



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

**BİYODİZEL YAKIT KARIŞIMLARININ VE PÜSKÜRTME
BASINCININ MOTOR PERFORMANSINA VE YANMAYA OLAN
ETKİLERİ**

FARUK BAKAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. ALİ ETEM GÜREL**

DÜZCE, 2019

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİYODİZEL YAKIT KARIŞIMLARININ VE PÜSKÜRTME
BASINCININ MOTOR PERFORMANSINA VE YANMAYA OLAN
ETKİLERİ

Faruk BAKAN tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Ali Etem GÜREL

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Ali Etem GÜREL

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Suat SARIDEMİR

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KARAGÖZ

Karabük Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 26/07/2019

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

26 Temmuz 2019

Faruk BAKAN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve bu tezin hazırlanması süresince gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Doç. Dr. Ali Etem GÜREL'e, yine çalışmalarımın her adımında sürekli destek olan hocam Doç. Dr. Suat SARIDEMİR'e en içten dileklerimle teşekkür ederim. Deneylerin gerçekleştirilmesi aşamasındaki destekleri için Arş. Gör. Ümit AĞBULUT'a da teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

26 Temmuz 2019

Faruk BAKAN

İÇİNDEKİLER

ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	vii
SİMGELER	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
2. DİZEL MOTORLARINDA YANMA OLAYI	9
2.1. DİZEL MOTORLARDA YANMA OLAYI VE SAFHALARI.....	9
2.1.1. Tutuşma Gecikmesi Periyodu	10
2.1.2. Ani Yanma Periyodu	10
2.1.3. Kontrollü Yanma Periyodu.....	10
2.1.4. Art Yanma Periyodu	11
3. DİZEL MOTORLARDA ALTERNATİF YAKIT OLARAK KULLANILAN BİYODİZEL VE ÖZELLİKLERİ	12
3.1. BİYODİZELİN TANIMI	12
3.2. BİYODİZELİN TARİHSEL GELİŞİMİ	12
3.3. BİYODİZELİN FİZİKSEL VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİ.....	14
3.4. BİYODİZEL YAKITININ KARAKTERİSTİKLERİ	16
3.4.1. Asit numarası.....	16
3.4.2. Serbest Gliserin	17
3.4.3. Toplam Gliserin.....	17
3.4.4. Fosfor İçeriği.....	17
3.4.5. Biyolojik Olarak Bozunabilme.....	17
3.4.6. Toksik Etki.....	17
3.4.7. Depolama	18
3.4.8. İyot Sayısı.....	18
3.4.9. Viskozite ve Akış Özellikleri	18
3.4.10. Yoğunluk.....	19
3.4.11. Alevlenme Noktası	19

3.4.12. Bulutlanma Noktası.....	19
3.4.13. Kalori Değeri	19
3.4.14. Soğukta Akış Özelliği.....	20
3.4.15. Akma Noktası	20
3.4.16. Setan Sayısı	20
3.4.17. Isıl Değer	21
3.4.18. Yağlayıcılık	21
3.4.19. Yağlama Yağının Seyrelmesi.....	21
3.4.20. Karbon Artığı	22
3.4.21. Kükürt İçeriği.....	22
3.4.22. Su İçeriği.....	22
3.4.23. Oksidasyon Kararlılığı	22
3.5. DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE BİYODİZEL	23
3.5.1. Dünyada Biyodizel.....	23
3.5.2. Türkiye’de Biyodizel	25
3.6. BİTKİSEL VE ATIK BİTKİSEL YAĞLARDAN BİYODİZEL ÜRETİM PROSESİ.....	26
3.6.1. Bitkisel Yağlardan Biyodizel Üretimi	27
3.6.2. Atık Bitkisel Yağlardan Biyodizel Üretimi.....	30
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	32
4.1. BİYODİZEL ÜRETİMİ	32
4.2. MOTOR TEST DÜZENEGİ	34
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	37
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	45
7. KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ	54

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Dizel motorda basınç – krank açısı ve püskürtme seyri	9
Şekil 3.1. Biyodizel döngüsü	15
Şekil 3.2. Transesterifikasyon işlemi genel akış şeması	28
Şekil 3.3. Trigliseritlerin alkol ile transesterifikasyonu	29
Şekil 4.1. Transesterifikasyon yöntemi ile biyodizel üretimi akış şeması	33
Şekil 4.2. Deneysel düzeneğin şematik gösterimi.....	34
Şekil 4.3. Deneysel sistem.....	35
Şekil 5.1. 2,5 Nm motor yükü için silindir basıncı ve ısı yayılım oranının krank miline göre değişimi	38
Şekil 5.2. 5 Nm motor yükü için silindir basıncı ve ısı yayılım oranının krank miline göre değişimi.....	39
Şekil 5.3. 7,5 Nm motor yükü için silindir basıncı ve ısı yayılım oranının krank miline göre değişimi	41
Şekil 5.4. 10 Nm motor yükü için silindir basıncı ve ısı yayılım oranının krank miline göre değişimi	42
Şekil 5.5. 210 bar enjeksiyon basıncı için ÖYT değerinin değişimi.....	43
Şekil 5.6. 230 bar enjeksiyon basıncı için ÖYT değerinin değişimi.....	43

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1. Biyodizel ve dizel yakıtların özellikleri	14
Çizelge 3.2. B100 ve B20'nin dizele göre emisyon değerlerinin azalma oranları	16
Çizelge 3.3. AB biyoyakıt kullanımı ve hedefleri	24
Çizelge 4.1. Deney motorunun teknik özellikleri	37
Çizelge 4.2. Tork ölçüm sistemi ve özellikleri	37



KISALTMALAR

AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)
B0	%100 Dizel Yakıt
B10	%10 Biyodizel Katkılı Dizel Yakıt
B20	%20 Biyodizel Katkılı Dizel Yakıt
B50	%50 Biyodizel Katkılı Dizel Yakıt
B100	%100 Biyodizel
DIN	Deutsche Industrie Norm veya Deutsches Institut für Normung (Alman Endüstri Normu ya da Alman Standartlar Enstitüsü)
EBB	European Biodiesel Board (Avrupa Biyodizel Kurulu)
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
EN	European Norm (Avrupa Standartları)
ISO	International Organization for Standardization (Uluslararası Standard Organizasyonu)
ÖTV	Özel Tüketim Vergisi
ÖYT	Özgöl Yakıt Tüketimi
PP	Pour Point (akma noktası)
ppm	Parts Per Million (milyonda bir)
TG	Tutuşma Gecikmesi
TS	Türk Standartları
YAME	Yağ Asidi Metil Esteri
YEGM	Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü

SİMGELER

CH ₃ OH	Metanol
CH ₄	Metan
CO	Karbonmonoksit
CO ₂	Karbondioksit
D ₂	Ham petrol işleme yoluyla elde edilen bir ikinci damıtma gaz yağı
HCl	Hidroklorik asit
H ₂ O	Su
H ₂ SO ₄	Sülfürik asit
H ₃ PO ₄	Fosforik asit
KOH	Potasyum hidroksit
NaOH	Sodyum hidroksit
NO	Azot oksit
NO _x	Azot oksitler
O ₂	Oksijen
SO _x	Kükürt oksitler
TBA	Tersiyer bütıl alkol

ÖZET

BİYODİZEL YAKIT KARIŞIMLARININ VE PÜSKÜRTME BASINCININ MOTOR PERFORMANSINA VE YANMAYA OLAN ETKİLERİ

Faruk BAKAN
Düzce Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışman: Doç. Dr. Ali Etem GÜREL
Temmuz 2019, 53 sayfa

Dünya genelinde motorlu taşıt sayısı giderek artmaktadır. Son zamanlarda elektrikli araç teknolojisi ilerleme eğilimine girse de içten yanmalı motorlara göre üstünlükleri yeterli seviyede değildir. Günümüzde motorlu taşıtlar çoğaldıkça enerji ihtiyacı da o ölçüde artmaktadır. İçten yanmalı motorlar için enerji ihtiyacı petrol kaynaklı ürünler ile elde edilmektedir. Her geçen gün artan motorlu taşıtlar dikkate alındığında petrol rezervlerinin hızla tükendiği görülmektedir. Bu sebeple bilim dünyası alternatif yakıt olanaklarını araştırmaya başlamışlardır. Yapılan araştırmalarda bitkisel veya hayvansal yağlardan üretilen biyodizel yakıtı üzerinde durulmuştur. Biyodizel, bileşenlerinde oksijen bulunan, ancak sülfür bulunmayan ve zehirleyici olmayan, doğada çözünebilir olan yenilenebilir bir alternatif dizel motor yakıtıdır. Standart dizel yakıttan daha az karbon monoksit ve hidrokarbon çıkardıkları görülmüştür. Dizel motorlarda farklı ilave bir düzenek ihtiyacı olmadan kullanılabilirler. Dizel motorların performansı, yakıt sistemi özelliklerinden ve püskürtülen yakıtın kalitesinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu çalışmada, standart dizel yakıt ile mısır yağı metil esteri (biyodizel) karışımının, tek silindirli dizel motorda yanma karakteristiklerine olan etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler standart dizel yakıtta %10, %20 ve %50 oranlarında katılan mısır yağı metil esteri yakıtı ile 210 bar ve 230 bar enjektör basınçlarında 2,5 Nm, 5 Nm, 7,5 Nm ve 10 Nm motor yüklerinde gerçekleştirilmiştir.

Anahtar sözcükler: Mısır yağı metil esteri, Dizel motor, Yanma, Performans.

ABSTRACT

THE EFFECTS OF BIODIESEL FUEL BLENDS AND INJECTION PRESSURE ON ENGINE PERFORMANCE AND COMBUSTION

Faruk BAKAN

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Manufacturing

Engineering

Master Thesis

Consultant: Associate Professor Ali Etem GÜREL

July 2019, 53 pages

The number of motor vehicles is increasing worldwide. Although electric vehicle technology has recently tended to progress, its superiority over internal combustion engines is not sufficient. Today, as the number of motor vehicles increase, so does the need for energy. The energy requirement for internal combustion engines is obtained by petroleum products. Considering the increase in the number of motor vehicles, oil reserves are depleting rapidly. For this reason, the science world has begun to seek alternative fuel possibilities. In researches, biodiesel fuel which can be produced from vegetable or animal oils has been emphasized. Biodiesel is an alternative diesel engine fuel that contains oxygen, that is sulfur-free, non-toxic, biodegradable and renewable in nature. They emit less carbon monoxide and hydrocarbons than diesel fuel. They can be used in diesel engines without the need for any modifications. The performance of diesel engines is significantly affected by the injection system characteristics and the quality of the fuel injected. In this study, the effects of standard diesel fuel and corn oil methyl ester (biodiesel) blends on combustion characteristics in a single-cylinder diesel engine are investigated experimentally. Tests were carried out with corn oil methyl ester fuel blended into the standard diesel fuel with 2,5 Nm, 5 Nm, 7,5 Nm and 10 Nm engine loads at 210 bar and 230 bar injector pressures in 10%, 20% and 50% by volume.

Keywords: Corn oil methyl ester, Diesel engine, Combustion, Performance.

1. GİRİŞ

Konvansiyonel enerji kaynaklarının gittikçe azalmasına bağılı olarak günümüzde enerji, en pahalı üretim girdilerinden birisi konumundadır. Dünyada geçmişten günümüze kadar yaşanan nüfus artışındaki gelişim dikkate alındığında enerji kullanımının nüfus artış oranından daha hızlı artması petrol esaslı yakıtların nihayetinde sürdürülemez olduğunu göstermektedir. Artan bu enerji ihtiyacından dolayı çok az değişlikle ulaşım yakıtları olarak kullanılabilen, sürdürülebilirliği olan ve sera gazı salımları oldukça az olan, petrol esaslı yakıtlara alternatif enerji kaynaklarına eğilim artmıştır [1].

Motorlu araç sanayinin en önemli enerji kaynağı petrol esaslı yakıtlardır. Petrol rezervlerinin giderek azalması ve kaynakların belli bölgelerde tespit edilmiş veya bulunmuş olması siyasi ve ekonomik krizleri ortaya çıkarmıştır. Petrol kaynaklarında giderek artan bu sorunlar alternatif yakıtlara eğilimi arttırmıştır. Bu kapsamda çok yeni olmayıp, ancak yenilenebilir enerji kaynağı olması ve dizel motorlarda da yakıt olarak kullanılabilmesi sebebiyle bitkisel yağlardan üretilen en önemli alternatif dizel yakıtının biyodizel olduğu yapılan araştırmalarla ortaya çıkarılmıştır. Biyodizel ismi ilk olarak 1992 yılında Amerika Ulusal Dizel Geliştirme Kuruluşu tarafından ortaya çıkarılmıştır. Hayvansal yağlar ile mısır, ayçiçeği ve soya fasulyesi gibi bitkilerin yağları biyodizel imalatında kullanılır. Biyodizel katkısız olarak kullanılabilirken petrol esaslı motorin ile karıştırılarak ta kullanılabilir [2].

“Biyo” kelimesi, yakıtın yenilenebilir ve biyolojik olduğunu, “dizel” kelimesi ise dizel motorlarda kullanılabildiğini ifade etmektedir. Biyodizel tabiat ortamında bozulabilir, içeriğinde oksijen bulunan ancak sülfür içermeyen yenilenebilir, alternatif dizel yakıt türüdür. Biyodizelin motor sisteminde farklı bir değişiklik yapılmadan kullanılabilmesi için standart dizel yakıtın taşıdığı özelliklere çok yakın bir yapıya sahip olması gerekmektedir [3].

Dizel motorlar üzerinde hiçbir değişikliğe gidilmeden kullanılabilen ve emisyonlar açısından da çevreyi daha az kirleten bir yakıttır. Ayrıca literatürde biyodizelin silindir içerisinde kalan kalıntıların çözülmesinde ve motorun hareketli parçalarının yağlanması artırarak motorun daha verimli çalışmasında pozitif katkı sağladığı ifade edilmektedir. Biyodizel yakıtı kükürt içermemektedir. Bundan dolayı sağlığa zararlı olan kükürt dioksit

(SO₂) emisyonu oluşturmamakta, doğada kolaylıkla çözünebilmekte ve böylece çevreye karşı zararlı etkileri asgari seviyede kalabilmektedir [4].

Biyodizel yakıtların alev alma sıcaklık değerinin yüksek olması depolanma özelliğinin güvenilirlik seviyesini arttırmaktadır. Toprak veya suya dökülme durumunda kirleticiliği diğer yakıt türlerine göre oldukça düşüktür. Bünyesindeki oksijen oranı %10-11 seviyesinde olup, setan sayıları 49 ile 62 arasında farklılık gösterir. Donma ve akma noktalarının düşük olması sebebiyle, biyodizel üretiminde mısır yağı, kanola yağı, susam yağı, pamuk yağı ve soya yağlarının kullanımı daha fazla tercih sebebi olmaktadır. Bununla birlikte biyodizel yakıtların önemli iki dezavantajı vardır. Bunlardan birisi, akma noktası sıcaklık değerinin, diğeri ise soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklık değerlerinin yüksek olmasıdır [5].

Dizel motorlarda egzoz emisyon değerlerini düşürmek için oksijenli yakıtların kullanılması mutlak ihtiyaçtır. Oksijenli yakıtlar saf halde veya petrol türevi yakıtlarla belli oranlarda karıştırılarak kullanılmaktadırlar [6]. Oksijenli yakıtlardan sadece etanol (C₂H₅OH); ısı değeri ve setan sayısının düşük olmasından, üretim maliyetinin yüksek olmasından, uzun tutuşma gecikmesine ve vuruntuya sebep olmasından dolayı alternatif yakıt olarak tercih edilmemektedir [7].

Dizel motorlarda kullanılacak yakıtların, motor ömrünü kısaltmadan, üretimi, taşınması ve depolanması esnasında sağlığa ve çevreye zarar vermemeleri gibi bazı önemli özellikleri taşımaları gerekmektedir. Ayrıca fiyatları düşük, yenilenebilir ve kesintisiz elde edilebilir olmalıdırlar. Amerika’da kanola ve soya, Avrupa’da ise kolza bitkisi biyodizel üretiminde en fazla kullanılan hammaddelerdir. Ülkemizde bu anlamda eskiden günümüze kadar ayçiçeği üretimi yaygın olarak yapılmakta olup, aspir ve kanola üretimi için Tarım ve Orman Bakanlığı çeşitli teşvikler vermektedir. Kolza, soya ve palm yağlarından da biyodizel üretilmektedir. Fakat, bu yağlardan elde edilen biyodizelin fiyatı dizel yakıtına yakın olduğundan bu yağların biyodizele dönüştürülmesi tercih edilmemektedir [8, 9].

2009 yılında Türkiye tarafından da imzalanan Kyoto Protokolü’nde, karbondioksit (CO₂) en önemli pay sahibidir. CO₂ emisyonu dünya çapında 2009 yılına göre 2010 yılında %4,6 artış göstermiştir. Atmosfere yayılan toplam CO₂ emisyonunun %36’sı petrol kaynaklı olup, bunun %22’si ulaştırma sektörünü kapsamaktadır [10]. Bu sektörde

ağırlıklı olarak hava taşıtları için de alternatif yakıt olarak biyoyakıtlar yer almaktadır [11].

Bugün geline nokta biyodizel üretiminde, yağ bitkileri, yağlı tohumlar, atık kızartma ve hayvansal yağlar kullanılmaktadır. Bitkisel yağlardan ise aspir, kanola, ayçiçek, soya, keten tohumu ve pamuk tohumu yağları kullanılmaktadır. Literatürde, çeşitli bitkisel yağlardan üretilen biyodizel ile standart dizel yakıt karışımlarının motor performansında ve egzoz emisyonlarında meydana getirdiği etkilerin incelendiği çok sayıda çalışmalar yapılmıştır. Ancak motor gürültü ve titreşimine olan etkilerinin incelendiği çalışmaların henüz yeterli seviyede olmadığı görülmüştür. Dizel motorlarda dizel yakıttan kaynaklanan egzoz emisyon değerlerini düşürmek için oksijenli yakıt kullanılması gereklidir. Oksijenli yakıtlar, petrol kökenli kaynaklardan üretilmediği için stratejik ve ekonomik bir önem taşımaktadır. Oksijenli yakıtların saf halde veya petrol türevi yakıtlarla oransal karışım yapılarak kullanılması ve egzoz emisyonlarını azaltma eğilimi, her zaman ilgilenilen bir durumdur [12].

Mevcut literatür çalışmalar detaylı bir biçimde incelendiğinde, biyodizelin üretimi, motorlarda kullanımı, performans analizleri, titreşim ve gürültü gibi farklı parametrelerin değerlendirilmesi gibi çok farklı çalışmalar bulunduğu görülmektedir. Aşağıdaki bölümde bu çalışmalardan bazıları özetlenmiştir.

Geyer ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, pamuk yağı ve pamuk yağı metil esteri, ayçiçek yağı, ayçiçek metil esteri, tek silindirli direk enjeksiyonlu (Avco-Bernard W-51 0,36 L) motorda 1/3, 2/3 ve tam yük koşullarında test yapılarak, performans ve egzoz emisyon verileri belirlenmiştir. Bitkisel yağların ve metil esterlerin dizel yakıta kıyasla NO_x emisyonlarında artış olduğu, partikül emisyonlarının ise ayçiçeği yağında yüksek, metil esterlerde ise düşük olduğu görülmüştür [13].

Yıldırım ve arkadaşları, 6 silindirli bir motorda biyodizel-dizel yakıt karışımlarını hacimsel olarak %20 (B20) ve %50 (B50) oranlarda ve %100 (B100) biyodizel yakıtı kullanarak motorda meydana gelen gürültü ve titreşim karakteristiklerini sabit devirde yüke bağlı olarak incelemişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde, en büyük titreşim değerinin B20 yakıtı ile 100 Nm yük altında olduğu tespit edilmiştir [14].

Tahir ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, ayçiçeği metil esteri içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılmış ve sonuçlar dizel yakıtı ile karşılaştırılmıştır. Yapılan motor testlerinden elde edilen güç eğrilerinde önemli derecede bir değişiklik olmadığı,

elde edilen azami gücün %60'lık diliminde özgül yakıt tüketiminin dizel yakıta kıyasla %6 oranında fazla olduğu görülmüştür. Bunun nedeni ise ayçiçeği metil esterinin ısı yayılım oranının dizel yakıta oranla %13 daha az olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir [15].

Karaosmanoğlu ve Aksoy yapmış oldukları çalışmada, seyreltme yöntemi ile atık kızartma yağından biyodizel elde etmişler ve viskozitesini düşürmüşlerdir. Bu yakıtı standart dizel yakıt ile farklı oranlarda karıştırarak elde edilen karışımların fiziksel özelliklerini incelemişler ve %40 civarına kadar olan karışım oranlarındaki yakıtın kullanılabilirliğini tespit etmişlerdir [16].

Yılmaz ve Morton, atık sebze yağlarından biyodizel elde ederek, sıkıştırma oranları, silindir sayıları ve soğutma sistemleri farklı olan iki ayrı dizel motorun performansında ve emisyonlarında oluşan etkileri deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyler B0, B20 ve B100 oranlarında hazırlanan yakıtları ile yapılmıştır. İki ayrı motorda da ısı verim biyodizelin kullanımıyla artmıştır. Ancak ısı verim, tek silindirli motorda iki silindirli motora göre daha yüksek elde edilmiştir. Tüm testlerde her iki motorda yük artarken CO emisyonlarında ve yanmamış hidrokarbonların oranında düşüş olduğu belirtilmiştir [17].

Peterson ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, 4 silindirli, dizel motorda soya etil esteri testi yapmışlardır. Test sonuçlarında performans değerlerinde düşüş, yakıt tüketiminde ise artış görülmüştür. Karbon monoksit (CO), hidrokarbon (HC), ve azotoksitler (NO_x) değerlerinde azalma, CO₂ değerlerinde ise artma görüldüğü belirtilmiştir [18].

Altın ve Yücesu, filtrelenmiş ham pamuk yağı ile standart dizel yakıtını ayrı ayrı 4 zamanlı ve tek silindirli dizel motorda test etmişlerdir. 1300 dev/dak ve 1700 dev/dak'da dizel yakıt ve pamuk yağının motor performansına ve egzoz emisyon değerlerine bakmışlardır. Sonuçlar; dizel için moment değerleri %3, pamuk için %14, dizel için güç değerleri %3, pamuk için %11,7 ve dizel için özgül yakıt tüketimi değerleri %6, pamuk için %27 oranları ölçülmüş olup, özgül enerji maliyeti dizel için %43 olurken pamuk için %50 daha düşük olduğunu göstermiştir [19].

Büyükkaya tarafından yapılan deneysel çalışmada, kolza yağını yakıt olarak kullanılmış olup, dizel motorun performans ve egzoz emisyon değerleri incelenmiştir. Kolza yağı deneylerde standart dizel yakıt ile %5, %20 ve %70 oranlarında karıştırılmış ve motor konstrüksiyonunda herhangi bir değişiklik yapılmamış olup en iyi ısı verimi %20 karışım

ile yapılan yakıt verirken, egzoz emisyonlarında NO_x biyodizel kullanılmasıyla birlikte artış göstermiştir [20].

Masjuki ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, dört silindirli ön yanma odasına sahip bir dizel motoru (Isuzu 4FB1) kullanarak, palmiye yağı metil esteri yakıtı ve standart dizel yakıtı karşılaştırarak motor performans ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. İlk olarak dizel yakıt ve palmiye yağı metil esterine %5 ve %10 oranlarında su karıştırmışlar, sonrasında bu karışımları %100 dizel yakıt ve %100 palmiye yağı metil esteri ile karşılaştırarak testleri tamamlamışlardır. Palmiye yağı metil esteri ve emülsiyonlarının dizel yakıtla oranla motor gücünün düşük olduğunu, enjektör memelerindeki karbon birikimlerinde azalma olduğunu, egzoz sıcaklıklarının düşüş gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca CO ve yanmamış HC'ların %100 palmiye yağı metil esteri ile dizel yakıtla kıyasla %8,8-%8,6 aralığında azaldığı, NO_x değerinin ise %9,3 oranında artış gösterdiği bildirilmiştir [21].

Karaosmanoğlu ve arkadaşları tek silindirli bir dizel motorda ayçiçek yağının 50 saat boyunca test etmişlerdir. Ayçiçek yağı 2 nolu dizel yakıt ile kıyaslanmış olup, ayçiçeği yağı kullanımıyla performans değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. CO, CO_2 , NO, NO_x ve HC emisyonlarında artış, is emisyonunda ise düşüş meydana geldiği belirtilmiştir. Emisyonlarda görülen artışın, yağın viskozitesinin daha yüksek olmasına bağlı olarak yakıtın atomizasyonunda istenilen oranların elde edilememesinden kaynaklandığı ifade edilmiştir. HC emisyonunun artış göstermesi, ayçiçek yağının setan sayısının daha düşük olmasına bağlı olarak tam yanmanın gerçekleşmemesinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Enjektörler de incelenmiş ve herhangi bir karbon birikintisi görülmediği bildirilmiştir [22].

Çelikten ve Arslan tarafından yapılmış olan çalışmada, soya ve kanola yağı metil esterlerinin 4 silindirli dizel motorun emisyonlarına ve performansına olan etkileri incelenmiştir. 1600 dev/dak'da maksimum torkta dizel yakıt ile kıyaslandığında; motor gücünde; kanola yağı metil esterinde %9,7 ve soya yağı metil esterinde %11,8 oranında azalma olduğu bildirilmiştir. Özgül yakıt tüketimleri dizel yakıt ile karşılaştırıldığında; soya yağı metil esterinde %17,5, kanola yağı metil esterinde ise %10,1 oranında artış meydana geldiği bildirilmiştir. CO emisyonu değerlerinde dizel yakıtla göre soya yağında %39, kanola yağında %27 oranında azalma olduğu bildirilmiştir. NO_x emisyonlarının ise dizel yakıtla göre kanola yağı ile %22, soya yağı ile %33 oranında arttığı bildirilmiştir [23].

Şahin tarafından yapılan çalışmada, ham keten tohumu yağından biyodizel yakıt elde edilmiş ve biyodizel standart dizel yakıt ile B2, B5, B20, B50, B100 hacimsel oranlarda karıştırılarak oluşturulmuştur. Deneyler sonunda, keten tohumuyla elde edilen karışımların fiziksel özelliklerinin standart dizel yakıt ile benzer özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Maksimum tork değerinin dizel ile 1000 dev/dak'da yaklaşık 59,6 Nm, B100 yakıtı ile 1200 dev/dak'da yaklaşık 53,8 Nm olduğu belirtilmiştir. Maksimum gücün dizel yakıt ile 2100 dev/dak'da yaklaşık 10,96 kW, B100 yakıtı ile 2000 dev/dak'da yaklaşık 10,23 kW olduğu belirtilmiştir. Özgül yakıt tüketimi değerleri incelendiğinde ise en düşük değer, standart dizel yakıt ile 1000 dev/dak'da yaklaşık 231,36 g/kWh olurken, B100 yakıtı ile 1200 dev/dak'da yaklaşık 296,73 g/kWh olduğu görülmüştür. Ölçümler sonunda, yakıtların içeriğindeki biyodizel oranın artmasıyla motor yük ve gücünde azalma olduğu fakat özgül yakıt tüketiminde artma olduğu bildirilmiştir [24].

İlkılıç ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, aspir tohumundan transesterifikasyon yöntemi ile biyodizel yakıt elde edilmiş ve %5, %20 ve %50 hacimsel oranlarda standart dizel yakıt ile karıştırılmıştır. Testler tek silindirli dizel motorda gerçekleştirilmiş ve hacimsel karışım oranı yükseldikçe yaklaşık %11'e varan güç ve yük kayıpları gözlenmiştir. En yüksek karışım oranında ise özgül yakıt tüketimlerinde ve NO_x ve HC emisyonlarında az oranda artış; partikül, CO ve is emisyonlarında kabul edilebilir oranlarda azalma olduğu bildirilmiştir [25].

Antolin ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, üzerinde hiçbir değişik yapılmayan direkt püskürtmeli bir dizel motorda ayçiçeği yağından elde edilen biyodizeli test etmişlerdir. Yapılan ölçümlerde, biyodizel yakıtın ısı değeri dizel yakıtla kıyasla %12 daha düşük olduğu tespit edilmiş fakat yoğunluk değerlerinde yapılabilecek artışla bu farkın dengelenebileceği görülmüştür [26].

Ulusoy ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada kullanılmış yemeklik yağlardan elde edilen biyodizel, TOFAŞ otomotiv fabrikasında bir dizel motorda test edilmiştir. Test esansında şasi dinamometresi de kullanılmıştır. Yapılan ölçümlerde biyodizelde dizel yakıtla göre araç teker gücü ve momentinde %2,03'lük ve %3,35'lik bir azalma olduğu, ivmelenme test sonuçlarında ise, 40 km/saat hızdan 100 km/saat hıza çıkmada %7,32'lik, 60 km/saat hızdan 100 km/saat hıza çıkmada ise %8,59'luk bir düşüş olduğu ayrıca CO₂ emisyonunda %2,62, NO_x emisyonunda %5,03 artış, yakıt tüketiminde ise %2,43 azalma olduğu belirtilmiştir [27].

Radu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, sebze yağlarından elde edilmiş biyodizele %50 oranında metanol karıştırılmış ve bu karışım ile saf dizel yakıtın, motor performansına ve emisyonlarına etkileri incelenmiştir. Deney sonucunda, biyodizel-metanol karışımının güç ve tork değerlerinin saf dizele göre düşük olduğu, düşük ısıl değerinden dolayı yakıt tüketiminin ise yüksek olduğu görülmüştür. Silindir içi basınç ve ısı yayılımı değerlerinde ise dizel yakıtın basıncının daha yüksek ölçüldüğü belirtilmiştir [28].

Özsezen tarafından yapılan çalışmada, atık palmiye yağından biyodizel elde edilmiş olup, motor performans ve egzoz emisyon değerlerindeki etki araştırılmıştır. Ölçümler dizel bir motorda, 20, 40, 60 Nm sabit yük ve tam yük altında, farklı devirlerde ve karışım oranlarında yapılmıştır. Biyodizel ve karışımlarının, motor performansında düşüş, özgül yakıt tüketiminde ise artış olduğu belirtilmiştir. Diğer taraftan CO ve HC emisyonlarında düşme meydana gelirken, NO_x emisyonunda yükselme meydana geldiği ifade edilmiştir [29].

Engin tarafından yapılan çalışmada, ayçiçeği atık yağından biyodizel üretilerek ön ısıtma işlemi uygulanmıştır. B50 yakıtının sıcaklığı 60 °C'ye getirilerek viskozitesinin saf eurodizelin 40 °C'deki viskozitesine yakın değerlere gelmesi sağlanmıştır. B100 yakıtı, 60 °C'ye kadar ısıtılarak eurodizelin oda sıcaklığındaki viskozitesine yaklaşabilmiştir. 60 °C üzerinde viskozite değeri okunamamıştır. B100 yakıtının 60 °C'deki viskozite ve yoğunluk değerlerinin eurodizele çok yaklaştığı görülmüş olup, motor gücünün eurodizelden daha az, özgül yakıt tüketiminin ise B50 ve B100 yakıtlarda eurodizelden daha fazla olduğu görülmüştür. CO ve HC emisyonları eurodizelden daha az çıkarken, NO_x emisyonunda artma yaşandığı belirtilmiştir. İş değerleri düşük devirlerde B50 yakıtı için yüksek, B100 yakıtı için düşük; yüksek devirlerde ise B50 ve B100 yakıtların her ikisinde de eurodizelden düşük çıktığı belirtilmiştir [30].

Koç tarafından yapılan çalışmada, biyodizel kullanımı ile motor yağ analiz deneyleri yapılmıştır. Deney sonucunda aşınma elementlerinin bazılarının yüksek olduğu belirlenmiştir. Biyodizel yakıtının standart dizel yakıtı göre yağlayıcılık özelliğinden dolayı, bu yakıtların silindirlerde gömlek aşınmalarını azalttığı görülmüştür. Titreşim değerleri eşit devirler için aynı koşullarda ölçülmüş olup, 1700 dev/dak'ya kadar biyodizel yakıt ve standart dizel yakıtın motor titreşimlerindeki etkisi değişkenlik gösterirken, 1700 dev/dak ile 2500 dev/dak arasında biyodizel ile çalışan motor daha titreşimli çalışmıştır. Biyodizel yakıtlı motorda 1400 dev/dak ile 2100 dev/dak arasında

hızlı bir yükseliş görülmüştür. Dizel yakıtlı motorda ise devirlere göre değişen bir titreşim gözlemlenmiştir. Sonuç olarak biyodizel yakıt kullanan motorun, dizel motora göre daha titreşimli çalıştığı belirlenmiştir [31].

Redel-Macias ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, zeytin prina metil ester yağının direkt püskürtmeli dizel motorda gürültü ve egzoz emisyonu etkileri araştırılmıştır. Yüksek oranda zeytin prina metil esteri içeren yakıt karışımlarında CO emisyonu azalırken, NO_x oranının arttığı ve yakıt tüketiminin sabit kaldığı belirtilmiştir. Biyodizel karışımlarında hava ve gürültü kirliliğinin azaldığı belirlenmiştir [32].

Reşitoğlu tarafından yapılan çalışmada, mutfak bulaşıkhanelerindeki yağ tutucularından yüksek oranda yağ asidi içeren biyodizel elde edilmiş ve standart dizel yakıt ile %10, %20, %30, %40, %50, %60, %70, %80, %90 oranlarında karıştırılarak hava soğutmalı tek silindirli direk enjeksiyonlu Lombardini 4LD 640 marka dizel motorda test edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda %10, %20, %30 ve %40 oranlarındaki karışım yakıtların dizel yakıt değerlerine daha yakın olduğu görülmüştür. Karışım yakıtların ısı değerlerinin dizel yakıtla kıyasla daha düşük olmasına bağlı olarak özgül yakıt tüketiminde artış, CO emisyonlarında azalış, NO_x emisyonlarında artış, HC emisyonlarında ise düşüş olduğu belirtilmiştir [33].

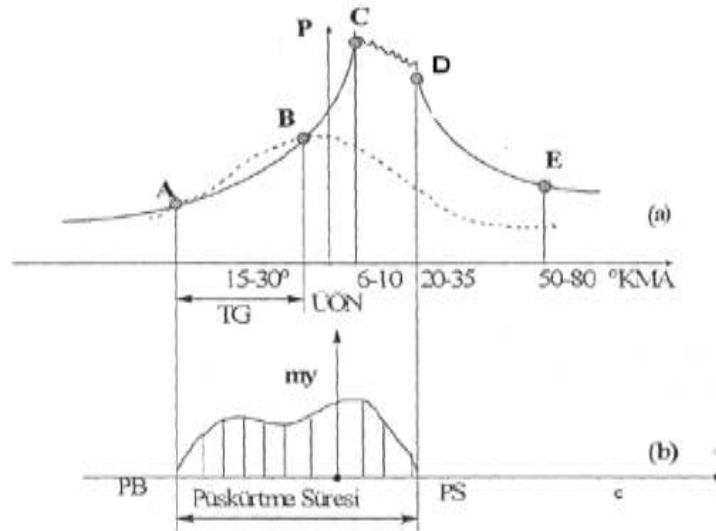
Bu çalışmada, transesterifikasyon yöntemi kullanılarak mısır yağından biyodizel üretimi gerçekleştirilmiş ve üretilen bu biyodizel, saf dizel yakıtla farklı oranlarda karıştırılarak, bir dizel motorda test edilmiştir. Deneysel çalışma farklı yük koşullarında ve farklı enjektör basınçlarında yürütülmüştür. Farklı oranlardaki biyodizel yakıtların motorun yanma performansı üzerindeki etkileri, kendi aralarında ve saf dizel (referans) yakıtla karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

2. DİZEL MOTORLARINDA YANMA OLAYI

2.1. DİZEL MOTORLARDA YANMA OLAYI VE SAFHALARI

Dizel motorlarda silindirin içersine enjektörler vasıtasıyla damlacıklar halinde püskürtülen yakıtın, silindirde oluşan yüksek sıcaklık ve basınç ile buharlaşarak önce tutuşması devamında yanması gerçekleşir. Sonrasında yanma olayı heterojen yanma (difüzyon alevi) şeklinde devam eder [34].

Dizel motorlarında yanma ve egzoz emisyonlarının oluşumu kimyasal ve fiziksel etkileşimler ile meydana gelen karmaşık bir olaydır. Kütle ve enerji iletimine bağlı olarak yanmayı oluşturan fiziksel olaylar gerçekleşmektedir. Motorlardaki yanma, yakıtın silindir içersine püskürtülmesiyle başlar ve yanma sonrasında oluşan gazların dışarıya atılmasını sağlayan egzoz zamanının başlamasına kadar geçen süreyi kapsar. Yanma odasında homojen bir karışım oluşmamaktadır. Sıkıştırma oranı yüksek olduğundan yanma odasında yüksek sıcaklık ve basınç oluşmasıyla silindire püskürtülen yakıtın buharlaşmasıyla birlikte reaksiyonlar da başlamaktadır. Şekil 2.1’de dizel motor için basınç-krank açısı diyagramı gösterilmiştir. Şekil üzerindeki PB ibaresi püskürtme başlangıcını, PS ibaresi ise püskürtme sonunu ifade etmektedir [35-38].



Şekil 2.1. Dizel motorda basınç – krank açısı ve püskürtme seyri [37].

Dizel motorlarda yanma olayı dört farklı periyotta incelenmektedir. Şekil 2.1’de bu bölümler açık bir şekilde görülmektedir. Bunlar şöyledir:

- Tutuşma gecikmesi bölgesi (A-B),
- Ani yanma bölgesi (B-C),
- Kontrollü yanma bölgesi (C-D),
- Art yanma bölgesi (D-E) [35-37].

2.1.1. Tutuşma Gecikmesi Periyodu

Yakıtın püskürtüldüğü andan itibaren tutuşma olayının başladığı ana kadar oluşan kısımdır. Püskürtme olayından sonra yakıtta buharlaşma oluşması için belli bir sürenin geçmesi gerekmektedir. Yakıt kalitesi, basınç ve sıcaklık tutuşma gecikmesini (TG) etkileyen en önemli parametrelerdendir. Silindir içerisine püskürtülmüş yakıtın miktarı tutuşma gecikmesi etkilemez. Yakıt, bu süreçte silindir içerisine girer ve tutuşma olana kadar orada birikir [35-38].

2.1.2. Ani Yanma Periyodu

Tutuşma gecikmesi süresince yakıt silindir içerisine girerek buharlaşır ve devamında damlacıklar parçacıklar halinde hava ile karışır. Yanmanın başladığı anda ise oksijen ile karışan yakıt aniden yanmaya başlar. Bu ani yanmanın hızı silindir içerisindeki basınç artış hızını da (dP/dt) belirler. Bu sebeple tutuşma gecikmesinin dizel motorlarda yanma olayını yönlendiren en önemli parametre olup, kontrol edilmesi son derece önemlidir. Oluşan yüksek basınç artış hızı, motorun çalışan parçaları üzerinde aniden yükün binmesine neden olacağından buradaki parçalarda tahribatlar meydana getirir. Bu olaya dizel vuruntusu denir. Yanma olayı, tutuşma gecikmesi safhasına göre daha kısa sürede meydana geldiğinden yakıtın çoğunluğu tutuşma gecikmesi safhasında silindir içerisine gönderildiğinden maksimum basınç durumunu belirleyecek olan tutuşma gecikmesi periyodudur [35-38].

2.1.3. Kontrollü Yanma Periyodu

Tutuşma gecikmesinde silindire gönderilen yakıtın tamamen yanması ile kontrollü yanma periyoduna geçilir. Ani yanma periyodu sonucunda silindir içerisindeki sıcaklık ve basınç oranları yüksek olduğundan püskürtülmüş olan yakıt oksijen ile temasa girince ani yanma gerçekleşir. Yanma olayı, yanacak olan yakıt karışımının miktarıyla kontrol edilebilir. Bu periyottaki yanmanın hızı yakıt hava karışımındaki orana bağlıdır. Yüksek verimin olabilmesi için yanma olayının silindirin üst ölü noktasına olabildiğince yakın

tamamlanması gerekmektedir. Dolayısıyla bu periyotta karışımın hızlı ve mükemmel olması istenilen durumdur [35-38].

2.1.4. Art Yanma Periyodu

Kontrollü yanma sonunda silindir içinde yanmamış bir miktar yakıt kalır. Motor veriminin etkilenmemesi için bu safhanın olabildiğince kısa olması beklenir. Art yanmanın beklenenden uzun sürmesi silindir yüzeylerinin, silindir kapağının ve pistonların aşırı ısınmasına, segmanlarda karbon ve artıklar oluşmasına sebep olacaktır [35-38].



3. DİZEL MOTORLARDA ALTERNATİF YAKIT OLARAK KULLANILAN BİYODİZEL VE ÖZELLİKLERİ

3.1. BİYODİZELİN TANIMI

Biyodizelin en genel tanımı; hayvansal ve bitkisel atıkların eklenmesiyle üretilen dizel yakıttır. Bilimsel olarak tanımlanırsa; organik olan yağların baz ve alkol ile belirli oranlarda karıştırılmasıyla dizel yakıtı dönüştürülmesi sonucunda elde edilen üründür.

Biyodizel petrol içerikli değildir; fakat her oranda petrol esaslı dizel yakıt ile karıştırılarak kullanılabilir. Saf biyodizel ve biyodizel-dizel karışımları bir dizel motorda herhangi bir değişime gerek duyulmadan ya da bazı küçük değişiklikler ile kullanılabilir.

Biyodizel, biyoyakıt sınıfından olup, sıvı halde bulunan alternatif yakıtlar kategorisinde değerlendirilen bir yakıttır. Biyodizele, biyomotorin, yeşil enerji veya halk arasında yağ mazotu da denilmektedir [39].

Biyodizel; bitkisel (ayçiçeği, kanola, soya, fındık, pamuk, mısır vb. bitkilerin) veya hayvansal esaslı yağların bir katalizör kullanılarak alkol ile (metanol veya etanol) tepkimeye girmesi sonunda elde edilen ve alternatif yakıt olarak kullanılan bir yakıt türü olarak tanımlanır [40].

3.2. BİYODİZELİN TARİHSEL GELİŞİMİ

Biyolojik yakıtların tarihsel gelişimi teknolojik yönden daha fazla politik ve ekonomik alanlardaki değişimler sayesinde gerçekleşmiştir. Alternatif yakıt olarak değerlendirilen biyodizele olan ilgi 1970'li yıllarda yaşanan enerji krizi ile oluşmuştur. Biyoyakıt elde etmede kullanılan transesterifikasyon yöntemi, gliserin elde etmek amaçlı olarak da 1800'li yıllardan bu yana uygulanmıştır. Bitkisel yağ ve türevlerinin dizel yakıt olarak kullanımı, 1900'li yıllarda dizel motorun icat edilmesi ile başlamıştır. Dizel motorun icadını yapan alman makine mühendisi Rudolf Christian Karl Diesel (1858-1913) Paris'te 1898 yılında dizel motoru fındık yağı ile çalıştırmayı başarmıştır. Rudolf Diesel'den başka, biyoyakıtların dizel motorlar için ciddi bir atılım olacağını düşünen diğer bir kişi de Henry Ford'dur. Otomobillerin 1908 yılından sonraki tasarımlarını biyoyakıt kullanımına uyumlu olacak şekilde yapmıştır. Ancak o yıllarda ülke politikalarında ve

ekonomide çıkan krizlerden dolayı sektör gereken ilgiyi görememiştir. 1973’de çıkan ilk krizde OPEC dünyadaki petrol tedarikini zayıflatmış, bu da fiyatların yükselmesine neden olmuştur. 1978’de çıkan ikinci krize bağlı olarak otomobil alacak müşteriler ağırlıklı olarak dizel motorlu araçları tercih etmeye başlamışlardır. Kullanıcıların çoğu kendi ihtiyacı olan yakıt için kendi biyoyakıtlarını yapmayı tercih etmişlerdir. 1980 yılına gelindiğinde bitkisel yağların sahip olduğu yüksek viskozitenin düşürülmesi için metil alkolle reaksiyona sokulmuş ve düşük viskoziteli biyodizel elde edilmiştir. Biyodizel ismi ilk böyle ortaya çıkmıştır [41].

1997 yılında Kyoto Protokolü’nün imzalanması ile, gelecekte biyoyakıt kullanımına yönelik toplumda farkındalığın oluşması sağlanmıştır. Böylece Rudolf Diesel ve Henry Ford gibi öncülerin yıllar önceki buluşları ile bugün bu bilincin geliştirilmesi yönündeki adımlar hız kazanmıştır. ABD’de alternatif yakıtlar için yapılan çalışmalar, bitkisel yağlar üzerinde yoğunlaşmış ve özellikle John Dere, International Harvester, Caterpillar ve Perkins gibi motor imalatçıları tarafından bu çalışmalar hassasiyetle devam ettirilmiştir [42].

1990’lı yıllarda Körfez Savaşı’nın başlamasıyla petrol fiyatlarındaki artış, biyodizelin ülkemiz tarafından üretilebilmesine yönelik stratejik ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Avrupa’da teknolojiyi geliştirip üretebilen ülkelerin başında olan Almanya ve Fransa’nın önderliğinde biyodizel için bir piyasa oluşturulmaya başlanmış ve biyodizel üretimi giderek arttırılmıştır. 2000’li yıllarda petrol fiyatlarının tekrar yükselmesi, çevreci hassasiyetin artması ve kırsal bölgelerin kalkındırılması gibi sebeplerle biyodizel teknolojisi büyümeye başlamıştır [43].

Ayçiçek, soya veya kolza yağları metil esterleri, ilk biyoyakıt olarak İtalya’da üretilmiştir. 1991 yılından itibaren İsviçre’nin Zürih şehrinde çalışan belediye otobüslerinde kullanılmıştır [42].

Gelinen noktada bitkisel yağların dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılabilirliği, olumlu ve uygun değerlendirilmektedir. Dolayısıyla bitkisel yağların kimyasal ve fiziksel özellikleri dikkate alınarak her geçen gün geliştirilerek üretilen biyodizel yakıt çeşitlerinin dizel motorlarda sorunsuz bir şekilde kullanılabilirliğine yönelik araştırma ve çalışmalar yapılmaktadır [37].

3.3. BİYODİZELİN FİZİKSEL VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİ

Çizelge 3.1’de biyodizel ve standart dizel yakıt özellikleri verilmiştir. Bu özelliklerde alevlenme noktası değerlerine bakıldığında, biyodizel parlama noktasının, dizel yakıtı göre daha yüksek ($>110\text{ }^{\circ}\text{C}$) olduğu görülmektedir. Bu özellik biyodizel yakıtın depolama, taşınma ve kullanımda güvenilir bir yakıt olduğunu göstermektedir. Biyodizel, dizel yakıt ile her oranda karıştırılarak kullanılabilir. Yanma olayı sonunda meydana gelen ve doğaya zararlı olan emisyon gazlarının yayılımlarını azaltır ve motor parçalarındaki yağlanmayı artırır. Motor parçaları üzerinde zamanla oluşan ve motor gücünün azalmasına sebep olan tortuları çözer. Biyodizel dizel yakıtı göre daha üstün yağlayıcı özelliği olmasının yanında, pompa ve enjektör sistemlerindeki yağlanmayı da en ideal seviyeye getirerek motorda meydana gelebilecek aşınmaları azaltır. Ayrıca, biyodizelin ağırlığının yaklaşık %11’i oksijen olduğundan yüksek yanma özelliği öne çıkmaktadır [44-48].

Çizelge 3.1. Biyodizel ve dizel yakıtların özellikleri [40, 44].

Yakıt Özelliği	Birimler	Dizel	Biyodizel
Yakıt Standardı	-	ASTM D 975	ASTM D 975
Yakıt İçeriği	-	C10 – C21HC	C12 – C22 FAME
Alt Isıl Değer	MJ/L	36,6	32,6
Kinematik viskozite (40 $^{\circ}\text{C}$ ’de)	mm ² /s	2,5 – 3,5	4,3
Yoğunluk (15 $^{\circ}\text{C}$ ’de)	kg/L	0,85	0,88
Su	ppm	161	Mak. %0,05
Karbon (ağırlığının % oranı)	% kütlese	87	77
Hidrojen (ağırlığının % oranı)	% kütlese	13	12
Oksijen (ağırlığının % oranı)	% kütlese	0	11
Kükürt (ağırlığının % oranı) maksimum	% kütlese	0,005	0,0 – 0,0024
Kaynama noktası (0 $^{\circ}\text{C}$)	$^{\circ}\text{C}$	188 - 343	182 - 338
Parlama noktası (0 $^{\circ}\text{C}$)	$^{\circ}\text{C}$	60 – 80	100 - 170
Bulutlanma noktası (0 $^{\circ}\text{C}$)	$^{\circ}\text{C}$	(-15) – (+15)	(-3) – (+12)
Akma noktası (0 $^{\circ}\text{C}$)	$^{\circ}\text{C}$	(-35) – (-15)	(-15) – (+10)
Setan sayısı	-	40 – 55	48 - 65
Hava/Yakıt oranı	% kütlese	15	13

Biyodizelin yapısında motordaki yanma verimini ve egzoz emisyonlarının oluşumunu artırıcı aromatik hidrokarbonlar, metaller, ham petrol artıkları ve kükürt bulunmaz. Dolayısıyla bu özellikler ile çevresel kirliliğin önlenmesi yönünden biyodizel ideal bir yakıt olarak karşımıza çıkmaktadır [49]. Yanma olayı sonucu oluşan ve sera gazları

içerisinde önemli bir yere sahip olan CO₂, dünyada en bilinen doğa sorunu olan küresel ısınma olayına yol açar. Ayrıca yanma sonucunda çıkan ve sera gazlarının içerisinde bulunan NO_x, CO, SO_x gazları da insan sağlığı açısından son derece zararlıdır. Biyodizel, standart dizel yakıtı göre yaşam döngüsünde karbondioksit emisyonlarını yaklaşık olarak %80 oranında azaltır. Biyodizel kullanımında diğer yakıtlarda olduğu gibi CO₂ gazı çevreye salınır. Ancak biyodizelin elde edilmesinde kullanılan tarımsal bitkiler, biyolojik olarak karbon döngüsü içerisinde fotosentez yoluyla çevredeki CO₂'yi kullandıktan sonra tekrar karbon döngüsüne girmesi nedeni ile biyodizel yakıtlar sera etkisini arttıracak düzeyde çevreyi etkilemez. Şekil 3.1'de biyodizel döngüsü şematik olarak gösterilmiştir. Biyodizelin yakılması sonucu atmosfere salınan CO, SO_x, toz ve yanmamış hidrokarbonlar oldukça az seviyededir. CO değeri de dizel yakıtı oranla %50 daha düşük seviyededir [46, 49, 50].



Şekil 3.1. Biyodizel döngüsü [46].

Biyodizel doğada %99,6 oranında biyolojik olarak parçalana ayrılabilmektedir. Biyodizel bu özelliğinden dolayı suda yaşayan canlılarda toksik bir etki yaratmamaktadır. Ayrıca suya karışan biyodizelin yaklaşık 28 gün sonunda %95'i çözünürken, dizel yakıtı bu oranın %40 civarında kaldığı belirtilmiştir. Bu nedenle, özellikle ABD'nin eyaletlerinin çoğunda göller ve nehirlerde kullanılan ulaşım araçlarında saf biyodizel kullanımı zorunlu hale gelmiştir. 1 L ham petrol, içme suyunun bir milyon litresini kirletebilme potansiyeline sahiptir [40, 46-48].

B100 ve B20 yakıtlarının çıkardığı egzoz emisyon değerlerinin standart dizel yakıtıyla karşılaştırması Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. B100 ve B20’nin dizele göre emisyon değerlerinin azalma oranları [51].

Yakıt Özellikleri	B20	B100
Yanmamış Hidrokarbonlar	-%30	-%93
Karbonmonoksit (CO)	-%20	-%50
Nitratlı maddeler (nPAH)	-%50	-%90
Hidrokarbonlardaki ozon tabakası etkisi	-%10	-%50
Sülfatlar	-%20	-%100
Polisiklik aromatikler hidrokarbonlar (PAH)	-%13	-%80
Azot oksitler (NO _x)	+%2	-%13
Partikül madde	-%22	%0

Biyodizelin standart dizele göre öne çıkan dezavantajı, %10 oranında daha az enerji potansiyeline sahip olmasıdır. Biyodizelin standart dizel yakıtla kıyasla ısı değeri düşük olması yakıt sarfiyatında artışlara sebep olmaktadır. Ayrıca biyodizelin akma ve bulutlanma noktası ile nitrojen oksit emisyonları dizel yakıtla kıyasla yüksek olup, biyodizelin viskozitesi daha yüksek ve düşük uçuculuk özelliğine sahiptir. Bu nedenle yakıtın verimli püskürtülmesi için enjektörlerde daha yüksek basınç ihtiyacı vardır. Bu durum enjektör sistemlerinin tıkanmalarına, karbon birikintilerinin oluşumuna, yağlama yağının bozulmasına, enjeksiyon aşamasında atomizasyon yapısının bozulmasına ve yanma olayının verimsiz olmasına sebep olan dezavantajlardır [24, 49].

3.4. BİYODİZEL YAKITININ KARAKTERİSTİKLERİ

3.4.1. Asit numarası

Biyodizel bünyesindeki serbest yağ asitlerinin miktarına asit numarası denir. Bu asitler, motorlarda aşınmaya sebep olduğundan biyodizel üretiminde katalizör kullanılarak biyodizelin içerisinden uzaklaştırılırlar. Su veya hava ile bir temas olmamalıdır. Eğer temas olursa asit numarasında tekrar yükselme meydana gelir. Dolayısıyla biyodizel üretimi esnasında kalite kontrol işlemlerinde bu değerin kesinlikle takibe alınması gerekmektedir [34].

3.4.2. Serbest Gliserin

Yakıt içeriğinde moleküler gliserinin bulunmasına serbest gliserin denir. Transesterifikasyon tepkimesinin devamında ester ile gliserin, yıkama işleminin yetersiz olmasından dolayı istenilen seviyede ayrıştırılma gerçekleşmemektedir. Silindir içerisinde serbest gliserin bulunması da karbon oluşumuna sebep olan en önemli etkindir [34].

3.4.3. Toplam Gliserin

Yakıt içindeki serbest ve bağlı gliserinin toplamına denir. Mono, di ve trigliseritlerin içerisinde bulunan gliserinlere de bağlı gliserin denir. İstenilen düzeyde transesterifikasyon tepkimesinin görülememesi, toplam gliserin oranının yüksek çıkmasına sebep olmaktadır. Bu yüksek oran ise, silindir içerisinde fazla karbon birikintisi oluşumuna yol açar [34].

3.4.4. Fosfor İçeriği

Biyodizelin fosfor içeriği bitkisel ve hayvansal yağların bünyesinde bulunan zar ve proteinlerin sebebiyle oluşan fosfolipidlerin istenilen düzeyde saflaştırma işleminin yapılamaması sonucunda meydana gelen ve yakıt içinde istenmeyen bir karakteristiktir [34].

3.4.5. Biyolojik Olarak Bozunabilme

Biyodizeli oluşturan C_{16} – C_{18} metil esterleri, koruma altına alınmazlarsa tabiatta zorlanmadan hızlı bir şekilde bozunabilmektedir. Biyodizel tabiat ortamında bozunabilmektedir. Bu bozunabilme özelliği de dekstroza yani şekere benzemektedir [2, 52].

3.4.6. Toksik Etki

Biyodizel zehirleyici değildir. Yani toksik etkisi yoktur. Biyodizel vücuda 17,4 g biyodizel/kg alındığında hayati tehlike meydana gelir, ancak bu miktar sofr tuzu için 1,75 g tuz/kg kadardır. Dolayısıyla tuz, biyodizele kıyasla 10 kat daha fazla öldürücü etkiye sahiptir. Biyodizelin etkili toksik özelliği olmamasına rağmen, dizel yakıt ve biyodizel karışım yakıtlarının kullanılması halinde dizel yakıtı için zorunlu olarak uygulanması gereken standartlaştırılmış şartların (göz koruyucuları, havalandırma sistemleri vb.) karşılanması gerekmektedir [53].

3.4.7. Depolama

Standart dizel yakıt için kullanılan depolama yöntem ve kuralları biyodizel için de geçerlidir. Biyodizelin depolandığı alan temiz, nemsiz, aydınlık olmayan bir ortam olmalıdır. Deponun üretiminde kullanılan malzemeler, paslanmaz ve yumuşak çelik, florlanmış polietilen ve florlanmış polipropilen tercih edilmelidir. Eğer elastomerler, tabii ve butil kauçuklar kullanılırsa biyodizel bu malzemelere ciddi zararlar verir. Bu sebeple biyodizel yakıtı uyumlu Viton B tipi elastomerik malzemenin kullanılması en uygun tercih olacaktır [16].

3.4.8. İyot Sayısı

İyot sayısı, yağların doymamışlığının ölçüsüdür. İyot sayısı, üretimi yapılan bitkisel yağların niteliğine göre değişkenlik göstermektedir [54]. İyot sayısı aynı zamanda biyodizel yakıtın doymamışlık derecesini de verir. Yakıtın doymamış olması tortu oluşumuna ve depolamadaki kararlılık problemlerini doğurabilir. Yakıtın içerisinde fazla miktardaki iyot sayısı enjektörün tıkanmasına ve yanma odasında fiziksel hasara sebep olduğu gibi motor yağının viskozitesinde de düşmeye neden olmaktadır [55].

3.4.9. Viskozite ve Akış Özellikleri

Viskozite bir sıvının akmaya karşı gösterdiği dirence denir. Kinematik viskozite değerinin belirlenmesindeki temel faktör ise, sıvının sabit sıcaklık şartlarında düşey bir borunun içinden geçirilerek borunun üzerinde bulunan işaretlenmiş bölgeye ulaşma zamanının hesaplanmasıdır. Birimi “stocke” dur [56]. Viskozite, yakıtın motorlarda yakıt sisteminin arzu edilen çalışma şartlarında atomizasyonunda, tutuşma gecikmesinde, yanma sürecinde ve ısı verimliliğinde önemli rol oynar. Biyodizel yakıtların viskoziteleri dizel yakıt viskozitesinden daha yüksektir [57]. Yakıtın akıcılığının iyi olması, yakıt besleme sistemi için çok önemlidir. Yüksek viskoziteli yakıtlar enjektörlerde tıkanmaya ve segman bölgesinde karbon birikintilerinin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca yüksek pompalama basıncı gerektirmekte ve enjektörlerdeki yakıt püskürtme oranının azalmasına sebep olmaktadır. Biyodizelin viskozitesi 40 °C sıcaklıkta yaklaşık 3,5-6 mm²/s’dir. Hidrokarbonların bünyesinde bulunan zincir uzunluğu arttıkça viskozite artmakta, çift bağ miktarının artmasıyla birlikte ise azalmaktadır [56]. Viskoziteyi etkileyen başka bir etken de sıcaklıktır. Viskozitenin yüksek çıkması transesterifikasyon işleminin başarısızlıkla yapıldığının sonucudur. Test yöntemi olarak DIN EN ISO 3104 kullanılırken, yüksek viskozite probleminin çözümüne yönelik iki seçenek sunulabilir.

Bu seçenekler ya motorun yakıta ya da yakıtın motora uyarlanmasıdır (viskozitenin düşürülmesi) [53].

3.4.10. Yoğunluk

Biyodizelin yoğunluğu 860–900 kg/m³ olup, dizel yakıta (820–845 kg/m³) kıyasla daha yüksektir. Yakıt tüketimi ve yanma ısısına etki eden en önemli parametrelerin başında yoğunluk gelir. Hidrokarbon zincirindeki uzama ile yakıtın yoğunluğunda azalma, çift bağ sayısındaki artış ile yakıtın yoğunluğunda artma görülmektedir [58]. Biyodizelin yoğunluğunun yüksek olması, yakıtın içeriğinde bulunan gliserinin yeterince arındırılmaması nedeniyledir. Biyodizel, dizel yakıta kıyasla %5-7 oranında daha fazla yoğundur. Bu da güç kaybına sebep olmaktadır [59].

3.4.11. Alevlenme Noktası

Yakıt ısıtıldıktan sonra üzerinde biriken yakıt buharıyla birlikte havanın tutuşabildiği en düşük sıcaklık değerine parlama noktası denir. Biyodizelin parlama noktası çok iyi olup, motor üzerinde önemli bir performans düşüklüğü göstermemektedir. Parlama noktası dikkate alınarak risk sınıflaması yapılır. Parlama noktasının yüksek olması taşıma ve depolama için belirgin bir avantajdır. Motorin için parlama noktası 74 °C iken, biyodizel için bu değer yaklaşık 220 °C’dir. Parlama noktasının belirlenmesinde kullanılan standart, DIN EN 22719 standardıdır [59].

3.4.12. Bulutlanma Noktası

Biyodizel yakıtın bulutlanma noktası, standart dizel yakıta kıyasla daha yüksek olduğundan motorun soğukta çalışma performansı olumsuz etkilemektedir. Biyodizel yakıtların bulutlanma noktalarının birbirlerinden farklı olmasının nedeni, doymuş yağ asit düzeyi farklı hammaddeleri içermesidir. Bulutlanma noktasını daha aşağı seviyelere çekmek için yakıt içerisine özel katkı maddeleri konulmalı ya da düşük doymuş yağ asidi oranına sahip olan yağlar ile yüksek doymuş yağ asidi oranına sahip yağlar karıştırılarak bulutlanma noktası düşürülmelidir [60].

3.4.13. Kalori Değeri

Motorun en uygun şartlarda çalışması için kalori değeri önemli bir etkidir. Biyodizel yakıtın kalorisi 35 MJ/kg’dan daha yüksektir. Kalori değeri DIN 51900-3 test standardına göre belirlenir [59].

3.4.14. Soğukta Akış Özelliği

Biyodizelin akma noktası dizel yakıta göre daha yüksektir. Buna göre de yakıtların soğuk hava şartlarında kullanılması, hafife alınmayacak derecede sıkıntılar yaratmaya neden olacaktır. Özellikle yakıt besleme parçalarında hasarlar oluşabilecek, motorun ilk harekete geçirilmesinde çok çeşitli sorunlar yaşanabilecektir. Doymuş hidrokarbonların içeriğindeki CP, CFPP, PP değerleri yüksektir ve de yüksek sıcaklıklar kristalize olmalarına neden olmaktadır. Hayvansal ve kızartma yağlarda doymuş hidrokarbonlar sayıca fazla durumdadır [59].

3.4.15. Akma Noktası

Ortam sıcaklığının düşmesiyle beraber yakıt giderek yoğunlaşır ve akamayacak bir noktaya gelir. İşte bu noktaya akma noktası denir. Biyodizel, dizel yakıta kıyasla daha yüksek bir akma noktasına sahiptir. Bu nedenle biyodizel kullanımında, soğuk havalarda standart dizel yakıta göre daha çok sorun yaşanabilecektir [55]. Yağın doyma noktasındaki artış akma noktasını da önemli derecede etkilemektedir. Dolayısıyla yağın doymuşluk oranı ve asit numarası biyodizel yakıtın akma noktasına etki eden önemli parametrelerdir [61].

3.4.16. Setan Sayısı

Dizel motorlarda kullanılan yakıtların kendiliğinden tutuşmaya olan yatkınlığını setan sayısı belirtir. Motor vuruntusunu oluşturan yakıtlar, kendiliğinden tutuşma sıcaklık değeri yüksek olan yakıtlardır. Uzun düz zincir yapısına sahip doymuş hidrokarbonların setan sayısı daha yüksek olurken, çift bağ sayısının artmasında ise setan sayısı azalmaktadır [54]. Setan sayısı tutuşma gecikmesi ile ilişkili bir özelliktir. Setan sayısının artması tutuşma gecikmesini azaltır. Bu da yakıtın uygun zamanda tutuşmamasını sağlayacağından motor vuruntusu meydana getirerek motorun gürültülü çalışmasına ve motor parçalarının zarar görmesine sebep olur. Biyodizel yakıtın setan sayısı, biyodizelin elde edildiği hammadde (yağın) içerisinde bulunan yağ asidinin ayırıcı niteliklerine göre değişmektedir [62]. İçten yanmalı motorlarda kullanılan dizel yakıtın setan sayısının en az 40 olması ideal olmalıdır. Biyodizelin setan sayısı ise kullanılan hammaddeye göre değişkenlik göstermekte olup, 46 ila 60 arasında değişmektedir [63].

3.4.17. Isıl Değer

Bir yakıtın birim kütlesi başına alınan enerji miktarına ısı değeri denir. Isı değeri, ağırlık sınırlaması olan araçlar için önemli bir parametredir. Isı değeri artışı doymuş hidrokarbonlardaki zincir uzunluğunun artmasından kaynaklanır. Hidrojen sayısındaki azalma ile de (doymamışlığın artması) ısı değeri düşüğü görölür. Biyodizeldeki oksijen içeriğinin yüksek olması, dizel yakıtı göre ısı değeri yaklaşık %11 daha az olmasına neden olmaktadır. Biyodizel yakıt ile standart dizel yakıtın, aynı şart ve koşullarda çalıştırılan motordan alınacak güç ve tork değeri farklı çıkmaktadır. Ancak yakıt tüketiminin arttırılması durumunda performans değeri birbine çok yaklaştığı belirlenmiştir [4].

3.4.18. Yağlayıcılık

Motorlarda hareketli parçaların (piston, supap, kam mili vb.) aşınmaya karşı direncini arttırmak için yağlama yapılır. Petrol esaslı yakıtların içeriğinde bulunan kükürt oranının düşürölmesi ile yakıt içerisine katkı maddeleri ilave edilmekte ve bu sayede dizel yakıtın yağlama özelliğini geliştirilebilmektedir. Ancak bu katkı maddelerinin kullanılması yakıt besleme elemanlarında tortu oluşturabilmektedir [54]. Biyodizelin yağlayıcılık özelliği dizel yakıtı kıyasla daha üstündür. Arıtılma işlemi uygulanmamış biyodizel yakıtın içerisinde düşük oranda monogliseric, trigliseric ve digliseric bulunmaktadır. Arıtılmış biyodizel ile arıtılmamış biyodizel kıyaslandığında, arıtılmamış biyodizelin daha iyi yağlayıcılığa sahip olduğı görölmüştür [64].

3.4.19. Yağlama Yağının Seyrelmesi

Motorda yağlama yağının seyrelmesi özellikle biyodizel yakıt kullanımında istenmeyen bir durumdur. Biyodizel yakıt ile motor yağı arasındaki ilişki, yakıt enjeksiyon pompası ve silindirler sayesinde kurulur. Bu kapsamdaki araştırmalarda yağlama yağının seyrelme oranı %4-5 olarak belirlenmiştir [65]. Motor yağının seyrelmesi, motor ömrüne ve kullanım süresine göre giderek artış göstermektedir. Dizel yakıtın yağlama yağına karışması durumunda yakıtın büyük bir kısmı buharlaşırken, biyodizelde ise ester moleküllerinin kaynama noktası yağlama yağına çok yakın olmasından dolayı buharlaşmayı engel olup kısa sürede motor yağının zarar görmesine sebep olur [39].

3.4.20. Karbon Artığı

Karbon artığı, enjektör, silindir ve piston yüzeyi gibi bölgelerde karbon birikintilerinin oluşmasına sebep olmaktadır. Karbon artığı miktarı, oksijenin bulunmadığı bir ortamda DIN EN ISO 10370 sına ma yöntemi kullanılarak belirlenebilmektedir. Biyodizel uygulanabilirlikte oldukça az karbon artığı bırakmaktadır. Yapılan testlerde, çıkan artığın azami karşılığı, kütlenin %0,4'üne karşılık gelmektedir [59].

3.4.21. Kükürt İçeriği

Kükürt, dizel yakıt içinde bulunan ve pek istenmeyen bir maddedir. Biyodizel bünyesinde de az miktarda kükürt bulunur. Ayrıca biyodizel üretiminde proteinler, katalizör ve/veya nötralizasyon işlevi kükürt oluşmasına neden olmaktadır [60]. Kükürt oranı motorda oluşan korozyona ve çevre kirliliğine etkisi bakımından çok önem taşımaktadır. Bitkisel yağlardaki kükürt oranı yaklaşık %0,01 olup, ASTM standardındaki değeri ise %0,5'dir ve biyoyakıtlar için bu sınır değeri geçilmemektedir [66].

3.4.22. Su İçeriği

Su, biyodizel içerisinde çözünmüş halde veya asılı durumda damlacıklar halinde bulunmaktadır. Biyodizelin içerisinde su kesinlikle bulunmamalıdır. Su, enjeksiyon sistemi için son derece zararlı olduğu kadar, biyodizelin içerisinde oluşturduğu mikrobiyolojik hareketlilikler sayesinde asitlenmeye ve içerisinde çamur oluşmasına da neden olabilmektedir [67].

3.4.23. Oksidasyon Kararlılığı

Biyodizel yakıtın oksidasyon kararlılığının dizel yakıt ile karşılaştırıldığında daha düşük olduğu görülmektedir. Doymuş yağ asitlerinin (palm yağı) oksidasyon kararlılığına bakıldığında, sonucun yüksek çıktığı görülmektedir [39].

3.5. DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE BİYODİZEL

1970'li yıllardaki petrol krizinden bugüne kadar, enerji faaliyetlerinin güvenliği ve enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği için giderek artan politika arayışlarının önemi artmıştır. Ekonomik nedenler başta olmak üzere kalkınmada süreklilik, küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi alanlardaki gelişmeler bu önemin derecesini yükseltmektedir [68]. 1990'lı yıllarda çıkan Körfez Savaşı, petrol fiyatlarında ciddi artışlara neden olmuş, buna bağlı olarak Almanya, Fransa ile birlikte biyodizel teknolojisini gündemine almaya başlamıştır. Böylece biyodizel üretiminin sürekli artmaya başladığı görülmüştür [43].

3.5.1. Dünyada Biyodizel

2000'li yıllardan itibaren biyodizel endüstrilerinde Latin Amerika ve Kuzey Amerika'da gelişmeler yaşanmaya başlamış olup, 2008 yılı içinde ABD'de 31 etanol rafinerisi kurularak yıllık üretim kapasitesi 40 milyar litreye ulaşmıştır. Brezilya ve Arjantin'de özellikle etanol üretiminde büyük aşamalar görülmüştür. Brezilya 2008 yılında 400 adet büyük ölçekli etanol üretim tesisi ve 60 adet biyodizel üretim tesisine sahip olmuştur. Arjantin'de ise 18 büyük biyodizel üretim tesisi bulunmakta olup, yıllık mevcut kapasitesi 1,8 milyar litredir [68].

Dünyada biyodizel üretiminin yaklaşık %64'ü Almanya, Fransa ve diğer AB üye ülkelerinde gerçekleşmiştir. AB ülkeleri içerisinde biyodizel üretim miktarı 2018 yılı itibariyle 9,6 milyon ton olurken, bunlardan Almanya, Fransa, İspanya ve İtalya biyodizel üretiminde %67'lik bir paya sahiptirler [43, 68, 69].

Avrupa Birliği tarafından yayımlanan 2003/30/EC sayılı biyoyakıtlarla ilgili yönergeye göre, 2010 yılında ulaşımda sarf edilen yakıtın %5,75'inin biyoyakıtlardan karşılanması hedeflenmiştir. 2009 yılında bu yönerge revize edilmiş ve bu hedef 2020 yılında %10 olacak şekilde güncellenmiştir. Bu hedefe ulaşılabilmek için tarım ekonomik olarak desteklenmekte ve biyodizele vergi indirimi uygulanmaktadır. Avrupa Birliği yayımladığı 2003/96/EC sayılı başka bir yönergede ise biyoyakıtlara uygulanan vergi oranını, benzin ve dizel yakıtlara uygulanan vergi oranına göre yaklaşık %50 daha az vergilendirme uygulayacağını bildirmektedir [70].

ABD'de Enerji Politikası Yasası'nın 2005 yılında yürürlüğe girmesiyle biyodizele, dizel yakıtı ile harmanlanması şartıyla litre başına 0,264 \$ vergi indirimi yapılmıştır. 2022 hedefleri arasında yer alan ve 2007 senesinde yürürlüğe giren Enerji Bağımsızlığı ve

Güvenliği Yasası'na göre 136 milyon ton biyoyakıtın karayolu nakliyeciliğinde kullanılması planlanmıştır. Hindistan'da ise 2003 yapılan ulusal biyodizel programı gereği jojoba bitkisinden biyodizel üretiminin desteklenmesine başlanmış ve üretilen biyodizelin dizel yakıt ile %20 oranında harmanlanması amaçlanmıştır. Hindistan'da jojoba bitkisinden üretilen biyodizel, bütün vergilendirmelerin dışında tutulmuştur [71]. Avrupa Birliğinde de biyoyakıt kullanımına yönelik tarımsal kalkınma, global ısınma ve enerji güvenliği bakımından yapılan çalışmalar büyük önem taşımaktadır. Uygulanan enerji politikaları gereği, vergilendirmede şart koşulan “kırleten öder” ibaresi hayata geçirilmiş ve böylece biyoyakıt konusunun ne kadar ciddiye alındığı görülmüştür. Çizelge 3.3'de Avrupa Birliğinin 2030 yılına kadar biyoyakıt kullanımı yönündeki hedefleri gösterilmektedir [24].

Çizelge 3.3. AB Biyoyakıt kullanımı ve hedefleri.

2007	2010	2020	2030
%5	%5,75	%10	%25

Endonezya palmiye yağı üretiminde dünyada lider konumda olup, bu ülkede 2009 yılı itibariyle ulaşım sektörü alanında dizel yakıtta %1 biyodizel karıştırılması kararlaştırılmıştır. Malezya'da ise palmiye yağından üretilen biyodizelin standart dizel yakıtta %5 oranında karıştırılması zorunlu hale getirilmiştir. Çin, yağlı tohum üretiminde zorluklar yaşaması sebebiyle hammadde sıkıntısı çekmekte ve biyodizel üretimini destekleyici adımlar atmakta zorlanmaktadır. Brezilya'da da biyodizel yasası çıkarılmış ve yasaya göre biyodizelin, dizel yakıtta 2008 yılında %2 oranında, 2013 yılında ise %5 oranında karıştırılması kararlaştırılmıştır [70].

Biyodizel üretiminde kullanılan hammadde, ülkelerin ekimini yaptıkları yağlı tohum bitkilerine göre farklılık göstermektedir. Kanola yağından Almanya ve Avusturya, ayçiçeği yağından Fransa ve İtalya, soya yağından ABD, palmiye yağından Biyodizel üretiminde ise Malezya lider ülkelerdir. Kullanılmış yemeklik (kızartmalık atık yağ) yağlardan en fazla biyodizel üreten ülkeler ABD, İngiltere ve Avusturya'dır. Avrupa Birliği, biyodizel tüketiminin farkındalığını artırmak için “Avrupa Biyodizel Kurulu” (EBB-European Biodiesel Board) oluşturmuştur. Dizel yakıtta katılacak biyodizel oranı arttırılarak 2005 yılında güncellenmiştir. Almanya ise biyodizeli, “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Öncelik Tanıma Yasası” kapsamında değerlendirilecek yakıt olarak kabul

etmiştir. Biyoyakıtlara 2007 yılından bu yana ara ara vergi indirimi uygulanmış, tarım alanındaki kullanımlar için vergi alımı kaldırılmıştır [43].

3.5.2. Türkiye’de Biyodizel

Ülke kaynaklarından petrol ürünlerine olan ihtiyacımızın yalnızca %9’u karşılanmaktadır. Bu durum ülkemizin alternatif kaynaklara olan ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle biyodizel, ülkemizin ihtiyaç duyduğu petrole ve doğalgaza alternatif bir yakıt olarak ülkemiz için çok önem taşıyan bir yakıt olma durumuna gelmiştir. Büyükşehirlerimizin bazıları hava kirliliğiyle mücadele kapsamında toplu taşımacılıkta kullandıkları araçlarda dizel yakıtta belli oranlarda biyodizel katılması yönünde uygulamalara geçmişlerdir. Fakat biyodizel hammaddesi olarak kullanılan yağlı tohumların temini ülkemizde ihtiyacı karşılayacak seviyeye erişememiştir. Dolayısıyla petrole olan bağımlılığımızın yakın ve orta vadede azalmayacağı aşikârdır [72].

Ülkemizde biyodizel yakıtın, motorine %2 oranında karıştırılması ile elde edilen yakıt için ÖTV indirimi uygulamasına 2006 yılı sonu itibariyle geçilmiştir. Ancak, biyodizelin standart dizel yakıtla karıştırılması konusunda bir zorunluluk olmadığı için biyodizel konusunda istenilen ilerleme sağlanamamıştır. 20.12.2003 tarih ve 25322 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan kanun ile biyodizel, özel tüketim vergisinden muaf tutulmuştur. Bu muafiyetin etkisiyle ülkemizde birçok biyodizel üretim tesisi açılmıştır. Ancak 08.04.2006 tarih ve 25794 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan yasayla birlikte biyodizele litrede 0,6498 TL ÖTV alınmasına başlanmıştır. Bu uygulama ile açılan birçok biyodizel tesisi kapanmıştır [70]. EPDK’dan alınan 14 Eylül 2013 tarihli bilgilere göre, Türkiye’de 23 işletmenin biyodizel üretim lisansına sahip olduğu halde içlerinden sadece bir tanesi (DB Tarımsal Enerji Sanayi ve Ticaret A.Ş.) biyodizel imalatı yapmakta olup, üretimde aspir bitkisini kullanmıştır. EPDK’nın düzenlediği sektör raporuna göre DB Tarım firması 2011 yılında 11646 ton, 2012 yılında 17729 ton biyodizel üretmiştir. Türkiye’de 2016 yılında 395710 dekarlık alana aspir bitkisi ekimi yapılmış olup, ekili alanın 2018 yılı sonu itibariyle 500 bin hektara çıkarılması planlanmaktadır [73].

Biyodizelin motorinle harmanlanması koşuluyla kullanımında atık kızartma yağlarından üretilenler haricindeki karışımlara %2 vergi muafiyeti getirilmiştir. 06.06.2008 tarih ve 26898 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan 5766 sayılı yasayla birlikte atık kızartma yağlardan ve yerli tarım ürünlerinden elde edilen biyodizel yakıttan 72 kuruşluk ÖTV alınmaya başlanmıştır. Ancak 31 Aralık 2013 tarih ve 28868 sayılı Resmî Gazete’de

yayımlanan Özel Tüketim Vergisi Genel Tebliği gereği toplanan atık kızartma yağlardan ve son kullanma tarihi geçmiş bitkisel yağlardan üretilen biyodizel yakıtı %2 ÖTV muafiyeti getirilmiştir [70].

3.6. BİTKİSEL VE ATIK BİTKİSEL YAĞLARDAN BİYODİZEL ÜRETİM PROSESİ

Biyodizel üretiminde çeşitli metotlar bulunmaktadır. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan yöntem transesterifikasyon (alkoliz) yöntemidir. Bu yöntemde hammadde olarak kullanılacak yağ, alkol ile (etanol, metanol), katalizör (asidik, bazik katalizörler ile enzimler) kullanılarak gliserin vererek esterleşir. Biyodizel üretiminde genellikle kanola (kolza), ayçiçek, soya vb. yağları, atık kızartmalık yağlar ve hayvansal yağlar kullanılırken, alkol olarak metanol, katalizör olarak ise sodyum hidroksit, potasyum hidroksit ve sodyum metilat kullanılmaktadır [48]. Biyodizelin yakıt özelliklerini belirleyen en önemli etken, hammadde olarak kullanılan yağın çeşididir. Yağın içeriğindeki yağ asitlerinin çeşitleri ve miktarları biyodizelin yakıt kalitesini ortaya çıkarmaktadır [74].

Biyodizel biyolojik yönden çabuk bozunabilen fakat toksin içermeyen, emisyon değerleri düşük ve çevreyle barışık bir yakıttır [75]. Biyodizel kesinlikle petrol ürünü bir yakıt değildir. Biyodizel, tek başına kullanılabilirken, dizel yakıt ile karıştırılarak da kullanılabilir. Motor ekipmanlarında bir değişiklik yapmadan kullanılabilmektedir. Ancak üretiminde doğal kauçuk malzemesi kullanılan araçlarda biyodizel yakıtı istenildiği gibi kullanılamamıştır. Biyodizel, doğal kauçuk malzemeden yapılan hortum ve contalarda tahribatlar meydana getirmiş olup, tahribatlar sadece B20 (%20 biyodizel ve %80 dizel) yakıtı ve bu yakıttan daha düşük oranda biyodizel/dizel yakıt karışımlarında görülmemiştir. Ayrıca biyodizelin sahip olduğu çözücü özelliği nedeni ile dizel yakıtın, yakıt deposunun duvar ve borularında zamanla oluşan tortu ve kalıntıları çözeceğinden filtrelerin tıkanmasını önlemek için tedbirler alınması gerekmektedir [76].

Biyodizel, dizel yakıt ile karıştırılma oranına göre isimlendirilmektedir. Örneğin standart dizel yakıtı %5 oranında biyodizel yakıt katılmışsa B5 olarak, eğer saf olarak kullanılmışsa B100 olarak isimlendirilmektedir [77].

3.6.1. Bitkisel Yağlardan Biyodizel Üretimi

Üretimde teknolojik açıdan fazla zorluk bulunmamaktadır. Ancak, üretim esnasında en dikkat edilmesi gereken konu, biyodizelin sahip olduğu saflık derecesidir. Bu sebeple rafine işleminin çok önemli olduğu ve biyodizelin %99 oranında veya daha fazla saf üretilmesi gerektiği belirtilmiştir [40].

Enerji içerikleri açısından, bitkisel yağlarla fosil yakıtlar arasında ciddi bir farklılık belirlenememiştir. Fakat viskozitelere bakıldığında, bitkisel yağların viskozitesi fosil yakıtlara göre 10-20 kat daha fazladır. Yüksek viskozite, motor verimliliğinde düşüş, enjektörlerde tıkanma ve motor ömründe kısalma gibi olumsuzluklara neden olmaktadır. Bitkisel yağ veya bitkisel yağ/motorin karışımlarının dizel motorlarda en çok hasarı yakıt besleme sistemine verdiği bilinmektedir. Bu sebeplerden dolayı bitkisel yağların motorda doğrudan kullanılmasının uygun olmadığı görüldüğünden yakıtın motora uyumlu hale getirilmesi ve bitkisel yağların viskozite sorununun çözülmesine ihtiyaç vardır [39].

Bitkisel yağların yakıt özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik yapılan çalışmaların çoğunluğu, bu yağların sahip oldukları yüksek viskozitelerin azaltılması yönündedir. Bitkisel yağların viskozitesinin azaltılmasında, genellikle ısı yöntem ve kimyasal yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan en uygun olan kimyasal yöntemler;

1. Seyreltme (inceltme),
2. Piroliz (ayırıştırma),
3. Mikroemülsiyon,
4. Transesterifikasyon (yeniden esterleme),
5. Süperkritik yöntemler olarak beş gruba ayrılır [39].

Seyreltme yöntemi, bitkisel yağların içerdiği yüksek viskozite değerini aşağılara çekmek amacıyla belirli oranlarda dizel yakıt ile karıştırılarak inceltilmesi işlemidir. Ayrıca bu yöntemle elde edilen yakıtlarda dizel yakıt kullanımı azaltılmış olup, yakıt maliyeti standart dizel yakıtı göre düşük olduğu ve performans değerlerinin standart dizel yakıtı yakın olduğu bildirilmiştir. Bu yöntemde en çok kullanılan bitkisel yağların, ayçiçeği, aspir, kanola, yer fıstığı ve soya olduğu söylenebilir [37, 45, 49].

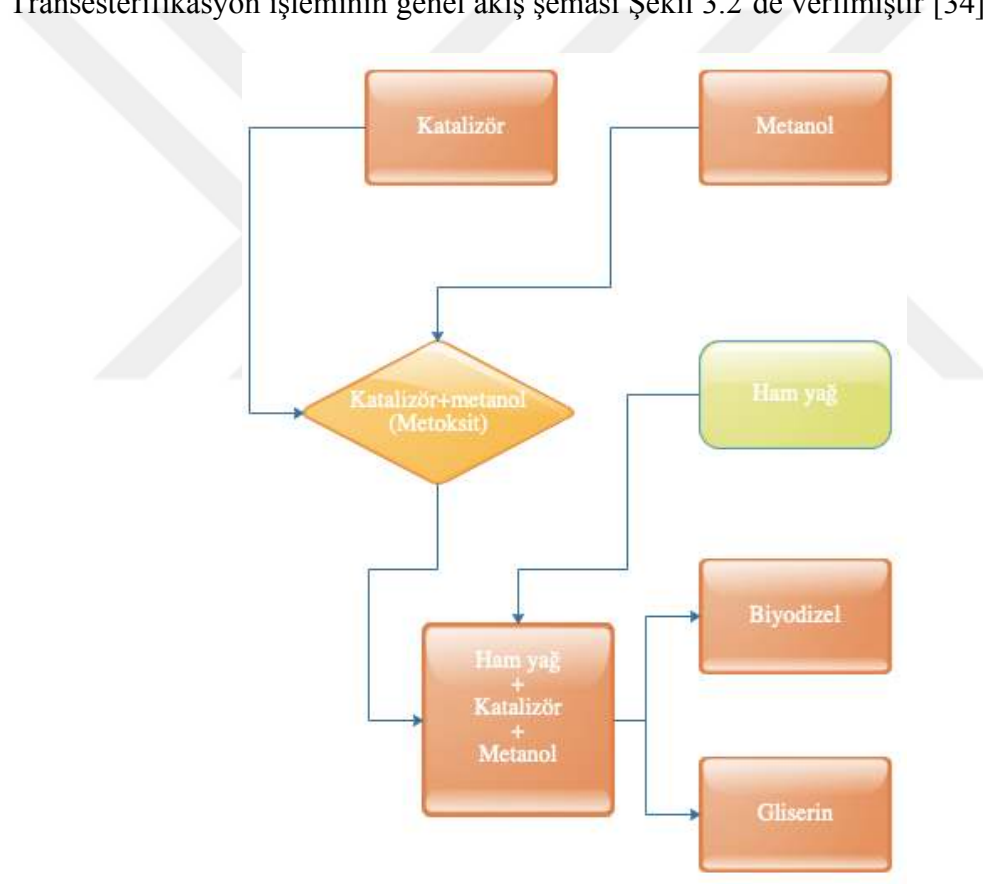
Mikroemülsiyon oluşturma yöntemi, viskozitenin düşürülmesine yönelik metil ve etil alkol gibi sıvılar kullanılarak mikroemülsiyonlar meydana getirilmesi işlemidir.

Piroliz yönteminde ise yağ molekülleri yüksek sıcaklıklarda ısıtılarak içerisindeki hava veya oksijen alınarak kimyasal yapılarında bozulma oluşur. Bu sayede küçük moleküllü

yapılara dönüştürülür. Böylece yağların viskoziteleri düşürülmüş olur. Piroliz işleminde bünyede oksijenin alındığı için oksijen içeren yakıtların çevreye vermiş olduğu faydaları da ortadan kaldırmış olur [34, 45, 49].

Süperkritik yöntem, katalizör kullanılmadan, 350 °C sıcaklıkta ve 240 saniye süresince gerçekleştirilen bir yöntemdir [44].

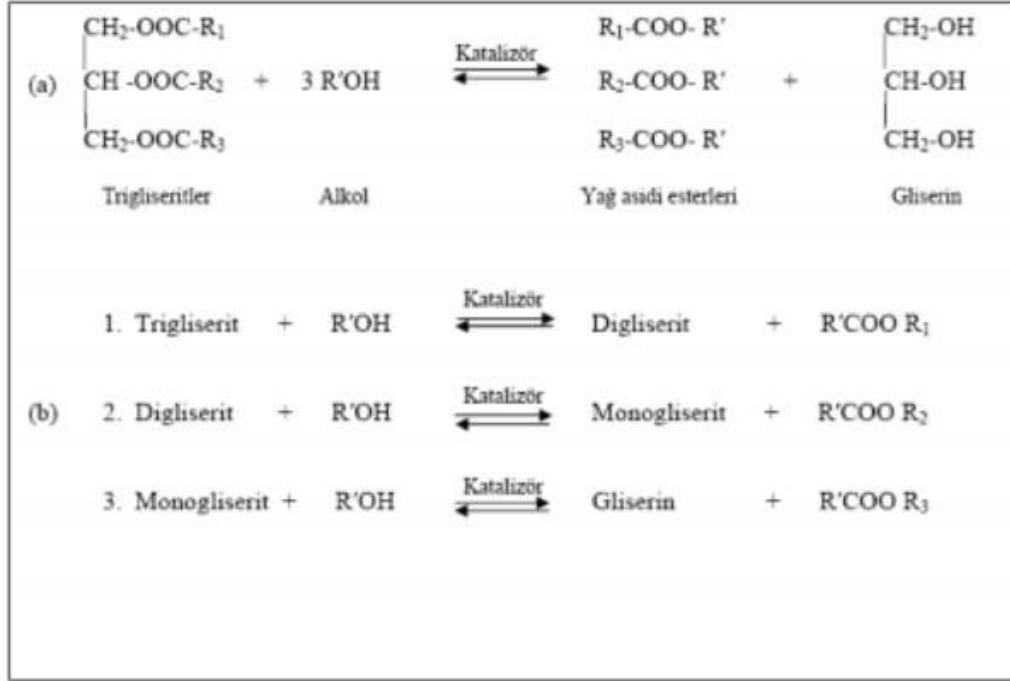
Kimyasal yöntemlerin içinde bitkisel ve hayvansal yağların yakıt özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik uygulanan en önemli yöntem transesterifikasyon yöntemidir. Burada bir trigliserit molekülü alkol ve katalizör birlikte tepkimeye sokularak, gliserin ve yağ asidi alkil esterleri elde edilir. Bitkisel ve hayvansal yağlardan, en çok transesterifikasyon yöntemi tercih edilerek biyodizel üretimi yapılır [77]. Transesterifikasyon işleminin genel akış şeması Şekil 3.2’de verilmiştir [34].



Şekil 3.2. Transesterifikasyon işlemi genel akış şeması.

İşleminin başlangıcında alkol ve katalizör bir depo içerisine alınarak karıştırılır. İşlenmemiş yağ, reaktörün içerisine konur ve 55 °C'ye kadar ısıtılır. Birbiriyle karışan alkol-katalizör, ısıtılan yağın üzerine dökülür ve karıştırılarak bir süre sonra beklemeye alınır. Karışımın bileşimindeki yoğunlukların farklılıklarından dolayı biyodizel üste çıkar, gliserin dibe iner ve tahliye çıkışından alınır. Buna rağmen karışımda gliserin olma

olasılığına karşılık karışım 30-35 °C'deki ılık su ile yıkanır. Yıkama işlemi ile gliserin suya karışır, su ile aralarındaki faz farkından dolayı gliserin dibe çöker ve belli bir süre sonra gliserin boşaltılır. Bütün bunlardan sonra biyodizelin içerisinde su kalma olasılığına karşı, ısıtma işlemi yapılarak suyun buharlaşması sağlanır. Genel transesterifikasyon reaksiyonu şeması ve aşamaları Şekil 3.3'de gösterilmiştir [34].



Şekil 3.3. Trigliseritlerin alkol ile transesterifikasyonu (a) Genel Denklem, (b) Tersinir aşama reaksiyonları (R', R₁, R₂, R₃ alkil gruplarını temsil etmektedir).

Transesterifikasyon işlemi sırasında, reaksiyon zamanına ve ürün dönüşümüne alkol ve katalizörün kullanım miktarlarının etkisi bulunmaktadır. Başka bir etken de tepkime sıcaklığıdır. Viskozitenin transesterifikasyon reaksiyonu sonrası yaklaşık 10 kat daha azaldığı, yoğunluğun ise biraz azaldığı, ayrıca biyodizelin molekül ağırlığının, bitkisel yağın molekül ağırlığından 3 kat az olduğu görülmüştür. Biyodizel üretiminde en fazla kullanılan alkol metanoldür. Başka alkollere göre daha iyi sonuçlar vermesi ve maliyet açısından avantajlı olması, metanolün daha çok tercih edilmesini sağlamaktadır. Transesterifikasyon işleminde tepkimenin hızını, verimini ve bütünlüğünü arttırmak için katalizör kullanılmaktadır [77]. Genelde potasyum hidroksit (KOH) ve sodyum hidroksit (NaOH) en yaygın kullanılan katalizörlerdir. Asit katalizörleri de kullanılabilmekte olup, transesterifikasyon reaksiyonunda asit katalizörler alkali katalizörlere göre tepkime daha yavaş kalmakta ve daha fazla alkol tüketilmesine sebep olmaktadır. Tepkimenin yavaş

olması ile ester dönüşümü beklenenden az düzeyde kalmaktadır. Biyodizel üretimi 5 aşamada gerçekleşmektedir. Bunlar aşağıdaki gibidir:

1. Alkol ve katalizörün birbiriyle karıştırılması,
2. Transesterifikasyon reaksiyonu,
3. Gliserini ayırma işlemi,
4. Alkol distilasyonu,
5. Yıkama işlemleri [63].

3.6.2. Atık Bitkisel Yağlardan Biyodizel Üretimi

Bitkisel yağların dizel motorlarda kullanılması ekonomik yönden dezavantajlı bir durumdur. Bitkisel yağa alternatif olarak bitkisel atık yağların kullanılması daha az maliyetlidir. Bitkisel yağlar kullanıldıktan sonra, fiziksel ve kimyasal yapıları üzerinde değişiklik görülmekte olup, örneğin yağ ile kızartma esnasında sıcaklığın yükselmesine paralel olarak, yağın özelliklerini değiştirici etkiye sahip hidroliz, oksidasyon ve polimerizasyon benzeri kimyasal tepkimeler meydana gelmektedir. Bu durum karşısında yoğunluk, serbest yağ asidi, viskozite ve sabunlaşma değeri miktarlarının yükseldiği, iyot değerinin ise düştüğü görülmektedir [33, 37, 78].

Atık bitkisel yağların bitkisel yağlara göre özelliklerinde farklılıklar olduğundan dolayı dizel motorlarda sorunsuz kullanılabilmeleri için yağın bünyesindeki su ve istenmeyen diğer unsurların uzaklaştırılması gerekmektedir [37]. Atık bitkisel yağlar ile bitkisel yağların analiz sonuçlarına bakıldığında, aralarında belirgin bir fark olmadığı görülmektedir. Transesterifikasyon reaksiyonu için ısıtma ve katı maddelerin filtre edilmeleri yeterli olabilecektir [39].

Transesterifikasyon reaksiyonu için ısıtma ve katı maddelerin filtre edilmesi yeterlidir. Genellikle atık kızartma yağlarının serbest yağ asidi (SYA) seviyeleri %2 kütle oranından daha fazladır [39]. Kızartma esnasında bitkisel yağların viskoziteleri artmaktadır. Bu artış bileşiklerin ortaya çıkmasına ve molekül ağırlıklarının artmasına bağlıdır. Bu durumun tek sebebi polimerizasyon olarak değerlendirilmektedir. Atık yağlar kullanıldığında özelliklerinin değişmesi ve serbest yağ asit oranının artması görülebilmektedir. Eğer bir yağın içerisinde serbest yağ asidi miktarı yüksek ise ve alkali katalizörle reaksiyona sokulmuşsa, sabun oluşumunun gerçekleştiği görülecektir. Eşitlik 3.1’de sabun oluşum reaksiyon denklemi verilmiştir [33].



Alkali katalizörler ile serbest yağ asidi yüksek olan yağlar doğrudan tepkimeye sokulmamaktadır. Bu nedenle atık bitkisel yağlar ile transesterifikasyon işlemine başlamadan önce yağdaki serbest yağ asidi miktarı belirlenmelidir. Serbest yağ asidi miktarı %0,5'den fazla ise asit katalizörleri (H_2SO_4 , H_3PO_4 , HCl) kullanılması uygun olacaktır. Eğer böyle bir uygulama yöntemi seçilirse serbest yağ asitleri mono esterlere dönüşümü sağlanmış olur ki, bu yönteme ön iyileştirme denir. Ön iyileştirme işlemi sayesinde yağdaki serbest yağ asidi miktarı da düşürülmüş olur. Serbest yağ asidi miktarı istenilen düzeye indirildiğinde, transesterifikasyon reaksiyonu işlemine geçilebilir. Eşitlik 3.2'de asit katalizör eşliğinde transesterifikasyon reaksiyonu görülmektedir [33].



Ortamdaki su miktarı ile asidik transesterifikasyon reaksiyonun hızı birbiriyle ters orantılıdır. Görülen ters orantı, ortamda bulunan suyun katalizörü önlemesinden kaynaklanmaktadır. Bu durumda asidik reaksiyonda ortamın su miktarı takibe alınmalı ve ihtiyaç olması durumunda ise bu suyun kurutulması ya da uzaklaştırılmasına çalışılmalıdır [33].

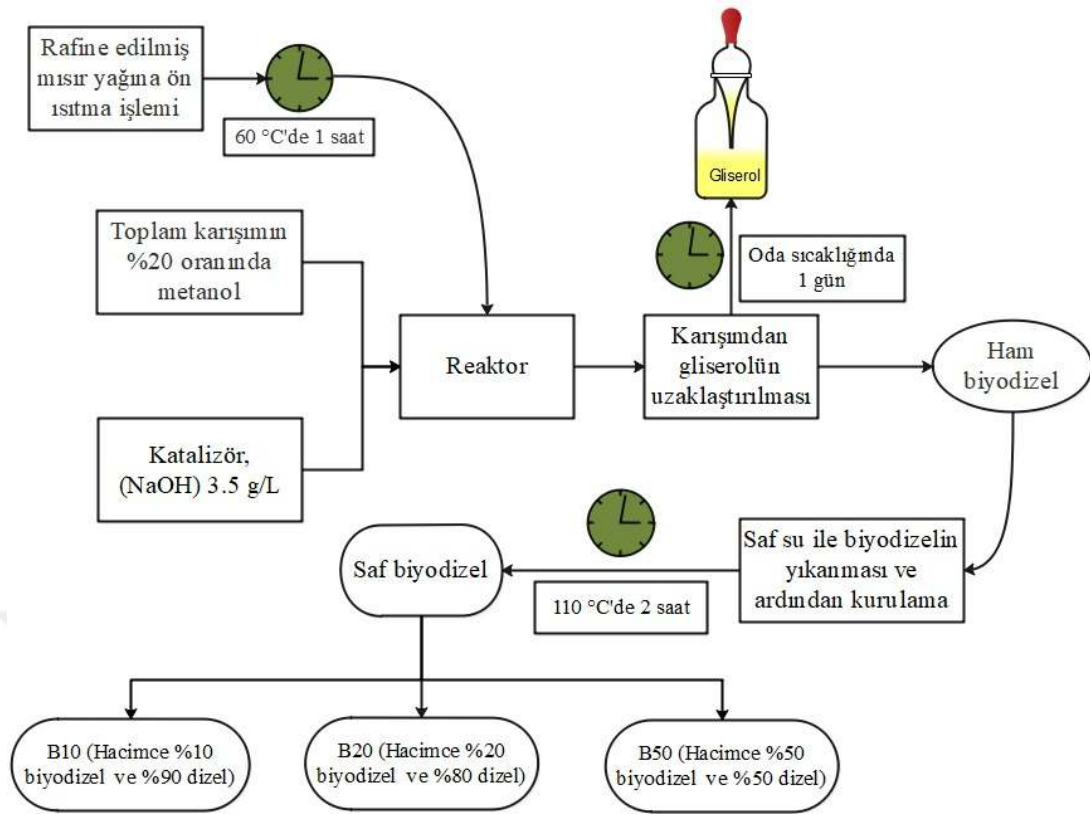
4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, transesterifikasyon yöntemi ile rafine edilmiş mısır yağından, mısır yağı metil esteri (biyodizel) üretilmiştir. Üretilen mısır yağı metil esteri (MYME), hacimsel olarak %10, %20 ve %50 oranlarıyla standart dizel yakıt (M0) ile karıştırılarak M10, M20 ve M50 yakıtları elde edilmiştir. Elde edilen biyodizel içerikli yakıtlar, dört farklı motor yükü altında (2,5 Nm, 5 Nm, 7,5 Nm ve 10 Nm) ve sabit devirde (2000 dev/dak) tek silindirli dizel bir motorda 210 bar ve 230 bar püskürtme basınçlarında test edilmiştir.

Çalışmanın genel prosedürü temel olarak 3 ana başlıktan oluşmaktadır. Çalışmanın ilk aşaması biyodizel üretim sürecini kapsamaktadır. Bu süreçte biyodizel, transesterifikasyon yöntemi ile üretilmiştir. İkinci aşama ise motor test düzeneği ile deneylerin gerçekleştirilmesini kapsamaktadır. Bu aşamada, motor yanma performansını değerlendirebilmek için kullanılacak veriler toplanmıştır. Çalışmanın son aşamasını ise elde edilen verilerin analizi ve yorumlanması süreci oluşturmaktadır.

4.1. BİYODİZEL ÜRETİMİ

Deneylerde kullanılan mısır yağı biyodizeli TS EN 14214 standardına uygun olarak transesterifikasyon yöntemi ile elde edilmiştir. Biyodizel üretiminde katalizör olarak sodyum hidroksit (NaOH) 3,5 g/L oranında ve metanol ise hacimsel olarak %20 oranında kullanılmıştır. Biyodizel üretimin akış şeması Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Transesterifikasyon yöntemi ile biyodizel üretimi akış şeması.

Reaksiyon işlemi 60 °C'de (± 2 °C) 1 saat boyunca gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, dinlenmeye bırakılan karışım içerisinde yoğunluk farkından dolayı dibe çöken gliserin ayırıştırma kabı kullanılarak sistemden uzaklaştırılmıştır. Saf biyodizel elde edildikten sonra, kalıntı gliserin, tuz veya metanol gibi bileşiklerin karışımda olma ihtimali düşünülerek karışımın bu kalıntılardan temizlenmesi amacıyla elde edilen biyodizel saf su ile yıkanmıştır. Yıkama işleminden sonra karışıma 2 saat boyunca 110 °C sıcaklık uygulanmış ve saf suyun karışımdan uzaklaştırılması sağlanmıştır. Bu işlem sonucunda nihai biyodizel üretimi gerçekleşmiştir.

Şekil 4.1'de gösterilen akış şemasına uygun olarak üretilen saf biyodizel yakıtı, saf mazot yakıtı hacimce %10, %20 ve %50 oranında ilave edilerek B10, B20 ve B50 olarak adlandırılan test yakıtları elde edilmiştir. Elde edilen biyodizel test yakıtlarının karşılaştırılabilirliği ve etkilerinin anlamlandırılması amacıyla tüm deneyler bu 3 biyodizel yakıt tipine ek olarak, biyodizel içermeyen %100 saf dizel referans yakıtı (B0) ile de gerçekleştirilmiştir.

4.2. MOTOR TEST DÜZENEĞİ

Deneyler, direkt enjeksiyonlu tek silindirli ve 4 zamanlı, hava soğutmalı Lombardini 15 LD marka dizel motor ile gerçekleştirilmiştir. Deney motorunun teknik özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Deney motorunun teknik özellikleri.

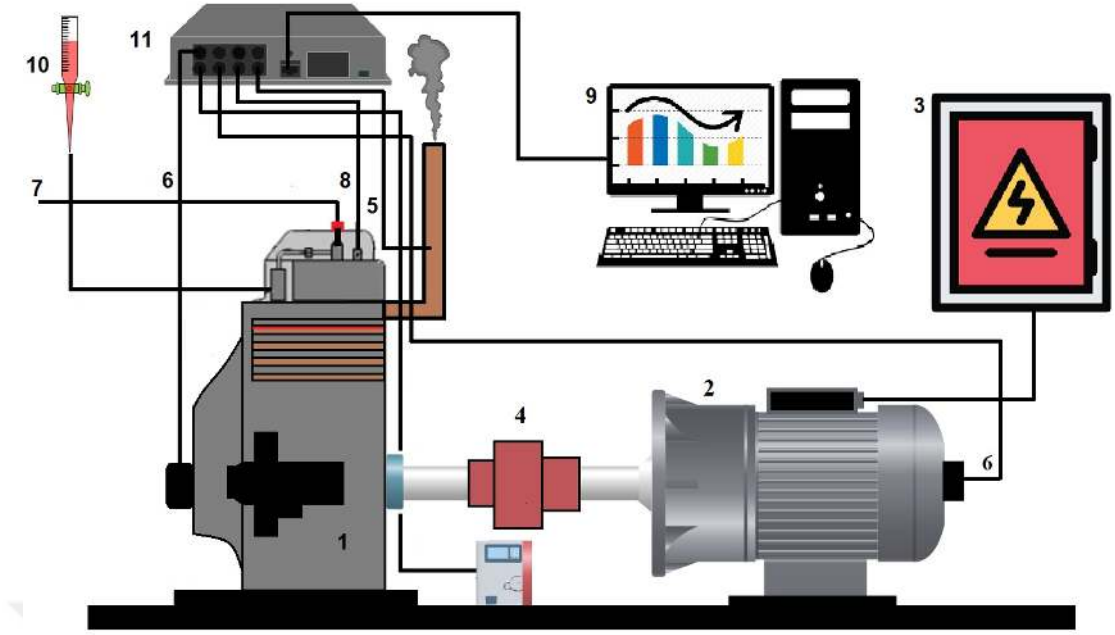
Silindir sayısı	1
Kurs hacmi	349 m ³
Sıkıştırma oranı	20,3:1
Soğutma sistemi	Hava soğutmalı
Maksimum motor devri	3600 dev/dak
Enjektör açılma basıncı	207 bar
Maksimum motor momenti	16,6 Nm (2400 dev/dak)

Motor 15 kW güç absorbe etme kapasitesine sahip Kemsan marka bir elektrikli dinamometre ile yüklenmiştir. Kistler Rotor tipi 4550A tork ölçüm sistemi ile motor torku ölçülmüştür. Çizelge 4.2’de tork ölçüm sisteminin teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.2. Tork ölçüm sistemi teknik özellikleri.

Model	Kistler Rotor tipi 4550A tork ölçüm sistemi	
Nominal tork	Nm	50
Maksimum tork	Nm	2 x nominal tork
Doğruluk	%	0,05
İşletme sıcaklık aralığı	°C	10-60

Çalışmada kullanılan deneysel düzeneğe ait şematik gösterim Şekil 4.2 ile gösterilmektedir.



1. Test motoru, 2. Dinamometre, 3. Kontrol paneli, 4. Torkmetre, 5. Egzoz gazı emisyon cihazı, 6. Enkoder, 7. İvmeölçer, 8. Silindir içi basınç sensörü, 9. Bilgisayar, 10. Yakıt tüketim büreti, 11. Anakart

Şekil 4.2. Deneysel düzeneğin şematik gösterimi.

Deneyler 210 ve 230 bar enjektör basıncında, 2000 dev/dak sabit hızda ve dört farklı yük altında (2,5 Nm, 5 Nm, 7,5 Nm ve 10 Nm) gerçekleştirilmiştir. Motor hızı tüm deneyler boyunca 2000 dev/dak'da sabit tutulmuştur. Her bir deney motor yağı sıcaklığı 40 °C'ye ulaştığında başlatılmıştır. Aynı koşullar altında her test üç kez tekrarlanmıştır. Tekrarlanan deneylerin aritmetik ortalaması alınarak sonuçlar elde edilmiştir. Yanma işlemini analiz etmek amacıyla Febris yazılımı kullanılmıştır. Krank açısına bağlı olarak silindir içi basınç değişimi bu yazılımın çalıştığı bilgisayara bağlanan sensörler ile elde edilmiştir. Silindir basıncı oprant marka basınç sensörü, krank açısı kübler marka enkoder ile ölçülmüştür. Krank açısına bağlı olarak, yanma işleminin başlaması ve bitmesi göz önüne alınarak ısı yayılım oranı tespit edilmiştir. Tüm veriler, 750 çevrimin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Kullanılan yazılım, ısı yayılım oranını termodinamiğin birinci kanuna bağlı olarak Eşitlik 4.1'de verilen eşitliğe göre hesaplamıştır.

$$\frac{\partial Q_n}{\partial \phi} = \frac{k}{k-1} P \frac{\partial V}{\partial \phi} + \frac{1}{1-k} V \frac{\partial P}{\partial \phi} \quad (4.1)$$

Eşitlikte, politropik sabitidir ve bu çalışma için 1,37 alınmıştır, n ise politropik indeksi temsil etmektedir. ∂P silindir içi basıncın değişimini, ∂V ise piston hareketlerine bağlı olarak silindir hacmindeki değişimi göstermektedir. Öte yandan, θ krank açısını göstermektedir.

Çalışma kapsamında özgül yakıt tüketimi de değerlendirilmiştir. Özgül yakıt tüketimi (ÖYT) aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{ÖYT} = \frac{\dot{m}}{P_e} \quad (4.2)$$

Eşitlikte $\dot{m}$ tüketilen saatlik yakıt miktarı (g/h) ve P_e efektif güçtür (kW). Efektif güç, Eşitlik 4.3 kullanılarak hesaplanabilir.

$$P_e = \frac{M_d \times \dot{n}}{9549} \quad (4.3)$$

Eşitlikte M_d tork (Nm) ve $\dot{n}$ devir sayısıdır (dev/dak).

Çalışmada, segmanlardan ve bağlantı noktalarından herhangi bir hava sızıntısı olmadığı kabulüyle hesaplar yapılmıştır. Çalışmada, silindir içerisinde bulunan gazın ideal gaz olduğu ve yanma odasındaki termodinamik özelliklerini tüm deneyler boyunca koruduğu varsayımı yapılmıştır. Ayrıca yanma süresi, yanma prosesinin başlamasından sonlanmasına kadar geçen süreyi temsil etmektedir.

Çalışma kapsamında yapılan analizlerde kullanılan deneysel sistem Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Deneysel sistem.

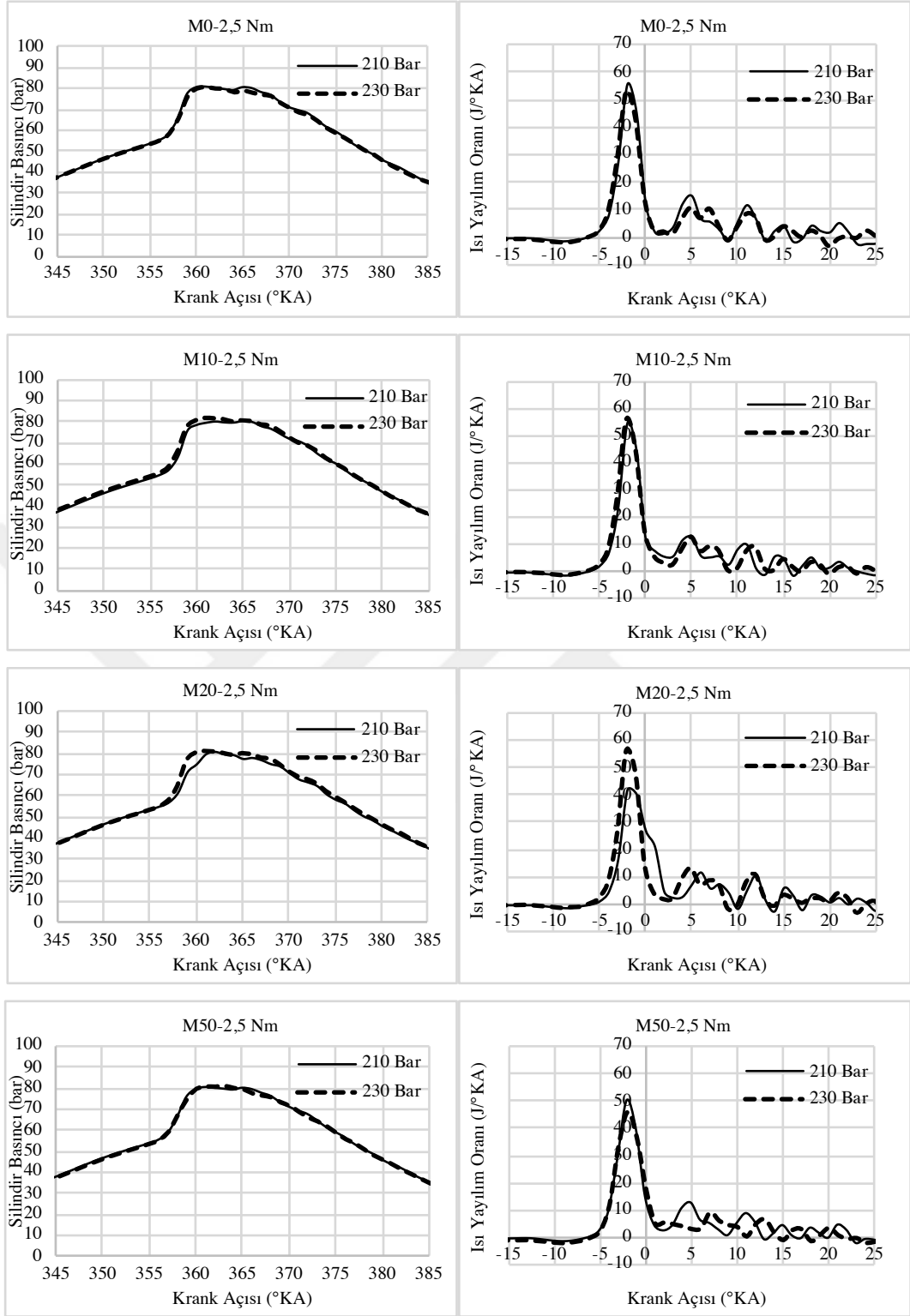
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, mısır yağından üretilen mısır yağı metil esterinin farklı oranlarda dizel yakıtla karıştırılmasının, bir dizel motor üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneyler sabit motor devrinde (2000 dev/dak) ve dört farklı motor yükünde yapılmıştır. Bu motor yükleri sırasıyla, 2,5 Nm, 5 Nm, 7,5 Nm ve 10 Nm'dir. Çalışmada dört farklı motor yükünün seçilmesinin nedeni, farklı koşullardaki performansları değerlendirebilmek, böylece biyodizel kullanımın etkilerini daha gerçekçi bir bakış açısıyla yorumlayabilmektir.

Çalışmada mısır yağı kullanıldığından bundan sonraki bölümlerde yakıt sınıflandırmaları, M0, M10, M20 ve M50 olarak tanımlanacaktır. Çalışmada mısır yağı metil esteri, saf dizel yakıt içerisine farklı oranlarda karıştırılmıştır. Böylece M10, M20 ve M50 biyodizel yakıtlar elde edilmiştir. Gerçekçi bir yorumlama ve bir referans noktası da oluşturabilmek adına M0 (saf dizel) yakıt kullanan bir motora ait performans değerlendirmesi de yine yukarıda açıklanan şartlarda gerçekleştirilmiştir. Biyodizel kullanımında enjektör basınçlarının etkilerini de yorumlayabilmek adına deneyler, 210 bar ve 230 bar enjektör basınçlarında yapılmıştır.

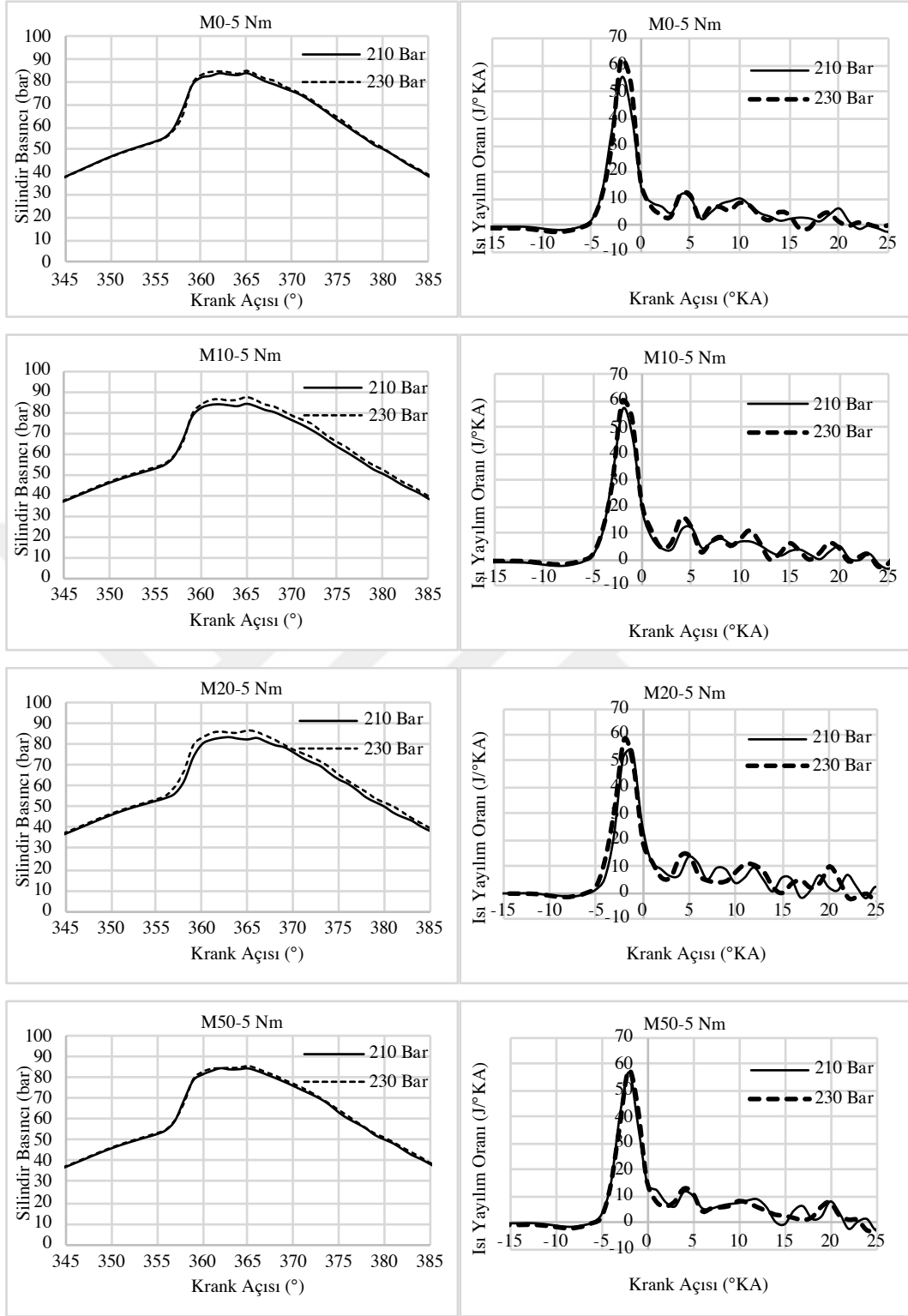
Şekil 5.1'de 2.5 Nm motor yükü için M0, M10, M20 ve M50 deney yakıtlarının farklı motor yüklerinde oluşan silindir basınçları (bar) ve ısı yayılım oranlarının ($J/^{\circ}KA$) krank açısına göre değişimleri, farklı enjeksiyon basınçlarına göre verilmiştir.

Şekil 5.1'de görüldüğü gibi her iki enjeksiyon basıncı için de tüm yakıtlarda birbirine yakın silindir içi basınç değerleri elde edilmiştir. Bu durum 2,5 Nm yük değerinin çok küçük olmasından kaynaklanmaktadır. M0 ve M50 ile 210 bar'da daha büyük ısı yayılım oranları elde edilirken, M10 ve M20 ile 230 bar'da daha büyük ısı yayılım oranları elde edilmiştir. 210 bar, motorun katalog püskürtme basıncı olan 207 bar'a daha yakın olduğundan dolayı M0 ile 210 bar'da, 230 bar'a göre daha büyük maksimum ısı yayılım oranı elde edilmiştir. Biyodizel içerikli yakıtların O_2 içeriğinin fazla olması yanmayı iyileştirip maksimum ısı yayılım oranını artırırken, alt ısı değerlerinin küçük olması maksimum ısı yayılım oranlarını azaltıcı yönde etkilemiştir. Bu nedenle M0, M10 ve M20 yakıtlarının maksimum ısı yayılım oranları birbirine yakın iken M50 ile en küçük maksimum ısı yayılım oranı elde edilmiştir.



Şekil 5.1. 2,5 Nm motor yükü için silindir basıncı ve ısı yayılım oranının krank miline göre değişimi.

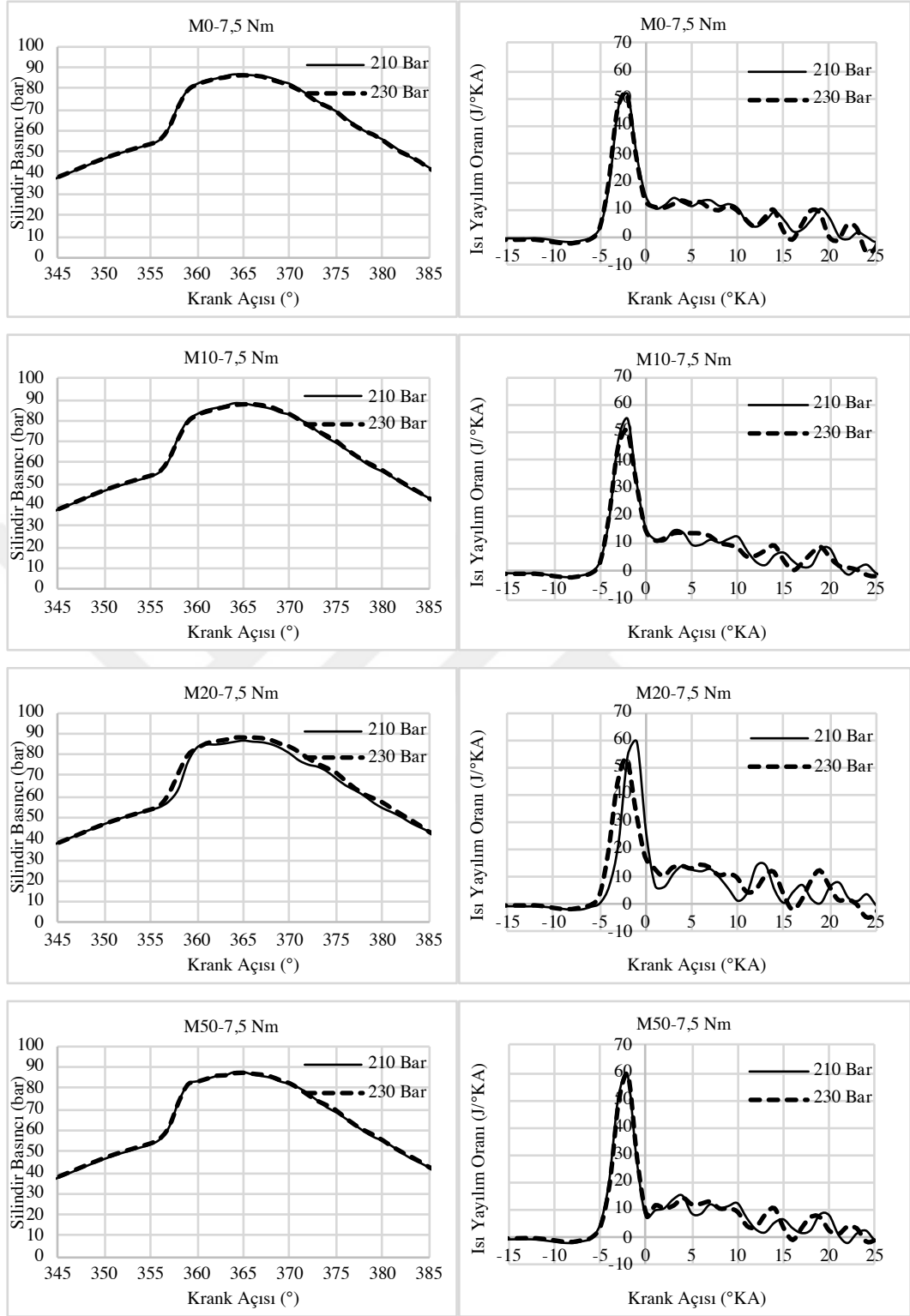
Şekil 5.2’de 5 Nm motor yükü için M0, M10, M20 ve M50 deney yakıtlarının farklı motor yüklerinde oluşan silindir basınçları ve ısı yayılım oranlarının krank açısına göre değişimleri, farklı enjeksiyon basınçlarına göre verilmiştir.



Şekil 5.2. 5 Nm motor yükü için silindir basıncı ve ısı yayılım oranının krank miline göre değişimi.

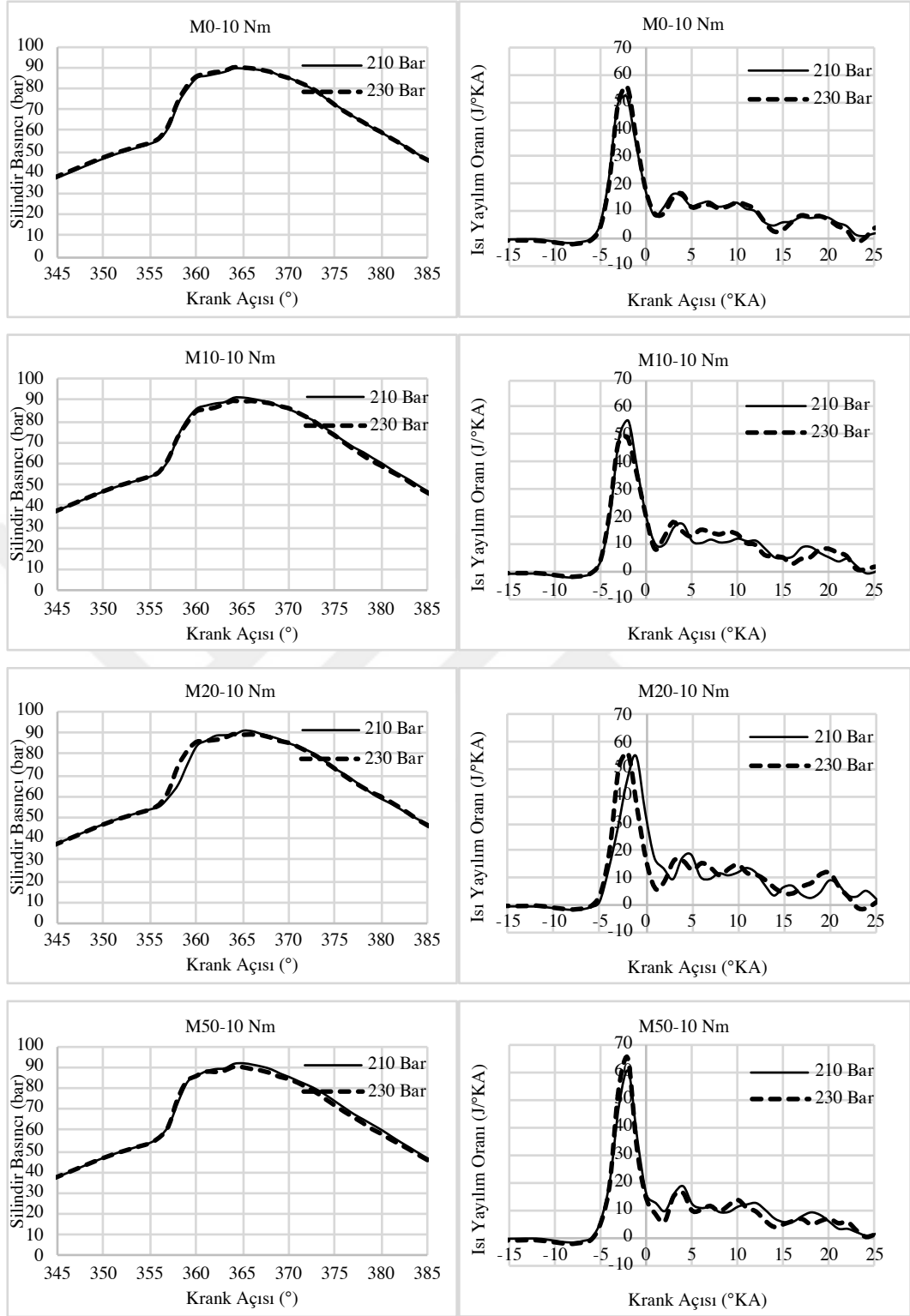
Şekil 5.2’de görüldüğü gibi, maksimum silindir basıncı, yakıt karışımları içeriğindeki biyodizel oranına bağlı olarak artmaktadır. Biyodizel içerikli yakıtların alt ısı değerleri ve setan sayıları M0’a göre daha küçüktür. Bu nedenle biyodizel içerikli yakıtların tutuşma gecikmesi süreleri M0’a göre daha uzundur. Bu nedenle M0 ile en küçük maksimum silindir basıncı elde edilir iken M50 ile en büyük maksimum silindir içi basınç değeri elde edilmiştir. Biyodizel içerikli yakıtların alt ısı değerleri M0’a göre küçük olduğundan dolayı, M50 ile en küçük maksimum ısı yayılım oranı elde edilirken, M0 ile en büyük değer elde edilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi 230 bar enjeksiyon basıncında tüm yüklerde 210 bar’a göre daha büyük maksimum silindir basınçları ve ısı yayılım oranları elde edilmiştir. 230 bar enjeksiyon basıncında tüm yakıtlar 210 bar’a göre daha iyi atomize olmuşlardır. Bu durum yakıtların yanma kalitesini artırarak maksimum silindir içi basınç değerlerini artırmıştır.

Şekil 5.3’de 7,5 Nm motor yükü için M0, M10, M20 ve M50 deney yakıtlarının farklı motor yüklerinde oluşan silindir basınçları ve ısı yayılım oranlarının krank açısına göre değişimleri, farklı enjeksiyon basınçlarına göre verilmiştir. Tüm yakıtlar için birbirlerine yakın maksimum silindir basınçları elde edilmiştir. Tüm yakıtlar için, 210 bar’da daha büyük maksimum ısı yayılım oranları elde edilmiştir. Ayrıca biyodizel içerikli yakıtların tutuşma gecikmesi süresi M0’a göre daha fazla olduğundan dolayı, maksimum silindir basınçları da daha yüksektir.



Şekil 5.3. 7,5 Nm motor yükü için silindir basıncı ve ısı yayılım oranının krank miline göre değişimi.

Şekil 5.4’de 10 Nm motor yükü için M0, M10, M20 ve M50 deney yakıtlarının farklı motor yüklerinde oluşan silindir basınçları ve ısı yayılım oranlarının krank açısına göre değişimleri, farklı enjeksiyon basınçlarına göre verilmiştir.



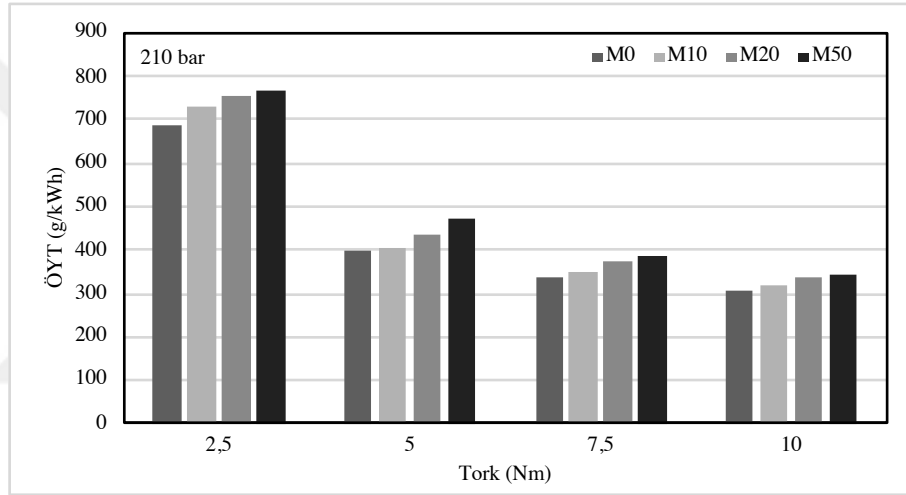
Şekil 5.4. 10 Nm motor yükü için silindir basıncı ve ısı yayılım oranının krank miline göre değişimi.

Tüm yakıtlar için her iki enjeksiyon basıncında da birbirlerine yakın silindir basınç değerleri elde edilirken, M10 haricindeki tüm yakıtlar ile 230 bar'da daha büyük maksimum ısı yayılım oranları elde edilmiştir. 10 Nm yük altında, 230 bar'da yakıtların

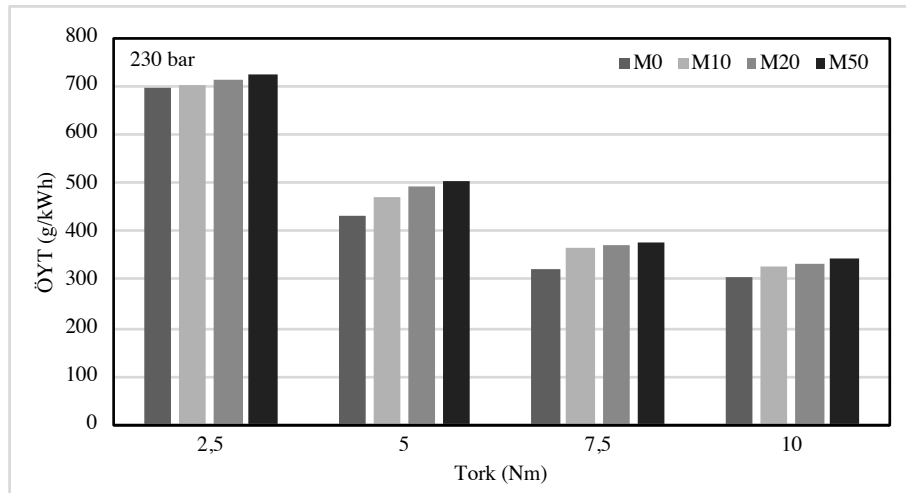
daha fazla atomize olmaları yanma kalitesini artırarak maksimum ısı yayılım oranlarını artırmıştır.

Şekil 5.1-5.4'te görüldüğü gibi motor yükünün artmasına bağlı olarak maksimum silindir içi basınç değerleri ve ısı yayılım oranı değerleri artmaktadır. Bu durum motor yüküne bağlı olarak silindir içerisine daha fazla yakıt püskürtülmesinden kaynaklanmaktadır. Püskürtülen yakıt miktarının artışı, yanma sonucu açığa çıkan enerji miktarını artırmıştır. Bu nedenle yüksek motor yüklerinde silindir içi basınçlar maksimum değer almaktadır.

Şekil 5.5'te 210 bar enjeksiyon basıncında ve Şekil 5.6'da 230 bar enjeksiyon basıncında özgül yakıt tüketiminin değişimi, dört farklı tork değerine göre M0, M10, M20 ve M50 yakıtları için verilmiştir.



Şekil 5.5. 210 bar enjeksiyon basıncı için ÖYT değerinin değişimi.



Şekil 5.6. 230 bar enjeksiyon basıncı için ÖYT değerinin değişimi.

Her iki şekilde de görüldüğü gibi saf dizel yakıtın (M0) özgül yakıt tüketimi değeri tüm tork değerlerinde en düşük olarak belirlenmiştir. M50 yakıtının özgül yakıt tüketimi ise tüm tork değerleri için en yüksek olmuştur. M50 yakıtı kullanımında özgül yakıt tüketiminin tüm tork değerleri için yüksek çıkmasının başlıca nedeni, bu yakıtın alt ısı değerin, M0 yakıtından daha düşük olmasıdır. M50 yakıtı kullanıldığında motor, aynı torku elde edebilmek için çok daha fazla yakıt tüketmektedir. Bu da özgül yakıt tüketimini artırmaktadır.

Benzer bir durum diğer yakıt karışımları için de geçerlidir. Şekil 5.5 ve 5.6'da görüldüğü gibi yakıtlardaki karışım oranı arttıkça özgül yakıt tüketimi değeri artış göstermektedir. Biyodizel içerikli yakıtların alt ısı değerin düşük olması özgül yakıt tüketimlerini etkileyen oldukça önemli bir parametre olmuştur.

230 bar enjeksiyon basıncında, biyodizel içerikli yakıtların özgül yakıt tüketimlerinin, 210 bar enjeksiyon basıncına göre daha düşük olduğu her iki şekilden de görülmektedir. Bunun nedeni, yüksek enjeksiyon basıncında biyodizel içerikli yakıtların daha iyi atomize olmasıdır. Bu sayede ısı verim artmakta ve özgül yakıt tüketimi de düşmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada dizel yakıtla farklı oranlarda karıştırılmış, mısır yağından elde edilen biyodizel yakıtlar ve saf dizel yakıt, farklı yük koşullarında ve farklı enjeksiyon basınçları altında deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda aşağıda listelenen sonuçlara ulaşılmıştır:

- Silindir içi basınçlar motor yüküne bağlı olarak tüm yakıt tiplerinde artış göstermiştir. Bu durumun nedeni, motor yükündeki artışla birlikte motora daha fazla yakıt gönderilmesidir.
- Saf dizel yakıt (M0) kullanımında enjektör basıncındaki değişim, ısı yayılım oranını dolayısıyla yanma kalitesini çok fazla etkilemediği görülmüştür. Saf dizel yakıt, biyodizele göre daha düşük viskoziteye sahip olduğundan enjektör basınçlarındaki değişimler, yanma kalitesinde önemli bir değişikliğe neden olmamıştır.
- Dizel yakıt içerisindeki biyodizel katkı oranı arttıkça enjektör basınçlarındaki değişimler daha anlamlı hale gelmiştir. Biyodizel yüksek yoğunluğa ve yüksek viskoziteye sahip bir yakıt olduğundan, yüksek enjektör basınçlarında çok daha iyi bir atomizasyon gerçekleşmekte bu da yanma kalitesini artırmaktadır.
- Biyodizel içerikli yakıtların alt ısı değerlerinin M0'a göre düşük olması, maksimum ısı yayılım oranı değerlerini biyodizel oranına bağlı olarak azaltmıştır.
- Bununla birlikte, biyodizel içerikli yakıtların setan sayısının düşük olması tutuşma gecikmesi süresini uzatmaktadır.
- Bu durum tutuşma gecikmesi süresi boyunca daha fazla yakıtın silindire püskürtülmesine neden olmaktadır. Bu nedenle alt ısı değer, silindir içi maksimum basınca azaltıcı yönde etki ederken, düşük setan sayısı ise silindir içi maksimum basınca artırıcı yönde etki etmektedir.
- Tutuşma gecikmesi süresince yanma odasında daha fazla biriken yakıtın, aniden yanarak maksimum silindir içi basınç değerini artırdığı düşünülmektedir.

Çalışmanın sonuçları irdelendiğinde, bundan sonra yapılacak olan çalışmalar için aşağıdaki önerileri getirmek mümkün gözükmektedir:

- Çalışma kapsamında farklı tipte biyoyakıtlar üretilerek, bu yakıtların performansları karşılaştırılabilir.
- Deneysel parametreler değiştirilerek farklı çalışma koşulları için deneyler uygulanabilir.
- Motor çalışma performansına yönelik titreşim ve gürültü ölçümlerinin yapılması mümkündür. Bu sayede kullanılan biyoyakıtın sadece termodinamik açıdan değil aynı zamanda da gürültü kirliliğine olan etkileri de analiz edilebilir.
- Çevresel etkiler de düşünülerek, atık yağlardan elde edilen biyodizel yakıtlar da incelenebilir.
- Biyoyakıtların araçların yakıt sistemlerindeki ve motor aksamlarındaki malzemelere üzerine etkilerini daha detaylı inceleyebilmek amacıyla belli kullanım süresi boyunca testler yapılabilir.

7. KAYNAKLAR

- [1] S. Göçer ve Z. Zaimoğlu, “Üçüncü ve dördüncü nesil biyoyakıtların araştırılması,” *Uluslararası GAP Yenilenebilir Enerji ve Enerji Verimliliği Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 2018, ss. 66-67.
- [2] T. Ölçüm, “Biyodizel teknolojisi,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2006.
- [3] Y. Sekmen ve A. Aktaş, “Soya yağı metil esterinin dizel motor performans ve egzoz emisyonlarına etkileri,” *Gazi Üniversitesi Mühendislik Politeknik Dergisi*, c. 11, sayı 3, ss. 249-254, 2018.
- [4] N. Alçelik, “Atık yağlardan üretilen biyodizelin tek silindirli bir dizel motorun performans, egzoz emisyonları ve titreşimine olan etkilerinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2017.
- [5] A. Keskin, “Pamuk yağı metil esteri-eurodizel yakıt karışımlarının direkt püskürtmeli bir dizel motorunun yanma, performans ve emisyon karakteristiklerine etkisi,” *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 34, sayı 2, ss. 915-927, 2019.
- [6] A. N. Özsezen ve M. Çanakçı, “Biyodizel ve karışımlarının kullanıldığı bir dizel motorda performans ve emisyon analizi,” *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 15, sayı 2, ss. 173-180, 2009.
- [7] A. A. Aziz, M. F. Said and M. A. Awang, “Performance of palm oil- based biodiesel fuels in a single cylinder direct injection engine,” *Palm Oil Development*, c. 42, ss. 15-27, 2005.
- [8] N. Usta, Ö. Can and E. Öztürk, “An experimental study on performance and exhaust of a diesel engine fuelled with diesel fuel no. 2/waste sunflower oil methyl ester blends,” *9th International Combustion Symposium*, Kırıkkale, Turkey, 2006, ss. 89-103.
- [9] M. E. Gomez, R. Howard-Hildige, J. J. Leahy, T. O'Reilly, B. Supple and M. Malone, “Emission and performance characteristics of a 2 liter Toyota diesel van operating on esterified waste cooking oil and mineral Diesel fuel,” *Environmental Monitoring and Assessment*, c. 65, ss. 13-20, 2000.
- [10] International Energy Agency (IEA), “CO₂ emission from fuel combustion,” ss. 37-39, 2012.
- [11] S. S. Sidibe, J. Blin, G. Vaitilingom and Y. Azoumah, “Use of crude filtered vegetable oil as a fuel in diesel engines state of the art: Literature review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 14, ss. 2748-2759, 2010.

- [12] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, New York, USA: McGraw-Hill, 1988, ss. 491-558.
- [13] S. M. Geyer, M. J. Jacobus and S. Lestz, "Comparison of diesel engine performance and emissions from neat and transesterified vegetable oils," *Transaction of the ASAE*, c.27, sayı 2, ss. 375-381, 1984.
- [14] H. Yıldırım, A. Çınar, Ö. Şaylı and H. Köylü, "Vibration and noise analysis of an engine fuelled with diesel and biodiesel blends," *International Conference on Advances in Mechanical Engineering*, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [15] A. R. Tahir, H. M. Lapp and L. C. Buchanan, "Sunflower oil as fuel for compression ignition engines," *International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels*, North Dakota, USA, 1982, ss. 82-91.
- [16] F. Karaosmanoğlu ve H. A. Aksoy, "Kullanılmış kızartma atık yağının seyreltme yöntemi ile alternatif yakıt olarak değerlendirilmesi," *6. Enerji Kongresi*, İzmir, Türkiye, 1994, ss. 461-462.
- [17] N. Yılmaz and B. Morton, "Comparative characteristics of compression ignited engines operating on biodiesel produced from waste vegetable oil," *Biomass and Bioenergy*, c. 35, sayı 2, ss. 2194-2199, 2011.
- [18] C. L. Peterson and D. Reece, "Potential of vegetable oils as a transportation fuel," *ASCE (American Society of Civil Engineers) Third International Conference on Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering*, Washington, USA, 1995, ss. 242-248.
- [19] R. Altın ve S. Yücesu, "Pamuk yağının dizel motorlarında yakıt olarak kullanılması ve motor performansının belirlenmesi," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 12, ss. 117-131, 1999.
- [20] E. Büyükkaya, "Effects of biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics," *Fuel*, c. 89, ss. 3099-3105, 2010.
- [21] H. Masjuki, M. Z. Abdulmuin and H. S. Sii, "Indirect injection diesel engine operation on palm oil methyl esters and its emulsions," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part D*, c. 211, sayı 4, ss. 291-299, 1997.
- [22] F. Karaosmanoğlu, G. Kurt and T. Ozaktas, "Direct use of sunflower oil as a compression-ignition engine fuel," *Energy Sources*, c. 22, sayı 7, ss. 659-672, 2000.
- [23] İ. Çelikten ve M. A. Arslan, "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*, c. 23, sayı 4, ss. 829-836, 2008.
- [24] S. Şahin, "Keten yağı biyodizelinin ve motorinle karışımlarının motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisinin araştırılması," Yüksek lisans tezi, Tarım Makineleri Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2013.

- [25] C. İlkılıç, S. Aydın, R. Behçet and H. Aydın, "Biodiesel from safflower oil and its application in a diesel engine," *Fuel Processing Technology*, c. 92, ss. 356- 362, 2011.
- [26] G. Antolin, F. V. Tinaut, Y. Briceno, V. Castano, C. Perez and A. I. Ramirez, "Optimisation of biodiesel production by sunflower oil transesterification," *Biosource Technology*, c. 83, sayı 2, ss. 111-114, 2002.
- [27] Y. Ulusoy, Y. Tekin, M. Çetinkaya and F. Karaosmanoğlu, "The engine tests of biodiesel from used frying oils," *Energy Sources*, c. 26, sayı 10, ss. 927-932, 2004.
- [28] R. Radu, C. Petru, R. Edward and M. Gheorghe, "Fueling an DI agricultural diesel engine with waste oil biodiesel: Effects over injection, combustion and engine characteristics," *Energy Conversion and Management*, c. 50, ss. 2158- 2166, 2009.
- [29] A. N. Özsezen, "Atık palmye yağından üretilen biyodizelin motor performansı ve egzoz emisyon karakterleri üzerine etkisinin incelenmesi," Doktora tezi, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, 2007.
- [30] M. Engin, "Atık ayçiçeği yağından biyodizel üretimi ve ön ısıtma uygulaması," Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2011.
- [31] Ö. Koç, "Dizel motorlarda biyodizel kullanımının motora etkilerinin dizel yakıtı ile deneysel karşılaştırmalı olarak incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye, 2010.
- [32] M. D. Redel-Macias, S. Pinzi, D. Leiva, A.J. Cubero-Atienza and M.P. Dorado, "Air and noise pollution of a diesel engine fueled with olive pomace oil methyl ester and petrodiesel blends," *Fuel*, c. 95, ss. 615-621, 2011.
- [33] İ. A. Reşitoğlu, "Atık yağlardan üretilmiş biyodizelin dizel motor performans ve emisyonuna etkisinin deneysel olarak araştırılması," Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin Üniversitesi, Mersin, Türkiye, 2010.
- [34] İ. Tillem, "Dizel motorlar için alternatif yakıt olarak biyodizel üretimi ve kullanımı," Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye, 2005.
- [35] C. Ünal, "Örnek dizel motorda püskürtmenin fazlara ayrılmasının NO_x ve is oluşumuna etkisinin araştırılması," Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2006.
- [36] İ. Sönmez, "Dizel motorlarına ilave oksijen verilmesinin motor performansı ve emisyonlarına etkisi," Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak, Türkiye, 2006.

- [37] A. K. Eliçin, “Biyodizel yakıtla çalıştırılan küçük güçlü bir dizel motorun performans ve emisyonuna giriş hava basıncı etkisinin deneysel olarak araştırılması,” Doktora tezi, Tarım Makinaları Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2011.
- [38] A. Aktaş ve Y. Sekmen, “Biyodizel ile çalışan bir dizel motorda yakıt püskürtme avansının performans ve egzoz emisyonlarına etkisi,” *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 23, sayı 1, ss.199-206, 2008.
- [39] A. S. Altınsoy, “Biyodizel üretimi, motorlarda kullanımı ve Türkiye’deki kaynakların incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2007.
- [40] Y. Akdere, “Soya yağı metil esterinin dizel motorlarda yakıt olarak kullanımının deneysel olarak araştırılması,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye, 2006.
- [41] Anonim. (2019, 30 Haziran). [Online]. Erişim: <https://ekstremlbilgi.com/bilim/biyodizel-biodizel-yakit-nedir-tarihcesi>.
- [42] A. Işığigür, “Türkiye kökenli aspir tohum yağlarının transesterifikasyonu ve dizel yakıt alternatifi olarak değerlendirilmesi,” Doktora tezi, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 1992.
- [43] B. T. Top, “Biyodizel,” Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü, Türkiye, 2011.
- [44] A. Altuntaş, “Hardal yağı biyodizelinde depolama süresi ve şartlarının yakıt özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması,” Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2006.
- [45] E. Mutlu, “Dizel yakıtı, kanola yağı ve fındık yağı metil esterlerinin dizel motor performansına ve emisyonlarına etkilerinin deneysel incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2010.
- [46] S. Albayrak, “Biyodizelin tek silindirli bir dizel motorun performans, emisyon ve titreşimlerine olan etkilerinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2014.
- [47] Y. Akdere, “Soya yağı metil esterinin dizel motorlarda yakıt olarak kullanımının deneysel olarak araştırılması,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye, 2006.
- [48] Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü. (2019, 30 Haziran). [Online]. Erişim: <http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/biyodizel.aspx>.
- [49] F. Çiçek, “Fungal Lipid Üretimi: Optimizasyon çalışmaları ve biyodizel üretiminde kullanılabilirliği,” Yüksek lisans tezi, Biyoloji Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Giresun Üniversitesi, Giresun, Türkiye, 2012.

- [50] S. Albayrak ve S. Sarıdemir, “Kanola yağı metil esteri ve dizel yakıt karışımlarının motor titreşimine olan etkileri,” *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, c. 5, sayı 3, ss. 74-85, 2016.
- [51] M. Arslan, “Laboratuvar ölçekli biyodizel üretim tesisinin projelendirilerek imal edilmesi ve yabancı zeytinden (oleaoleaster) üretilecek biyodizelin yakıt özelliklerinin belirlenmesi,” Yüksek lisans tezi, Tarım Makinaları Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye, 2015.
- [52] Z. Ö. Özdemir ve H. Mutlubaş, “Biyodizel üretim yöntemleri ve çevresel etkileri,” *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, c. 2, sayı 2, ss. 129-143, 2016.
- [53] S. Nişancı, “Biyodizel yakıt karışımlarının performans ve emisyon üzerine etkilerinin deneysel araştırılması,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2007.
- [54] Ş. Karahan, “Biyodizel kalitesi ve biyodizel kalitesinin dizel motorlara etkileri,” *Türkiye’de Biyodizel Üretimindeki Mevcut Durum, Sorunlar ve Öneriler Çalıştayı*, Ankara, Türkiye, 2005 ss. 1-61.
- [55] H. Ögüt ve H. Oğuz, *Üçüncü Milenyum Yakıtı*, 2. Baskı, Ankara, Türkiye: Nobel Akademik Yayıncılık, 2006, ss.1-190.
- [56] Anonim. (2019, 01 Temmuz). [Online]. Erişim: http://berker.ficicilar.com/kmb305/source/Viskozite_Olcum_Yontemleri.pdf.
- [57] C. Haşımoğlu, Y. İçingür ve İ. Özsert, “Turbo şarjlı bir dizel motorda yakıt olarak biyodizel kullanılmasının motor performans ve egzoz emisyonlarına etkisi,” *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 23, sayı 1, ss. 207-213, 2008.
- [58] M. A. Servan, “Bazı aklali (baz) katalizörlerinin hazırlanması, karakterizasyonu ve bu katalizörler varlığında yağlardan transesterleşme tepkimesi ile biyodizel üretimi,” Yüksek lisans tezi, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2011.
- [59] A. Akyarlı, “Biyodizel yakıtının uluslararası standartlarda üretimi,” *Biyoenerji Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 2004, ss. 1-11.
- [60] J. V. Gerpen, B. Shanks, R. Pruszko, D. Clements and G. Knothe, “Biodiesel production technology,” National Renewable Energy Laboratory, USA, Rep. NREL/SR-510-36244, 2004.
- [61] O. Çıldır ve M. Çanakçı, “Çesitli bitkisel yağlardan biyodizel üretiminde katalizör ve alkol miktarının yakıt özellikleri üzerine etkisinin incelenmesi,” *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 21, sayı 2, ss. 367-372, 2006.

- [62] C. S. Lee, S. W. Park and S. I. Kwon, "An experimental study on the atomization and combustion characteristics of biodiesel-blended fuels," *Energy&Fuels*, c. 19, ss. 2201- 2208, 2005.
- [63] A. Dinbař, "Biyodizel kullanımının dizel motoru üzerindeki etkilerinin uzun süreli testlerle ve motorinle karşılaştırmalı olarak incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Güneř Enerjisi Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2007.
- [64] H. Jianbo, D. Zexue, L. Changxiu and M. Enze, "Study on the lubrication properties of biodiesel as fuel lubricity enhancers," *Fuel*, c. 84, sayı 12-13, ss. 1601–1606, 2005.
- [65] M. Karabektaş, "Dizel motorlarında alternatif yakıt olarak biyodizel kullanımının motor performansına etkisi," Doktora tezi, Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2002.
- [66] B. Alpgiray, "Kanola yağının diesel motorunun performans ve emisyon karakteristiklerine etkilerinin belirlenmesi," Yüksek lisans tezi, Tarım makinaları Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2006.
- [67] C. Demir. (2019, 16 Mart). *Biyodizel standartları ve analiz yöntemleri* [Online]. Erişim: https://albiyobir.org.tr/files/img_etk/e06-1008-cevdetdemir.ppt.
- [68] H. Kum, "Yenilenebilir enerji kaynakları: Dünya piyasalarındaki son gelişmeler ve politikalar," *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, c. 33, ss. 207-223, 2009.
- [69] M. S. Fidan, E. Alkan, "Bitkisel hammaddelerden elde edilen biyodizelin alternatif enerji kaynağı olarak kullanılması," *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 4, sayı 2, ss. 144-160, 2014.
- [70] H. şanlı, "Atık kızartma yağlarının karakterizasyonu ve biyodizel üretiminde değerlendirilmesi," Doktora tezi, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, 2014.
- [71] J. B. Gonsalves, "An assessment of the biofuels industry in India," *United Nations Conference on Trade and Development*, Genova, Italy, 2006, ss. 1-42.
- [72] P. Elmas. (2019, 16 Mayıs). *Umudumuz biyodizel* [Online]. Erişim: http://www.izto.org.tr/Portals/0/IztoGenel/Dokumanlar/umudumuz_biodizel_p_elmas_6.04.2012%2022-45-41.pdf.
- [73] Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi 2013 Çalışma Grubu, "Enerji raporu 2013," Türkiye, Rap. 0022, 2014.
- [74] E. M. Shadid and Y. Jamal, "A review of biodiesel as vehicular fuel," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 12, sayı 9, ss. 2484-2494, 2008.
- [75] Ç. Deniz, "Biyodizel dizel karışımlarının bazı fiziksel özelliklerinin biyodizel oranı ile değişimi," Yüksek lisans tezi, Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, 2013.

- [76]A. Yiğit, “Bir dizel motorda LPG kullanılması ve farklı özellikteki pilot dizel yakıtının motor performans ve emisyonuna etkisinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2008.
- [77]M. Yıldız, “Atık yağlardan biyodizel üretimi ve karakterizasyonu,” Yüksek lisans tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye, 2008.
- [78]S. Çat, “Dizel motorda atık biyodizel kullanımının performans ve emisyonlara etkisi,” Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2012.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Faruk BAKAN
Doğum Tarihi ve Yeri : 1977- Karacabey
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : fbakan16@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	İmalat Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2019
Lisans	Makine Mühendisliği	Balıkesir Üniversitesi	2000
Önlisans	Makine	İstanbul Üniversitesi	1997
Lise	Makine	Karacabey Teknik Lisesi	1991