıt Isıl Kapasitesi	J/kg°C	1853	1853
Düşük sıcaklıklarda doymuş buhar basıncı	bar	0.0477 (207°C)	0.04326 (207°C)
Yüksek sıcaklıklarda doymuş buhar basıncı	bar	1.616 (437°C)	2.408 (448.2°C)

#### 4.2.2.3 Yakıt Demeti Modeli

RK-modelde yakıt demeti modeli, Şekil 4.6'da gösterildiği üzere yedi karakteristik bölgeden oluşmaktadır. 1-3 nolu bölgelerin püskürtme işleminin başlamasından duvara çarpma anının öncesinde, 4-7 nolu bölgelerin ise duvara çarptıktan sonra oluştuğu varsayılmaktadır.



Şekil 4.6: Yakıt demetinin yedi karakteristik bölgesi [122].

- 1) Yoğun konik çekirdek (eksenel çekirdek)
- 2) Yoğun ön kısım (ön cephe)
- 3) Yoğun olmayan dış kısım
- 4) Duvar yüzeyindeki yoğun konik çekirdek
- 5) Piston yüzeyi üzerindeki duvar yüzeyi yoğun çekirdek
- 6) Duvar yüzeyindeki yoğun ön kısım (ön cephe)
- 7) Duvar yüzeyindeki yoğun olmayan dış kısım (ön cephe)

Bu modelde yakıt demeti ön kısım kalınlığı (4.6) nolu denklem ile bulunur. Denklemdeki ampirik katsayılar  $A_m$  için 0.7,  $F_s$  için 0.0075-0.009 olup,  $\rho = \rho_a / \rho_f$ 'dir.

$$b_m = A_m \times F_s \times \rho^{0.5} \times l \times W_e^{0.32} \times M^{-0.7} \quad (4.6)$$

Enjektör nozülü - yakıt demeti ön kısmı arası uzunluk ( $l$ ), boyutsuz parametreler olan ( $W_e$ ) ve ( $M$ ) aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır. Bu denklemlerde bulunan  $t_k$  ve  $t_m$ , yakıt demeti  $l$  ve  $l_m$  mesafelerine ulaşınca kadar geçen süreleri ifade eder.

$$l = l_m \times \left[ 1 - \left( 1 - \frac{t_k}{t_m} \right)^3 \right] \quad (4.7)$$

$$W_e = \frac{U_{0m}^2 \times d_n \times \rho_f}{\sigma_f} \quad (4.8)$$

$$M = \frac{\mu_f^2}{d_n \times \rho_f \times \sigma_f} \quad (4.9)$$

Şekil 4.6'da gösterilen duvar yüzeyi ön akış bölgesi yüksekliği ( $h_{wfr}$ ), (4.10) nolu denklem ile bulunur. Bu denklemde  $F_{sw} \cong 1.5 \times F_s$  olarak kabul edilmekte,  $l_{w1}$  sayısal yöntemle uygun şekilde hesaplanarak bulunmaktadır.

$$h_{wfr} = F_{sw} \times \rho^{0.5} \times l_{w1} \times W_e^{0.32} \times M^{-0.7} \quad (4.10)$$

#### 4.2.2.4 Yakıt Buharlaşma Modeli

Yakıt demetinin enjeksiyonu ve gelişmesi esnasında yanma hızı büyük ölçüde yakıtın buharlaşması ile ilişkilidir. Modelde toplam yakıt buharlaşma hızı, tüm yakıt damlacıklarının buharlaşma hızları toplamına eşit olduğu kabul edilir ve Sreznevsky denklemine (4.11) göre tutuşma öncesi/sonrası tek bir yakıt damlacığı buharlaşma hızı hesaplanır. Denklemde  $K$  buharlaşma katsayısı,  $t_u$  ise buharlaşma başlangıcından itibaren geçen süredir.

$$d_k^2 = d_0^2 - K \times t_u \quad (4.11)$$

Yakıt damlacıklarının ortalama çapı olan  $d_{32}$ , Sauter denklemiyle (4.12) belirlenir. Denklemde  $E_k = 0.7$  olarak alınır, püskürtme başlangıcındaki damlacık çapı

ise  $d_0=d_{32}$  olarak kabul edilir.

$$d_{32} = E_k \times d_n \times M^{0.0733} \times (\rho \times W_e)^{-0.266} \quad (4.12)$$

Püskürtme işlemi boyunca her bir bölgede  $\epsilon_u$  oranının sabit olduğu kabulüyle herhangi bir bölgedeki bağıl buharlaşma hızı ( $d\delta_{ui}/dt$ ), Razleytsev denklemi (4.13) kullanılarak hesaplanır. Denklemden hesaplanacak bölgeye ait yakıt oranı ( $\delta_{zi}$ ), buharlaşma katsayısı ise ( $K_{ui}$ )'dir.  $K_{ui}$ , (4.14) nolu denklem ile elde edilir.

$$\frac{d\delta_{ui}}{dt} = \left[ 1 - (1 - \epsilon_{ui} \times t_{ui})^{3/2} \right] \times \frac{\delta_{zi}}{t_{ui}} \quad (4.13)$$

$$K_{ui} = \frac{4 \times 10^6 \times Nu_D \times D_p \times p_s}{\rho_f} \quad (4.14)$$

Nihai olarak toplam buharlaşma oranı her bir bölgedeki yakıt buharlaşma oranı toplamı olarak (4.15) nolu denklem kullanılarak belirlenir.

$$\frac{d\delta_u}{dt} = \sum_{i=1}^m \frac{d\delta_{ui}}{dt} \quad (4.15)$$

#### 4.2.2.5 Isı Yayılm Modeli

Diesel-RK'da yanma işlemi dört evrede gerçekleştirilmektedir:

- 1) Tutuşma gecikmesi,
- 2) Ön (ani/kontROLSÜZ) yanma,



3) Kontrollü (difüzyon) yanma,

4) Son (art) yanma.

**Tutuşma gecikmesi:** Tutuşma gecikmesi süresi modifiye edilen Tolstov denkleminde (4.16) bulunur. Denkleminde  $E_a$  (23000-28000 kJ/kmol) yakıtın tutuşması için gereken aktivasyon enerjisi miktarını,  $T$  silindir sıcaklığını (K),  $P$  silindir basıncını (MPa),  $CN$  ise yakıtın setan sayısını ifade eder.

$$t_{id} = 3.8 \times 10^{-6} \times (1 - 1.6 \times 10^{-4} \times n) \times \sqrt{\frac{T}{P}} \times \exp\left(\frac{E_a}{8.312 \times T} \times \frac{70}{CN + 25}\right) \quad (4.16)$$

**Ön (ani/kontrolsüz) yanma:** Ön yanma evresindeki ısı yayılım oranı (4.17) nolu denklem ile hesap edilir. Bu denklemdeki  $P_0$  ve  $P_1$  değerleri, (4.18) ve (4.19) nolu denklemlerden bulunur. (4.18)'deki  $x_0$  ifadesi, tutuşma gecikmesinde buharlaşan yakıt oranını belirtir.

$$\frac{dQ}{dt} = \phi_0 \times P_0 + \phi_1 \times P_1 \quad (4.17)$$

$$P_1 = A_0 \times \left(\frac{m_f}{V_i}\right) \times (\delta_{ud} - x_0) \times (0.1 \times \delta_{ud} + x_0) \quad (4.18)$$

$$P_1 = \frac{d\delta_{ud}}{dt} \quad (4.19)$$

**Kontrollü yanma:** Kontrollü yanma evresinde ısı yayılımı (4.20) nolu denklem ile belirlenir. Denklemindeki  $\phi_1$  ve  $\phi_2$  yanmanın tamamlanma miktarını ifade eden fonksiyonlardır.  $P_2$  değeri (4.21) nolu denklemden bulunur; bu denklemdeki  $x$ , yanmış yakıt oranını belirtir.

$$\frac{dQ}{dt} = \phi_1 \times P_1 + \phi_2 \times P_2 \quad (4.20)$$

$$P_2 = A_2 \times \left(\frac{m_f}{V_c}\right) \times (\delta_u - x) \times (\lambda - x) \quad (4.21)$$

**Son (art) yanma:** Son (art) yanma evresindeki ısı yayılımı (4.22) nolu denklem ile hesaplanır. Denklemdaki  $\phi_3$  yanmanın tamamlanma miktarını ifade eden fonksiyondur.

$$\frac{dQ}{dt} = \phi_3 \times A_3 \times K_T \times (1 - x) \times (\xi_b \times \lambda - x) \quad (4.22)$$

#### 4.2.2.6 Isı Transferi Modeli

Tasarlanan modelde emme/egzoz kanallarına ve silindir duvarlarına doğru olan ısı transferi (4.23) nolu denklemde verilen Woshni korelasyonu ile belirlenmektedir.

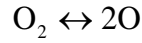
$$\dot{Q}_w = C \times \frac{p^{0.8} \times w^{0.8}}{T^{0.53} \times D^{0.2}} \quad (4.23)$$

Denklem (4.23)'deki C ısı transferi artırma katsayısını ifade etmekte olup, w (m/s) gaz akış hızı (4.24) nolu denklem ile hesap edilir. Denklemdaki ortalama piston hızı,  $S_p = H \times n / 30$  formülüyle bulunmakta; emme ve egzoz işlemlerinde  $C_1 = 6.18$  ve  $C_2 = 0$ , sıkıştırma işlemlerinde  $C_1 = 2.28$  ve  $C_2 = 0$ , yanma ve genişleme işlemlerinde ise  $C_1 = 2.28$  ve  $C_2 = 3.24 \times 10^{-3}$  olarak alınmaktadır. Denklemden bulunan  $V_a$ ,  $p_a$  ve  $T_a$  ise sıkıştırma işlemi sonundaki silindir hacmi, basıncı ve sıcaklığı ifade etmektedir.

$$w = C_1 \times S_p + C_2 \times \frac{V_h \times T_a}{p_a \times V_a} \times (p - p_m) \quad (4.24)$$

#### 4.2.2.7 NO<sub>x</sub> Emisyon Modeli

Diesel-RK'da NO<sub>x</sub> emisyonları, ayrıntılı kinetik mekanizma ya da Zeldovich mekanizması ile belirlenebilmektedir. Modelde, Zeldovich NO emisyon modeli kullanılmış ve NO<sub>x</sub> emisyonunun büyük bölümü NO'dan oluştuğu için elde edilen değer, "BULGULAR" başlığında NO<sub>x</sub> emisyonu olarak verilmiştir. Zeldovich NO emisyon modelinde kullanılan temel reaksiyonlar aşağıdaki gibidir. Bu reaksiyonlar kullanılarak hacimsel NO oluşumu (4.25) nolu denklem ile belirlenmektedir.



$$\frac{d[NO]}{d\theta} = \frac{2.333 \times 10^7 \times p \times e^{\frac{38020}{T}} \times [N_2]_e \times [O]_e \left\{ 1 - \left( \frac{[NO]}{[NO]_e} \right)^2 \right\}}{R \times T \times \left( 1 + \frac{2365}{T} \times e^{\frac{3365}{T}} \times \frac{[NO]}{[O_2]_e} \right)} \times \frac{60}{n} \quad (4.25)$$

#### 4.2.2.8 Duman Koyuluğu-PM Emisyon Modeli

Diesel-RK'da duman koyuluğu Bosch duman koyuluğu ile ifade edilmekte, PM emisyonu ise Bosch duman koyuluğu değeri üzerinden hesaplanmaktadır. Tasarlanan modelde, Bosch duman koyuluğu, Hartidge denkleminin (4.26) bir fonksiyonu olarak bulunmaktadır. PM emisyonu (mg/m<sup>3</sup>) hesabında ise (4.27) nolu Alkidas denklemi kullanılmaktadır. Denklemden A<sub>PM</sub> düzeltme katsayısıdır ve çoğunlukla 1 alınır.

$$\text{Hartidge} = 100 \times [1 - 0.9545 \times \exp(-2.4226 \times [C])] \quad (4.26)$$

$$\text{Alkidas: } PM = 565 \times A_{PM} \times \left[ \ln \left( \frac{10}{10-\text{Bosch}} \right) \right]^{1.206} \quad (4.27)$$

## 5. BULGULAR

### 5.1 Biyodizel Üretimi

Çalışmanın bu bölümünde, gerçekleştirilen biyodizel üretimi ve yakıt analiz sonuçları aktarılmıştır. “Bitkisel Yağlardan Biyodizel Üretimi” alt başlığında, mikrodalga ışıma ile rafine ayçiçek, kanola ve soya yağları; konvansiyonel metot ile ise rafine ayçiçek yağı kullanılarak gerçekleştirilen pilot ölçekli biyodizel üretimleri irdelenmiştir. “Atık Yağdan Biyodizel Üretimi” alt başlığında, mikrodalga ışıma altında atık ayçiçek yağı (AAY) ve farklı katalizör oranları kullanılarak gerçekleştirilen biyodizel üretimi deney sonuçları paylaşılmış, elde edilen veriler literatürdeki çalışmalar ile mukayese edilip yorumlanmıştır. “Motor Test Yakıtı Üretimi” alt başlığında, motor testlerinde kullanılmak üzere ayçiçek, kanola ve soya yağlarından biyodizel üretimleri gerçekleştirilmiş; üretilen biyodizellerin detaylı yakıt özellikleri EN 14214 standartları ile karşılaştırılmıştır. “Değerlendirme” alt başlığında ise ilk üç alt başlıkta elde edilen veriler derlenerek, konvansiyonel ve mikrodalga üretim sistemlerinin karşılaştırılması yapılmış ve tasarlanan reaktörün sağladığı avantajlar bir bütün halinde değerlendirilmiştir.

#### 5.1.1 Bitkisel Yağlardan Biyodizel Üretimi

Bitkisel yağlardan biyodizel üretimleri, mikrodalga ışıma altında sabit reaksiyon parametreleri (6:1 molar metanol:yağ, ağırlıkça %1.0 KOH, 60°C sıcaklık) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Transesterifikasyonun tamamlanma oranıyla ilintili iki değer olan biyodizelin ester içeriği ve biyodizel üretim veriminin reaksiyon süresine bağlı olarak değişimleri Şekil 5.1, Tablo 5.1 ve Şekil 5.2, Tablo 5.2’de; biyodizelin en önemli özelliklerinden yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin

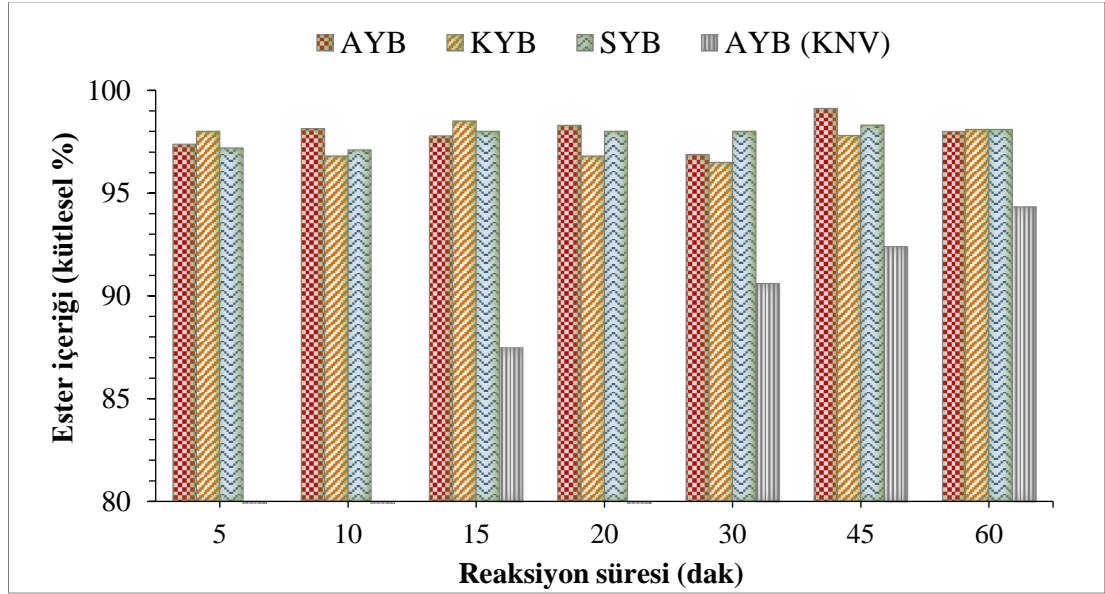
reaksiyon süresine bağlı olarak değişimi ise Şekil 5.3, Tablo 5.3 ve Şekil 5.4, Tablo 5.4'te gösterilmiştir.

### 5.1.1.1 Ester İçeriği

Şekil 5.1'deki grafik ve Tablo 5.1'deki veriler incelendiğinde, mikrodalga ışıma altında gerçekleştirilen 5 dakikalık transesterifikasyon ile tüm bitkisel yağlardan, ester içeriği oranı EN 14214 standardına uygun (>%96.5) biyodizellerin (No:1) retilbildiği görülmektedir. Yapılan ölçümlere göre, biyodizel numunelerinin ester içeriği değerleri, ilerleyen reaksiyon sürelerinde kayda değer bir değerim göstermemiştir. Örneğin, AYB numuneleri içinde en düşük ester içeriğine sahip olan numune %96.88 ile No:5 iken en yüksek ester içeriğine sahip olan numune %99.13 ile No:6 olarak bulunmuştur. Benzer biçimde KYB ve SYB numuneleri arasında sırasıyla en düşük ve yüksek ester içeriğine sahip numuneler; KYB için No:5 (%96.50) ve No:3 (%98.50), SYB için ise No:2 (%97.10) ve No:6 (%98.30) olarak bulunmuştur. Bu verilere göre mikrodalga ışıma altında 6:1 molar metanol oranı, ktlece %1 KOH, 60°C sıcaklıkta gerçekleştirilen reaksiyonda 5 dakikalık reaksiyon süresinin bitkisel yağların transesterifikasyonunun tamamlanması için yeterli olduğu anlaşılmaktadır. Numunelerin ester içeriğindeki eser miktardaki farkların ölçüm hatalarından ve el ile gerçekleştirilen saflaştırma proseslerinde (ayırma hunilerinin çalkalanması) aynı hassasiyetin uygulanamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Konvansiyonel metot ile aynı reaksiyon koşullarında gerçekleştirilen deneylerde ise transesterifikasyon süresinin artışıyla paralel olarak AYB (KNV) numunelerinin ester içeriğinin de arttığı tespit edilmiştir. Yapılan ölçümlerde; reaktörden alınan ilk biyodizel numunesi No:3 için ester içeriği değerinin %87.48 olduğu, reaksiyon süresinin ilerlemesiyle bu değerin doğrusal sayılabilecek bir düzeyde artarak No:7 (60 dak) için %94.33'e kadar yükseldiği grlmştir. Ancak 60 dak sonunda elde edilen en yüksek ester içeriği oranı dahi EN 14214 standartlarında belirtilen asgari değere ulaşamamıştır. Ester içeriğinin reaksiyon süresine bağlı

değişimine göre, tasarlanan reaktörde konvansiyonel metot ile EN 14214'e uygun saflıkta (>%96.5 eser içeriği) biyodizelin üretilebilmesi için mevcut reaksiyon koşullarında reaksiyon süresinin 60 dakikadan daha fazla sürdürülerek esterleşmenin devam ettirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.



Şekil 5.1: Bitkisel yağ biyodizellerinin reaksiyon süresi-ester içeriği değişimi.

Tablo 5.1: Bitkisel yağ biyodizellerinin ester içeriği değerleri.

Biyodizel çeşidi	Ester içeriği (kütleli %)							EN 14214 Standardı
	Numune							
	No:1	No:2	No:3	No:4	No:5	No:6	No:7	
AYB	97.38	98.14	97.79	98.30	96.88	99.13	98.01	Min. 96.5
KYB	98.00	96.80	98.50	96.80	96.50	97.80	98.10	
SYB	97.20	97.10	98.00	98.00	98.00	98.30	98.10	
AYB (KNV)	-	-	87.48	-	90.60	92.40	94.33	

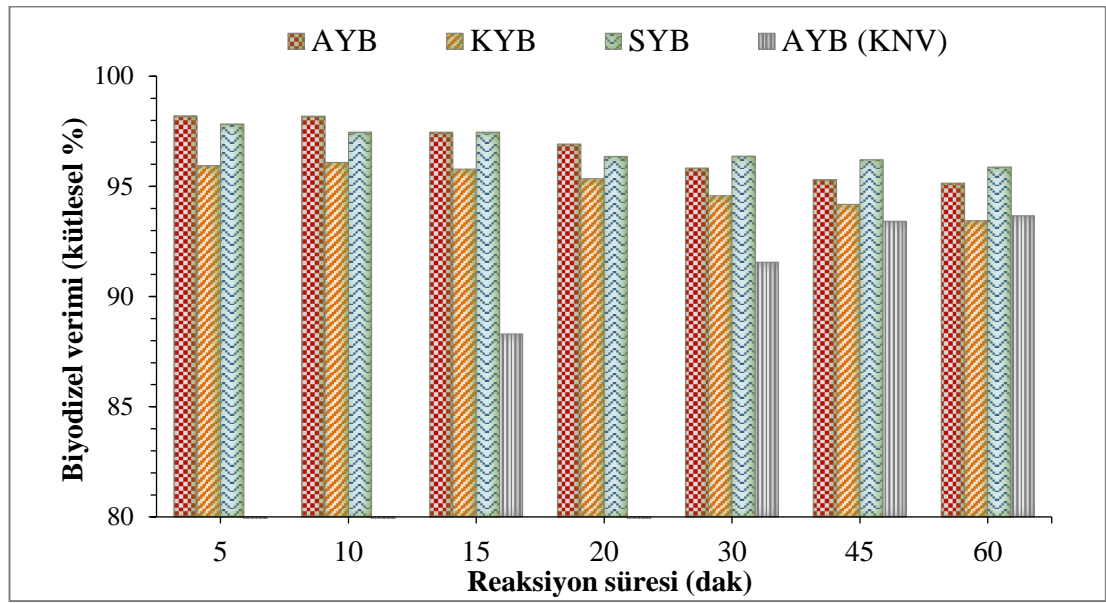
Literatür incelendiğinde, konvansiyonel üretim metotları kullanılarak gerçekleştirilen benzer bazik bitkisel yağ transesterifikasyonlarında %96.5 ester içeriğinin ancak 60 dak ila 240 dak aralığındaki uzun reaksiyon sürelerinde elde edilebildiği görülmektedir. Bunlara örnek olarak; Karabaş [123], soğuk presyon ile ürettikleri ayçiçek yağından biyodizel dönüşümünde etkili olan parametreleri incelemiş ve en yüksek biyodizel eldesine %0.5 KOH ve 10:1 molar oranda metanol kullanımında ulaşıldığını belirtmiştir. Araştırmacı, bu reaksiyon parametrelerinde 60 dak sonunda %96.6 ester içeriğine sahip AYB üretmiştir. Pullen vd. [124] %1 NaOH katalizör ve 6:1 metanol kullanımıyla gerçekleştirdikleri transesterifikasyon reaksiyonuyla kanola yağından 60 dak sonunda >%97.5 ester içeriğine sahip biyodizel üretmişlerdir. Freedman vd. [125], konvansiyonel metotlar ile 6:1 molar alkol ve bazik katalizör (KOH veya NaOH) kullanımında ayçiçek yağı ve diğer bitkisel yağların 60°C ve üstü sıcaklıklarda 60 dak, 32°C sıcaklıkta ise 240 dakikada %99 oranında metil-etil-bütül esterlerine dönüştürülebildiklerini belirtmişlerdir. Alptekin vd. [116], 6:1 molar metanol ve kütlece %1 KOH kullanarak gerçekleştirdikleri 240 dakikalık transesterifikasyon ile ayçiçek, kanola ve soya yağlarından sırasıyla %97.1, %99.2 ve %98.2 ester içeriğine sahip biyodizel numuneleri üretmişlerdir.

#### **5.1.1.2 Biyodizel Verimi**

Bitkisel yağlardan üretilen biyodizel numunelerinin transesterifikasyon reaksiyon süresine bağlı üretim verimleri incelendiğinde; en yüksek verim değerleri AYB ve SYB için No:1, KYB için ise No:2 numunelerinde elde edildiği görülmektedir. Ester içeriği değerlerine benzer olarak biyodizel verim değerleri, mikrodalga ışıma ile bitkisel yağ transesterifikasyonunun 5 dak civarında tamamlandığını ve en yüksek dönüşüm oranlarının bu süreler içinde elde edildiğini işaret etmektedir. Mikrodalga ışıma altında gerçekleştirilen üretimlerin ilk dakikalarında daha yüksek olan verim değeri, reaksiyon süresinin artışıyla çok az da olsa bir düşüş göstermiştir. Reaksiyonun 5. ve 60. dakikalarında alınan No:1 ve No:7 numunelerinin biyodizel verim değeri farkı, AYB için %3.07, KYB için %2.5, SYB



için ise %1.95 olarak hesaplanmıştır. Reaksiyon süresinin artışı ile kısmi olarak düşen biyodizel veriminin, reaksiyon süresi ile paralel olarak gliserol çözünürlüğünün artmasından ve tersinir reaksiyonlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Benzer şekilde, belli bir reaksiyon süresinden sonra biyodizel veriminin azaldığı çalışmalarda, bu durumun transesterifikasyon tamamlandıktan sonra devam ettirilen reaksiyonda oluşmaya başlayan hidroliz reaksiyonları ile yağ asidi mono alkil esterlerin serbest yağ asitlerine ve sabuna dönüşmesinden, ayrıca artan reaksiyon süresi ve sıcaklığı ile gliserol çözünürlüğünün artmasından kaynaklandığı ifade edilmektedir [83, 114].



Şekil 5.2: Bitkisel yağ biyodizellerinin reaksiyon süresi-verim değişimi.

Tablo 5.2: Bitkisel yağ biyodizellerinin biyodizel verim değerleri.

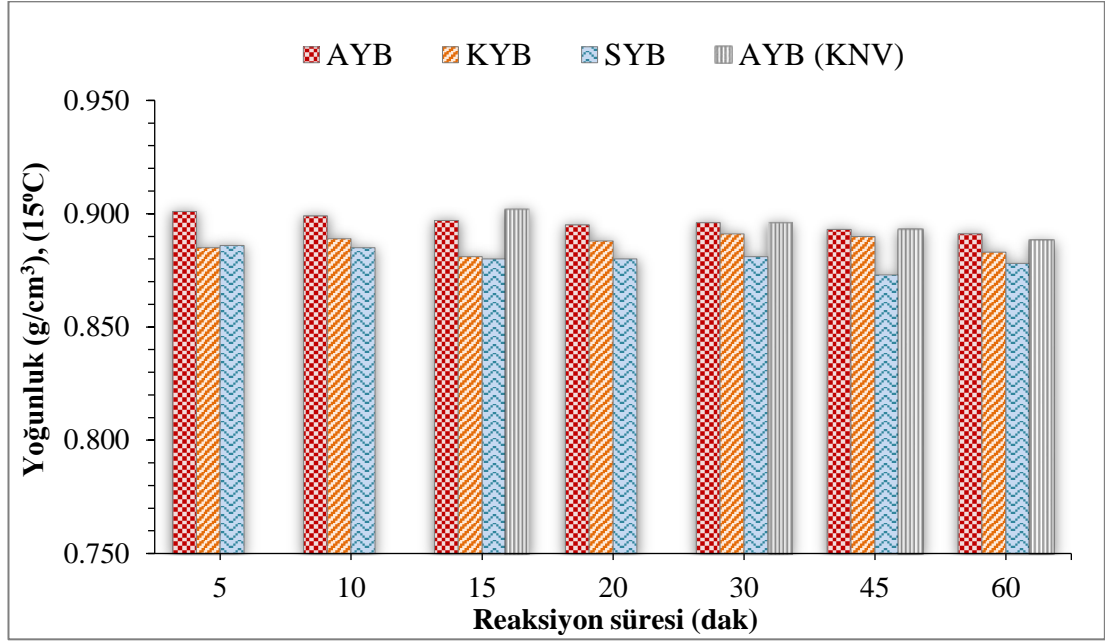
Biyodizel çeşidi	Biyodizel verimi (kütlesel %)						
	Numune						
	No:1	No:2	No:3	No:4	No:5	No:6	No:7
AYB	98.21	98.18	97.46	96.92	95.83	95.31	95.14
KYB	95.95	96.09	95.79	95.35	94.58	94.19	93.45
SYB	97.82	97.45	97.46	96.36	96.37	96.21	95.87
AYB (KNV)	-	-	87.48	-	90.60	92.40	94.33

Aynı reaksiyon şartlarında konvansiyonel ısıtma ile gerçekleştirilen ayçiçek yağından biyodizel üretimi için transesterifikasyon süresinin artışıyla paralel olarak reaksiyon veriminin de arttığı görülmektedir. Yapılan hesaplamalarda, AYB (KNV) numunelerinde No:3 için %88.31 olan biyodizel verimi, No:7 için %93.67 olarak bulunmuştur. Mikrodalga destekli üretimde, aynı yağ ve aynı reaksiyon koşullarında 5 dak sonunda elde edilen biyodizel verimi, konvansiyonel üretimde 60 dak sonunda elde edilen verimden %1.47 daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, ester içeriği sonuçlarında da bahsedildiği üzere reaksiyonun 60 dak sonunda tamamlanmadığını ve ester dönüşümünün devam ettiğini göstermektedir. Mikrodalga ışıma ile 5 dakikada ulaşılan bu değere, konvansiyonel metotlar ile benzer reaksiyon koşullarında çok daha uzun sürelerde ulaşılabildiği literatürdeki çalışmalarda aktarılmaktadır. Bu çalışmalara örnek olarak 60 dakikalık bazik transesterifikasyon süresi ile Rashid vd. [126] ayçiçek yağından %97.1, Karabaş [127] kanola yağından %98, Dias [56] ise soya yağından yaklaşık %97 verim ile biyodizel üretimi gerçekleştirmişlerdir.

### 5.1.1.3 Yoğunluk

AYB numunelerinin Şekil 5.3 ve Tablo 5.3'te verilen yoğunluk değişimleri incelendiğinde, mikrodalga ışıma altında üretilen No:1'den No:7'ye kadar tüm numunelerin yoğunluk değerlerinin EN 14214 biyodizel standartları aralığında olduğu görülmektedir. 5 dakikalık transesterifikasyon ile üretilen No:1'in yoğunluk değeri  $0.885 \text{ g/cm}^3$  olarak ölçülmüş, artan reaksiyon süresiyle yoğunluk değerinde belirgin farkların oluşmadığı tespit edilmiştir. En yüksek yoğunluk değeri No:5 için  $0.888 \text{ g/cm}^3$ , en düşük yoğunluk değeri ise No:6 için  $0.873 \text{ g/cm}^3$  olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde KYB ve SYB için de No:1 ve No:7 dâhil tüm biyodizel numunelerinin yoğunluk değerleri EN 14214 biyodizel standartlarına uygun bulunmuştur. KYB numuneleri içerisinde en küçük değer  $0.881 \text{ g/cm}^3$  ile No:3'e, en büyük değer ise  $0.891 \text{ g/cm}^3$  ile No:5'e aittir. SYB numunelerinde içinde en az yoğun olan  $0.873 \text{ g/cm}^3$  ile No:6, en yoğun olan ise  $0.886 \text{ g/cm}^3$  ile No:1'dir. Görüldüğü gibi mikrodalga ışıma ile gerçekleştirilen tüm üretimlerde biyodizeli numunelerinin yoğunlukları, EN 14214

standartları limitleri içinde ve birbirlerine eşit sayılacak kadar yakın büyüklüktedir. Çünkü reaksiyon 5 dak sonunda tamamlanmış ve esterleşme işlemi bitmiş, dolayısıyla artan reaksiyon süresi yakıtların yapısal özelliklerinde bir değişime neden olmamıştır.



**Şekil 5.3:** Bitkisel yağ biyodizellerinin reaksiyon süresi-yoğunluk değişimi.

**Tablo 5.3:** Bitkisel yağ biyodizellerinin yoğunluk değerleri.

Biyodizel çeşidi	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )							EN 14214 Standardı
	Numune							
	No:1	No:2	No:3	No:4	No:5	No:6	No:7	
AYB	0.885	0.880	0.882	0.877	0.888	0.873	0.881	0.860-0.900
KYB	0.885	0.889	0.881	0.888	0.891	0.890	0.883	
SYB	0.886	0.885	0.880	0.880	0.881	0.873	0.878	
AYB (KNV)	-	-	0.902	-	0.896	0.893	0.888	

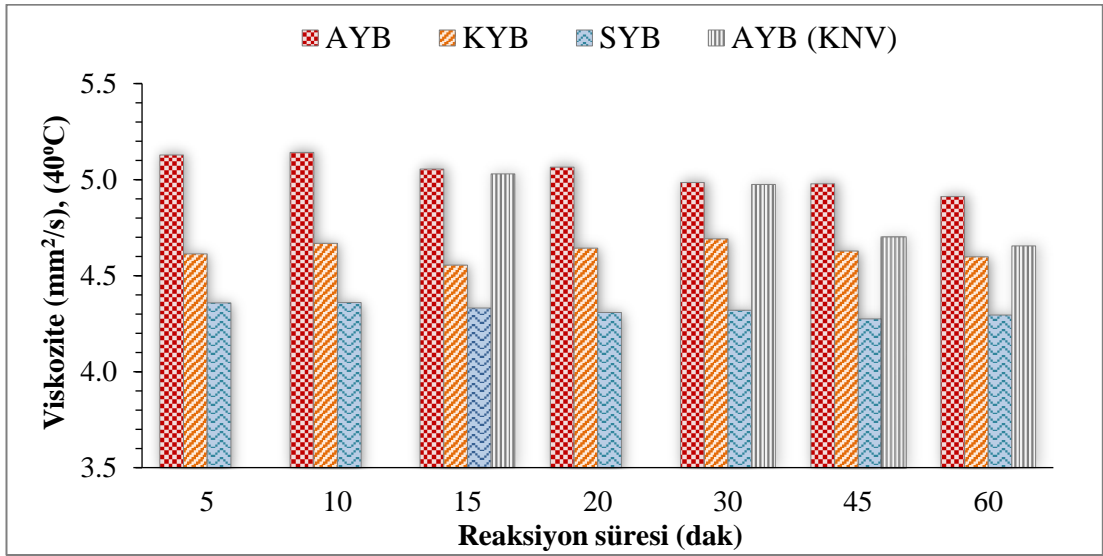
Konvansiyonel metot ile gerçekleştirilen üretim sonuçları incelendiğinde, yoğunluğun biyodizel dönüşüm verimiyle ilişkili olarak değişiklik gösterdiği

anlaşılmaktadır. AYB (KNV) numuneleri içerisinde 15 dakikada üretilen No:3'ün yoğunluk değeri, yeterli oranda dönüşüm sağlanamadığı için EN 14214 standartları dışında,  $0.902 \text{ g/cm}^3$  olarak ölçülmüştür. No:5, No:6 ve No:7 numunelerin yoğunluk değerleri ise artan dönüşüm oranları nedeni ile standarda uygun bulunmuştur.

#### 5.1.1.4 Kinematik Viskozite

Şekil 5.4 ve Tablo 5.4'teki verilere göre genel olarak reaksiyon süresine bağlı viskozite değişiminin yoğunluk değişimine benzer karakteristikte olduğu gözlemlenmiştir. Mikrodalga ışıma altında 5 dakikalık reaksiyon ile üretilen AYB No:1 numunesinin viskozite değeri  $4.554 \text{ mm}^2/\text{s}$ , 60 dakikalık reaksiyon sonunda üretilen No:7 numunesinin viskozite değeri ise  $4.515 \text{ mm}^2/\text{s}$  olarak ölçülmüştür. Benzer biçimde, KYB ve SYB No:1 numunelerinin de EN 14214'e uygun viskozite değerlerine sahip olduğu, artan reaksiyon süresiyle viskozitelerinde dikkate değer bir değişim olmadığı bulunmuştur. Reaksiyon süresi ile viskozite arasında net bir korelasyon yoktur, çünkü 5 dak sonunda büyük oranda denge konumuna ulaşan transesterifikasyon ile gliserolün tamamına yakını yağın yapısından ayrıştırılmış ve esterleşme tamamlanmıştır. Daha uzun sürdürülen reaksiyonlarda, reaksiyon ürününün yapısında bir değişiklik oluşmadığı için viskozite değerleri de çok değişmemiştir. Eser miktardaki farkların ölçüm hatalarından ve numunelerin aynı derecede saflaştırılmamalarından dolayı olduğu söylenebilir. No:1'den No:7'ye kadarki tüm numunelerin ortalama viskozite değerleri AYB için  $4.535 \text{ mm}^2/\text{s}$ , KYB için  $4.628 \text{ mm}^2/\text{s}$ , SYB için ise  $4.321 \text{ mm}^2/\text{s}$  olarak hesaplanmıştır. Soya yağından üretilen biyodizelin, ayçiçek ve kanola yağından üretilen biyodizellere kıyasla daha düşük viskozite değerine sahip olduğu başka çalışmalarda da ifade edilmektedir [116, 128]. Biyodizel viskozite değerinin büyük ölçüde biyodizelin dönüştürüldüğü bitkisel yağı oluşturan yağ asitlerinin zincir yapısına, uzunluğuna ve doymuşluk oranına bağlı olarak değiştiği belirtilmektedir. Genellikle yağ asitlerinin zincir yapısı düzleştikçe, uzunluğu kıaldıkça ve doymamışlık oranı arttıkça biyodizelin viskozite değeri azalmaktadır [128, 129].

Konvansiyonel metot ile ayçiçek yağından üretilen biyodizel numunelerinin reaksiyon süresine bağlı özellikleri incelendiğinde, dönüşüm oranının artmasıyla viskozitelerinin azaldığı görülmektedir. No:3 için düşük seviyelerde bulunan dönüşüm oranı, viskozite değerinin EN 14214 asgari sınırının altında kalmasına neden olmuştur. Reaksiyon süresinin artırıldığı diğer numunelerde ester içeriği ve biyodizel veriminin artmasıyla birlikte viskozite değerleri, standartta belirtilen aralıktaki değerler seviyesine ulaşmıştır. Konvansiyonel metotla üretilen tüm numuneler içerisinde en kaliteli yakıt özelliklerine sahip numune, 60 dakikalık reaksiyon sonunda elde edilen ve en düşük viskozite değerine (4.655 mm<sup>2</sup>/s) sahip No:7 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.4: Bitkisel yağ biyodizellerinin reaksiyon süresi-viskozite değişimi.

Tablo 5.4: Bitkisel yağ biyodizellerinin viskozite değerleri.

Biyodizel çeşidi	Viskozite (mm <sup>2</sup> /s)							EN 14214 Standardı
	Numune							
	No:1	No:2	No:3	No:4	No:5	No:6	No:7	
AYB	4.554	4.483	4.529	4.628	4.641	4.395	4.515	3.5-5.0
KYB	4.612	4.668	4.555	4.642	4.691	4.627	4.598	
SYB	4.357	4.360	4.331	4.308	4.320	4.275	4.294	
AYB (KNV)	-	-	5.029	-	4.974	4.695	4.655	

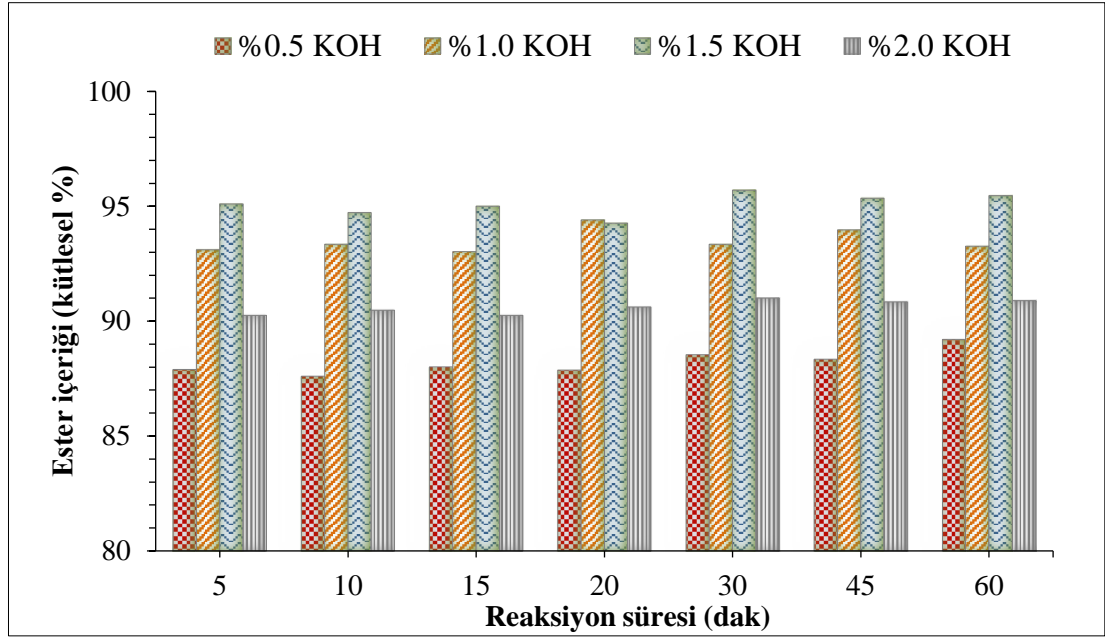
## 5.1.2 Atık Yağdan Biyodizel Üretimi

AAY'nin mikrodalga ışıma altında tek basamaklı transesterifikasyon reaksiyonları; 6:1 molar alkol:yağ oranında metanol:yağ ve 60°C sıcaklıktaki sabit reaksiyon parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu reaksiyon koşullarında yağın kütlece %0.5, %1.0, %1.5 ve %2.0'ı kadar KOH kullanılarak 4 farklı biyodizel üretim koşulu incelenmiştir. Tüm reaksiyon koşullarında, No:1'den No:7'ye kadar numaralandırılan biyodizel numuneleri üretilerek, bu numunelerin üretim verimleri ve temel yakıt özellikleri analiz edilmiştir. Üretimlere ait reaksiyon süresine bağlı olarak değişen ester içeriği değerleri Şekil 5.5 ve Tablo 5.5, biyodizel verim değerleri Şekil 5.6 ve Tablo 5.6, yoğunluk değerleri Şekil 5.7 ve Tablo 5.7, kinematik viskoziteleri değerleri Şekil 5.8 ve Tablo 5.8'de verilmiştir. Ayrıca, benzer koşullarda konvansiyonel metotlar ile gerçekleştirilen literatürdeki atık yağ biyodizel üretimleri de bu başlık altında verilerek, mikrodalga ve konvansiyonel ısıtma sistemlerinin biyodizel üretimi üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

### 5.1.2.1 Ester İçeriği

Şekil 5.5 ve Tablo 5.5'teki ester içeriği değerleri incelendiğinde, AAY'den biyodizel üretiminde yağın kütlece %0.5'i kadar KOH kullanımıyla istenilen düzeyde dönüşümün gerçekleşmediği görülmektedir. Transesterifikasyonun tamamlanma derecesini belirten en önemli biyodizel özelliği olan ester içeriği oranı No:1 için %87.90 iken No:7'de çok az bir artışla %89.21 olarak ölçülmüştür. Bunun sebebinin gerekenden az miktarda katalizör kullanımının olduğu söylenebilir. Çünkü atık yağların içinde kullanılmamış yağlara göre çok daha yüksek oranda bulunan SYA'lar, reaksiyon karışımındaki mevcut katalizörü harcayarak sabun oluşturmakta, karışımda azalan katalizör miktarı ise reaksiyonun katalitik veriminin düşürmektedir [62]. Bir sonraki üretimde, KOH miktarının %1.0'a yükseltilmesiyle reaksiyonun genel veriminin arttığı ancak yine de istenilen düzeyde dönüşümün gerçekleşmediği

görülmektedir. Buna göre No:1 için ester içeriği değeri, %0.5 KOH kullanımıyla üretilen No:1 numunesinin ester içeriği değerinden %5.12 artışla %93.02'e yükselmiştir. Diğer numunelerinin ester içeriklerinde de birbirine yakın artış oranları gözlemlenmiştir. Bu deney şartlarında, en yüksek ester içeriği No:4 için %94.41 olarak bulunmuştur. No:1'den No:7'ye kadar artan reaksiyon süresi, biyodizel numunelerinin ester içeriğinde istenilen artışı sağlamamış, bu iki özellik sabit değerlerde seyretmiştir.



Şekil 5.5: Farklı KOH oranları için reaksiyon süresi–AAYB ester içeriği değişimi.

Tablo 5.5: Farklı KOH oranları için AAYB ester içeriği değerleri.

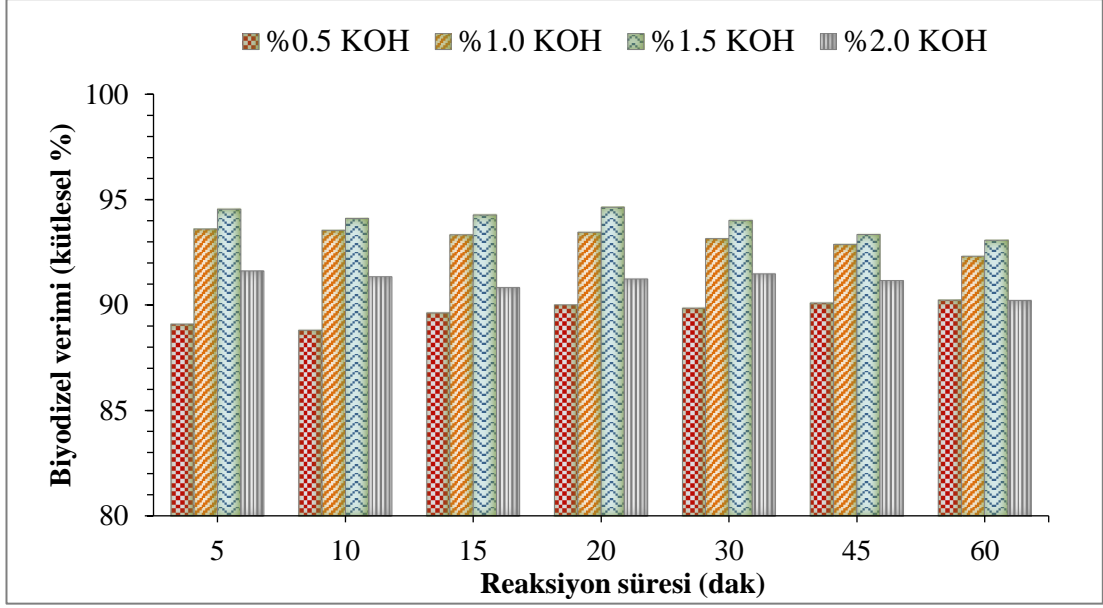
KOH (kütleli %)	Ester içeriği (kütleli %)							EN 14214 Standartı
	Numune							
	No:1	No:2	No:3	No:4	No:5	No:6	No:7	
0.5	87.90	87.61	88.01	87.87	88.54	88.34	89.21	Min. 96.5
1.0	93.11	93.34	93.02	94.41	93.35	93.98	93.27	
1.5	95.10	94.72	95.00	94.27	95.70	95.35	95.46	
2.0	90.25	90.47	90.25	90.62	91.01	90.84	90.90	

Elde edilen verilere göre %1.5 KOH varlığında gerçekleştirilen üretimde, %0.5 ve %1.0 KOH kullanımına kıyasla daha yüksek oranda metil ester dönüşümü elde edilmiştir. En yüksek ester içeriği No:5 için %95.70, en düşük ester içeriğinin ise No:2 için %94.72 olarak ölçülmüştür. Genel olarak ester içeriği oranları EN 14214 standardında belirtilen değerin çok az altında kalmış, reaksiyon süresinin artması biyodizel numunelerinin ester içeriği oranının yükselmesine etki etmemiştir. Ancak pilot ölçekteki mikrodalga destekli 5 dakikalık üretimde elde edilen ester içeriği değeri (%95.10), literatürde konvansiyonel metotlar ile atık yağlardan ya da konvansiyonel pilot ölçekli reaktörlerde kullanılmamış bitkisel yağlardan çok daha uzun süren transesterifikasyonlar ile elde edilen ester içeriği değerlerine çok yakın ya da daha yüksektir. Örneğin Meng vd. [130], konvansiyonel metotlar ile atık yemeklik yağdan biyodizel üretimi için %86'lık dönüşüm oranı sağlayan optimum transesterifikasyon koşullarının 6:1 molar oranda metanol, %0.7 NaOH, 50°C sıcaklık ve 90 dakikalık reaksiyon süresi olduğunu belirtmişlerdir. Yıldız [55], yaptığı çalışmada 50 L hacimli konvansiyonel bir biyodizel reaktörü kullanarak atık kızartma yağından 60 dakikalık bazik transesterifikasyon ve sulu yıkama işlemleri sonunda %95.6 ester içeriğine sahip biyodizel üretmiştir. Konvansiyonel biyodizel reaktörünün (241 L hacimli) kullanıldığı bir başka çalışmada ise nötr pamuk yağından 120 dakikalık bazik transesterifikasyon ile biyodizel üretilmiş, yakıt analizlerinde ancak %86.12 ester içeriğine sahip biyodizel elde edilebildiği görülmüştür [38]. %2.0 oranında KOH kullanılan üretim için biyodizel numunelerinin ester içerikleri genel olarak düşmüştür. Elde edilen sonuçlara göre No:1 ester içeriği değeri, %1.5 KOH kullanımıyla üretilen No:1'e göre %5.10 azalmıştır. %2.0 KOH kullanımında ölçülen en yüksek ester içeriği değeri No:5 için %91.01 olarak bulunmuştur. Bu değer, %1.0 ve %1.5 KOH kullanımında elde edilen en yüksek ester içeriği değerlerine göre sırasıyla %3.60 ve %4.9 daha azdır. Katalizör miktarında artışla beraber biyodizel numunelerinin ester içeriğindeki bu düşüş, fazla miktardaki baz katalizör (KOH) ile SYA'ların reaksiyona girerek sabun oluşturması ile açıklanabilir. Çünkü SYA ve baz katalizörlerin etkileşimiyle oluşan sabunun reaksiyon üzerinde ester dönüşümünü azaltan ve biyodizel-gliserol faz ayrışması engelleyen etkisi vardır. Ayrıca reaksiyon karışımı içindeki sabun viskoziteyi artırır ve jel oluşumuna neden olur [52].



### 5.1.2.2 Biyodizel Verimi

Üretimlerde elde edilen veriler incelendiğinde (Şekil 5.6 ve Tablo 5.6), % 0.5 KOH kullanımı için ester içeriği değerlerine benzer olarak biyodizel verim değerlerinin de düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Biyodizel verimi No:1 için %89.10, No:7 ise % 90.24 olarak hesaplanmıştır. KOH oranının %1.0'a çıkarılmasıyla, artan ester içeriği ile biyodizel verimi de artarak No:1 için %93.61; No:7 için ise %92.31'e yükselmiştir. En yüksek ester içeriği değerlerinin elde edildiği %1.5 KOH kullanımına benzer olarak, biyodizel verimi değerleri de bu üretim koşulu için AAY'den biyodizel üretimleri deneyleri içindeki en yüksek seviyesine ulaşmıştır. No:1 için %95.10 olarak hesaplanan biyodizel veriminin, literatürde çok daha uzun reaksiyon sürelerinde gerçekleştirilen konvansiyonel biyodizel üretimlerinde elde edilen verim değerlerine çok yakın ya da onlardan daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Örneğin; Atapour vd. [131] yaptıkları çalışmada optimum bazik transesterifikasyon koşulları altında atık kızartma yağından 45 dakikada %92.05 verimle biyodizel üretmişlerdir. Predojevic vd. [132], toplam 60 dakika süren iki basamaklı bazik transesterifikasyon reaksiyonlarında katalizör olarak KOH kullanımıyla atık yağlardan %94.86 verimle biyodizel üretilebileceğini belirtmişlerdir. Yusuf ve Khan [133], atık palmiye yağı kullanarak metanol ve KOH varlığında gerçekleştirdikleri üretimde, 180 dak sonunda %96.00 oranında bir dönüşüm elde etmişlerdir. Katalizör oranın %2.0'a çıkarılmasıyla No:1 biyodizel verimi değeri, %1.5 KOH kullanımıyla üretilen No:1'e göre %3.11 azalmıştır. Katalizör miktarının artırımıyla meydana gelen sabun oluşumu ve düşen ester içeriği oranı, biyodizel veriminin de düşmesine neden olmuştur. Sonuç olarak; mikrodalga ışıma altında 60°C sıcaklık ve 6:1 molar metanol:yağ oranı kullanılarak gerçekleştirilen AAY transesterifikasyonlarında, en yüksek ester içeriği ve biyodizel veriminin %1.5 KOH kullanımıyla elde edildiği dolayısıyla transesterifikasyonun tamamlanma oranının ve dönüşüm veriminin en yüksek değerlerinin bu şartlar altında sağlandığı anlaşılmaktadır.



Şekil 5.6: Farklı KOH oranları için reaksiyon süresi–AAYB verimi değişimi.

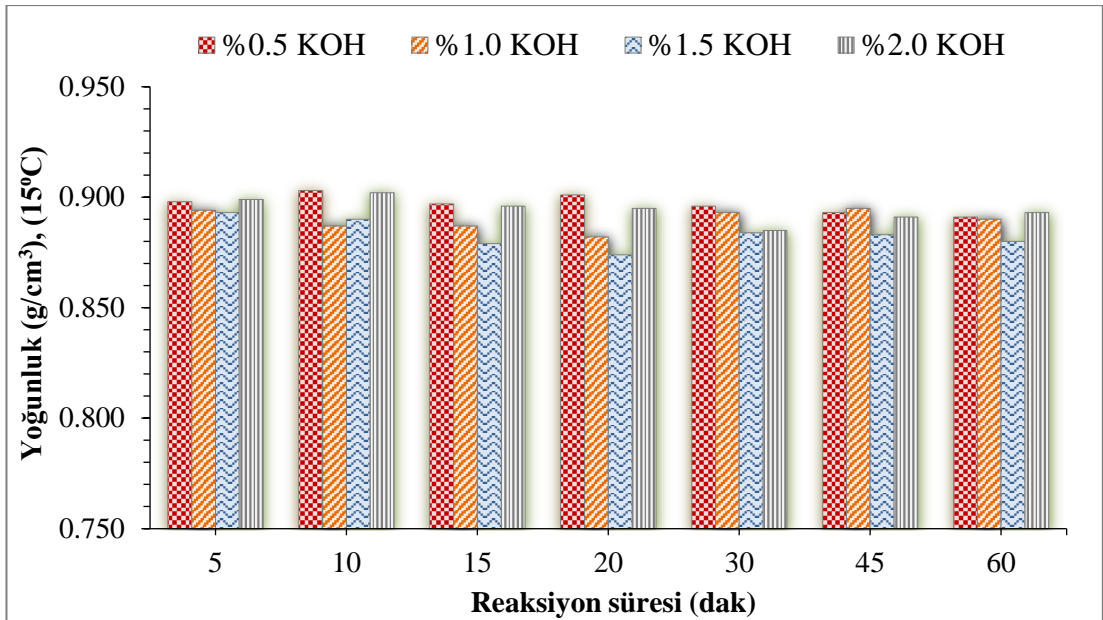
Tablo 5.6: Farklı KOH oranları için AAYB verimi değerleri.

KOH (kütlesel %)	Biyodizel verimi (kütlesel %)						
	Numune						
	No:1	No:2	No:3	No:4	No:5	No:6	No:7
0.5	89.10	88.80	89.62	90.01	89.86	90.10	90.24
1.0	93.61	93.55	93.34	93.45	93.15	92.87	92.31
1.5	94.55	94.11	94.28	94.64	94.01	93.35	93.08
2.0	91.61	91.34	90.82	91.24	91.48	91.16	90.22

### 5.1.2.3 Yoğunluk

%0.5 KOH kullanımında yeterince ester dönüşümün gerçekleşmediğinin bir başka göstergesi de biyodizel numunelerinin yoğunluk değerleridir. Şekil 5.7 ve Tablo 5.7'deki yoğunluk değerleri incelendiğinde; No:2 (0.903 g/cm<sup>3</sup>) ve No:4 (0.901 g/cm<sup>3</sup>) numunelerinin yoğunluk değerlerinin EN 14214 standardına uygun olmadığı, diğer

numunelerin yoğunluklarının ise standarda uygun ancak asgari sınır değere yakın büyüklüklerde olduğu görülmektedir. KOH oranının %1.0 ve %1.5'a çıkarıldığı üretimlerde dönüşüm veriminin artmasıyla tüm numunelerin yoğunlukları EN 14214 standartlarına uygun hale gelmiştir. Ancak bu üretimlerde istenilen düzeyde ester içeriği oranı (saflığı) elde edilemediği için numunelerin ortalama yoğunluk değerleri, mikrodalga altında ayçiçek yağından dönüştürülen biyodizel numunelerinkine (AYB) göre bir miktar daha yüksek bulunmuştur. Hesaplanan ortalama yoğunluk değerleri; AYB %1.0 KOH için  $0.881 \text{ g/cm}^3$ , AAYB %0.5 KOH için  $0.897 \text{ g/cm}^3$ , AAYB %1.0 KOH için  $0.890 \text{ g/cm}^3$ , AAYB %1.5 KOH için ise  $0.883 \text{ g/cm}^3$ 'tür. %2.0'ye artırılan KOH miktarıyla beraber, %1.5 KOH kullanımına kıyasla ortalama yoğunluk değerlerinde %1.25'lik bir artış meydana gelmiş; bu üretim şartlarında en düşük yoğunluk No:5 ( $0.885 \text{ g/cm}^3$ ), en yüksek yoğunluk ise No:2 ( $0.902 \text{ g/cm}^3$ ) için bulunmuştur. Tüm numunelerin yoğunluk değerleri birlikte ele alındığında; reaksiyon süresi ile yoğunluk arasında net bir korelasyon olmadığı ve en düşük yoğunluklu biyodizelin, en iyi dönüşüm oranının elde edildiği %1.5 KOH varlığındaki üretimde elde edildiği (No:4,  $0.874 \text{ g/cm}^3$ ) tespit edilmiştir.



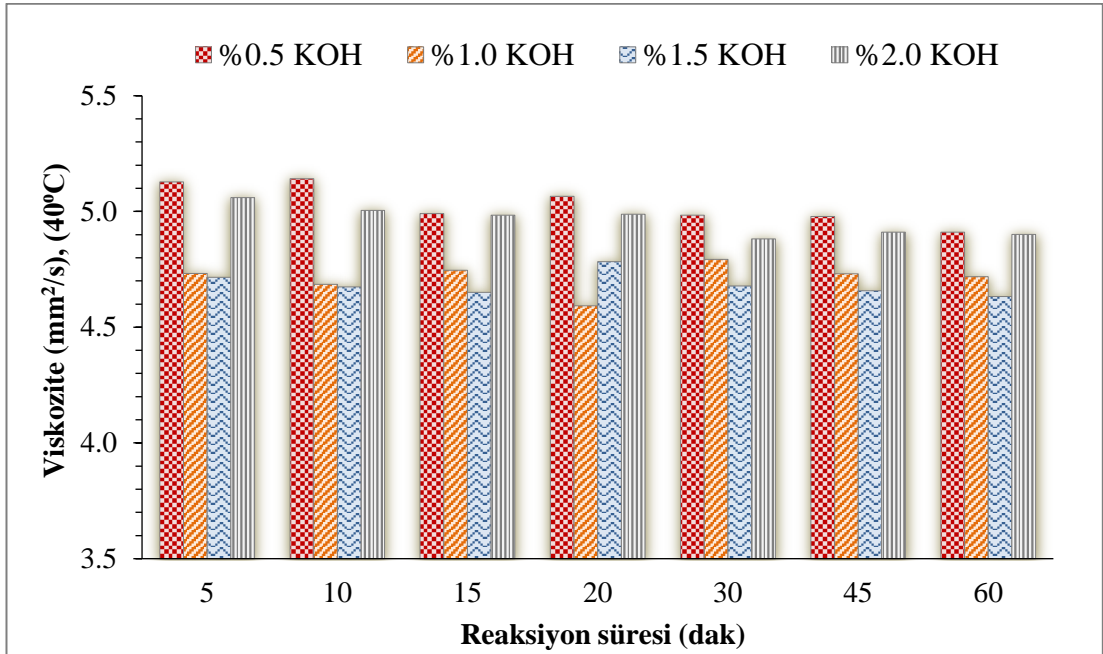
**Şekil 5.7:** Farklı KOH oranları için reaksiyon süresi–AAYB yoğunluk değişimi.

**Tablo 5.7:** Farklı KOH oranları için AAYB yoğunluk değerleri.

KOH (kütle %)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )							EN 14214 Standartı
	Numune							
	No:1	No:2	No:3	No:4	No:5	No:6	No:7	
0.5	0.899	0.903	0.897	0.901	0.896	0.893	0.891	0.860-0.900
1.0	0.894	0.887	0.887	0.882	0.893	0.895	0.890	
1.5	0.893	0.890	0.879	0.874	0.884	0.883	0.880	
2.0	0.899	0.902	0.896	0.895	0.885	0.891	0.893	

#### 5.1.2.4 Kinematik Viskozite

Şekil 5.8 ve Tablo 5.8’de, farklı %KOH oranları için mikrodalga ışıma altında üretilen AAYB numunelerinin ölçülen viskozite değerleri verilmiştir.



**Şekil 5.8:** Farklı KOH oranları için reaksiyon süresi–AAYB viskozite değişimi.

**Tablo 5.8:** Farklı KOH oranları için AAYB viskozite değerleri.

KOH (kütlesel %)	Viskozite (mm <sup>2</sup> /s)							EN 14214 Standardı
	Numune							
	No:1	No:2	No:3	No:4	No:5	No:6	No:7	
0.5	5.128	5.141	4.991	5.065	4.984	4.978	4.911	3.5-5.0
1.0	4.732	4.685	4.746	4.592	4.793	4.731	4.719	
1.5	4.715	4.674	4.650	4.784	4.678	4.658	4.632	
2.0	5.060	5.005	4.984	4.988	4.881	4.911	4.901	

Elde edilen verilere göre, %0.5 KOH kullanımı için viskozite değerlerinin reaksiyon süresine bağlı olarak değişimi, yoğunluğun reaksiyon süresine bağlı değişimine benzer şekilde bulunmuştur. Buna göre; No:1, No:2 ve No:4 numunelerinin viskoziteleri EN 14214 standartlarının dışında, diğer numunelerinki ise standart limitleri dâhilinde ancak sınır değere çok yakın ve literatürde rapor edilmiş, kullanılmamış ayçiçek yağı kaynaklı biyodizellerin viskozite değerlerinin [88, 116, 126] üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak AAY'nin metil esterlerine dönüşümünün istenilen miktarda gerçekleştirilememesi, dolayısıyla yoğun ve viskoz bir yağ bileşeni olan gliserolün biyodizel yapısında halen bulunması olarak gösterilebilir. %1.0 KOH kullanımında üretilen AAYB viskozite değerlerinin tümü EN 14214 standartlarına uygun aralıkta ölçülmüş; en yüksek viskozite değeri No:5 için 4.793 mm<sup>2</sup>/s, en düşük viskozite değeri ise No:4 için 4.592 mm<sup>2</sup>/s olarak bulunmuştur. %1.5 KOH kullanımıyla gerçekleştirilen üretimlerde transesterifikasyonun, %0.5 ve %1.0 KOH kullanımına göre daha yüksek oranda tamamlanmış olması, AAYB numunelerinin ortalama viskozite değerlerinin daha düşük çıkmasına neden olmuştur. Bu üretim için gerçekleştirilen viskozite ölçümlerinde en düşük değer No:7 için 4.632 mm<sup>2</sup>/s, en yüksek değer No:4 için 4.784 mm<sup>2</sup>/s, ortalama değer 4.684 mm<sup>2</sup>/s olarak bulunmuştur. %0.5 ve %1.0 KOH kullanımlarında ortalama viskozite değerleri ise sırasıyla 5.037 mm<sup>2</sup>/s ve 4.714 mm<sup>2</sup>/s'dir. Katalizör oranının %2.0'a çıkarılmasıyla düşen esterleşme oranı biyodizel numunelerinin viskozitelerini olumsuz etkilemiş, ortalama viskozite değeri %1.50 KOH kullanıma göre %5.91 artmıştır. Bu reaksiyon şartlarında üretilen No:1 ve No:2 için viskozite değerleri EN 14214 standartlarının

biraz üzerinde sırasıyla 5.060 mm<sup>2</sup>/s ve 5.005 mm<sup>2</sup>/s, diğer numuneler için ise standardın üst sınır değerine yakın büyüklük seviyelerinde ölçülmüştür. Genel olarak, tüm deney koşullarında transesterifikasyon 5 dak sonunda denge konumuna yaklaştığı için ilgili üretimlerde elde edilen numunelerin viskozite değerleri kendi içinde ufak farklılıklar gösterse de birbirlerine çok yakın olarak bulunmuştur.

### 5.1.3 Motor Test Yakıtı Üretimi

Yapılan deneylerde; mikrodalga ışıma altında, optimum reaksiyon koşulları olarak belirlenen 6:1 molar metanol:yağ, kütlece %1 KOH, 60°C ve 5 dak reaksiyon süresinde ayçiçek, kanola ve soya yağlarından temel yakıt özellikleri EN 14214 standartlarına uyumlu biyodizeller elde edilebildiği görülmüştür. Ancak AAY'nin hammadde olarak kullanıldığı deneylerin hiçbirisinde ester içeriği oranı %96.5 sınırının üzerinde olan; bir başka tanımla dizel motorlarda kullanılabilecek, EN 14214 standartlarında ticari bir biyodizel üretilmemiştir. Bunun için motor testlerinde kullanılmak üzere, reaktör tam kapasitede çalıştırılarak optimum reaksiyon koşullarında ayçiçek, kanola ve soya yağlarından yeniden biyodizel üretimleri gerçekleştirilmiştir. Sulu yıkama sonrasında hesaplanan verim değerleri AYB için %97.1, KYB için %96.37 ve SYB için %97.41 olarak bulunmuştur. Üretilen biyodizellerin detaylı yakıt analizleri İnönü Üniv. PAL laboratuvarlarında yapılmıştır. Biyodizellerin resmi analiz sonuçları, tez çalışmasının EKLER kısmında bulunmaktadır (EK-D, E ve F). AYB, KYB, SYB ve Petrol Ofisi akaryakıt istasyonundan satın alınan motorinin (B0) yakıt özellikleri, EN 14214 ile kıyaslamalı olarak Tablo 5.9'da gösterilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre, tüm biyodizel numunelerin saflık derecesini ve transesterifikasyonun tamamlanma oranını ifade eden başta ester içeriği olmak üzere monoglisericit, diglisericit, triglisericit, serbest ve toplam gliserol değerleri; ayrıca en önemli yakıt özellikleri olan viskozite, yoğunluk ve setan sayısı değerleri EN 14214'e

uygun bulunmuştur. Dolayısıyla bu yakıtların hepsinin konvansiyonel bir dizel motorunda modifikasyon yapılmadan kullanılabilceği görülmüştür.

**Tablo 5.9:** AYB, KYB, SYB ve motorinin detaylı yakıt özellikleri

Yakıt özellikleri	Birim	EN 14214 sınır değerleri	AYB	KYB	SYB	Motorin*
Yoğunluk (15°C)	gcm <sup>-3</sup>	0.860-0.900	886.6	882.9	885.6	821.1
Viskozite (40°C)	mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	3.5-5.0	4.369	4.423	4.133	2.95
Alt ısııl değeri (ID)	Mj/kg	-	39.86	39.91	39.74	45.95
Setan sayısı	-	Min 51	60.7	55.6	52.70	51
Soğuk filtre tıkanma noktası	°C	-	-3	-12	-3	-23
Parlama noktası	°C	Min 101	170	110.5	121.0	56
Asit sayısı	mgKOH/g	Maks 0.5	0.28	0.20	0.10	-
Su içeriği	mg/kg	Maks 500	618.8	316.50	401.32	-
Bakır şerit korozyonu	3saat,50°C	Kor. derecesi	No.1A	No.1A	No.1A	-
Sülfatlanmış kül içeriği	kütlese %	Maks 0.02	0.0065	0.001	0.017	-
Kükürt	mg/kg	10	2.84	1.42	3.0	-
Toplam kirlilik	mg/kg	-	24	16.3	10.6	-
İyot sayısı	-	Maks 120	115.7	104.0	107.6	-
Metanol içeriği	kütlese %	Maks 0.2	<0.01	<0.01	<0.01	-
Ester içeriği	kütlese %	Min 96.5	98.5	96.9	98.4	-
Linolenik asidi metil esteri	kütlese %	Maks 12	0.31	0.39	7.4	-
Monogliserit içeriği	kütlese %	Maks 0.7	0.46	0.29	0.33	-
Digliserit içeriği	kütlese %	Maks 0.2	0.12	0.10	0.094	-
Trigliserit içeriği	kütlese %	Maks 0.2	0.078	0.043	0.038	-
Serbest gliserol	kütlese %	Maks 0.02	0.0020	0.0022	0.0020	-
Toplam gliserol	kütlese %	Maks 0.25	0.140	0.095	0.104	-

\*Motorinin yakıt özellikleri aynı yakıtın kullanıldığı [134] nolu referanstan alınmıştır.

Tablo 5.9'daki biyodizelin motor performansına direkt etki eden yakıt özellikleri incelendiğinde; üç biyodizelin içerisinde en düşük viskoziteye sahip olanlar, optimizasyon çalışmasında da ölçüldüğü gibi sırasıyla soya, ayçiçeği ve kanola yağından üretilen biyodizellerdir. Bu üç biyodizelin viskozitelerinin karşılaştırıldığı literatürdeki çalışmalarda da aynı sıralamada verilmektedir [116, 128]. Biyodizellerin viskozite değerlerindeki bu fark, yağ asitlerinin doymuşluk derecesinden kaynaklanmaktadır. Biyodizelin üretildiği yağın doymamışlık derecesi arttıkça viskozitesi azalmaktadır. Bunun yanında, yağ asitlerinin zincir yapısının düzleşmesi ve uzunluğu kısalması da viskozite azaltan etkenlerdir [128, 129]. Üç biyodizelin yoğunlukları ise birbirlerine oldukça yakındır. Biyodizellerin kapalı kimyasal formüllerinin ve molekül ağırlıklarının birbirlerine çok benzer olması, yoğunlukların da benzer olmasına neden olmuştur. Analiz verilerine göre, tüm biyodizellerin setan sayıları motorine (51) göre daha büyüktür. Biyodizeller arasında 60.7 ile AYB en yüksek setan sayısına sahip biyodizel iken, KYB'nin setan sayısı 55.6, SYB'nin setan sayısı 52.7'dir. Benzer biçimde, biyodizelin setan sayısının petrol dizelinden daha yüksek olduğu literatürdeki birçok çalışmada aktarılmaktadır [16, 116, 130]. Setan sayısı, biyodizel üretiminde kullanılan yağı oluşturan yağ asitlerinin bileşimine göre değişmekte; genel itibariyle yağ asitlerinin doymuşluk derecesinin ve bağ uzunluğunun artmasıyla beraber artmakta, zincir yapısı dallandıkça ise azalmaktadır [128]. AYB'nin setan sayısının ve su içeriğinin beklenen değerlerden yüksek olması, AYB'nin detaylı analiz yapılmadan önce depoda saklanma süresi kaynaklı olduğu söylenebilir. Depolama süresi ile doğru orantılı olarak oksidatif etkiyle biyodizelin setan sayısı ve hidroliz reaksiyonları ile de su içeriği artmaktadır [135]. Ayçiçek, kanola ve soya biyodizellerin ısı değerleri incelendiğinde birbirlerine çok yakın değerlerde sırasıyla 39.86 Mj/kg, 39.91 Mj/kg ve 39.74 Mj/kg olduğu görülmektedir. Biyodizellerin motorine (45.95 Mj/kg) oranla %10 civarı düşük olan ısı değerleri, yapılarında bulunan oksijenden kaynaklanmaktadır [40]. Yakıtların soğuk akış özellikleri kıyaslandığında; soğuk filtre tıkanma noktası KYB için AYB ve SYB'ye göre düşük olsa da tüm biyodizel numunelerinin bu özelliği motorine göre oldukça yüksektir. Özellikle soğuk iklim bölgelerinde biyodizel kullanımını zorlaştıran bu özelliğin iyileştirilmesi için katkı maddesi kullanımı gerekmektedir.



Transesterifikasyon reaksiyonu, yağların sahip olduğu yağ asit kompozisyonu oranını değiştirmemekte, üretilen biyodizel için bu oran aynı kalmaktadır [136]. Dolayısıyla AYB, KYB ve SYB'nin yağ asidi metil esteri içeriği dağılımı, üretildikleri yağların yağ asidi içeriği dağılımı oranıyla aynı kabul edilmiştir. Buna göre, üretilen biyodizellerin molekül ağırlığı ve kapalı kimyasal formülleri Tablo 5.10'daki biyodizellerin yağ asidi metil esteri içerikleri kullanılarak hesaplanmıştır.

**Tablo 5.10:** Biyodizellerin yağ asidi metil esteri içerikleri dağılımı.

Yağ asidi metil esterinin genel ismi	Kimyasal Formül	Molekül Ağırlığı	Kütlesel bileşik oranı (%)		
			AYB	KYB	SYB
Mistirik ME	$C_{15}H_{30}O_2$	242.37	0.09	0.05	0.07
Pentadekanoik ME	$C_{16}H_{32}O_2$	256.40	-	-	0.01
Palmitik ME	$C_{17}H_{34}O_2$	270.42	5.33	4.61	10.17
Palmitoleik ME	$C_{17}H_{32}O_2$	268.41	0.12	0.25	0.07
Heptadekanoik ME	$C_{18}H_{36}O_2$	284.45	0.14	0.04	0.08
Heptadesenoik ME	$C_{18}H_{34}O_2$	282.44	0.09	0.07	-
Stearik ME	$C_{19}H_{38}O_2$	298.48	3.46	1.71	4.58
Oleik ME	$C_{19}H_{36}O_2$	296.46	37.13	62.13	21.85
Linoleik ME	$C_{19}H_{34}O_2$	294.45	52.01	20.97	53.32
Linolenik ME	$C_{19}H_{32}O_2$	292.43	0.43	7.86	7.18
Araşidik ME	$C_{21}H_{42}O_2$	326.53	0.17	0.54	0.32
Gadoleik ME	$C_{21}H_{40}O_2$	324.51	-	1.15	0.20
Eikosadienoik ME	$C_{21}H_{38}O_2$	322.50	-	-	0.03
Behenik ME	$C_{23}H_{46}O_2$	354.58	0.66	0.30	0.32
Erusik ME	$C_{23}H_{44}O_2$	352.57	-	0.70	-
Trikosanoik ME	$C_{24}H_{48}O_2$	368.61	-	-	0.03
Lignoserik ME	$C_{25}H_{50}O_2$	382.64	0.14	0.12	0.03
Nervonik ME	$C_{25}H_{48}O_2$	380.62	-	0.13	-

Örnek olarak, Tablo 5.11’de AYB’nin molekül ağırlığı ve kapalı kimyasal formülünün hesaplanması gösterilmiştir. Yapılan hesaplamalar göre; AYB, KYB ve SYB’nin molekül ağırlığı ve kimyasal formülleri, sırasıyla 293.84 g/mol, 297.58 g/mol, 287.71 g/mol ve  $C_{18.88}H_{34.91}O_2$ ,  $C_{19.11}H_{35.62}O_2$ , ve  $C_{18.49}H_{33.97}O_2$  olarak bulunmuştur.

**Tablo 5.11:** AYB’nin molekül ağırlığı ve kapalı kimyasal formülünün hesaplanması.

Yağ asidi metil esteri						AYB		
Çeşidi	C	H	O	Molekül Ağırlığı	Yüzde (%)	C	H	Molekül Ağırlığı
Mistirik ME	15	30	2	242.37	0.09	0.0135	0.027	0.218133
Pentadekanoik ME	16	32	2	256.40	-	-	-	-
Palmitik ME	17	34	2	270.42	5.33	0.9061	1.8122	14.413386
Palmitoleik ME	17	32	2	268.41	0.12	0.0204	0.0384	0.322092
Heptadekanoik ME	18	36	2	284.45	0.14	0.0252	0.0504	0.39823
Heptadesenoik ME	18	34	2	282.44	0.09	0.0162	0.0306	0.254196
Stearik ME	19	38	2	298.48	3.46	0.6574	1.3148	10.32741
Oleik ME	19	36	2	296.46	37.13	7.0547	13.3668	110.0756
Linoleik ME	19	34	2	294.45	52.01	9.8819	17.6834	153.1434
Linolenik ME	19	32	2	292.43	0.43	0.0817	0.1376	1.257449
Araşidik ME	21	42	2	326.53	0.17	0.0357	0.0714	0.555101
Gadoleik ME	21	40	2	324.51	-	-	-	-
Eikosadienoik ME	21	38	2	322.50	-	-	-	-
Behenik ME	23	46	2	354.58	0.66	0.1518	0.3036	2.340228
Erusik ME	23	44	2	352.57	-	-	-	-
Trikosanoik ME	24	48	2	368.61	-	-	-	-
Lignoserik ME	25	50	2	382.64	0.14	0.035	0.07	0.535696
Nervonik ME	25	48	2	380.62	-	-	-	-
<b>TOPLAM</b>					<b>99.77</b>	<b>18.88</b>	<b>34.91</b>	<b>293.84</b>
<i>Biyodizelin kapalı formülü</i>					<i><math>C_{18.88}H_{34.91}O_2</math></i>			
<i>Biyodizelin molekül ağırlığı</i>					<i>293.84 g/mol</i>			

#### 5.1.4 Değerlendirme

Tasarlanan pilot ölçekteki reaktörde, mikrodalga ışıma altında ayçiçek, kanola ve soya yağlarından 6:1 molar oranda metanol:yağ, yağın kütlece %1'i kadar KOH ve 60°C sıcaklık reaksiyon şartlarındaki 5 dakikalık transesterifikasyon ve saflaştırma işlemlerinden sonra EN 14214'e uyumlu metil esterler üretilebilmiştir. Üç biyodizel üretiminde de 5 dak sonunda reaksiyon tamamlanmış ve konvansiyonel üretimlere oranla yüksek verimde ürün elde edilmiştir. Reaktörün konvansiyonel ısıtma sisteminin kullanıldığı biyodizel üretiminde ise aynı reaksiyon parametrelerinde ayçiçek yağı metil esterlerine dönüştürülmeye çalışılmış, ancak 60 dak sonunda dahi reaksiyon tamamlanamamış ve yeterli saflıkta biyodizel elde edilememiştir. AAY'nin kullanıldığı mikrodalga destekli biyodizel üretimlerinde, optimum reaksiyon koşullarının 6:1 molar oranda metanol:yağ, kütlece %1.5 KOH ve 60°C olduğu belirlenmiştir. Bu koşullar altında 5 dak reaksiyon ile elde edilen biyodizel numunesinin yoğunluk ve viskozite değerinin EN 14214 standartları dâhilinde, %95.10'lik ester içeriğinin ise standart sınır değerinin bir miktar altında olduğu tespit edilmiştir. Ancak yapılan literatür taramasında, 5 dakikada elde edilen bu ester içeriği değerine, benzer reaksiyon şartlarında gerçekleştirilen birçok konvansiyonel üretimde çok daha uzun süren reaksiyonlar ile ulaşılabildiği görülmüştür.

Mikrodalğanın kimyasal reaksiyonları hızlandırıcı etkisi halen net olarak bilinmemektedir. Ancak transesterifikasyonların bu mertebede yüksek hızlı ve verimli gerçekleştirilmiş olması; 1.3.2.1 nolu alt başlıkta bahsedildiği üzere mikrodalğanın kimyasal reaksiyonlardaki yan reaksiyonları azaltması, gelişmiş seçicilik (polar olmayan maddelerin mikrodalgaya inert olması) özelliği ve reaksiyon süresini azaltıcı mekanizmaları sayesinde sağlandığı söylenilebilir. Seçici ısıtma ve yan reaksiyonların azalması, direkt olarak dönüşüm ve biyodizel veriminde artışa neden olmaktadır. Reaksiyon süresindeki büyük oranlı azalma net olarak kanıtlanamamış olsa da; mikrodalğanın “aşırı ısınma etkisi”, “sıcak nokta etkisi” ve “kinetik etki” gibi güçlü varsayımlar ile açıklanabilmektedir [65]. Bunun yanında, 2.45 GHz frekansındaki mikrodalga saniyede 2.45 milyar defa elektrik alan yönünü değiştirmektedir. Böylece

aynı hızda, elektrik alan etkisindeki dipoller döndürülerek ve alkol gibi yüklenmiş iyonlar, iletimsel hareket ettirilerek aktive edilmiş olur. Mikrodalga etkisindeki dipol ve iyonların çok hızlı hareketi, reaksiyondaki reaktanların birbiriyle temas etme ihtimalini arttırmakta böylece reaksiyon hızı da artmaktadır [60, 137].

Elde edilen deney sonuçlarına göre; bitkisel yağlardan biyodizel üretimine yönelik tasarlanan mikrodalga destekli pilot ölçekli reaktör ile konvansiyonel reaktörlere göre çok daha kısa sürede ve yüksek verimde biyodizel üretilebilmiştir. Böylelikle, laboratuvar ölçekli biyodizel üretimlerinde mikrodalga teknolojisi kullanımıyla kazanılan avantajların, ticari biyodizel üretiminde kullanılabilecek bir reaktörde de kazanılabildiği gösterilmiştir.

## 5.2 Motor Testleri

Motor performans ve egzoz emisyon testleri; test motorunda maks torkun elde edildiği 1800 d/d motor hızında, motorun 4 farklı yükteki (16 Nm, 32 Nm, 48 Nm ve 64 Nm) koşulları için gerçekleştirilmiştir. Çalışmada; 16 Nm'lik yük düşük yük, 32 Nm ve 48 Nm'lik yükler sırasıyla alt ve üst orta yükler, 64 Nm'lik yük ise yüksek yük olarak ifade edilmiştir. AYB, KYB ve SYB'nin yakıt özellikleri benzer olduğu için bu yakıtlara ait test çıktıları da birbirlerine yakın bulunmuştur. Bunun için yüke bağlı motor performansı ve egzoz emisyonu değişimleri saf haldeki AYB (AYB100), motorin ve farklı orandaki AYB-motorin karışımları (AYB5, AYB10, AYB20) için grafiksel olarak gösterilmiştir. Tüm biyodizel yakıtlarının motorine oranla motor performans ve egzoz emisyonu yüzdesel farkları (%) ise hazırlanan tablolarda verilmiş, elde edilen tüm veriler kıyaslanarak irdelenmiştir.

### 5.2.1 Motor Performansı

Özgül yakıt tüketimi ( $b_e$ ), motorlarda krank mili üzerinde elde edilen birim güç için tüketilen yakıtı ifade eder. Özgül yakıt tüketimi, motor testlerinde kullanılan yakıtlara ait motor performans karşılaştırılmalarında kullanılan en önemli parametrelerden biridir. Bu değer ile bağlantılı olan efektif verim ( $\eta_e$ ), farklı test yakıtlarının motor performanslarının karşılaştırılmasında kullanılan bir başka önemli parametredir. Efektif verim, motor krank milinden alınan efektif gücün motor içerisine alınan enerji miktarına oranı olarak tanımlanır. Egzoz gazı sıcaklığı (EGS) değeri, motorlarda gerçekleşen yanma prosesi hakkında bilgi verir. EGS, motor performans ve yanma analizlerinde sıklıkla kullanılan bir parametredir ve motor hızına, yükleme oranına ve yakıt türüne göre değişim gösterir. Yakıtlara ait motor performansı değerlendirmelerinde, özgül yakıt tüketimi, efektif verim ve EGS değerleri kullanılan üç önemli parametredir.

Çalışmanın bu kısmında, hazırlanan test yakıtları deney motorunda belirlenen koşullarda test edilerek yakıtlara ait özgül yakıt tüketimi, efektif verim ve EGS değerleri bulunmuştur. Elde edilen motor performansı değerleri alt başlıklar halinde ayrı ayrı incelenerek yorumlanmıştır.

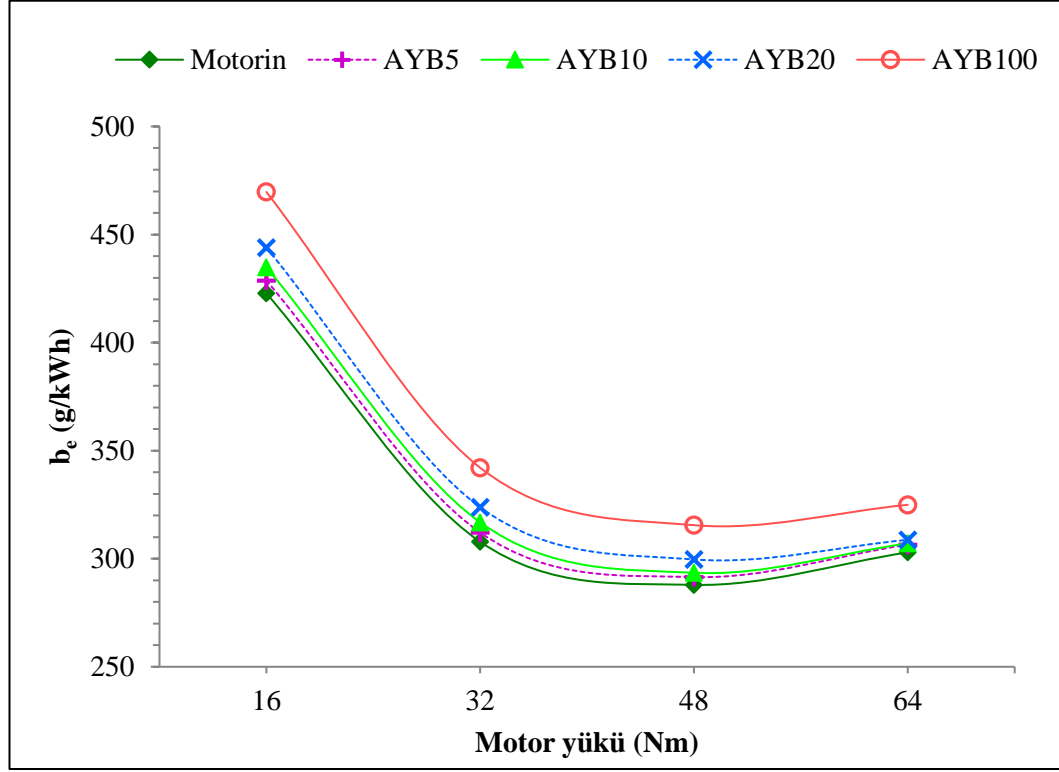
#### 5.2.1.1 Özgül Yakıt Tüketimi ( $b_e$ )

AYB, motorin ve AYB-motorin karışımlarından oluşan test yakıtlarına ait elde edilen motor yükü – özgül yakıt tüketimi değişim grafiği Şekil 5.9'da gösterilmiştir. AYB, KYB ve SYB karışımlarının motorine göre özgül yakıt tüketimindeki yüzdesel (%) farklar ise Tablo 5.12'de verilmiştir.

Şekil 5.9 incelendiğinde; hem motorin hem de AYB için özgül yakıt tüketim değerlerinin düşük yük bölgesinde en yüksek seviyesinde olduğu, orta yük bölgesine geçilmesiyle azaldığı ve 48 Nm'de en düşük seviyesine ulaştığı görülmektedir. Motor

yükü arttıkça özgül yakıt tüketiminin azalmasının sebebi azalan ısı kayıpları ve artan yanma verimidir. Motor yük seviyesi orta yükten yüksek yük bölgesine çıkarıldığında, artan güç ihtiyacı ile zenginleşen yakıt-hava karışımları yanma verimini düşürmeye başlamış, artan yakıt tüketimi ve kötüleşen yanma özgül yakıt tüketiminin yükselmesine neden olmuştur. Test yakıtları birbirleriyle karşılaştırıldığında, genel olarak biyodizel ilavesiyle özgül yakıt tüketiminin arttığı görülmektedir. Bunun temel sebebi, oksijen içeriğinden dolayı AYB ısı değerinin motorine göre %13.25 daha düşük olmasıdır. Benzer şekilde motorine kıyasla KYB %13.15, SYB ise %13.52 daha düşük ısı değerlere sahiptir (Tablo 5.12). Motor testlerinde sabit motor güçlerinde ölçümler yapıldığından biyodizel yakıtlarının kullanımında bu gücü elde etmek için silindir içine daha fazla yakıt gönderilmiş, dolayısıyla özgül yakıt tüketimi yükselmiştir. Biyodizellerin viskozite ve yoğunluk değerlerinin motorine göre daha yüksek olması, özgül yakıt tüketimi artışının bir başka nedenidir. Çünkü yüksek viskozite, yakıt enjeksiyonu püskürtme hızını azaltmakta dolayısıyla yakıtın atomizasyon ile küçük parçalara ayrılmasını zorlaştırmakta ve yanma verimini düşürmektedir [138]. Dizel motorlarda biyodizel kullanımı ile motorine göre daha yüksek özgül yakıt tüketimi değerlerinin elde edildiği benzer birçok çalışmada aktarılmıştır [16, 139, 140]. Tablo 5.12’de verildiği üzere, en yüksek özgül yakıt tüketiminin ölçüldüğü düşük yük bölgesinde AYB5, AYB10, AYB20 ve AYB100’ün özgül yakıt tüketimi değerleri motorine göre sırasıyla %1.40, %2.85, %5.01, %11.09 artmıştır. Yüksek motor yükünde ise bu fark değerleri aynı yakıtlar için %1.19, %1.37, %1.91, %7.26 olarak bulunmuştur. Genel olarak motor yükünün artışıyla özgül yakıt tüketimindeki farkın azalması, artan motor sıcaklığıyla beraber AYB’nin viskozite değerinin düşmesinden ve zenginleşen yakıt hava karışımında AYB’nin yapısında bulunan oksijenin yanmayı iyileştirmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Özgül yakıt tüketiminin motor yüküne bağlı değişim oranları KYB ve SYB için de benzer bir değişim karakteristiği göstermiştir. Bunun yanında, genel olarak SYB düşük ve orta yüklerin başlangıcında AYB ve KYB’ye göre bir miktar daha düşük özgül yakıt tüketimine sahiptir. SYB’nin AYB’ye göre %5.40, KYB’ye göre ise %6.56 daha düşük olan viskozitesi bu farkın oluşmasında etkili olmuştur. Yüksek yük bölgesinde biyodizellerin motorine oranla özgül yakıt tüketimi değerleri kıyaslandığında, AYB

için %7.26 olan farkın KYB ve SYB için sırasıyla 8.42 ve 8.58 olduğu görülmektedir. Yüksek yük bölgesinde en düşük özgül yakıt tüketiminin AYB'e ait olması, AYB'nin en yüksek setan sayısına sahip biyodizel olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



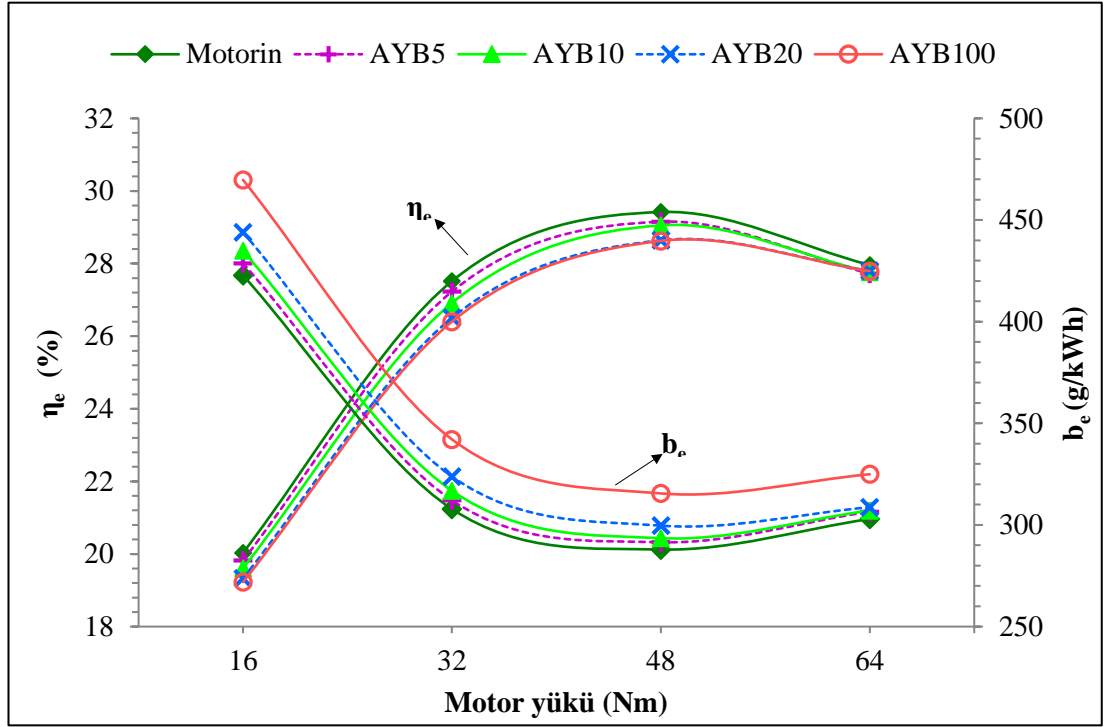
Şekil 5.9: Motorin ve AYB yakıtlarının motor yüküne bağlı  $b_e$  değişimi.

Tablo 5.12: Biyodizel yakıtlarının motorine kıyasla  $b_e$  % farkları.

Motor yükü	AYB				KYB				SYB			
	B5	B10	B20	B100	B5	B10	B20	B100	B5	B10	B20	B100
16 Nm	1.40	2.85	5.01	11.09	1.43	2.92	5.05	13.50	1.42	2.81	4.65	10.69
32 Nm	1.39	2.92	5.19	11.13	1.32	3.30	5.38	13.67	1.38	3.07	4.79	11.02
48 Nm	1.25	0.68	2.10	9.59	1.31	2.12	4.06	10.25	1.27	2.35	4.26	10.02
64 Nm	1.19	1.37	1.91	7.26	1.17	1.48	2.07	8.42	1.22	1.56	2.23	8.58

### 5.2.1.2 Efektif Verim ( $\eta_e$ )

AYB, motorin ve AYB-motorin karışımlarından oluşan yakıtların motor yükü-efektif verim değişim grafiği Şekil 5.10'daki gibidir. AYB, KYB ve SYB karışımlarının motorine göre yüzdesel (%) efektif verim farkları ise Tablo 5.13'te gösterilmiştir.



Şekil 5.10: Motorin ve AYB yakıtlarının motor yüküne bağlı  $\eta_e$  değişimi.

Tablo 5.13: Biyodizel yakıtlarının motorine kıyasla  $\eta_e$  % farkları.

Motor yükü	AYB				KYB				SYB			
	B5	B10	B20	B100	B5	B10	B20	B100	B5	B10	B20	B100
16 Nm	-1.06	-2.13	-3.51	-4.02	-1.09	-2.21	-3.57	-6.17	-1.06	-2.06	-3.12	-3.39
32 Nm	-1.05	-2.19	-3.68	-4.05	-0.99	-2.57	-3.87	-6.32	-1.02	-2.31	-3.24	-3.67
48 Nm	-0.91	-1.25	-2.65	-2.71	-0.97	-1.44	-2.66	-3.41	-0.91	-1.62	-2.76	-2.79
64 Nm	-0.85	-0.69	-0.57	-0.60	-0.84	-0.82	-0.76	-1.78	-0.86	-0.85	-0.83	-1.51



Şekil 5.10'da, efektif verimin motorun yük seviyesine ve özgül yakıt tüketim değerine göre değişimi gösterilmektedir. Sabit motor devrinde, motor yükünün üst orta yüklerin sonuna kadar yükselmesiyle özgül yakıt tüketiminde ve ısı kayıplarında meydana gelen düşüş, efektif verim değerlerinin yükselmesine neden olmuştur. Tüm yakıtlar için en yüksek efektif verim değerleri 48 Nm motor yükünde elde edilmiştir. Yüksek yük bölgesine geçildiğinde ise yanmanın kötüleşmesi ve özgül yakıt tüketiminin artması ile efektif verim düşüş göstermiştir. Yapılan ölçüm ve hesaplamalara göre motorin için efektif verim değerleri motor yüküne göre; 16 Nm'de %20.03, 32 Nm'de %27.52, 48 Nm'de %29.42 ve 64 Nm'de %27.96 olarak bulunmuştur. Test yakıtlarında biyodizel harman oranıyla paralel olarak yakıtın artan viskozite ve yoğunluğu; atomizasyon ve buharlaşmanın kötüleşmesine, özgül yakıt tüketiminin artmasına dolayısıyla efektif verimin azalmasına neden olmuştur. Saf biyodizel yakıtı AYB100 için 16 Nm motor yükünde %19.23 olan efektif verim 32 Nm'de %26.40, 48 Nm'de %28.62 ve 64 Nm'de %27.79 olarak bulunmuştur. Literatürde biyodizel - efektif verim değişimi farklı sonuçlar halinde sunulsa da genel bulgu yapılan bu çalışmaya benzer olarak biyodizel oranına bağlı efektif verimin kısmen azaldığı yönündedir [17, 139, 141].

Tablo 5.13'te sunulduğu üzere motor yükünün artışıyla motorin ve biyodizel yakıtlarının efektif verim değerleri arasındaki farklar gittikçe azalmıştır. Efektif verim, en düşük değerini aldığı 16 Nm motor yükünde AYB5, AYB10, AYB20 ve AYB100 için motorine göre sırasıyla %1.06, %2.13, %3.51 ve %4.02 daha düşük hesaplanmıştır. Yüksek motor yükünde ise bu fark değerleri aynı yakıtlar için %0.85, %0.69, %0.57 ve %0.60 olarak bulunmuştur. Literatürdeki benzer çalışmalarda, genel olarak motorin-biyodizel efektif verim değerleri arasındaki bu düşüşün, motorin-biyodizel özgül yakıt tüketimi farkının da motor yüküne bağlı olarak düşmesi ve biyodizelin oksijen içermesinden dolayı yanma veriminin artmasından dolayı meydana geldiği belirtilmektedir [33, 140]. Biyodizel yanma veriminin motor yüküyle ilişkili artışı, artan silindir içi sıcaklıklarının biyodizelin motorine göre kötü olan buharlaşma yeteneğini iyileştirmesine ve viskozitesini düşürmesine de bağlı olduğu düşünülmektedir. SYB, düşük ve orta yüklerin başlangıcında genel olarak diğer

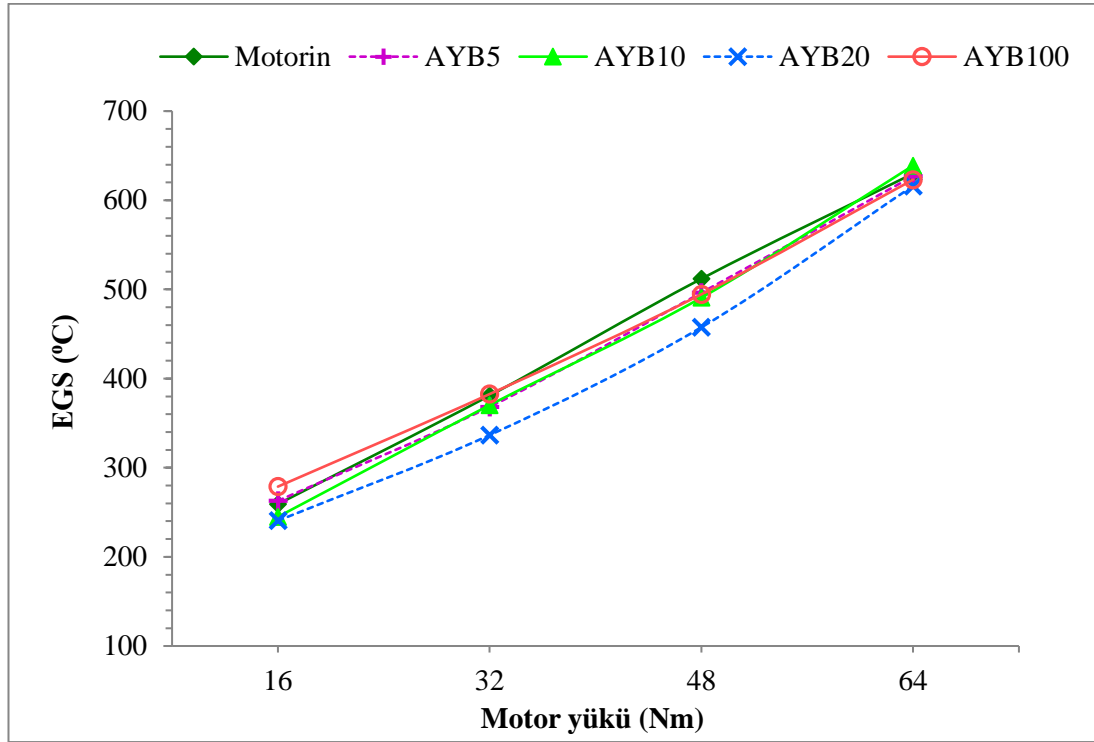
biyodizellere nazaran daha düşük özgül yakıt tüketimi değeri ve daha az viskoz yapısıyla motorine en yakın efektif verim değerine sahip biyodizel yakıtı olarak bulunmuştur. Motorine oranla efektif verim değerindeki düşüş; 16 Nm yük altında AYB100 için %4.02, KYB100 için %6.17, SYB100 için %3.39; 32 Nm yük altında AYB100 için %4.05, KYB100 için %6.32, SYB100 için %3.67, olarak hesaplanmıştır. Üst orta ve yüksek yük bölgesinde ise yüksek setan sayısına sahip AYB'nin efektif verim değerleri daha fazla artış göstermiştir. Buna göre; motorine kıyasla efektif verimdeki düşüş; 48 Nm yük altında AYB100 için %2.71, KYB100 için %3.41, SYB100 için %2.79; 64 Nm yük altında ise AYB100 için %0.60, KYB100 için %1.78, SYB100 için %1.51 olarak bulunmuştur. Biyodizelin artan yüklerde yanmayı iyileştiren avantajları olsa da genel olarak yanma verimi; biyodizelin nispeten yüksek yoğunluğu, viskoz yapısı ve kötü buharlaşma yeteneğinden dolayı biyodizel harman oranıyla doğru orantılı olarak artmamıştır. Yüksek yük bölgesinde gerçekleştirilen deneylerde, en yüksek efektif verim değeri tüm biyodizel yakıtları için B20 karışımlarında elde edilmiştir. Tablo 5.13'te de görüldüğü üzere, 64 Nm motor yükü şartlarında motorin ile en yakın performansı, %0.57 efektif verim farkıyla AYB20, sonrasında %0.76 farkla KYB20 ve %0.83 farkla SYB20 göstermiştir.

### 5.2.1.3 Egzoz Gazı Sıcaklığı (EGS)

AYB, motorin ve AYB-motorin karışımı test yakıtlarının motor yükü - egzoz gazı sıcaklığı (EGS) değişim grafiği Şekil 5.11'deki gibidir. AYB, KYB ve SYB karışımlarının motorine göre yüzdesel EGS farkları Tablo 5.14'te gösterilmiştir.

Şekil 5.11'de görüldüğü üzere motorin, AYB ve motorin-AYB karışımlarının hepsi için artan motor yüküyle beraber ölçülen EGS değerleri de artış göstermiştir. Her 16 Nm'lik yük artışında ortalama olarak EGS'nin motorin için 123.57°C, AYB için 81.43°C yükseldiği tespit edilmiştir. Bunun nedeni, motor yükünün artırılması için yanma odası içerisine alınan yakıt miktarının fazlaşması ile silindir içi yanma sonu sıcaklığının yükselmesidir. Elde edilen verilere göre AYB oranı ve EGS arasında çok

net bir ilişki kurulamasa da genel olarak AYB kullanımı ile EGS'nin bir miktar düşüş gösterdiği anlaşılmaktadır. Aynı ilişki KYB ve SYB yakıtları için de geçerlidir. Konu ile ilgili çalışan araştırmacıların bir kısmı, biyodizel kullanımı ile EGS'nin bir miktar yükseldiğini [142], diğer kısmı ise yapılan bu çalışmada gözlemlenen sonuçlara benzer olarak biyodizelin EGS'yi düşürdüğünü belirtmektedirler [143, 144]. Biyodizel kullanımı ile EGS'nin düşmesinde en önemli etkenlerden bir tanesi, biyodizel ısıl değerinin düşük olmasından dolayı maks silindir içi sıcaklığın azalmasıdır [144]. Bunun dışında biyodizel kullanımı ile EGS'nin düşmesinin başlıca diğer nedenleri; biyodizelin motorine oranla daha yüksek bulk modülü ve sıkıştırılamazlık özelliği ile enjektör püskürtme başlangıcının daha erken başlaması ve yüksek setan sayısı dolayısıyla ısı dağılımındaki artışın daha erken oluşması böylece silindir içi sıcaklıkların daha erken soğumaya başlaması olarak gösterilmektedir [145].



**Şekil 5.11:** Motorin ve AYB yakıtlarının motor yüküne bağlı EGS değişimi.

**Tablo 5.14:** Biyodizel yakıtlarının motorine kıyasla EGS % farkları.

Motor yükü	AYB				KYB				SYB			
	B5	B10	B20	B100	B5	B10	B20	B100	B5	B10	B20	B100
16 Nm	1.43	-5.52	-7.18	7.56	0.86	-1.45	-3.10	-2.10	-2.11	-6.02	-7.51	-5.83
32 Nm	-3.31	-2.81	-11.63	0.45	2.42	-3.41	-3.21	-5.68	-1.46	-2.55	-3.01	-4.57
48 Nm	-3.05	-4.14	-4.14	-3.40	-0.85	1.25	-3.47	-1.56	-1.11	2.36	-4.21	-2.41
64 Nm	-0.46	1.43	-2.19	-1.08	0.25	-1.20	-4.01	-3.02	-0.98	-2.71	-1.41	-2.14

### 5.2.2 Egzoz Emisyonları

Egzoz emisyonlarından hidrokarbonlar (HC), genellikle kötü kokulu, kanserojen özellikte ve tahriş edici bir yapıya sahiptir. Gaz formundaki HC, güneş ışığı varlığında azot oksitlerle birleşerek fotokimyasal sis olarak ifade edilen sis tabakasını oluştururlar. Egzoz emisyon gazları içerisinde mevcut olan HC, yakıtın tam olarak yakılamadığını gösterir [146]. Kokusuz, renksiz, bunun yanında çok zehirli olan karbon monoksit (CO), HC emisyonuna benzer olarak hidrokarbon yakıtlar için bir eksik yanma ürünüdür. Yanma işleminin sonlarına doğru oluşan CO, değişik oksidantlar ile reaksiyona girerek CO<sub>2</sub> emisyonlarına dönüşürler [147]. Karbon dioksit (CO<sub>2</sub>), daha önce de belirtildiği üzere direkt olarak insan veya çevre sağlığı üzerinde zararlı bir etki göstermez ancak oluşturduğu sera etkisi nedeniyle sınırlandırılan bir emisyon türüdür. En önemli dizel motoru emisyon gazlarından olan azot oksit (NO<sub>x</sub>), genellikle azot monoksit (NO) ve azot dioksitten (NO<sub>2</sub>) oluşur ve bu iki bileşenin toplamı NO<sub>x</sub> emisyonları olarak tanımlanır. Çoğunlukla NO<sub>x</sub>'in %70 - %90'lık kısmı NO emisyon gazından meydana gelir [143]. Zararlı bir emisyon gazı olan NO<sub>x</sub>, atmosferde bulunan su ile birleşerek nitrik asit oluşumuna dolayısıyla asit yağmurlarının meydana gelmesine neden olur. Benzer biçimde NO<sub>x</sub> akciğerde bulunan su buharı ile birleşerek vücut içinde nitrik asit ve nitroz asit oluşturur [146]. Bahsi geçen bu dört bileşen, motor emisyon ölçümlerinde dikkate alınan en önemli egzoz emisyonlarından biridir.

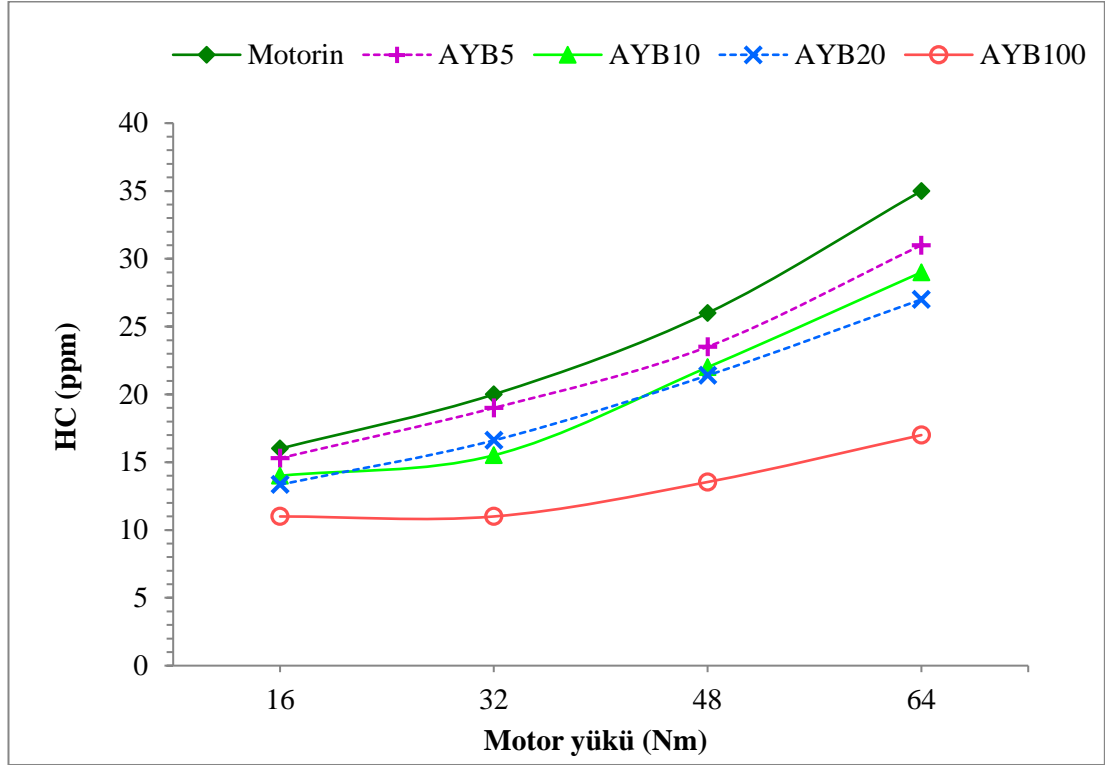
Bu başlık altında test yakıtlarının ölçülen HC, CO, CO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> emisyon gazı değerleri alt başlıklar halinde sunulmuş ve elde edilen veriler yorumlanmıştır.

### 5.2.2.1 Hidrokarbonlar (HC)

AYB, motorin ve AYB-motorin karışımı test yakıtlarının eksik yanma ürünü olan HC emisyonlarının değişimini gösteren Şekil 5.12'deki grafikten anlaşıldığı üzere, artan motor yükü ile tüm yakıtlar için HC emisyonunda artış meydana gelmiştir. Artan yükte beraber yakıtça zenginleşen hava-yakıt karışımında yetersiz oksijen miktarı, HC oluşumunu hızlandırmıştır. Düşük yükte motorin için 14 ppm olan HC emisyon salınımı yüksek yükte %150 artarak 35 ppm'e kadar yükselmiştir. AYB kullanılan yakıtlarda, HC salınımı motorine oranla tüm yükler altında azalsa da özellikle artan motor yüklerinde bu düşüş daha belirgin hale gelmiştir. Yapılan ölçümlere göre, düşük yükte AYB100 HC emisyonu 12 ppm, yüksek yükte ise 17 ppm bulunmuştur. KYB ve SYB kullanımlarında da HC emisyonunda önemli miktarda azalma sağlanmıştır. Biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile HC emisyonlarında gözlenen iyileşme, biyodizelin içeriğinde bulunan oksijenin zengin yakıt-hava karışım bölgelerinde oksidasyonu artırması ile sağlanmaktadır [17, 138]. Bunun yanında biyodizel setan sayısının motorine göre yüksek oluşu tutuşma gecikmesini azaltıp yanmayı iyileştirmekte böylece eksik yanma ürünü olan HC emisyon oranının azaltılmasına yardımcı olmaktadır [148].

Tablo 5.15 incelendiğinde, biyodizeller içerisinde en düşük viskoziteli yakıt olan SYB, düşük yükte motorine oranla en fazla HC azaltan biyodizel çeşidi olsa da orta ve yüksek yüklerde yüksek setan sayısına sahip AYB karışımlarının HC emisyonlarını daha çok iyileştirdiği görülmektedir. En fazla HC emisyon salınımının yapıldığı yüksek motor yükünde AYB kullanım oranına bağlı HC emisyonlarındaki azalma AYB5, AYB10, AYB20 ve AYB100 için sırasıyla %11.43, %17.14, %22.86 ve %51.43 olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara benzer olarak, sabit devir değişken yük testlerinde yüksek yük altında HC emisyon salınımlarında; Can vd. [17]

B20 kullanımını ile %30.3; Pi-qiang vd. [149] ise B100 kullanımını ile %46.7 iyileşme elde etmişlerdir.



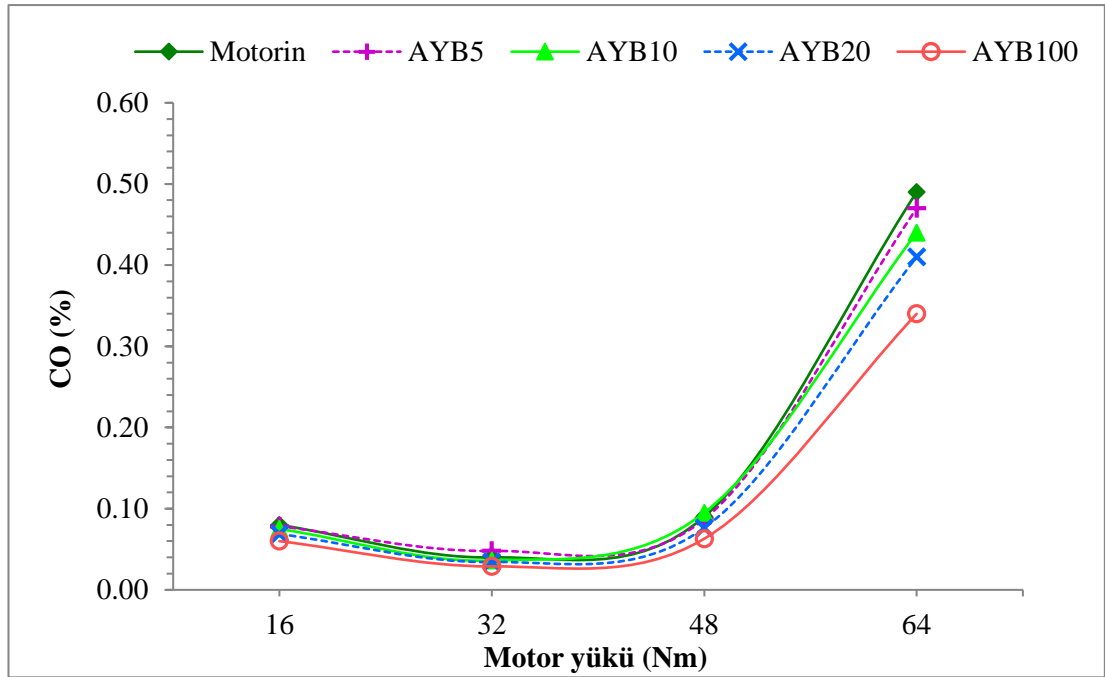
Şekil 5.12: Motorin ve AYB yakıtlarının motor yüküne bağlı HC emisyonu değişimi.

Tablo 5.15: Biyodizel yakıtlarının motorine kıyasla HC emisyonu % farkları.

Motor yükü	AYB				KYB				SYB			
	B5	B10	B20	B100	B5	B10	B20	B100	B5	B10	B20	B100
16 Nm	-4.38	-12.50	-16.75	-31.25	-1.25	-10.38	-14.74	-28.63	-4.13	-13.75	-17.10	-33.13
32 Nm	-5.00	-19.45	-16.95	-45.00	-5.29	-13.00	-15.00	-40.00	-6.00	-13.50	-16.10	-43.50
48 Nm	-9.54	-15.08	-17.92	-48.10	-8.69	-14.23	-17.31	-47.08	-6.92	-14.03	-18.08	-45.62
64 Nm	-11.43	-17.14	-22.86	-51.43	-10.71	-15.43	-19.71	-42.86	-8.57	-14.29	-18.57	-48.00

### 5.2.2.2 Karbon Monoksit (CO)

Şekil 5.13'te motor yüküne bağlı olarak AYB, motorin ve AYB-motorin karışımı test yakıtlarının bir başka eksik yanma ürünü olan CO emisyonlarının değişimi gösterilmiştir. Motorinle kıyasla tüm biyodizel ve karışımlarının CO emisyonu değerindeki yüzdesel farkları ise Tablo 5.16'da verilmiştir.



Şekil 5.13: Motorin ve AYB yakıtlarının motor yüküne bağlı CO emisyonu değişimi.

Tablo 5.16: Biyodizel yakıtlarının motorine kıyasla CO emisyonu % farkları.

Motor yükü	AYB				KYB				SYB			
	B5	B10	B20	B100	B5	B10	B20	B100	B5	B10	B20	B100
16 Nm	-2.01	-6.25	-14.05	-23.00	-1.81	-7.12	-12.12	-20.36	-2.21	-2.32	-14.34	24.03
32 Nm	5.62	-9.50	-14.25	-25.61	-2.01	-8.66	-12.61	-22.54	-2.41	3.54	-13.95	-24.14
48 Nm	-3.22	5.56	-15.22	-27.33	-3.11	-10.10	-13.98	-26.13	-2.96	-8.81	-14.81	-25.42
64 Nm	-4.08	-10.20	-16.33	-30.61	-4.02	-11.20	-15.80	-29.50	-3.81	-9.61	-15.63	-28.11

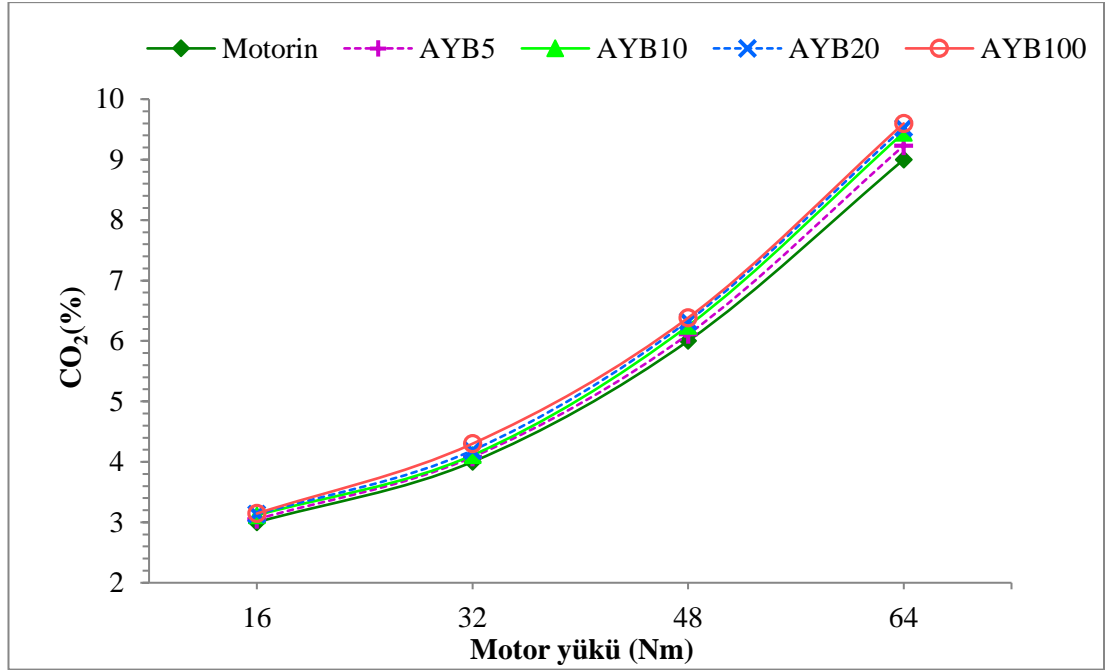
Şekil 5.13'te gösterildiği üzere tüm test yakıtları için CO emisyon salınımı yanmanın nispeten iyileştiği alt orta yük seviyesinde, düşük silindir içi sıcaklıklarının olduğu düşük yüke göre daha azalmıştır. Ancak motor yükünün daha fazla artırılmasıyla oluşan, yakıtça zenginleşen hava-yakıt karışımı eksik yanma meydana gelmesine neden olmuş, böylelikle CO emisyonları özellikle yüksek yüklerde hızlı bir artış eğilimi göstermiştir. Düşük yükte motorin için ölçülen CO emisyon miktarı %0.08, alt orta yükte %0.04, yüksek yükte ise %0.49'tür. Aynı yük oranlarında AYB için ölçülen CO salınımları sırasıyla %0.06, %0.03, %0.34'tür. Anlaşıldığı üzere, AYB kullanımıyla CO seviyelerinde önemli bir düşüş sağlanmış, benzer sonuçlar KYB ve SYB yakıtları için de elde edilmiştir. Biyodizel kullanımı ile CO emisyonlarında sağlanan iyileşmenin en önemli nedenleri, biyodizelin yapısında yanmayı iyileştiren oksijenin bulunması ve biyodizel bileşimlerinin motorine göre daha küçük C/H oranına sahip olması olarak gösterilmektedir [150]. Motor yükü arttıkça yakıtça zenginleşen hava-yakıt karışımlarında oksijen içeren biyodizel oranının artması, oksidasyon miktarını artırarak motorin-biyodizel %CO farkının artmasına neden olmuştur. Tablo 5.16'daki verilere göre en yüksek CO emisyonlarının ölçüldüğü yüksek yük bölgesinde; biyodizel yakıtlarının CO salınımlarında sağladığı iyileştirme AYB100, KYB100 ve SYB100 için sırasıyla %30.61, %29.50 ve %28.11 olarak bulunmuştur. Benzer olarak, geçmişte yapılan çalışmada yüksek motor yüklerinde farklı biyodizel ve biyodizel-motorin karışımlarının kullanımı ile %30 civarında CO emisyon gazı salınımlarında iyileştirmenin sağlandığı rapor edilmiştir [17, 151, 152].

### **5.2.2.3 Karbon Dioksit (CO<sub>2</sub>)**

CO<sub>2</sub> yanma proseslerinde tam yanmayı işaret eden bir gösterge olsa da aynı zamanda küresel ısınmayı arttıran bir emisyon türüdür. Şekil 5.14'teki motor yükü-CO<sub>2</sub> emisyonu değişimi grafiği, artan motor yükü ile CO<sub>2</sub> salınımlarının motorin ve AYB karışımları için doğrusala yakın bir artış gösterdiğini ifade etmektedir. Artırılan motor yükü sonucunda yükselen silindir içi sıcaklık ve fazlaşan yakıt tüketimi ile



artan yanma reaksiyonlarının genel olarak tam yanma ürünü olan CO<sub>2</sub> emisyonlarını arttırdığı söylenebilir.



Şekil 5.14: Motorin ve AYB yakıtlarının motor yüküne bağlı CO<sub>2</sub> emisyonu değişimi.

Tablo 5.17: Biyodizel yakıtlarının motorine kıyasla CO<sub>2</sub> emisyonu % farkları.

Motor yükü	AYB				KYB				SYB			
	B5	B10	B20	B100	B5	B10	B20	B100	B5	B10	B20	B100
16 Nm	1.67	2.13	4.40	4.83	1.57	2.01	4.21	4.67	1.75	2.33	4.56	5.01
32 Nm	2.00	2.75	4.75	7.50	2.07	2.55	4.60	5.45	2.01	2.65	4.67	5.88
48 Nm	1.83	4.17	5.50	6.38	1.77	3.97	5.33	5.87	1.64	4.05	5.04	5.91
64 Nm	2.56	4.94	5.88	6.66	2.22	4.72	5.36	6.42	2.10	4.64	5.25	6.05

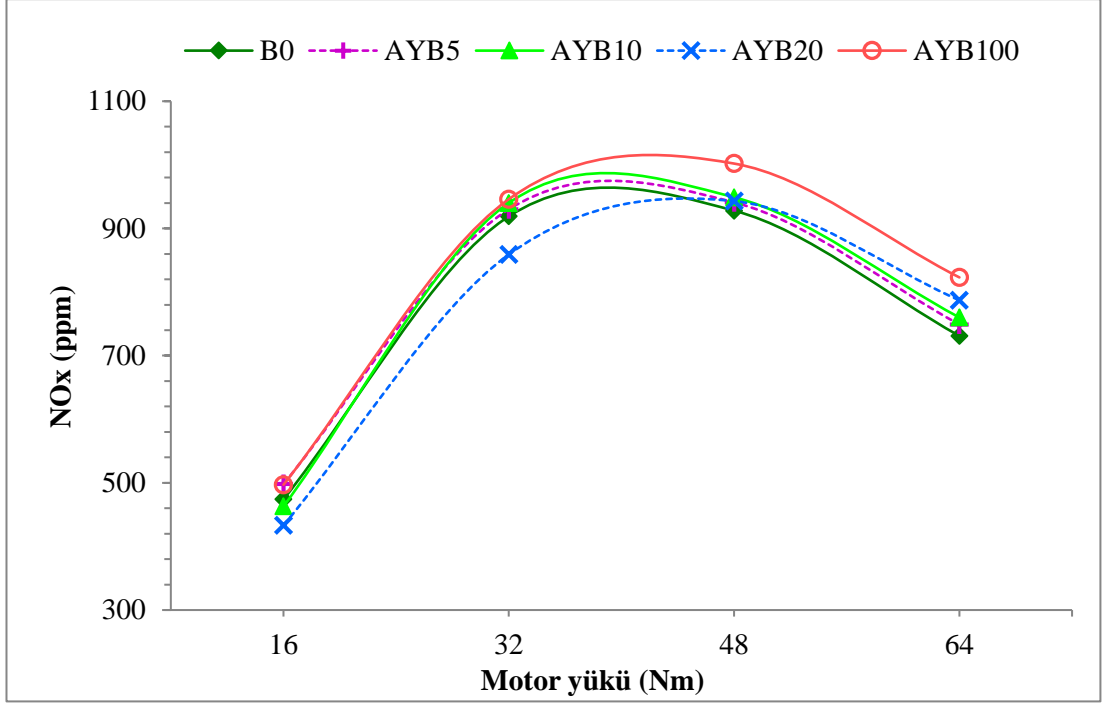
Motorine oranla kullanılan biyodizel yakıtlarının CO<sub>2</sub> emisyonun gazındaki yüzdesel farklar Tablo 5.17'de sunulmuştur. Buna göre test yakıtlarında tüm biyodizeller için artan biyodizel harman oranı, tüm yükler koşullarında CO<sub>2</sub> salınımını

artırmıştır. Biyodizellerin motorine kıyasla %CO<sub>2</sub> fakları birbirlerine çok yakın bulunmuştur. En yüksek CO<sub>2</sub> emisyon gazının ölçüldüğü yüksek yük bölgesinde; biyodizel yakıtlarının motorine göre CO<sub>2</sub> salınımlarında sağladıkları azalma AYB100, KYB100 ve SYB100 için sırasıyla %6.66, %6.42 ve %6.05 olarak tespit edilmiştir. Biyodizelin oksijen içeren yapısı ve yüksek setan sayısı ile yanmayı özellikle artıran yüklerde iyileştirmiş, böylece tam yanma ürünü olan CO<sub>2</sub>'nin artmasına neden olmuştur [153]. Bunun yanında, biyodizel kullanımıyla CO<sub>2</sub>'de gözlemlenen artış, biyodizelin motorine kıyasla daha düşük C/H oranı içermesinden kaynaklanmaktadır. Çünkü birim yakıttan elde edilen enerji biyodizelin düşük ısıl değerinden dolayı özgül yakıt tüketiminin yüksek olmasına neden olmakta, bu durumda ise CO<sub>2</sub> salınımları artmaktadır [16, 154]. Çalışmada elden verilere benzer olarak; Özer vd. [16], Alptekin vd. [33] ve Çanakçı vd. [155] gerçekleştirdikleri motor testlerinde biyodizel kullanımı ile motorine oranla CO<sub>2</sub> emisyonunda bir miktar artış tespit etmişlerdir.

Biyodizel yakıldığında üretilen CO<sub>2</sub> motorine kıyasla fazla olsa da, atmosfere salınan CO<sub>2</sub>'nin bir kısmı biyodizel üretiminde kullanılacak olan yağ bitkisi tarafından tüketilmektedir. Dolayısıyla üretim ve tüketim prosesleri birlikte düşünüldüğünde, biyodizelin CO<sub>2</sub> emisyonlarını hapseden doğal bir yutak olarak görev yaptığı, böylece CO<sub>2</sub> emisyonlarının yol açtığı sera etkisi ve küresel ısınma problemlerinin çözümüne katkı sağladığı düşünülmektedir [156].

#### **5.2.2.4 Azot Oksit (NO<sub>x</sub>)**

NO<sub>x</sub> emisyonları genellikle motorlardaki yanma esnasında oksijen ve azotun yüksek sıcaklıkta birbirleriyle reaksiyona girmesiyle oluşmaktadır. NO<sub>x</sub> çoğunlukla havada bulunan oksijen kaynaklıdır. Bununla birlikte, bazı yakıtlar yapılarında eser miktarlarda azot bulundurmakta, ancak bu azot içeriği NO<sub>x</sub> emisyonu üretimine çok az miktarda etki etmektedir [33].



Şekil 5.15: Motorin ve AYB yakıtlarının motor yüküne bağlı NO<sub>x</sub> emisyonu değişimi.

Tablo 5.18: Biyodizel yakıtlarının motorine kıyasla NO<sub>x</sub> emisyonu % farkları.

Motor yükü	AYB				KYB				SYB			
	B5	B10	B20	B100	B5	B10	B20	B100	B5	B10	B20	B100
16 Nm	4.32	-2.82	-3.20	4.85	0.51	0.48	1.15	2.37	0.10	-1.95	2.55	2.71
32 Nm	1.20	2.29	-4.53	2.94	-1.12	-2.19	3.01	5.87	-0.95	3.54	4.01	4.58
48 Nm	1.40	3.26	3.32	7.97	1.54	3.01	4.89	5.21	1.08	3.01	3.81	6.51
64 Nm	2.46	5.97	9.66	12.59	2.24	4.98	8.74	11.23	1.14	4.32	7.61	13.41

Yapılan bu çalışmadaki NO<sub>x</sub> emisyonu salınımı incelendiğinde (Şekil 5.15), motor yükünün üst orta yük bölgesine kadar artırılmasıyla silindir içi sıcaklıklarının yükseldiği, böylece hem motorin hem de AYB karışım yakıtları için NO<sub>x</sub> emisyon üretiminin arttığı görülmektedir. En yüksek NO<sub>x</sub> emisyon gazı ölçümlerinin yapıldığı üst orta yük bölgesinde, motorin için 928 ppm olan NO<sub>x</sub> değeri, AYB100 yakıtı için

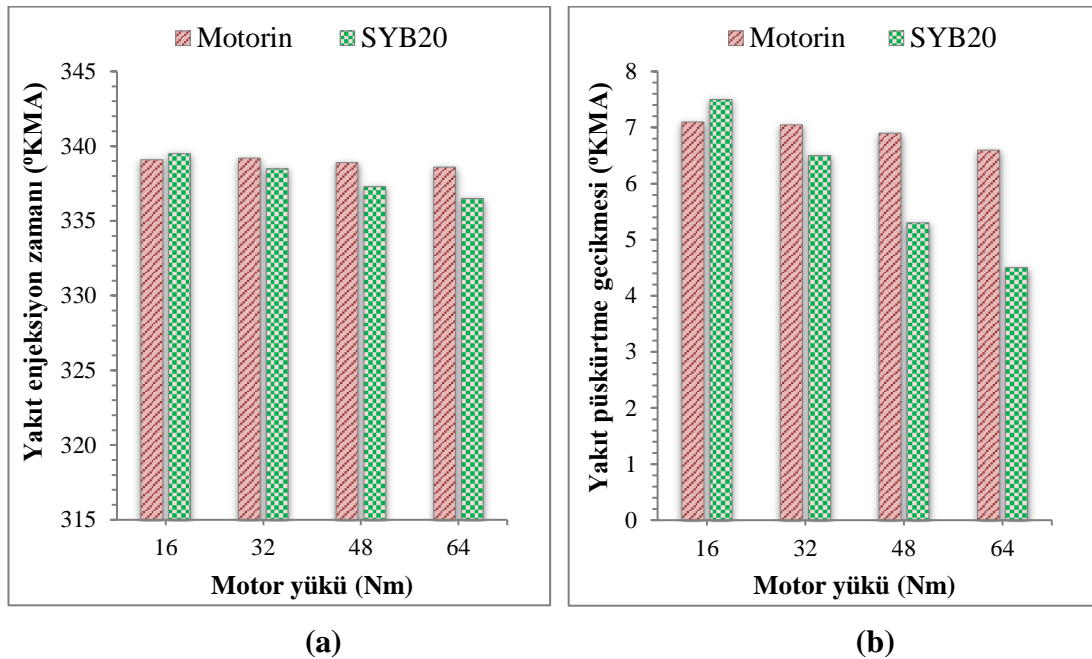
%7.97 artarak 1002 ppm değerine ulaşmıştır. Yüksek yük bölgesine geçildiğinde ise zenginleşen hava yakıt karışımlarında yetersiz oksijen nedeniyle NO<sub>x</sub> miktarı bir miktar azalmıştır.

Tablo 5.18'deki verilerden anlaşıldığı üzere, tüm yük Şartlarında, biyodizel yakıtlarının kullanımıyla birlikte NO<sub>x</sub> genel olarak artış eğilimi göstermiştir. Bu artış, motorin içindeki biyodizel oranının artmasıyla doğru orantılı olarak yükselmiştir. Biyodizel varlığında gerçekleşen NO<sub>x</sub> emisyonundaki artışın, biyodizel içeriğindeki oksijen kaynaklı olduğu birçok çalışmada belirtilmektedir [139, 149, 154]. Bunun yanında, zsezen yaptığı çalışmada bu artışı, biyodizel özgül yakıt tüketiminin motorine kıyasla yüksek olmasına böylece oksijen içeren biyodizelin yakıtça zengin bölgelerde gerekli oksitlenmeyi sağlayarak yanma bölgelerinin sayısını arttırmasına bağlamaktadır. Araştırmacı, bu sayede silindir içinde yüksek sıcaklık bölgesi sayısının da arttırdığını, dolayısıyla daha yüksek NO<sub>x</sub> oluşumu meydana geldiğini ifade etmektedir [28]. Biyodizelin yüksek bulk modülü ve setan sayısı da NO<sub>x</sub> oluşumunu artıran faktörlerdir. Yüksek bulk modülü, enjektör nozlnn erken açılması ve yakıt püskürtme işleminin daha erken başlamasına neden olmaktadır. Yüksek setan sayısı ile birlikte bu durum, biyodizel kullanılan yakıtlarda tutuşma gecikmesinin kısalmasına, yanmanın erken başlamasına ve yanma veriminin yükselmesine böylece termal NO<sub>x</sub> oluşumunun artmasına sebep olmaktadır [141, 149]. Beklenildiği üzere, yüksek yük bölgesinde biyodizel kullanımının motorine oranla sebep olduğu NO<sub>x</sub> artışı, düşük ve orta yk bölgesine göre daha yüksek bulunmuştur. Yüksek yükte arttırılan yüksek setan sayılı ve oksijen içerikli biyodizel oranının, zenginleşen hava yakıt karışım bölgelerinde yanmayı iyileştirerek NO<sub>x</sub> salınımını arttırdığı düşünülmektedir. Yüksek yükte biyodizeller içerisinde NO<sub>x</sub> salınımını en çok artıran biyodizeller sırasıyla; %13.41 SYB, ardından %12.59 ile AYB ve %11.23 ile KYB olarak bulunmuştur.

### 5.3 Motor Simülasyonu

#### 5.3.1 Püskürtme Gecikmesi ve Enjeksiyon zamanı

Test yakıtlarının motor yüküne bağlı enjeksiyon başlangıç ve püskürtme gecikme zamanları, °KMA olarak Şekil 5.16(a) ve Şekil 5.16(b)'de verilmiştir. Görüldüğü üzere, tüm yük koşullarında SYB20'nin enjeksiyon başlangıç zamanı motorine kıyasla daha erken başlamıştır. Bu durum, daha önce de bahsedildiği üzere biyodizelin yüksek bulk modülü ve sıkıştırılabilirliğinin daha az olması ile açıklanmaktadır. Çünkü mekanik pompalı yakıt sistemlerinde, basınç pompasında sıkıştırılan ve basıncı yükseltiletilen dizel yakıtı enjektöre gönderilmekte ve yakıt hattındaki basıncın enjeksiyon açılma basıncından daha yüksek olması ile birlikte yakıt enjeksiyonu başlamaktadır. Kullanılan yakıtın (biyodizel gibi) sıkıştırılabilirliği daha düşük olması durumunda yakıt enjeksiyon basıncı çok daha hızlı artmakta ve püskürtme daha önce başlamaktadır [157].



Şekil 5.16: Motorin ve SYB20'nin motor yüküne bağlı enjeksiyon ve püskürtme gecikme süreleri.

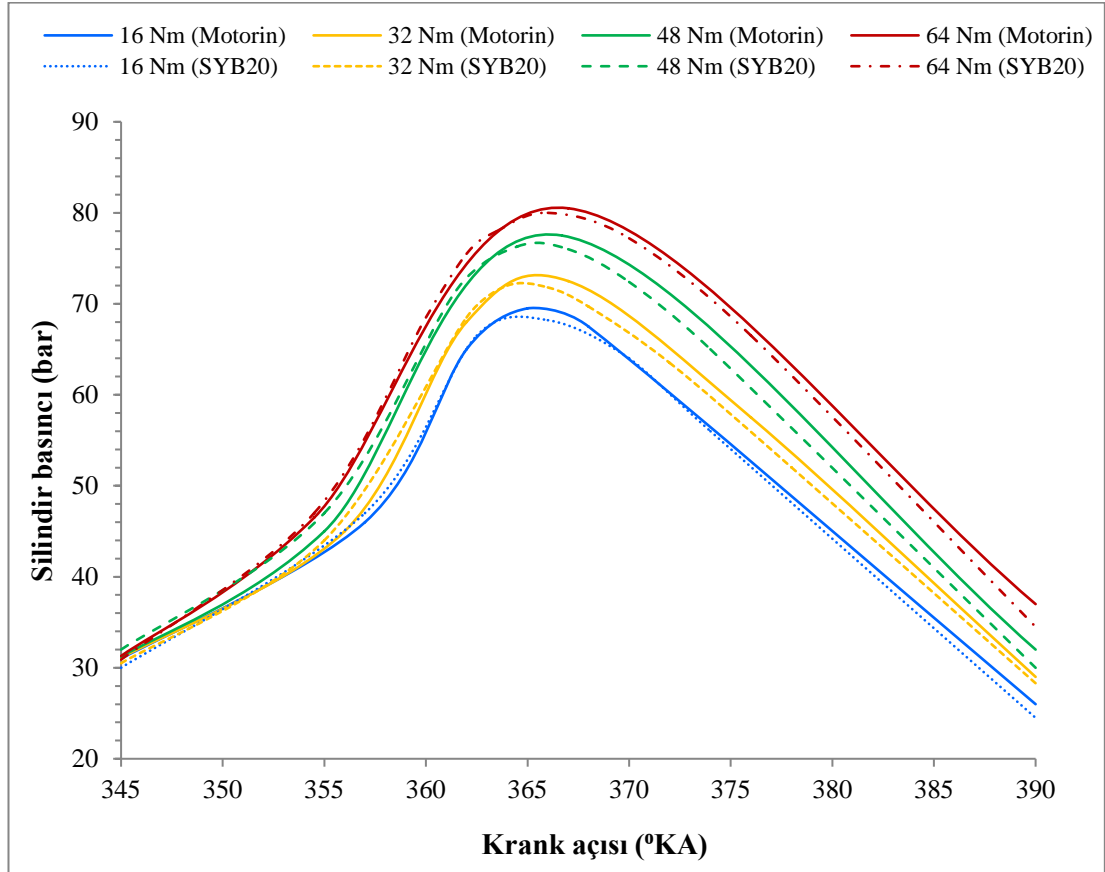
Yapılan simülsayonlarda, düşük yük koşullarında enjeksiyon başlangıç zamanı motorin için 339.8 °KMA, SYB20 için 339.6°KMA; yüksek yük koşullarında ise motorin için 338.6 °KMA, SYB20 için 336.3°KMA olarak bulunmuştur. Buna göre, artan motor yükü ile yakıt miktarı da arttığı için her iki yakıtın da püskürtme gecikmesinin azaldığı ve enjeksiyon işleminin daha erken başladığı söylenebilir.

### 5.3.2 Silindir İçi Gaz Basıncı (P)

Motorlarda iş, silindir içerisinde oluşturulan basınç ile üretilir; bu yüzden yüksek yanma sonu gaz basıncı istenen bir durumdur. Bunun yanında aşırı yüksek ve değişken silindir içi basınçlar motor yataklarında kropaj oluşmasına ve krank milinin aksenal yönde burkulmasına sebep olmaktadır. Yanma sonunda elde edilen en yüksek basınç değeri ( $P_{maks}$ ) ve  $P_{maks}$  oluşum hızı, test yakıtlarının motordaki etkileri hakkında bir bilgi edinilmesini sağlar [143]. İçten yanmalı motorlarda silindir gaz basıncı eğrileri ile yanma işlemi sonucunda silindir içerisinde meydana gelen mekanik yüklemelerin krank mili açısına (°KMA) göre dağılımı ifade edilmektedir [28]. Silindir içi gaz basıncının krank mili açısına bağlı değişimi ile tutuşma gecikmesi,  $P_{maks}$ 'ın değeri ve konumu, silindir içi basıncın artış hızı, vuruntu, yanma süresi gibi bilgilere ulaşılabilir.

Şekil 5.17'de, test yakıtlarının 345-390 °KMA aralığında motor yüküne bağlı silindir içi gaz basınç değişimi grafiği verilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere SYB20 ve motorin için artan motor yükü ile silindir içi gaz basınç değerleri artmış, en büyük  $P_{maks}$  değerleri yüksek yük bölgesinde oluşmuştur. Silindir içi basıncın artışı, yüklerle beraber yakıt tüketiminin de artması ile açıklanabilir. Genel olarak SYB20 ve motorinin çok benzer karakteristikte basınç değişimi gösterdiği, ancak motorinin SYB20'den bir miktar daha yüksek gaz basıncına sahip olduğu bulunmuştur. Literatürdeki çalışmaların bir bölümünde biyodizelin silindir içi gaz basıncını yükselttiği [33, 113], diğer bölümde ise simülasyon sonuçlarına benzer olarak bir miktar arttırdığı bildirilmektedir [17, 95, 143]. Dizel motorlarda silindir basıncı, ani

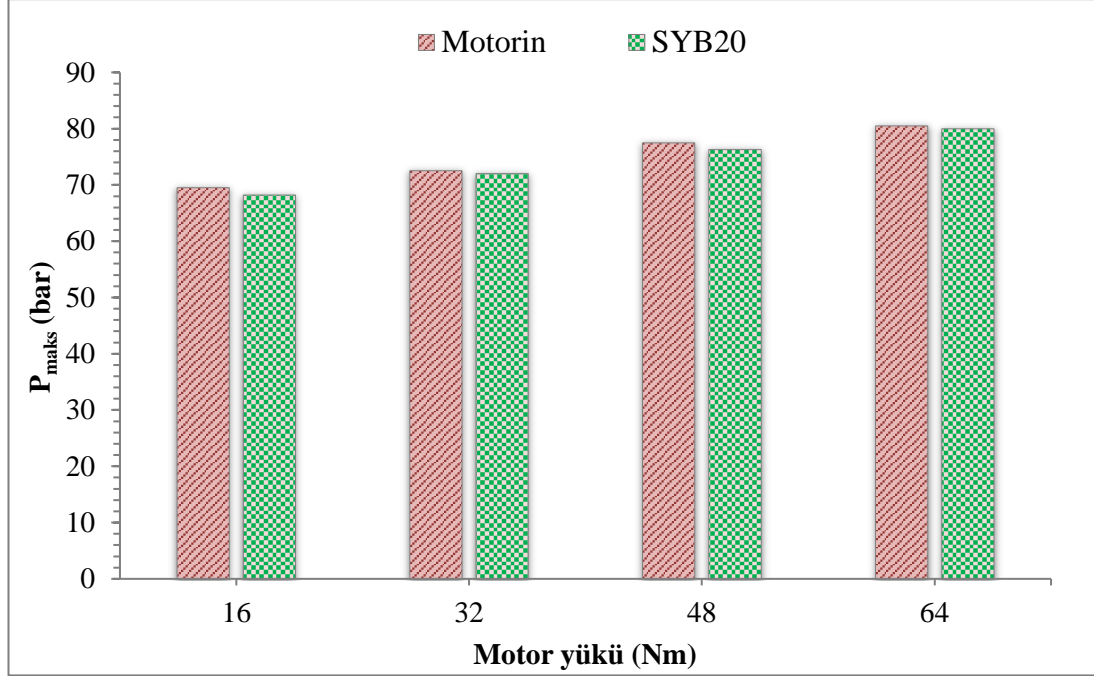
yanma evresinde yakıtın yanma oranı ve ortaya çıkan ısı ile ilişkilidir [158]. Dolayısıyla motorin silindir içi basınç değerlerinin SYB20 yakıtına göre daha yüksek çıkması, motorin ısı değerinin SYB20'ye göre daha büyük olmasından ve SYB20'nin ani yanma evresinde daha yavaş yanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



**Şekil 5.17:** Motorin ve SYB20'nin motor yükü ve °KMA'ya bağlı silindir içi gaz basıncı değişimi.

Simülasyon sonuçlarına göre  $P_{maks}$  değerleri düşük yükte SYB 20 için 69.5 bar, motorin için 70.1 bar; yüksek yük bölgesinde ise SYB 20 için 78.5 bar motorin için 80.1 bar olarak bulunmuştur (Şekil 5.18). Genel olarak biyodizel kullanımı ile  $P_{maks}$ 'ın azalma durumu; nispeten düşük ısı değere sahip biyodizelin daha kısa süren tutuşma gecikmesi süresi içinde yanma odasında biriken yakıt miktarının azalmasıyla ve

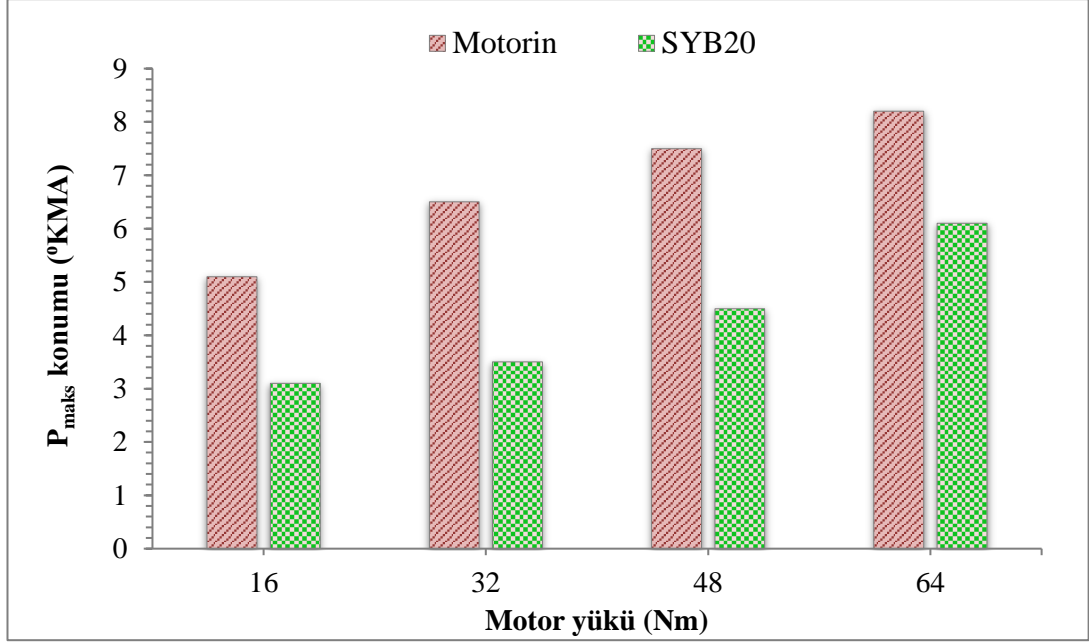
motorine göre daha düşük yanma hızının da etkisiyle ani yanma fazında biriken yakıtın daha küçük basınç artışlarına neden olmasıyla açıklanmaktadır [159].



**Şekil 5.18:** Motorin ve SYB20'nin motor yüküne bağlı  $P_{maks}$  değerleri.

Elde edilen verilere göre SYB20 ve motorin için  $P_{maks}$  değerleri sırasıyla düşük yükte  $365.1^{\circ}$  KMA ve  $366.5^{\circ}$  KMA, yüksek yükte ise  $363.0^{\circ}$  KMA ve  $364.9^{\circ}$  KMA'de oluşmuştur (Şekil 5.19). Her iki yakıt için de yük miktarı arttıkça  $P_{maks}$ 'ın daha geç oluşması artan yakıt miktarı ile yanmanın daha uzun sürmesi ile açıklanabilir. Tüm yük koşulları için SYB20  $P_{maks}$  değerinin motorininkinden daha önce oluşması (ortalama  $2^{\circ}$  KMA), biyodizel ilavesiyle yakıtın setan sayısının artmasından ve daha erken püskürtülmesinden dolayı daha erken yanmaya başlamasından kaynaklandığı söylenebilir. Yapılan benzer çalışmalarda da biyodizel içeren karışımların petrol dizel yakıtlarına oranla  $P_{maks}$  KMA konumunu daha öne çektiği aktarılmıştır [97, 160]. Artan motor yükü ile SYB20-motorin  $P_{maks}$  konum farkının kısmen azalması SYB20 tutuşma gecikmesi süresinin artışıyla ilişkilendirilebilir. Çünkü artan tutuşma gecikme süresi  $P_{maks}$  konumunu ileri yönde öter.



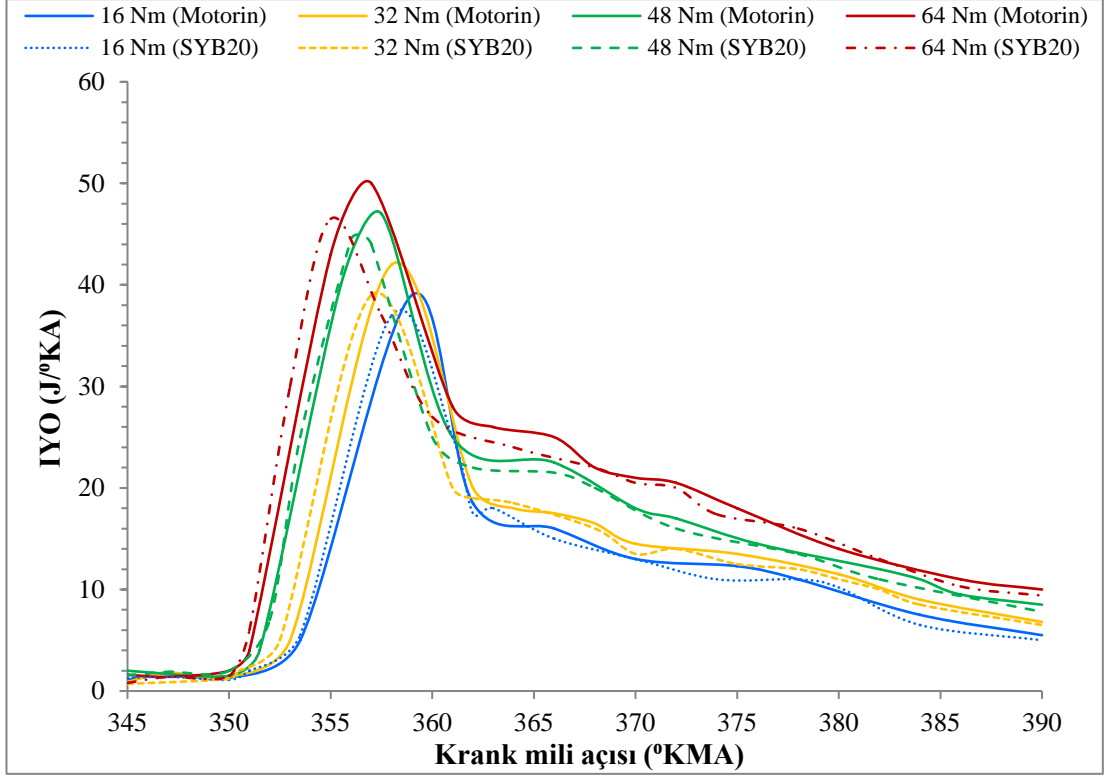


**Şekil 5.19:** Motorin ve SYB20'nin  $P_{maks}$  konumları (°KMA).

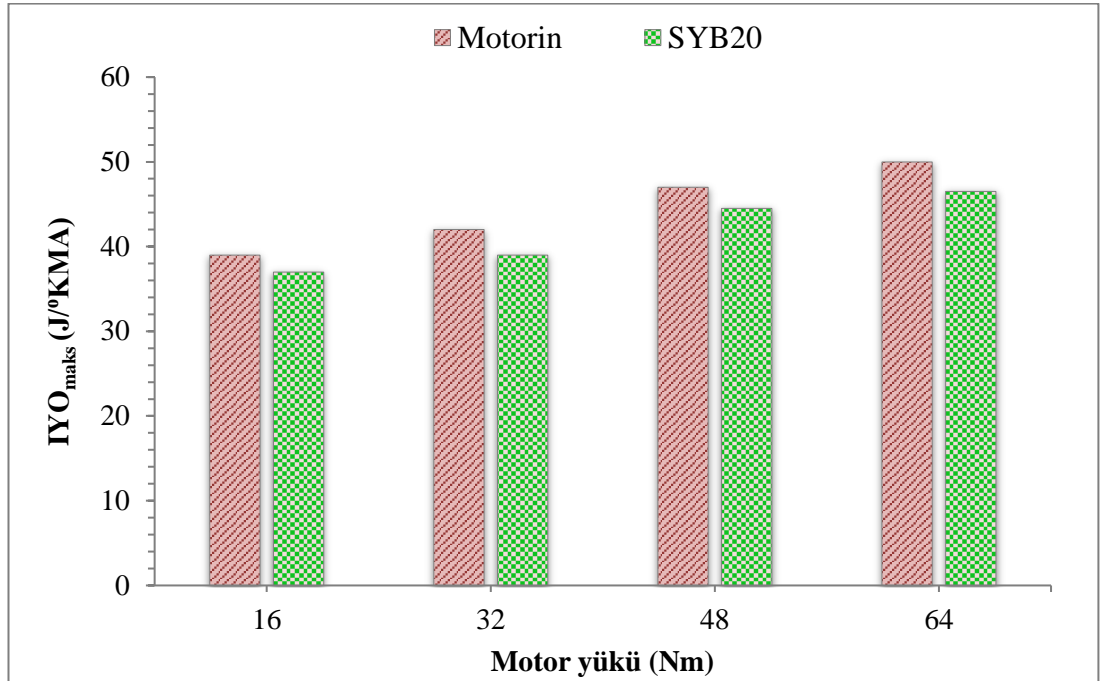
### 5.3.3 Isı Yayılım Oranı (IYO)

Isı yayılım oranı (IYO), silindir içi gaz basıncı verileri kullanılarak elde edilir. Isı yayılım analizleri yapılarak aynı koşullar altında farklı yakıtların yanma aşamaları mukayese edilebilmektedir [8].

Gerçekleştirilen motor simülasyonlarından elde edilen SYB20 ve motorinin KMA'ya bağlı IYO değişimleri Şekil 5.20'de gösterilmiştir. Isı yayılım eğrilerinden anlaşılacağı üzere, iki test yakıtı için de motor yükü arttıkça IYO değerleri yükselmiştir. Genel olarak SYB20 kullanımında IYO miktarı motorine göre düşmüştür. Biyodizel yakıtının ısı yayılımındaki negatif etkisi, motorine oranla daha düşük ısıl değere sahip olmasından kaynaklanmaktadır [143]. Elde edilen IYO verilerinden, tüm test koşullarında SYB20'nin motorine oranla daha önce yanmaya başladığı gözlemlenmiştir. SYB20'nin biyodizel içermesinden dolayı motorine göre daha erken püskürtülmesi ve yüksek setan sayısına sahip olması yanmanın erken başlamasına neden olmuştur.



Şekil 5.20: Motorin ve SYB20'nin motor yükü ve KMA'ya bağlı ısı yayımları.



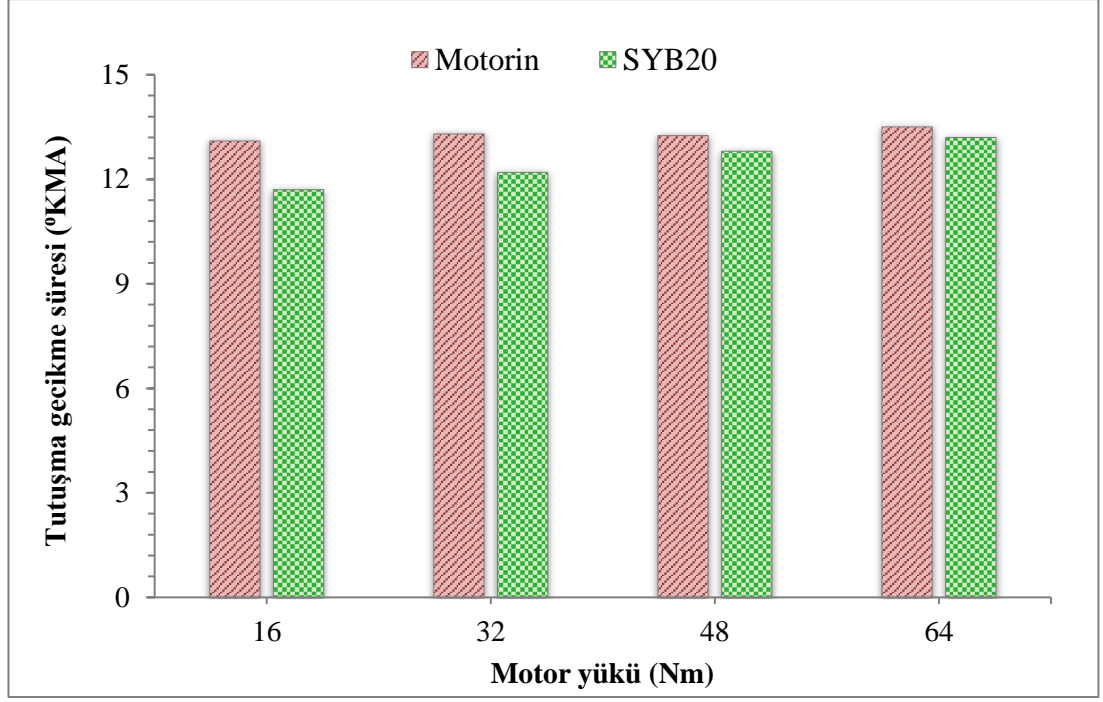
Şekil 5.21: Motorin ve SYB20'nin motor yüküne bağlı IYO<sub>maks</sub> değerleri.

Şekil 5.21 incelendiğinde, ani yanma evresinde oluşan en yüksek IYO değerinin ( $IYO_{maks}$ ) SYB20 kullanımında bir miktar düştüğü görülmektedir. Bu düşüş, kısalan tutuşma gecikme süresi içinde biyodizelin motorine göre daha kötü olan püskürtme özelliklerinden ve daha düşük ısı değere sahip olmasından dolayı meydana gelmektedir [161, 162]. SYB20 yakıtı için IYO tepe noktası motorine oranla bir miktar daha genişlemiştir. Bu durumun, yoğunluk ve viskozitesi yüksek olan biyodizel kullanımı ile yanmanın az da olsa uzamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Difüzyon yanma bölgesinde ise biyodizelin artan uçuculuk özelliğiyle yanma daha da hızlandığı ve ısı yayılımının SYB20 ve motorin için çok benzer bir dağılım gösterdiği söylenebilir.

### 5.3.1 Tutuşma Gecikmesi

Motor yükünün ve test yakıtlarının tutuşma gecikme süresi üzerindeki etkisi °KMA cinsinden Şekil 5.22’de gösterilmiştir. Setan sayısı, dizel motor yakıtlarında tutuşma gecikmesini kısaltan en önemli yakıt özelliğidir. Bunun için grafikten de anlaşıldığı gibi biyodizel içeren SYB20 yakıtının tutuşma gecikme süresi genel olarak motorinden daha kısadır. SYB20 ve motorinin tutuşma gecikmesi süreleri arasındaki farkın oluşmasında, bu yakıtların farklı buharlaşma yeteneklerine sahip olmaları da gösterilebilir. Çünkü daha uçucu olan motorin yanma odasında daha hızlı buharlaşarak ortamdaki ısıyı hızlı bir şekilde çekmekte ve silindir içi sıcaklığı düşürmekte, böylece biyodizele göre tutuşma gecikme süresinin uzamasına neden olmaktadır [143].

Simülasyon sonuçlarından, motorin tutuşma gecikme süresinin yüklenme oranından fazla etkilenmeyerek sabit değerlerde seyrettiği, SYB20 tutuşma gecikme süresinin ise motor yüküyle ilintili olarak kısmen arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, motor yükü ile artan silindir içi sıcaklıklarda biyodizel uçuculuk özelliğinin iyileşmesi ve ortamdaki ısıyı hızlı çekilmesiyle açıklanabilir.



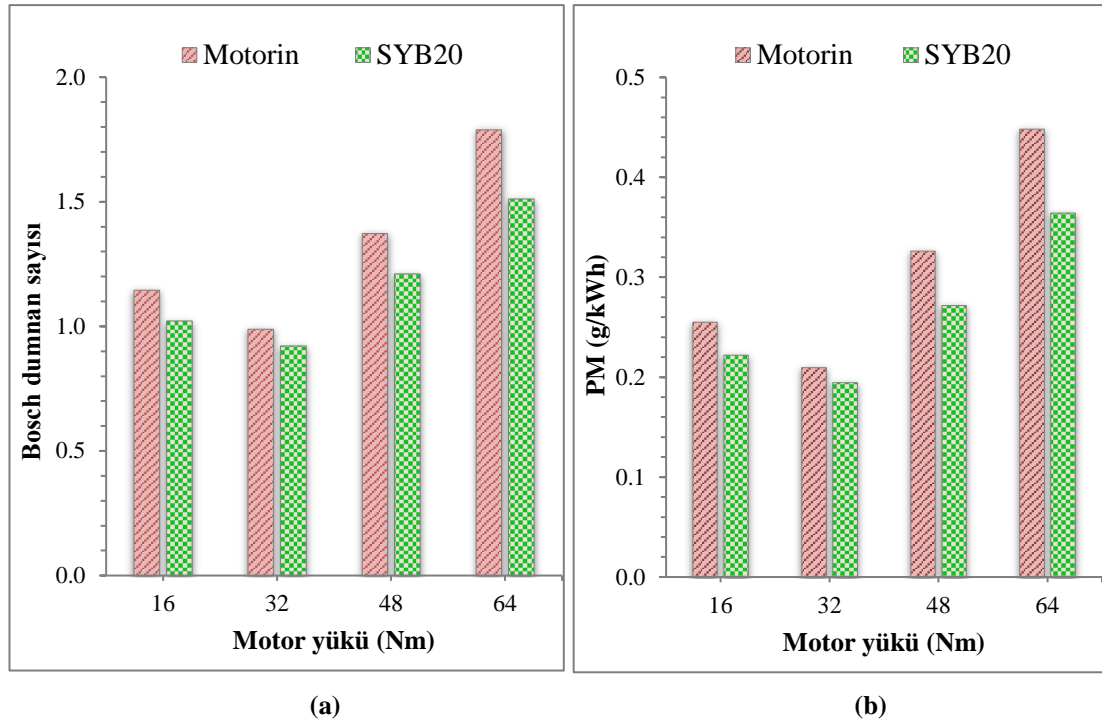
**Şekil 5.22:** Motorin ve SYB20'nin motor yüküne bağlı tutuşma gecikmeleri.

### 5.3.2 Duman Koyuluğu ve Partikül Madde (PM) Emisyonları

Partikül madde (PM) emisyonu, dizel motorlarda salınımı yapılan en önemli ve en zararlı emisyon gazları arasındadır. PM emisyonları genellikle yanmamış yakıt ve yağlama yağı kaynaklı organik bileşenlerin, yanma ürünleri olan karbon içerikli materyaller (is) tarafından absorbe edilmesi ile oluşur. İş ile duman oluşumu arasında çok güçlü bir ilişki vardır. Duman oluşumu, genel olarak eksik oksijen ve yüksek silindir içi sıcaklıklarda meydana gelmektedir [149].

Yakıtlara ait duman koyuluğu değerleri, Bosch duman sayısı cinsinden Şekil 5.23 (a)'da, Bosch duman sayısı kullanılarak elde edilen Partikül Madde (PM) emisyonları ise Şekil 5.23 (b)'de gösterilmiştir. Elde edilen bu verilere göre, her iki yakıt için de duman koyuluğu ve PM emisyonu yanma verimine bağlı olarak düşük yükte kısmen yüksek, alt orta yükte düşük, üst orta yükte artan yakıt miktarı ile yüksek,

yüksek yük bölgesinde ise çok yükselen eş değeri oranı ve silindir içi sıcaklıkları dolayısıyla en yüksek seviyelerinde oluşmuştur. Biyodizel içeren SYB20 kullanımı ile duman koyuluğu ve PM emisyon değerlerinde belirgin bir düşüş yaşanmıştır. Biyodizelin duman emisyonunu azaltmasında en önemli etkenler, oksijen içeren yapısı ve motorine göre daha az C-C bağından oluşmasıdır [163]. Eşdeğerlik oranının en çok arttığı yüksek yük bölgesinde en fazla duman koyuluğu ve PM emisyonu düşüşünün elde edilmesi, biyodizelin yanma odasında oksijen ihtiyacını karşılayarak yanmayı iyileştirmesiyle açıklanabilir. Literatürdeki deneysel ve sayısal emisyon verileri elde edilen simülasyon sonuçlarıyla uyumlu olarak biyodizel kullanımıyla emisyondaki duman koyuluğu ve PM emisyonlarının özellikle yüksek yüklerde önemli miktarda iyileştirdiğini belirtmektedir [149, 150, 158].



**Şekil 5.23:** Motorin ve SYB20'nin motor yüküne bağlı duman koyuluğu ve PM emisyon değerleri.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada, mikrodalga ısıtma sistemine sahip pilot ölçekli (60 L) bir biyodizel reaktörü tasarlanmış ve imal edilmiştir. Tasarlanan reaktör, “Türk Patent ve Marka Kurumu” tarafından faydalı model buluşu olarak kabul edilmiş ve tescillenmiştir. Reaktörde, bitkisel yağ olarak, Türkiye’de en fazla üretimi gerçekleştirilen ayçiçek yağı, dünya genelinde biyodizel üretiminde en çok tercih edilen yağ çeşitleri olan kanola ve soya yağları ve atık ayçiçek yağı kullanılarak transesterifikasyon metoduyla biyodizel üretimleri gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneylerde; mikrodalga ışıma altında, 33 kg ayçiçek, kanola ve soya yağlarından, 6:1 molar metanol:yağ, yağın kütlece %1.0’i kadar KOH ve 60°C reaksiyon sıcaklığı koşullarındaki 5 dakikalık transesterifikasyon ve sulu yıkama saflaştırma işlemleri sonunda EN 14214 standartlarına uygun biyodizeller üretilmiştir. Konvansiyonel metotlara göre çok hızlı tamamlanan üretimlerde; AYB için %95.31, KYB için %94.19, SYB için %96.41 biyodizel verimi elde edilmiştir. Aynı reaksiyon koşullarında, konvansiyonel ısıtma sisteminin kullanıldığı transesterifikasyon için ayçiçek yağından 60 dakika sonunda ancak %92.40 verimle biyodizel üretilebilmiş, elde edilen biyodizelin ester içeriği de EN 14214 standartlarının altında kalmıştır. Atık ayçiçek yağının kullanıldığı deneylerde, en kaliteli yakıt özellikleri; 6:1 molar metanol:yağ, yağın kütlece %1.5 KOH, 60°C reaksiyon sıcaklığı koşullarında üretilmiştir. Bu koşullar altında 5 dakikada üretilen biyodizel EN 14214 standartlarına uygun yoğunluk ve viskoziteye değerlerine sahipse de ester içeriği (%95.10) standart değerinin (%96.5) çok az altında kalmıştır. Ancak, yapılan literatür taramasında, 5 dakika sonunda elde edilen bu biyodizel yakıt özelliklerine, benzer reaksiyon şartlarında gerçekleştirilen birçok konvansiyonel üretimde çok daha uzun süren reaksiyonlar ile ulaşılabildiği görülmüştür. Sonuç olarak; reaksiyon süresinin kısaltılması ve ürün veriminin artırılması gibi avantajları ile biyodizel üretim

maliyetinin azaltılmasında faydalı olabilecek mikrodalga teknolojisi, pilot ölçekli bir reaktöre adapte edilmiş ve başarı ile uygulanmıştır.

Mikrodalga ışıma ile üretilen AYB, KYB, SYB ve motorin ile gerçekleştirilen sabit devir-değişken yük motor testlerinde, genel olarak özgül yakıt tüketiminde artış ve efektif verimde kısmi bir düşüş olsa da, tüm biyodizel yakıtları motorine benzer motor performansı göstermişlerdir. Biyodizeller içerisinde en düşük viskoziteye sahip SYB'nin düşük yükte, yüksek setan sayılı AYB'nin ise yüksek yüklerde daha iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Egzoz emisyon ölçümlerinde, tüm yakıtlar için CO, CO<sub>2</sub> ve HC salınımları artan motor yükü ile paralel olarak yükselmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonları ise üst orta yük bölgesine kadar artmış, yüksek yük bölgesinde ise bir miktar azalmıştır. Genel olarak oksijen içeren biyodizel yakıtlarının kullanımı ile eksik yanma ürünleri olan CO ve HC emisyonlarını azaltmış, tam yanma ürünü olan CO<sub>2</sub> ise artmıştır. Çoğunlukla oksijen miktarına bağlı olarak değişen NO<sub>x</sub> emisyonları ise beklediği üzere biyodizel kullanımı ile bir miktar yükselmiştir. Yapılan ölçümlerde, AYB, KYB ve SYB'nin birbirine çok benzer emisyon salınım karakteristiklerine sahip olduğu görülmüştür.

Çalışmanın son bölümünde, motor testlerinde yapılamayan yanma analizleri ve duman koyuluğu-PM emisyon ölçümleri, SYB20 ve motorin yakıtları için Diesel-RK programı kullanılarak oluşturulan simülasyonlar ile tahmin edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan; SYB20 kullanımı ile motorine göre püskürtmenin daha erken başladığı, tutuşma gecikmesinin kısaldığı, P<sub>maks</sub> ve IYO<sub>maks</sub> değerlerinin bir miktar düştüğü, duman koyuluğu ve PM emisyonlarında ise önemli iyileştirmelerin sağlandığı görülmüştür. Simülasyon verileri, benzer deney koşullarında gerçekleştirilen literatürdeki motor testleri ve simülasyonları ile karşılaştırıldığında, sonuçların büyük oranda birbirleriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Gerçekleştirilen motor testleri ve simülasyonları neticesinde; mikrodalga ışıma ile üretilen AYB, KYB ve SYB yakıtlarının, konvansiyonel bir dizel motorunda herhangi bir modifikasyon yapılmadan kullanılabilmesi anlaşılmıştır.

Yapılan bu doktora çalışması sonunda, literatürde tespit edilen eksiklikler ve araştırılması önerilebilecek konu ve çalışmalar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Tasarlanan reaktörde mikroalgler gibi alternatif yağ kaynakları kullanılarak biyodizel üretimi üzerine yeni araştırmalar yapılabilir.
- Mevcut reaktör geliştirilerek endüstriyel biyodizel üretiminde kullanılacak yeni reaktör modelleri tasarlanabilir.
- Üretilen biyodizeller kullanılarak gerçekleştirilecek testlerde; enjektör püskürtme basıncı ve zamanlaması, yakıt sıcaklığı, farklı sıkıştırma oranları, EGR oranı gibi çeşitli motor parametrelerinin motor gücü ve emisyon salınımları üzerindeki etkileri incelenebilir.
- Üretilen biyodizellerin NO<sub>x</sub> emisyonlarını azaltmak için kullanılacak yakıt katkı maddeleri üzerinde çalışılabilir.
- Motor test düzeneğine silindir içi basınç sensörü ilave edilerek üretilen biyodizellere ait silindir içi basınç ve ısı yayılım oranları belirlenebilir. Elde edilecek bu veriler ile gerçekleştirilen simülasyon sonuçları ve HAD kodlarıyla gerçekleştirilmesi planlanan çok boyutlu motor simülasyonları doğrularak, motor testlerine ait daha net ve hassas tahminlerde bulunulabilir.



## 7. KAYNAKLAR

- [1] "BP Statistical review of world energy 2016 [online]", (29 Mart 2017), [www.bp.com/statisticalreview](http://www.bp.com/statisticalreview), (2017).
- [2] "BP Energy outlook to 2035, (Oct 2016) [online]", (29 Mart 2017), <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook/energy-outlook-downloads.html>, (2016).
- [3] TÜİK," Motorlu kara taşıtları istatistikleri (kullanılan yakıt türüne göre motorlu kara taşıt sayısı) [online]", (30 Mart 2017), [http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt\\_id=1051](http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1051), (2016).
- [4] "Ham petrol ve doğal gaz sektör raporu Mayıs 2016 [online]", (28 Mart 2017), [http://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT%2F1%2FDocuments%2FSekt%C3%B6r%20Raporu%2FTP\\_HAM\\_PETROL-DOGAL\\_GAZ\\_SEKTOR\\_RAPORU\\_2015.pdf](http://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT%2F1%2FDocuments%2FSekt%C3%B6r%20Raporu%2FTP_HAM_PETROL-DOGAL_GAZ_SEKTOR_RAPORU_2015.pdf), (2017).
- [5] "Petrol [online]", (29 Mart 2017), <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Petrol>, (2016).
- [6] Özen, A. ve Onural, A., "Egzoz emisyon sistemlerinin neden olduğu çevre kirliliği, TMMOB Makine Mühendisleri Odası 7", *Otomotiv ve Yan Sanayi Sempozyumu*, Bursa, 107-112, (2001).
- [7] Marangoz, M., "İşletmelerin çevresel sorumluluğu: Türk otomotiv sanayine yönelik bir araştırma", *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 6(3), (2004).
- [8] Şanlı, H., "Atık kızartma yağlarının karakterizasyonu ve biyodizel üretiminde değerlendirilmesi", Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi*, Makine Eğitimi, (2014).
- [9] Shahid, E.M. ve Jamal, Y., "A review of biodiesel as vehicular fuel", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2484-2494, (2008).
- [10] Akyaz, S., "Benzin–tersiyer bütül alkol ve benzin naftalin karışımlarının buji ateşlemeli motorun performansına ve egzoz emisyonlarına etkisinin deneysel olarak incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi*, Makine Mühendisliği, (2007).

- [11] Akman, S., "Türkiye biyodizel piyasası incelenmesi, düzenlenmesi ve 2020 projeksiyonu", Yüksek Lisans Tezi, *TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi*, İşletme, Ankara, (2015).
- [12] Adıyaman, Ç., "Türkiye'nin yenilenebilir enerji politikaları", Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi*, Kamu Yönetimi, (2012).
- [13] Acaroğlu, M., "Türkiye'de biyokütle-biyoetanol ve biyomotorin kaynakları ve biyoyakıt enerjisinin geleceği", *VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu (UTES'2008)*, İstanbul, (2008).
- [14] Alptekin, E. ve Çanakçı, M., "Biyodizel ve Türkiye'deki durumu", *Mühendis ve Makine*, 561, 57-64, (2006).
- [15] An, H., Yang, W., Chou, S., Chua, K., "Combustion and emissions characteristics of diesel engine fueled by biodiesel at partial load conditions", *Applied Energy*, 99, 363-371, (2012).
- [16] Can, Ö., "Combustion characteristics, performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with a waste cooking oil biodiesel mixture", *Energy Conversion and Management*, 87, 676-686, (2014).
- [17] Can, Ö., Öztürk, E., Yücesu, H.S., "Combustion and exhaust emissions of canola biodiesel blends in a single cylinder DI diesel engine", *Renewable Energy*, 109, 73-82, (2017).
- [18] Szybist, J.P., Song, J., Alam, M., Boehman, A.L., "Biodiesel combustion, emissions and emission control", *Fuel Processing Technology*, 88(7), 679-691, (2007).
- [19] Zheng, J., "Use of an engine cycle simulation to study a biodiesel fueled engine", *Texas A & M University*, (2010).
- [20] Zehni, A., Saray, R.K., Poorghasemi, K., "Numerical comparison of PCCI combustion and emission of diesel and biodiesel fuels at low load conditions using 3D-CFD models coupled with chemical kinetics", *Applied Thermal Engineering*, 110, 1483-1499, (2017).
- [21] Milazzo, M., Spina, F., Vinci, A., Espro, C., Bart, J., "Brassica biodiesels: Past, present and future", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 350-389, (2013).
- [22] Alptekin, E., Canakci, M., Sanli, H., "Biodiesel production from vegetable oil and waste animal fats in a pilot plant", *Waste Management*, 34(11), 2146-2154, (2014).

- [23] Medipally, S.R., Yusoff, F.M., Banerjee, S., Shariff, M., "Microalgae as sustainable renewable energy feedstock for biofuel production", *BioMed Research International*, 2015, (2015).
- [24] Hidalgo, P., Toro, C., Navia, R., "Advances in direct transesterification of microalgal biomass for biodiesel production", *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 12(2), 179-199, (2013).
- [25] Van Gerpen, J., Shanks, B., Pruszko, R., Clements, D., Knothe, G., "Biodiesel production technology, National Renewable Energy Laboratory Subcontractor Report NREL", SR-510-36244, (2004).
- [26] Zhang, Y., Dube, M., McLean, D., Kates, M., "Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment", *Bioresource Technology*, 89(1), 1-16, (2003).
- [27] Xue, J., Grift, T.E., Hansen, A.C., "Effect of biodiesel on engine performances and emissions", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 1098-1116, (2011).
- [28] Önsezen, A.N. ve Çanakçı, M., "Atık palmiye ve kanola yağı metil esterlerinin kullanıldığı direkt püskürtmeli bir dizel motorda performans ve yanma", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24(2), (2009).
- [29] Owen, K. ve Coley, T., *Automotive fuels reference book*, SAE International, (1995).
- [30] Dwivedi, G. ve Sharma, M.P., "Investigation of oxidation stability of pongamia biodiesel and its blends with diesel", *Egyptian Journal of Petroleum*, 25(1), 15-20, (2016).
- [31] Hatunoğlu, E.E., *Biyoyakıt politikalarının tarım sektörüne etkileri*, Vol, DPT, (2010).
- [32] Ofisi, A.İ., "Supply, transformation and consumption of renewable energies - annual data [online]", (24 Nisan 2017), <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>, (2016).
- [33] Alptekin, E., "Hayvansal atık yağlardan biyodizel üretimi ve bir dizel motorda kullanımının incelenmesi", Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi*, Makine Eğitimi, (2013).
- [34] ABD Enerji Bilgilendirme ve Yönetim Merkezi, "Monthly biodiesel production report with data for January 2017 [online]", (24 Nisan 2017), <https://www.eia.gov/biofuels/biodiesel/production>, (2017).

- [35] Gonsalves, J.B., "An assessment of the biofuels industry in India", *Geneva: Unctad*, (2006).
- [36] Singh, R., "Literature review on biodiesel", *South Pacific Geoscience Commission*, (2003).
- [37] Knothe, G., "Improving biodiesel fuel properties by modifying fatty ester composition", *Energy & Environmental Science*, 2(7), 759-766, (2009).
- [38] Demir, B., "Küçük ölçekli bir biyodizel sisteminin oluşturulması, elde edilen pamuk yağı metil esterinin motor performans testleri, enerjetik ve ekserjetik değerlendirilmesi", Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi*, Güneş Enerjisi Anabilim Dalı, (2009).
- [39] Demir, V.G., Soyhan, H.S., Yüksel, H., "Atık ayçiçek yağından biyodizel üretimi ve motor yanma testleri", *Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Balıkesir/Türkiye*, (2015).
- [40] Srivastava, A. ve Prasad, R., "Triglycerides-based diesel fuels", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(2), 111-133, (2000).
- [41] Koç, M., "Biyodizel üretimine uygun Türkiye'de yetişen ve yetişebilecek bitkilerin ve biyodizel teknolojilerinin belirlenmesi", Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi*, Makine Mühendisliği, (2011).
- [42] Dağdelen, A. ve Yüksel, Y., "Yağlı tohum çeşidi ve transesterifikasyon yöntemlerinin biyoyakıt üretimine ve kalitesine etkileri", *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 107-117, (2016).
- [43] Gizlenci, Ş., Mustafa, A., Şahin, M., "Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının (biyodizel, biyoetanol ve biyokütle) projeksiyonu", *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 8(3), 337-44, (2012).
- [44] TÜİK, "Bitkisel üretim istatistikleri [online]", (26 Nisan 2017), <https://biruni.tuik.gov.tr/bitkiselapp/bitkisel.zul>, (2017).
- [45] Mesut, E., "Atık ayçiçeği yağından biyodizel üretimi ve ön ısıtma uygulaması", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi*, Makine Eğitimi, (2011).
- [46] Şanlı, H. ve Çanakçı, M., "Dizel motorlar için yükselen bir alternatif yakıt: biyodizel [online]", (30 Eylül 2017), [http://www.emo.org.tr/ekler/48a38cd25abeab0\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/48a38cd25abeab0_ek.pdf)

- [47] Fillières, R., Benjelloun-Mlayah, B., Delmas, M., "Ethanolysis of rapeseed oil: Quantitation of ethyl esters, mono-, di-, and triglycerides and glycerol by high-performance size-exclusion chromatography", *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 72(4), 427-432, (1995).
- [48] Canakci, M. ve Van Gerpen, J., "Biodiesel production via acid catalysis", *Transactions of the ASAE-American Society of Agricultural Engineers*, 42(5), 1203-1210, (1999).
- [49] Van Gerpen, J., "Biodiesel processing and production", *Fuel Processing Technology*, 86(10), 1097-1107, (2005).
- [50] Demir, V.G., Soyhan, H.S., Demirtaş, V., "Mikroalga ısıtıcılı biyodizel reaktör tasarımı ve imalatı", *13. Uluslararası Yanma Sempozyumu, Bursa/Türkiye*, (2015).
- [51] Meher, L., Sagar, D.V., Naik, S., "Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(3), 248-268, (2006).
- [52] Goodrum, J.W., Geller, D.P., Adams, T.T., "Rheological characterization of animal fats and their mixtures with # 2 fuel oil", *Biomass and Bioenergy*, 24(3), 249-256, (2003).
- [53] Canakci, M. ve Van Gerpen, J., "Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids", *Transactions-American Society of Agricultural Engineers*, 44(6), 1429-1436, (2001).
- [54] Encinar, J., Gonzalez, J., Rodriguez, J., Tejedor, A., "Biodiesel fuels from vegetable oils: transesterification of *Cynara cardunculus* L. oils with ethanol", *Energy & Fuels*, 16(2), 443-450, (2002).
- [55] Yıldız, M., "Atık yağlardan biyodizel üretimi ve karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Namık Kemal Üniversitesi, Çevre Mühendisliği*, (2008).
- [56] Dias, J.M., Alvim-Ferraz, M.C., Almeida, M.F., "Comparison of the performance of different homogeneous alkali catalysts during transesterification of waste and virgin oils and evaluation of biodiesel quality", *Fuel*, 87(17), 3572-3578, (2008).
- [57] Fedai, Ö., "Transesterifikasyon ile kanola yağı metil esteri sentezinin optimizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi, Kimya Mühendisliği*, (2006).

- [58] Vicente, G., Martinez, M., Aracil, J., "Integrated biodiesel production: a comparison of different homogeneous catalysts systems", *Bioresource Technology*, 92(3), 297-305, (2004).
- [59] Çildir, O. ve Çanakçı, M., "Çeşitli bitkisel yağlardan biyodizel üretiminde katalizör ve alkol miktarının yakıt özellikleri üzerine etkisinin incelenmesi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(2), (2006).
- [60] Azcan, N. ve Danisman, A., "Alkali catalyzed transesterification of cottonseed oil by microwave irradiation", *Fuel*, 86(17), 2639-2644, (2007).
- [61] Meher, L., Dharmagadda, V.S., Naik, S., "Optimization of alkali-catalyzed transesterification of Pongamia pinnata oil for production of biodiesel", *Bioresource Technology*, 97(12), 1392-1397, (2006).
- [62] Özsezen, A., "Atık Palmiye yağından üretilen biyodizelin motor performans ve emisyon karakterleri üzerine etkisinin incelenmesi". Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi*, Makine Eğitimi, (2007).
- [63] Bouaid, A., Diaz, Y., Martinez, M., Aracil, J., "Pilot plant studies of biodiesel production using Brassicacarinata as raw material", *Catalysis Today*, 106(1), 193-196, (2005).
- [64] Motasemi, F. ve Ani, F.N., "A review on microwave-assisted production of biodiesel", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 4719-4733, (2012).
- [65] Ergan, B.T., "Mikrodalga destekli proseslerin kinetik-mekanistik-termodinamik modellenmesi ve analizi", Doktora Tezi, *Gebze Yüksek Teknoloji Üniversitesi*, Kimya Mühendisliği, (2013).
- [66] Taylor, M., Atri, B.S., Minhas, S., Bisht, P., *Developments in microwave chemistry*, Evaluerve, United Kingdom, (2005).
- [67] Fini, A. ve Breccia, A., "Chemistry by microwaves", *Pure and Applied Chemistry*, 71(4), 573-579, (1999).
- [68] Buffler, C.R., *Microwave cooking and processing*, Vol, Van Nostrand Reinhold, (1993).
- [69] Von Starck, A., Mühlbauer, A., Kramer, C., *Handbook of thermoprocessing technologies: fundamentals, processes, components, safety*. Vulkan-Verlag GmbH. (2005),
- [70] Bogdal, D., *Microwave-assisted organic synthesis: one hundred reaction procedures*, Vol, 25, Elsevier, (2005).

- [71] Li, H., et al., "Chemical reaction in binary mixtures near the critical region: thermal decomposition of 2, 2'-Azobis (isobutyronitrile) in CO<sub>2</sub>/Ethanol", *Chemistry-A European Journal*, 8(24), 5593-5600, (2002).
- [72] Matsuzawa, M., Togashi, S., Hasebe, S., "Isothermal reactor for continuous flow microwave-assisted chemical reaction", *Journal of Thermal Science and Technology*, 7(1), 58-74, (2012).
- [73] Strauss, C.R. ve Trainor, R.W., "Developments in microwave-assisted organic chemistry", *Australian Journal of Chemistry*, 48(10), 1665-1692, (1995).
- [74] Baghurst D.R. ve Mingos, D.M.P., " Superheating effects associated with microwave dielectric heating ", *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, 9, 674, (1992).
- [75] Berlan, J., "Microwaves in chemistry: another way of heating reaction mixtures", *Radiation Physics and Chemistry*, 45(4), 581-589, (1995).
- [76] Ergan, B.T. ve Bayramoğlu, M., "The effects of microwave power and dielectric properties on the microwave-assisted decomposition kinetics of AIBN in n-butanol", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19(1), 299-304, (2013).
- [77] Azcan, N. ve Danisman, A., "Microwave assisted transesterification of rapeseed oil", *Fuel*, 87(10), 1781-1788, (2008).
- [78] Duz, M.Z., Saydut, A.,Ozturk, G., "Alkali catalyzed transesterification of safflower seed oil assisted by microwave irradiation", *Fuel Processing Technology*, 92(3), 308-313, (2011).
- [79] El Sherbiny, S.A., Refaat, A.A.,El Sheltawy, S.T., "Production of biodiesel using the microwave technique", *Journal of Advanced Research*, 1(4), 309-314, (2010).
- [80] Kumar, R., Kumar, G.R.,Chandrashekar, N., "Microwave assisted alkali-catalyzed transesterification of Pongamia pinnata seed oil for biodiesel production", *Bioresource Technology*, 102(11), 6617-6620, (2011).
- [81] Encinar, J., Gonzalez, J., Martínez, G., Sánchez, N.,Pardal, A., "Soybean oil transesterification by the use of a microwave flow system", *Fuel*, 95, 386-393, (2012).
- [82] Kamath, H.V., Regupathi, I.,Saidutta, M., "Optimization of two step karanja biodiesel synthesis under microwave irradiation", *Fuel Processing Technology*, 92(1), 100-105, (2011).

- [83] Chen, K.-S., Lin, Y.-C., Hsu, K.-H., Wang, H.-K., "Improving biodiesel yields from waste cooking oil by using sodium methoxide and a microwave heating system", *Energy*, 38(1), 151-156, (2012).
- [84] Hernando, J., Leton, P., Matia, M.P., Novella, J., Alvarez-Builla, J., "Biodiesel and FAME synthesis assisted by microwaves: homogeneous batch and flow processes", *Fuel*, 86(10), 1641-1644, (2007).
- [85] Kanitkar, A., Balasubramanian, S., Lima, M., Boldor, D., "A critical comparison of methyl and ethyl esters production from soybean and rice bran oil in the presence of microwaves", *Bioresource Technology*, 102(17), 7896-7902, (2011).
- [86] Loones, K.T., Maes, B.U., Rombouts, G., Hostyn, S., Diels, G., "Microwave-assisted organic synthesis: scale-up of palladium-catalyzed aminations using single-mode and multi-mode microwave equipment", *Tetrahedron*, 61(43), 10338-10348, (2005).
- [87] Gupta, M. ve Leong, E.W.W., *Microwaves and metals*, Vol, John Wiley & Sons, (2008).
- [88] Da Silva, F.N., Prata, A.S., Teixeira, J.R., "Technical feasibility assessment of oleic sunflower methyl ester utilisation in diesel bus engines", *Energy Conversion and Management*, 44(18), 2857-2878, (2003).
- [89] Kawano, D., Ishii, H., Goto, Y., "Effect of biodiesel blending on emission characteristics of modern diesel engine", *SAE Technical Paper*, (2008).
- [90] Çelikten, İ. ve Arslan, M.A., "Dizel yakıtı, kanola yağı ve soya yağı metil esterlerinin direkt püskürtmeli bir dizel motorunda performans ve emisyonlarına etkilerinin incelenmesi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(4), (2008).
- [91] Lakshmi Narayana Rao, G., Durga Prasad, B., Sampath, S., Rajagopal, K., "Combustion analysis of diesel engine fueled with jatropha oil methyl ester-diesel blends", *International Journal of Green Energy*, 4(6), 645-658, (2007).
- [92] Qi, D., vd., "Combustion and performance evaluation of a diesel engine fueled with biodiesel produced from soybean crude oil", *Renewable Energy*, 34(12), 2706-2713, (2009).
- [93] Rahim, R., Mamat, R., Taib, M.Y., "Comparative study of biofuel and biodiesel blend with mineral diesel using one-dimensional simulation", (eds: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 012009, (2012).



- [94] Said, M.F.M., Said, M.,Aziz, A.A., "Modelling of diesel engine fuelled with biodiesel using engine simulation software", (eds: *AIP Conference Proceedings*, 307-313, (2012).
- [95] Al-Dawody, M.F. ve Bhatti, S., "Optimization strategies to reduce the biodiesel NOx effect in diesel engine with experimental verification", *Energy Conversion and Management*, 68, 96-104, (2013).
- [96] Datta, A. ve Mandal, B.K., "Engine performance, combustion and emission characteristics of a compression ignition engine operating on different biodiesel-alcohol blends", *Energy*, 125, 470-483, (2017).
- [97] Paul, G., Datta, A.,Mandal, B.K., "An experimental and numerical investigation of the performance, combustion and emission characteristics of a diesel engine fueled with jatropha biodiesel", *Energy Procedia*, 54, 455-467, (2014).
- [98] Dubé, M., Tremblay, A.,Liu, J., "Biodiesel production using a membrane reactor", *Bioresource Technology*, 98(3), 639-647, (2007).
- [99] Hidayet, O. ve Hüseyin, Ö., "Çiftçi şartlarına uygun bir biyodizel üretim tesisinin tasarım ve imalatı", *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 1(1), (2005).
- [100] Benavides, P.T., Salazar, J.,Diwekar, U., "Economic comparison of continuous and batch production of biodiesel using soybean oil", *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 32(1), 11-24, (2013).
- [101] Robinson, R.K., *Encyclopedia of food microbiology*, Vol 1, Academic press, (2014).
- [102] "PTFE - Teflon [online]", (05 Kasım 2017), [www.nanotech-plastic.com/products-ptfe-teflon-96.html](http://www.nanotech-plastic.com/products-ptfe-teflon-96.html), (2017).
- [103] Coker, A.K., *Modeling of chemical kinetics and reactor design*, Vol, 1, Gulf Professional Publishing, (2001).
- [104] MEB, "Mikrodalga Fırınlar [Online]", (20 Eylül 2017), [http://www.megep.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/moduller\\_pdf/Mikrodalg\\_a%20F%C4%B1r%C4%B1nlar.pdf](http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Mikrodalg_a%20F%C4%B1r%C4%B1nlar.pdf), (2011).
- [105] Da Silva, N.D.L. ve Batistella Filho, C., "Determination of castor oil molecular weight by vapour pressure osmometry technique", *Chem Eng Trans*, 24, 601-606, (2011).
- [106] Lidström, P., Tierney, J., Wathey, B.,Westman, J., "Microwave assisted organic synthesis—a review", *Tetrahedron*, 57(45), 9225-9283, (2001).

- [107] Keera, S., El Sabagh, S.,Taman, A., "Transesterification of vegetable oil to biodiesel fuel using alkaline catalyst", *Fuel*, 90(1), 42-47, (2011).
- [108] Rashid, U., Anwar, F.,Knothe, G., "Evaluation of biodiesel obtained from cottonseed oil", *Fuel Processing Technology*, 90(9), 1157-1163, (2009).
- [109] Refaat, A., Attia, N., Sibak, H.A., El Sheltawy, S., ElDiwani, G., "Production optimization and quality assessment of biodiesel from waste vegetable oil", *International Journal of Environmental Science & Technology*, 5(1), 75-82, (2008).
- [110] Aksoy, L., "Alternatif enerji kaynağı olarak biyodizel ve üretim prosesleri", *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2(3), 45-52, (2010).
- [111] Alptekin, E., "Biyodizel ile dizel yakıtlarının harmanlanmasında yakıt özelliklerinin belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi*, Makine Eğitimi, (2007).
- [112] Şanlı, H., "Farklı alkol ve katalizör kullanımının biyodizel üretimindeki etkileri", Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi*, Makine Eğitimi, (2005).
- [113] Özsezen, A.N. ve Çanakçı, M., "Biyodizel ve karışımlarının kullanıldığı bir dizel motorda performans ve emisyon analizi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(2), 173-180, (2009).
- [114] Leung, D. ve Guo, Y., "Transesterification of neat and used frying oil: optimization for biodiesel production", *Fuel Processing Technology*, 87(10), 883-890, (2006).
- [115] Kinast, J.A., *Production of Biodiesels from Multiple Feedstocks and Properties of Biodiesels and Biodiesel/Diesel Blends: Final Report*, Report 1 in a Series of 6. No. NREL/SR-510-31460, National Renewable Energy Laboratory USA, (2003).
- [116] Alptekin, E. ve Canakci, M., "Characterization of the key fuel properties of methyl ester–diesel fuel blends", *Fuel*, 88(1), 75-80, (2009).
- [117] "Product Comparison Guide: Cannon-Fenske viscometer tube [online]", (05 Ocak2017),<https://www.cannoninstrument.com/Image/GetDocument/445?language=en>, (2017).
- [118] Alptekin, E., Canakci, M.,Sanli, H., "Evaluation of leather industry wastes as a feedstock for biodiesel production", *Fuel*, 95, 214-220, (2012).

- [119] Baydır, Ş.A., "HCCI (homojen şarjlı sıkıştırma ile ateşlemeli) bir motorda yanma analizi", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi, Makine Eğitimi*, (2012).
- [120] Pulkrabek, W.W., *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*, Prentice Hall, (2004).
- [121] Stone, R., *Introduction to internal combustion engines*, Palgrave Macmillan, (2012).
- [122] Dr. Sc. (Tech.), P.A.K., "Diesel-RK [online]", (03 Ocak 2018), <http://www.diesel-rk.bmstu.ru/Eng/index.php>
- [123] Karabaş, H., "Ayçiçek yağı biyodizelinin ester dönüşüm oranı üzerine etkili olan parametrelerin optimizasyonu", *AMÜ Ziraat Fak Der*, 10(1), (2013).
- [124] Pullen, J. ve Saeed, K., "Investigation of the factors affecting the progress of base-catalyzed transesterification of rapeseed oil to biodiesel FAME", *Fuel Processing Technology*, 130, 127-135, (2015).
- [125] Freedman, B., Pryde, E.,Mounts, T., "Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils", *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 61(10), 1638-1643, (1984).
- [126] Rashid, U., Anwar, F., Moser, B.R.,Ashraf, S., "Production of sunflower oil methyl esters by optimized alkali-catalyzed methanolysis", *Biomass and Bioenergy*, 32(12), 1202-1205, (2008).
- [127] Karabaş, H., "Investigation of biodiesel fuel from canola oil using various reaction parameters/Farklı reaksiyon parametreleri kullanılarak kanola yağından biyodizelin araştırılması", *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 2(3), 85-91, (2013).
- [128] Giakoumis, E.G., "A statistical investigation of biodiesel physical and chemical properties, and their correlation with the degree of unsaturation", *Renewable Energy*, 50, 858-878, (2013).
- [129] Knothe, G., "Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters", *Fuel Processing Technology*, 86(10), 1059-1070, (2005).
- [130] Meng, X., Chen, G.,Wang, Y., "Biodiesel production from waste cooking oil via alkali catalyst and its engine test", *Fuel Processing Technology*, 89(9), 851-857, (2008).
- [131] Atapour, M., Kariminia, H.-R.,Moslehabadi, P.M., "Optimization of biodiesel production by alkali-catalyzed transesterification of used frying oil", *Process Safety and Environmental Protection*, 92(2), 179-185, (2014).

- [132] Predojević, Z.J. ve Škrbić, B.D., "Alkali-catalyzed production of biodiesel from waste frying oils", *Journal of the Serbian Chemical Society*, 74(8-9), 993-1007, (2009).
- [133] Yusup, S. ve Khan, M.A., "Base catalyzed transesterification of acid treated vegetable oil blend for biodiesel production", *Biomass and Bioenergy*, 34(10), 1500-1504, (2010).
- [134] Efe, Ş., Ceviz, M.A., Temur, H., "Comparative engine characteristics of biodiesels from hazelnut, corn, soybean, canola and sunflower oils on DI diesel engine", *Renewable Energy*, 119, 142-151, (2018).
- [135] Moser, B.R., "Influence of extended storage on fuel properties of methyl esters prepared from canola, palm, soybean and sunflower oils", *Renewable Energy*, 36(4), 1221-1226, (2011).
- [136] Ramos, M.J., Fernández, C.M., Casas, A., Rodríguez, L., Pérez, Á., "Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties", *Bioresource Technology*, 100(1), 261-268, (2009).
- [137] Leadbeater, N.E. ve Stencel, L.M., "Fast, easy preparation of biodiesel using microwave heating", *Energy & Fuels*, 20(5), 2281-2283, (2006).
- [138] Lee, C.S., Park, S.W., Kwon, S.I., "An experimental study on the atomization and combustion characteristics of biodiesel-blended fuels", *Energy & Fuels*, 19(5), 2201-2208, (2005).
- [139] Qi, D., Chen, H., Geng, L., Bian, Y.Z., "Experimental studies on the combustion characteristics and performance of a direct injection engine fueled with biodiesel/diesel blends", *Energy Conversion and Management*, 51(12), 2985-2992, (2010).
- [140] Ramadhas, A., Muraleedharan, C., Jayaraj, S., "Performance and emission evaluation of a diesel engine fueled with methyl esters of rubber seed oil", *Renewable Energy*, 30(12), 1789-1800, (2005).
- [141] Habibullah, M., et al., "Biodiesel production and performance evaluation of coconut, palm and their combined blend with diesel in a single-cylinder diesel engine", *Energy Conversion and Management*, 87, 250-257, (2014).
- [142] Wirawan, S.S., Tambunan, A.H., Djamin, M., Nabetani, H., "The effect of palm biodiesel fuel on the performance and emission of the automotive diesel engine", *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, (2008).

- [143] Afşar, M., "Bir dizel motorda atık biyodizel kullanımının yanma karakteristiklerine etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi*, Makine Mühendisliği, (2015).
- [144] Haşimoğlu, C., İcingür, Y., Özsert, İ., "Turbo şarjlı bir dizel motorda yakıt olarak biyodizel kullanılmasının motor performans ve egzoz emisyonlarına etkisi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(1), (2008).
- [145] Lapuerta, M., Armas, O., Rodriguez-Fernandez, J., "Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions", *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(2), 198-223, (2008).
- [146] Reşitoğlu, İ.A., "Atık yağlardan üretilmiş biyodizelin dizel motor performans ve emisyonuna etkisinin deneysel olarak incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Mersin Üniversitesi*, Makine Eğitimi, (2010).
- [147] Rakopoulos, C.D., E.G.G., *Diesel engine transient operation-principles of operation and simulation analysis*, Springer-Verlag London Limited, Finland, (2009).
- [148] Monyem, A. ve Van Gerpen, J.H., "The effect of biodiesel oxidation on engine performance and emissions", *Biomass and Bioenergy*, 20(4), 317-325, (2001).
- [149] Tan, P.-q., Hu, Z.-y., Lou, D.-m., Li, Z.-j., "Exhaust emissions from a light-duty diesel engine with *Jatropha* biodiesel fuel", *Energy*, 39(1), 356-362, (2012).
- [150] Nabi, M.N., Akhter, M.S., Shahadat, M.M.Z., "Improvement of engine emissions with conventional diesel fuel and diesel-biodiesel blends", *Bioresource Technology*, 97(3), 372-378, (2006).
- [151] Altıparmak, D., Keskin, A., Koca, A., Gürü, M., "Alternative fuel properties of tall oil fatty acid methyl ester-diesel fuel blends", *Bioresource Technology*, 98(2), 241-246, (2007).
- [152] Sherwani, A., Yadav, A., Karimi, M., "Experimental study on the performance and emission characteristics of a four stroke diesel engine running with mahua oil ethyl ester", *Int J Sustain Dev Green Econ*, 2(1), 8, (2013).
- [153] Ong, H.C., et al., "Engine performance and emissions using *Jatropha curcas*, *Ceiba pentandra* and *Calophyllum inophyllum* biodiesel in a CI diesel engine", *Energy*, 69, 427-445, (2014).

- [154] Usta, N., vd., "Combustion of biodiesel fuel produced from hazelnut soapstock/waste sunflower oil mixture in a diesel engine", *Energy Conversion and Management*, 46(5), 741-755, (2005).
- [155] Canakci, M., "Production of biodiesel from feedstocks with high free fatty acids and its effect on diesel engine performance and emissions", Doktora Tezi, *Iowa Universitesi*, Makine Mühendisliği, ABD, (2001).
- [156] Sabancı, A., Ören, M., Yaşar, B., Öztürk, H., Atal, M., "Türkiye’de biyodizel ve biyoetanol üretiminin tarım sektörü açısından değerlendirilmesi", *Ziraat Mühendisliği VII. Teknik Kongresi*, 11-15, (2010).
- [157] Tat, M.E., vd., "The speed of sound and isentropic bulk modulus of biodiesel at 21 C from atmospheric pressure to 35 MPa", *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 77(3), 285-289, (2000).
- [158] Al-Dawody, M.F. ve Bhatti, S., "Effect of soybean oil biofuel blending on the performance and emissions of Diesel engine using diesel-rk software", *International Journal of Engineering Science and Technology*, 3(6), (2011).
- [159] Al-Dawody, M.F., "Theoretical study for the influence of biodiesel addition on the combustion, performance and emissions parameters of single cylinder diesel engine", *JBU Engineering Sciences*, 5(25), 2017.
- [160] Buyukkaya, E., "Effects of biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics", *Fuel*, 89(10), 3099-3105, (2010).
- [161] Sayin, C., Gumus, M., Canakci, M., "Effect of fuel injection pressure on the injection, combustion and performance characteristics of a DI diesel engine fueled with canola oil methyl esters-diesel fuel blends", *Biomass and Bioenergy*, 46, 435-446, (2012).
- [162] Gumus, M., Sayin, C., Canakci, M., "Effect of fuel injection timing on the injection, combustion, and performance characteristics of a direct-injection (DI) diesel engine fueled with canola oil methyl ester– diesel fuel blends", *Energy & Fuels*, 24(5), 3199-3213, (2010).
- [163] Utlu, Z. ve Koçak, M.S., "The effect of biodiesel fuel obtained from waste frying oil on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions", *Renewable Energy*, 33(8), 1936-1941, (2008).

# **EKLER**

## 8. EKLER

### EK A – Mikrodalga Destekli Biyodizel Reaktörü Faydalı Model Belgesi

  
**TURK  
PATENT**  
TÜRK PATENT VE MARKA KURUMU

# FAYDALI MODEL BELGESİ

**No: TR 2016 18918 Y**

Buluş Başlığı

**Mikrodalga veya Elektrikli Rezistans Destekli Biyodizel Reaktör  
Tasarımı ve Biyodizel Üretim Yöntemi**

Başvuru sahibi

**HAKAN SERHAD SOYHAN  
VELİ GÖKHAN DEMİR**

Bu belge, 6769 sayılı Sınai Mülkiyet Kanununun Geçici 1 nci maddesi uyarınca  
Mülga 551 sayılı Patent Haklarının Korunması Hakkında Kanun Hükmünde  
Kararname kapsamında 20/12/2016 tarihinden itibaren 10 yıl süre ile korunmak  
üzere 21/12/2017 tarihinde verilmiştir.

  
**Prof. Dr. Habip ASAN**  
Başkan



## EK A – Mikrodalga Destekli Biyodizel Reaktörü Faydalı Model Belgesi



(10) TR 2016 18918 Y

### FAYDALI MODEL BELGESİ

- (21) Başvuru Numarası  
u 2016/18918
- (22) Başvuru Tarihi  
2016/12/20
- (43) Başvuru Yayın Tarihi  
2017/04/21
- (11) Başvuru Yayın No.  
TR 2016 18918 U
- (45) Faydalı Model Belgesinin Veriliş Tarihi  
2017/12/21
- (51) Buluşun tasnif sınıfları  
C07C 67/00  
C10L 1/00

(30) Rüçhan Bilgileri (32) (33) (31) (74) Vekil

İLHAN ÖZSOY (SAKARYA ÜNİVERSİTESİ TEKNOLOJİ  
GELİŞTİRME BÖLGELERİ YÖNETİCİ A.Ş.)  
ESENTEPE MAH. AKADEMİYOLU SOK. TEKNOLOJİ  
GELİŞTİRME BÖLGELERİ BİNA NO:10-A NO:103  
SERDİVAN/SAKARYA

(71) Faydalı Model Sahipleri

HAKAN SERHAD SOYHAN

Sakarya Üniversitesi Müh. Fak. Makina Müh. Böl. M7 Binası Serdivan Sakarya TÜRKİYE

VELİ GÖKHAN DEMİR

Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Bigadiç Balıkesir TÜRKİYE

(72) Buluşu Yapanlar

VELİ GÖKHAN DEMİR

Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Bigadiç Balıkesir TÜRKİYE

HAKAN SERHAD SOYHAN

Sakarya Üniversitesi Müh. Fak. Makina Müh. Böl. M7 Binası Serdivan Sakarya TÜRKİYE


(54) Buluş Başlığı

Mikrodalga veya Elektrikli Rezistans Destekli Biyodizel Reaktör Tasarımı ve Biyodizel Üretim Yöntemi

(57) Özet

## EK B – Soya Yağı Yağ Asitleri Kompozisyonu Raporu




Rapor No : 49362558-125.05-19 /42																																																							
Talep Eden : CAMYAĞ SAN. TIC. A.Ş.																																																							
Adres : BOYA VE VERNİK ORG. SAN. BÖL. DOĞU CAD. NO 3 TUZLA. İSTANBUL																																																							
Örnek : SOYA YAĞI	Son kullanım Trh : Üretim Tarihi : Enstitü örnek kayıt no: 16-2991/001 Kabul tarihi ve saati : 22/12/2016 15:00:00 Analiz Tarihi : 04/01/2017 - 04/01/2017																																																						
Parti / Lot No : Örnek Sayısı : 1 Örneğin getiriliş şekli : Elden Kabul anındaki durumu: Plastik kap																																																							
Şahit numune bilgileri : ( ) Müşteriye geri iade ( ) Şahit numune mevcut ( x ) Şahit numune alınmamıştır																																																							
<b>YAĞ ASIDI KOMPOZİSYONU</b>																																																							
<table border="1"><thead><tr><th>Yağ Asitleri</th><th>Sonuç (%)</th><th>Metot</th></tr></thead><tbody><tr><td>Miristik Asit (C14:0)</td><td>0.07</td><td>IUPAC IID19</td></tr><tr><td>Pentadekanoik Asit (C15:0)</td><td>0.01</td><td>IUPAC IID19</td></tr><tr><td>Palmitik Asit (C16:0)</td><td>10.17</td><td>IUPAC IID19</td></tr><tr><td>Palmitoleik Asit (C16:1)</td><td>0.07</td><td>IUPAC IID19</td></tr><tr><td>Heptadekanoik Asit (C17:0)</td><td>0.08</td><td>IUPAC IID19</td></tr><tr><td>Stearik Asit (C18:0)</td><td>4.58</td><td>IUPAC IID19</td></tr><tr><td>Elaidik Asit (C18:1n9t)</td><td>0.02</td><td>IUPAC IID19</td></tr><tr><td>Oleik Asit (C18:1n9c)</td><td>21.83</td><td>IUPAC IID19</td></tr><tr><td>Linoleik Asit (C18:2n6c)</td><td>53.32</td><td>IUPAC IID19</td></tr><tr><td>Araşidik Asit (C20:0)</td><td>0.32</td><td>IUPAC IID19</td></tr><tr><td>γ-Linolenik Asit (C18:3n6)</td><td>0.04</td><td>IUPAC IID19</td></tr><tr><td>cis-11-Eikosenoik Asit (C20:1)</td><td>0.20</td><td>IUPAC IID19</td></tr><tr><td>α-Linolenik Asit (C18:3n3)</td><td>7.14</td><td>IUPAC IID19</td></tr><tr><td>cis-11,14-Eikosadlenoik Asit(C20:2)</td><td>0.03</td><td>IUPAC IID19</td></tr><tr><td>Behenik Asit (C22:0)</td><td>0.32</td><td>IUPAC IID19</td></tr><tr><td>Trikosanoik Asit(C23:0)</td><td>0.03</td><td>IUPAC IID19</td></tr><tr><td>Lignoserik Asit (C24:0)</td><td>0.10</td><td>IUPAC IID19</td></tr></tbody></table>	Yağ Asitleri	Sonuç (%)	Metot	Miristik Asit (C14:0)	0.07	IUPAC IID19	Pentadekanoik Asit (C15:0)	0.01	IUPAC IID19	Palmitik Asit (C16:0)	10.17	IUPAC IID19	Palmitoleik Asit (C16:1)	0.07	IUPAC IID19	Heptadekanoik Asit (C17:0)	0.08	IUPAC IID19	Stearik Asit (C18:0)	4.58	IUPAC IID19	Elaidik Asit (C18:1n9t)	0.02	IUPAC IID19	Oleik Asit (C18:1n9c)	21.83	IUPAC IID19	Linoleik Asit (C18:2n6c)	53.32	IUPAC IID19	Araşidik Asit (C20:0)	0.32	IUPAC IID19	γ-Linolenik Asit (C18:3n6)	0.04	IUPAC IID19	cis-11-Eikosenoik Asit (C20:1)	0.20	IUPAC IID19	α-Linolenik Asit (C18:3n3)	7.14	IUPAC IID19	cis-11,14-Eikosadlenoik Asit(C20:2)	0.03	IUPAC IID19	Behenik Asit (C22:0)	0.32	IUPAC IID19	Trikosanoik Asit(C23:0)	0.03	IUPAC IID19	Lignoserik Asit (C24:0)	0.10	IUPAC IID19	
Yağ Asitleri	Sonuç (%)	Metot																																																					
Miristik Asit (C14:0)	0.07	IUPAC IID19																																																					
Pentadekanoik Asit (C15:0)	0.01	IUPAC IID19																																																					
Palmitik Asit (C16:0)	10.17	IUPAC IID19																																																					
Palmitoleik Asit (C16:1)	0.07	IUPAC IID19																																																					
Heptadekanoik Asit (C17:0)	0.08	IUPAC IID19																																																					
Stearik Asit (C18:0)	4.58	IUPAC IID19																																																					
Elaidik Asit (C18:1n9t)	0.02	IUPAC IID19																																																					
Oleik Asit (C18:1n9c)	21.83	IUPAC IID19																																																					
Linoleik Asit (C18:2n6c)	53.32	IUPAC IID19																																																					
Araşidik Asit (C20:0)	0.32	IUPAC IID19																																																					
γ-Linolenik Asit (C18:3n6)	0.04	IUPAC IID19																																																					
cis-11-Eikosenoik Asit (C20:1)	0.20	IUPAC IID19																																																					
α-Linolenik Asit (C18:3n3)	7.14	IUPAC IID19																																																					
cis-11,14-Eikosadlenoik Asit(C20:2)	0.03	IUPAC IID19																																																					
Behenik Asit (C22:0)	0.32	IUPAC IID19																																																					
Trikosanoik Asit(C23:0)	0.03	IUPAC IID19																																																					
Lignoserik Asit (C24:0)	0.10	IUPAC IID19																																																					
Açıklamalar:																																																							
Sorumlu İmzalar:  53662 53652																																																							
Bu rapor ve sonuçları taleple bulunan kuruluş ve müşterilerince ticaret ve reklam amaçları ile kullanılamaz. Rapor tamamen veya kısmen çoğaltılamaz/yayınlanamaz. Raporde (*) işaretli analizler akredite edilmiştir. İmzasız analiz raporları geçersizdir.																																																							
Bu rapor 2 sayfa olup , 2 asıl( 1 asıl müşteriye, 1 asıl Enstitü arşivine) olarak hazırlanmıştır.	Sayfa 2 / 2																																																						

P.K 21, 41470 GEBZE(KOCAELI)  
T 0 262 677 20 00 F 0 262 641 23 09  
http://mam.tubitak.gov.tr

## EK C – AAY Yağ Asitleri Kompozisyonu Raporu





AB-0381-T  
11455  
12/14

Rapor No	: 49362558-181.06.03-	2860 / 11455
Talep Eden	: BALIKESİR ÜNİV.REKTÖRLÜĞÜ BAP BİRİMİ	
Adres	: KAT:5/502 ÇAĞIŞ YERLEŞKESİ 10145 BALIKESİR	
Örnek:ATIK YAĞ (AYÇİÇEK)		
Parti / Lot No	:	Son kullanım Trh :
Örnek Sayısı	: 1	Üretim Tarihi :
Örneğin getiriliş şekli	: Kargo ile	Enstitü örnek kayıt no: 14-2542/001
Kabul anındaki durumu:	Plastik kap	Kabul tarihi ve saati : 21/11/2014 14:00:00
		Analiz Tarihi : 27/11/2014 - 02/12/2014
Şahit numune bilgileri : ( ) Müşteriye geri iade ( ) Şahit numune mevcut ( x ) Şahit numune alınmamıştır		
Analiz	Sonuç	Yöntem
* Yağ asitleri kompozisyonu (katı ve sıvı yağlarda)	-	IUPAC IID19
* Miristik asit (C14:0)	0.07%	IUPAC IID19
* Palmitik asit (C16:0)	6.29%	IUPAC IID19
* Palmitoleik asit (C16:1)	0.10%	IUPAC IID19
* Heptadekanoik/margarik asit (C17:0)	0.03%	IUPAC IID19
* Stearik asit (C18:0)	3.91%	IUPAC IID19
* Linoleik asit (C18:2)	57.04%	IUPAC IID19
* Linolenik asit (C18:3)	0.05%	IUPAC IID19
* Araşidik asit (C20:0)	0.27%	IUPAC IID19
* Gadoleik/ekiekosenoik asit (C20:1)	0.13%	IUPAC IID19
* Behenik asit (C22:0)	0.71%	IUPAC IID19
* Lignoserik asit (C24:0)	0.24%	IUPAC IID19
* Oleik Asit (C18:1n9c)	28.58%	IUPAC IID19
Serbest yağ asitliği (katı ve sıvı yağlarda)	0.20% (oleik asit cinsinden)	AOCS Ca 5a 40
Açıklamalar:		
Sorumlu İmzalar:		
 53662		
Bu rapor ve sonuçları talepte bulunan kuruluş ve müşterilerince ticaret ve reklam amaçları ile kullanılamaz. Rapor tamamen veya kısmen çoğaltılamaz/yayınlanamaz. Raporda (*) işaretli analizler akredite edilmiştir. İmzasız analiz raporları geçersizdir.		
Bu rapor	2 sayfa olup , 2 asıl( 1 asıl müşteriye, 1 asıl Enstitü arşivine) olarak hazırlanmıştır.	Sayfa 2 / 2

P.K 21, 41470 GEBZE/KOCAELİ  
T 0 262 677 20 00 F 0 262 641 23 09  
http://www.mam.gov.tr

## EK D – AYB Detaylı Yakıt Analiz Raporu

	İnönü Üniversitesi Akaryakıt/Petrol Analiz Laboratuvarı (İNÖNÜ-PAL) Elazığ Yolu 15 km. 44280 MALATYA Tel:0422 3410767 Faks: 0422 3410407	Akreditasyon Kurum Adı: TÜRKAK Akreditasyon Belge No: AB-0316-T Geçerlilik Tarihi: 20 Nisan 2018	Rapor No: 2016-1175R Rapor Tarihi: 26.01.2018 Analiz Baş./Bitiş Tarihleri: 09.11.2016/07.12.2016					
	<b>Otobiodizel (2016-1175R) Analiz Raporu</b>							
Numune	Alınan	Yükümlünün Adı Soyadı/Unvanı-Lisans Numarası						
	Alanın	Adı, Soyadı	-	Unvanı	-			
		Şirketi ve Adresi	T.C. Balıkesir Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi/Çağış Yerleşkesi Kat:5/501 10145 BALIKESİR					
	Alımının	Yöntemi	-	Tarih	-			
Yeri		Ayçiçek ME						
Teslim	Tutanak No	-						
	Edenin	Adı, Soyadı	PTT Kargo	Unvanı	Görevli			
		Şirketi ve Adresi	PTT Kargo/MALATYA					
	Tarihi ve Saati	04.11.2016	No	KP01859124183				
	Şahit Numune	Var ( ) Yok (X)	Mühür	Var ( ) Yok (X)	Mühür No: - (Şartlı Kabul)			
Yazı Sayı No/Tarih	85048142/BİLA sayı/01.11.2016 (BAP(2016/09))							
ÖZELLİK	ÖZELLİK KODU	BİRİM	REFERANS SINIR DEĞERLERİ		ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ	ÖLÇÜM DEĞERİ	DENEY YÖNTEMİ	
			EN AZ	EN ÇOK				
Yoğunluk	100	kg/m <sup>3</sup>	880	900	±0,9	886,6	TS EN ISO 12185	
Viskozite (Akmazlık)	110	mm <sup>2</sup> /s	3,50	5,00	±0,044	4,369	TS 1451 EN ISO 3104	
Toplam Kirlilik	160	mg/kg	-	24	±1,9	21,0	TS EN 12682	
Oksidasyon Kararlılığı	170	h	8,0	-	-	-	TS EN 14112	
Parlama Noktası	200	°C	101	-	±1,7	170	TS EN ISO 3679	
Soguk Filtre Tıkanma Noktası	210	°C	-	+5 (Yaz) -15 (Kış)	±0,3	-3	TS EN 116	
Karbon Kalıntısı (%10 damıtma kalıntısında)	330	% (m/m)	-	-	±0,01	0,34	TS 6148 EN ISO 10370	
Metanol	421	% (m/m)	-	0,20	-	<0,01	TS EN 14110	
Su	500	mg/kg	-	500	±24,76	618,799	TS 6147 EN ISO 12937	
Sülfatlanmış Kül	520	% (m/m)	-	0,02	±0,0003	0,0065	TS ISO 3987 / ISO 3987 ASTM D 874	
Kükürt	540	mg/kg	-	10,0	±0,2	2,84	TS EN ISO 20846	
Fosfor	560	mg/kg	-	4,0	-	-	TS EN 14107	
Sodyum	570	mg/kg	-	5,0	-	-	TS EN 14108 TS EN 14538	
Potasyum	580	mg/kg	-	-	-	-	TS EN 14109	
Kalsiyum	590	mg/kg	-	5,0	-	-	TS EN 14538	
Magnezyum	600	mg/kg	-	-	-	-	TS EN 14538	
İyot Sayısı	620	g. iyot/100g	-	120	±0,5	115,7	TS EN 14111	
Gliserit	Monogliserit	651	% (m/m)	-	0,70	±0,02	0,46	TS EN 14105
	Digliserit	652	% (m/m)	-	0,20	±0,01	0,12	TS EN 14105
	Trigliserit	653	% (m/m)	-	0,20	±0,008	0,078	TS EN 14105
Gliserol	Serbest Gliserol	661	% (m/m)	-	0,02	±0,0002	0,002	TS EN 14105
	Toplam Gliserol	662	% (m/m)	-	0,25	±0,01	0,14	TS EN 14105
Ester	670	% (m/m)	96,5	-	±5,2	96,5	TS EN 14103	
Linolenik asit metil esteri	680	% (m/m)	-	12,0	±0,02	0,31	TS EN 14103	
Asit sayısı	690	mg KOH/g	-	0,50	±0,002	0,28	TS EN 14104	
Yağ asiti metil esterleri	-	% (m/m)	-	-	±2,95	92,48	TS EN 14078	
Çoklu doymamış metil esterleri	700	% (m/m)	-	1,0	-	-	TS EN 15779	
Setan sayısı	820	-	51,0	-	±0,1	80,7	TS EN 15195	
Bakır şerit korozyonu	910	derece	Sınıf 1		-	1a	TS 2741 EN ISO 2180	
Net Yanma Isısı	-	MJ/kg	-	-	±0,3	39,86	DIN 51900-2/DIN 51900-3	
Akma Noktası	-	°C	-	-	±0,4	-3	TS 1233 ISO 3016	

(Ş): Şahit Numune. (EPDK): Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (\*): Akredite değildir.



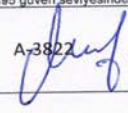

Bu rapor 1 (bir) sayfa olup, 2 (iki) asıl (1 asıl müşteriye ve 1 asıl İNÖNÜ-PAL arşivine) olarak hazırlanmıştır. Laboratuvarın izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve kaşesiz raporlar geçersizdir. Deney sonuçları, analizi yapılan numuneye ait olup 3 (üç) ay (bu süre şahit saklama süresi dikkate alınarak verilmiştir) içinde itiraz edilebilir.

**AÇIKLAMALAR: Revizyona uğrayan Analiz Raporu (Proje Numarasının eklenmesi ve numune isminin (Numune Alımının Yeri) eklenmesi nedeninden dolayı revize olmuştur.) geçerli olup revizyondan önceki Analiz Raporu geçersizdir.**

Sorumlu İmzalar T.C. İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ AKARYAKIT/PETROL ANALİZ LABORATUVARI (İNÖNÜ-PAL)

Kaşe ve Tarih: 14148 / 141608

## EK E – KYB Detaylı Yakıt Analiz Raporu

	TÜRK AKREDİTASYON KURUMU (TÜRKAK) TARAFINDAN AKREDİTE EDİLMİŞTİR İnönü Üniversitesi Akaryakıt/Petrol Analiz Laboratuvarı (İNÖNÜ-PAL) Elazığ Yolu 15 km. 44280 Malatya Tel: 0422 341 07 67 Faks: 0422 341 04 07			AB-0316-T			
	Analiz Baş./BitişTarihleri:27.02.2017/03.08.2017			2017-257R			
31.10.2017							
<b>OTOBİYODİZEL (2017-0257 (R)) ANALİZ RAPORU</b>							
Numune	Alınan Alanın	Yükümlünün Adı/Soyadı/Unvanı-Lisans Numarası		Ünvanı			
	Alımının	Adı,Soyadı	T.C. Balıkesir Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi/Çalış Yerleşkesi Kat:5/501 10145 BALIKESİR				
Teslim	Edeyin	Yöntemi	Tarih				
	Teslim Tarihi Ve Saati	Yeri	Kanola ME				
Şahit Numune	Adı, Soyadı	Tutanak No	Ünvanı				
	Şirketi Ve Adresi	Adı, Soyadı	PTT Kargo				
Tarih /Yazı Sayı No	Tarih /Yazı Sayı No	Şirketi Ve Adresi	PTT Kargo/MALATYA				
	Şahit Numune	Var()	Yok(X)				
Mühür	Var()	Yok(X)		Mühür No: -(Şartlı Kabul)			
	Tarih /Yazı Sayı No	21.02.2017/8.30.2.BAÜ.06.01.00 (BAP[2016/09])					
ÖZELLİK	ÖZELLİK KODU	BİRİM	REFERANS SINIR DEĞERLERİ	ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ	ÖLÇÜM DEĞERİ	DENEY YÖNTEMİ	
			EN AZ	EN ÇOK			
Yoğunluk(15 °C)	100	kg/m <sup>3</sup>	860	900	±0,9	882,9	TS EN ISO 12185
Viskozite (Akmazlık, 40 °C)	110	mm <sup>2</sup> /s	3,50	5,00	±0,044	4,423	TS 1451 EN ISO 3104
Toplam Kirlilik	160	mg / kg	-	24	±1,5	16,3	TS EN 12662
Oksidasyon Kararlılığı	170	h	8	-	-	-	TS EN ISO 14112
Parlama Noktası	200	°C	101	-	±1,1	110,5	TS EN ISO 3679
Soğuk Filtre Tıkanma Noktası	210	°C	-	+5 (Yaz)/-15(Kış)	±1,2	-12	TS EN 116
Karbon Kalıntısı	330	%(m/m)	-	0,30	-	-	TS EN ISO 10370
Metanol		%(m/m)	-	0,20	-	<0,01	TS EN 14110
Su	500	mg/kg	-	200	±9,495	316,494	TS 6147 EN ISO 12937
Sülfatlanmış Kül		%(m/m)	-	0,02	±0,0003	0,001	TS ISO 3987
Kükürt		mg/kg	-	10,0	±0,10	1,42	TS EN ISO 20846
Fosfor		mg/kg	-	4,0	-	-	TS EN 14107
Sodyum		mg/kg	-	-	-	-	TS EN 14108
Potasyum		mg/kg	-	5,0	-	-	TS EN 14109
Kalsiyum		mg/kg	-	-	-	-	TS EN 14538
Magnezyum		mg/kg	-	5,0	-	-	TS EN 14538
İyot Sayısı		g. iyot/100g	-	120	±0,6	104,0	TS EN 14111
Gliserit	Monogliserit	%(m/m)	-	0,70	±0,01	0,29	TS EN 14105
	Diğliserit	%(m/m)	-	0,20	±0,01	0,1	
	Trigliserit	%(m/m)	-	0,20	±0,004	0,043	
Gliserol	Serbest Gliserol	%(m/m)	-	0,02	±0,0001	0,0022	TS EN 14105
	Toplam Gliserol	%(m/m)	-	0,25	±0,004	0,095	
Ester		%(m/m)	96,5	-	±4,8	96,9	TS EN 14103
Linolenik asit metil esteri		%(m/m)	-	12,0	±0,02	0,39	TS EN 14103
Asit sayısı		mg KOH/g	-	0,50	±0,01	0,2	TS EN 14104
Yağ asiti metil esterleri		%(m/m)	-	-	±0,12	3,90	TS EN 14078
Çoklu doymamış metil esterleri		%(m/m)	-	1,0	-	-	TS EN 15779
Bakır şerit korozyonu		Derece	Sınıf 1		-	1a	TS 2741 EN ISO 2160
Net Yanma Isısı		MJ/kg	-	-	-	39,91	TS 1740
Akma Noktası		°C	-	-	±0,01	0	TS 1233 ISO 3016
Setan Sayısı			-	-	-	55,6	TS EN 15195
(S): Şahit Numune. (1): Laboratuvar İç metodudur. (EPDK): Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (*): Akredite değildir. Bu rapor 1 (bir) sayfa olup, 2 (iki) asil (1 asil müşteriye ve 1 asil İNÖNÜ-PAL arşivine) olarak hazırlanmıştır.Laboratuvarın izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve kaşesiz raporlar geçerlidir. Deney sonuçları, analizi yapılan numuneye ait olup 3 (üç) ay (bu süre şahit saklama süresi dikkate alınarak verilmiştir) içinde iliraz edilebilir. Ölçüm belirsizlikleri (olması halinde) k=2 olan genişletme katsayısı ile çarpılmış, %95 güven seviyesindedir.							
A-382 							
Açıklamalar:							
Kaşe/Tarih 31.10.2017 							
Doküman No:TY-F-169Rev.No/Tarih:06/26.09.2017							

# EK F – SYB Detaylı Yakıt Analiz Raporu

	TÜRK AKREDİTASYON KURUMU (TÜRKAK) TARAFINDAN AKREDİTE EDİLMİŞTİR İnönü Üniversitesi Akaryakıt/Petrol Analiz Laboratuvarı (İNÖNÜ-PAL) Elazığ Yolu 15 km. 44280 Malatya Tel: 0422 341 07 67 Faks: 0422 341 04 07			AB-0316-T
	Analiz Baş./BitişTarihleri:27.02.2017/03.08.2017			2017-258R
				31.10.2017

## OTOBİYODİZEL (2017-0258(R) ANALİZ RAPORU

Numune	Alınan Alanın	Yükümlünün Adı/Soyadı/Unvanı-Lisans Numarası	Ünvanı	
	Alımının	Adı,Soyadı Şirketi Ve Adresi	T.C. Balıkesir Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi/Çağış Yerleşkesi Kat:5/501 10145 BALIKESİR	
		Yöntemi	Soya ME	Tarih
		Yeri	Tutanak No	
Teslim	Edenin	Adı, Soyadı Şirketi Ve Adresi	PTT Kargo PTT Kargo/MALATYA	Ünvanı Görevli
	Tarihi Ve Saati	24.02.2017		No KP01900947495
	Şahit Numune	Var() Yok(X)	Mühür	Var() Yok(X) Mühür No: -(Şartlı Kabul)
	Tarih /Yazı Sayı No	21.02.2017/B.30.2.BAÜ.06.01.00 (BAP(2016/09))		

ÖZELLİK	ÖZELLİK KODU	BİRİM	REFERANS SINIR DEĞERLERİ		ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ	ÖLÇÜM DEĞERİ	DENEY YÖNTEMİ
			EN AZ	EN ÇOK			
Yoğunluk(15 °C)	100	kg/m <sup>3</sup>	860	900	±0,9	885,6	TS EN ISO 12185
Viskozite (Akmazlık, 40 °C)	110	mm <sup>2</sup> /s	3,50	5,00	±0,041	4,133	TS 1451 EN ISO 3104
Toplam Kirlilik	180	mg / kg	-	24	±1,0	10,6	TS EN 12662
Oksidasyon Kararlılığı	170	h	8	-			TS EN ISO 14112
Parlama Noktası	200	°C	101	-	±1,2	121,0	TS EN ISO 3679
Soğuk Filtre Tıkanma Noktası	210	°C	-	+5 (Yaz)/-15(Kış)	±0,3	-3	TS EN 116
Karbon Kalıntısı	330	%(m/m)	-	0,30			TS EN ISO 10370
Metanol		%(m/m)	-	0,20	-	<0,01	TS EN 14110
Su	500	mg/kg	-	200	±12,04	401,317	TS 6147 EN ISO 12937
Sülfatlanmış Kül		%(m/m)	-	0,02	±0,0009	0,017	TS ISO 3987
Kükürt		mg/kg	-	10,0	±0,2	3,0	TS EN ISO 20846
Fosfor		mg/kg	-	4,0			TS EN 14107
Sodyum			-				TS EN 14108
Potasyum		mg/kg	-	5,0			TS EN 14538
Kalsiyum			-				TS EN 14109
Magnezyum		mg/kg	-	5,0			TS EN 14538
iyot Sayısı		g. iyot/100g	-	120	±0,6	107,6	TS EN 14111
Gliserit	Monogliserit	%(m/m)	-	0,70	±0,01	0,33	TS EN 14105
	Digliserit	%(m/m)	-	0,20	±0,006	0,094	
	Trigliserit	%(m/m)	-	0,20	±0,004	0,038	
Gliserol	Serbest Gliserol	%(m/m)	-	0,02	±0,0001	0,0020	TS EN 14105
	Toplam Gliserol	%(m/m)	-	0,25	±0,004	0,104	
Ester		%(m/m)	96,5	-	±4,9	98,4	TS EN 14103
Linolenik asit metil esterleri		%(m/m)	-	12,0	±0,4	7,4	TS EN 14103
Asit sayısı		mg KOH/g	-	0,50	±0,01	0,1	TS EN 14104
Yağ asitli metil esterleri		%(m/m)	-	-	±0,13	4,12	TS EN 14078
Çoklu doymamış metil esterleri		%(m/m)	-	1,0			TS EN 15779
Bakır şerit korozyonu		Derece		Sınıf 1	-	1a	TS 2741 EN ISO 2160
Net Yanma Isısı		MJ/kg	-	-		39,735	TS 1740
Akma Noktası		°C	-	-	±0,4	3	TS 1233 ISO 3016
Setan Sayısı			-	-		52,7	TS EN 15195

(S): Şahit Numune. (1): Laboratuvar İç metodudur. (EPDK): Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (\*): Akredite değildir.  
 Bu rapor 1 (bir) sayfa olup, 2 (iki) asıl (1 asıl müşteriye ve 1 asıl İNÖNÜ-PAL arşivine) olarak hazırlanmıştır. Laboratuvarın izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve kaşesiz raporlar geçersizdir. Deney sonuçları, analizi yapılan numuneye ait olup 3 (üç) ay (bu süre şahit saklama süresi dikkate alınarak verilmiştir) içinde iliraz edilebilir. Ölçüm belirsizlikleri (olması halinde) k=2 olan genişletme katsayısı ile çarpılmış, %95 güven seviyesindedir.

A-3822

Açıklamalar:

Kaşe/Tarih 31.10.2017

A-1608

Doküman No:TY-F-169Rev.No/Tarih:06/26.09.2017