KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KANOLA-ASPİR YAĞI KARIŞIMI BİYODİZEL VE MOTORİN YAKITLARININ CRDI BİR DİZEL MOTORDA KULLANIMI

CEREN ÖZBİLGİ

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KANOLA-ASPİR YAĞI KARIŞIMI BİYODİZEL VE MOTORİN YAKITLARININ CRDI BİR DİZEL MOTORDA KULLANIMI

CEREN ÖZBİLGİ

Yrd. Doç. Dr. Ertan ALPTEKİN
Danışman, Kocaeli Üni. .....

Prof. Dr. Mustafa ÇANAKCI
Jüri Üyesi, Kocaeli Üni. .....

Prof. Dr. Cenk SAYIN
Jüri Üyesi, Marmara Üni. .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 03.01.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Fosil kaynaklara olan bağımlılık yoğun çevre kirliliğine yol açmaktadır. Bu nedenle doğada biyolojik olarak parçalanabilen alternatif yakıtların, düşük karbon döngüsü ile çevre dostu yakıtlar olarak kullanılması büyük önem taşımaktadır. Biyodizel içten yanmalı dizel motorlarda kullanılabilen çevre dostu alternatif bir dizel yakıtıdır. Motorine alternatif olarak kullanılan biyodizel yakıtının temel hammaddelerinden biri olan bitkisel yağların motorlarda performans, yanma ve egzoz emisyonlarına etkisi araştırma konularından bir tanesidir. Türkiye'nin var olan kaynaklarının kullanımı ile enerji verici bitkiler kullanılarak üretilebilecek biyodizel yakıtının Türkiye'nin petrol bağımlılığını azaltarak ekonomik olarak büyük bir katkı sağlayacağı kaçınılmazdır. Bu nedenle, bu çalışmada aspir bitkisinden üretilen yağ ile kanola yağı karıştırılarak (%50-%50) EN 14214 biyodizel standardına uygun olarak üretilmiş biyodizel yakıtının içten yanmalı bir dizel motorda kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Bu çalışmayı yapma fikrini veren ve yardımcı olan danışmanım Yrd. Doç. Dr. Ertan ALPTEKİN'e, deneylerin yapılmasında yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Hüseyin ŞANLI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca bana desteğini hiç esirgemeyen anneme ve beni bugünlere getiren aileme sonsuz minnet duygularımı sunarım.

Yüksek lisans çalışmamda kullanılmak üzere biyodizel tedarik eden DB Tarımsal Enerji'nin yöneticilerine de ayrıca teşekkür ederim.

Ocak – 2018 Ceren ÖZBİLGİ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iii
TABLOLAR DİZİNİ iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ v
ÖZET vi
ABSTRACT vii
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 3
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 13
3. BİYODİZEL 19
3.1. Biyodizel 19
3.1.1. Bitkisel yağların özellikleri 20
3.1.2. Bitkisel yağlardan biyodizel üretimi 22
3.1.3. Biyodizel ve motorin standartları 24
3.2. Türkiye'de Biyodizel 31
3.2.1. Kanola ve aspir bitkilerinin kimyasal yapıları ve özellikleri 32
4. MALZEME VE YÖNTEM 35
4.1. Deneylerin Yapılışı 41
4.2. Biyodizelin Yakıt Özellikleri 42
5. BULGULAR VE TARTIŞMA 43
5.1. Test Yakıtlarının Özellikleri 43
5.2. Özgül Yakıt Tüketimi ve Efektif Verim 43
5.3. Enjeksiyon ve Yanma Sonuçları 45
5.4. Motor Emisyonları 51
5.4.1. CO emisyonları 51
5.4.2. CO_2 emisyonları 53
5.4.3. THC emisyonları 54
5.4.4. NO_x emisyonları 55
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 59
KAYNAKLAR 61
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 73
ÖZGEÇMİŞ 74

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. 2015 yılı dünya'daki birincil enerji kaynaklarının.....4
Şekil 1.2. 1990-2035 yılları arasında kaynak bazında dünya'daki enerji talebi 5
Şekil 1.3. Türkiye Bitkisel Ürün Üretim İstatistikleri, 2016.....7
Şekil 1.4. 2013-2016 yılları arasında enerji bitkisi olarak aspir ve.....8
Şekil 1.5. dünya'da biyoyakıt üretimi MTEP 9
Şekil 3.1. Transesterifikasyon reaksiyonunun kimyasal tepkime denklemi 20
Şekil 3.2. Trigliseritlerin kimyasal yapısı 21
Şekil 3.3. Alkolle trigliseritlerin transesterifikasyonu 23
Şekil 4.1. Test ekipmanının deneysel kurulumu 36
Şekil 5.1. Motor performansları ve ÖYT değerlerinin karşılaştırılması.....44
Şekil 5.2. Yakıtların enjeksiyon karakteristiklerinin karşılaştırılması.....46
Şekil 5.3. Silindir gaz basıncı ve ısı dağılımlarının karşılaştırılması 49
Şekil 5.4. CO emisyonlarının karşılaştırılması.....52
Şekil 5.5. CO_2 emisyonlarının karşılaştırılması 53
Şekil 5.6. THC emisyonlarının karşılaştırılması 54
Şekil 5.7. NO_x emisyonlarının karşılaştırılması 56
Şekil 5.8. NO emisyonlarının karşılaştırılması 57
Şekil 5.9. NO_2 emisyonlarının karşılaştırılması 58

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. BP Enerji Görünümü 2035: Ocak 2017 Yakıt kullanımı ile enerji tüketim verileri 3
Tablo 1.2. 1980-2015 yılları arasında Türkiye'nin Toplam Enerji Tüketiminde Kaynakları ve Miktarları (*Bin TEP) ile oranları 6
Tablo 3.1. ASTM D6751[a] biyodizel standardı....25
Tablo 3.2. EN 14214 Avrupa Birliği biyodizel standardı değerleri 27
Tablo 3.3. Avrupa motorin standardı değerleri (EN 590)....28
Tablo 3.4. Amerikan motorin standartları (ASTM D975)....29
Tablo 3.5. B6 – B20 karışımları için Amerikan standartları (ASTM D7467-17)....30
Tablo 4.1. Test yakıtlarının temel özellikleri....35
Tablo 4.2. KAB yağ asidi dağılımı....35
Tablo 4.3. Test motorunun özellikleri 36
Tablo 4.4. Hidrolik dinamometrenin özellikleri....37
Tablo 4.5. Kızdırma bujisi basınç sensörünün özellikleri....37
Tablo 4.6. Egzoz emisyon cihazının özellikleri 38
Tablo 4.7. KAB yakıtının özellikleri....42
Tablo 5.1. Bütün test yakıtlarının yanma ve enjeksiyon sonuçları....50
Tablo 5.2. Test yakıtlarının Hava Fazlalık Katsayısı (λ)....52

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

b_e : Özgül yakıt tüketimi, (g/kWh)
cSt : Kinematik viskozitenin fiziksel birimi, (stokes St, 1 cSt = 1 $mm^2 \cdot s^{-1}$)
c_p : Sabit basınç için özgül ısı sığası, (kJ/kg.K)
c_v : Sabit hacim için özgül ısı sığası, (kJ/kg.K)
k : Özgül ısı oranı
m : Kütle, (kg)
$\dot{m}_f$: Saniye'de tüketilen yakıt miktarı, (g/s)
n : Motor devri, (dev/dk)
P : Basınç, (kPa)
P_e : Efektif güç, (kW)
$\dot{Q}$: Sistemin sınırlarına karşı yapılan ısı transfer oranı, (W)
R : Gaz sabiti, (kJ/kg.K)
T : Sıcaklık, (°C)
u : İç enerji, (kJ/kg)
V : Hacim, (cm^3)
$\dot{W}$: Sistem sınırlarının değişimi ile oluşan sınır işi, (W)
λ : Hava Fazlalık Katsayısı

Kısaltmalar

AÖNÖ : Alt Ölü Noktadan Önce
AÖNS : Alt Ölü Noktadan Sonra
ASTM D6751 : American Society for Testing Materials (Amerika Test Materyalleri Topluluğu'nun Biyodizel Yakıt Karışımı (B100) için Standartları)
B5 : %5 Biyodizel ve %95 Motorin Yakıtı İçeren Karışım
B100 : %100 Biyodizel
CRDI : Common Rail Direct Injection (Ortak hatlı direkt enjeksiyon)
D : Diesel (Motorin)
EN 14214 : European Nation (Avrupa Birliği Biyodizel Standardı)
EPDK : Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
ISO 8178 : International Organization for Standardization (Karayolu Dışı Motor Uygulamalarında Egzoz Emisyonlarının Ölçümü için Uluslararası Standart)
IUPAC : International Union of Pure and Applied Chemistry (Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği)
KA : Krank Açısı
KAB : Kanola ve Aspir Yağı Karışımından Üretilmiş Biyodizel
ÖTV : Özel Tüketim Vergisi
SYA : Serbest Yağ Asidi
ÜÖNÖ : Üst Ölü Noktadan Önce
ÜÖNS : Üst Ölü Noktadan Sonra

KANOLA-ASPİR YAĞI KARIŞIMI BİYODİZEL VE MOTORİN YAKITLARININ CRDI BİR DİZEL MOTORDA KULLANIMI

ÖZET

Bu çalışmada, motorin ve kanola-aspir yağı karışımı biyodizel (KAB) yakıtları direkt enjeksiyonlu ortak hatlı (common-rail direct injection, CRDI) bir dizel motorda sabit motor devri (2000 dev/dk) ve beş farklı motor yükü (Fren ortalama efektif basınç, FOEB: 3,3, 5, 6,6, 8,3 ve 9,9 Bar) test koşulları altında test edilmiş ve performans, enjeksiyon, yanma ve egzoz emisyonları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar motorin ile karşılaştırılmıştır. KAB yakıtının ısıl değerinin düşük olması nedeniyle özgül yakıt tüketimi (ÖYT) değerlerinin motorinden daha yüksek olduğu görülmüştür. KAB yakıtının kullanımıyla pilot ve ana enjeksiyon zamanlamaları motorine göre daha erken başlamış ve bitmiştir. Yakıt tipi doğrudan enjeksiyon karakteristiğini etkilemiştir. Motor yükünün artmasıyla maksimum silindir basıncı (MSB) artmıştır. Yüksek yüklerde, KAB yakıtının MSB değerlerinin motorinden daha fazla olduğu görülmüştür. Emisyon sonuçları incelendiğinde biyodizel yakıtı motorine kıyasla daha düşük CO ve THC yayarken, daha yüksek NO_x ve CO_2 emisyonları yaydığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Dizel Motor, Emisyon, Enjeksiyon, Kanola-Aspir, Ortak Hatlı.

USING CANOLA-SAFFLOWER OIL BIODIESEL AND DIESEL FUELS IN A CRDI DIESEL ENGINE

ABSTRACT

In this study, the performance, injection, combustion and emission characteristics of a common-rail direct injection (CRDI) diesel engine have been investigated experimentally when it was fuelled with canola-safflower oil mixture biodiesel (CSB) and diesel fuel. In order to determine the performance and combustion characteristics, the experiments were conducted at constant engine speed (2000 rpm) under five different engine load (Brake mean effective pressure, BMEP: 3,3, 5, 6,6, 8,3, 9,9 Bar) test conditions. The results of performance, injection, combustion and emission characteristics of CSB were compared with diesel fuel. The comparative analysis concluded that brake specific fuel consumption (BSFC) of biodiesel was higher than diesel fuel due to the low calorific value of CSB. With the use of CSB fuel, pilot and main injection timing started and ended earlier than diesel fuel. Fuel type directly affected the injection characteristics. The maximum cylinder pressure (MCP) values increased with increasing engine load and MCP values of CSB were higher than those of diesel fuel especially at higher loads. Emission results revealed that CSB fuelled diesel engine emitted higher NO_x and CO_2 emissions while producing lower CO and THC emissions in comparison with diesel fuel.

Keywords: Diesel Engine, Emission, Injection, Canola-Safflower, Common-Rail.

GİRİŞ

Doğada parçalanabilen ve düşük karbon döngüsüne sahip olan biyodizel yakıtları ile ilgili olan çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Bu yakıtlar fosil yakıtlara bağımlı olan araçlarımız açısından kullanılması en olanaklı alternatif kaynaklardan biridir. Bu kaynakların kullanımı yalnızca fosil yakıtlara olan bağımlılığımızı azaltmayacak, aynı zamanda atmosferimize faydalı olacak ve en önemlisi insan sağlığı açısından daha kaliteli bir yaşam olanağı sağlayacaktır. Bu nedenle, kullanımı her geçen gün yenilenen düzenlemelerle arttırılan biyodizel yakıtlarının motorine kıyasla vazgeçilmez bir alternatif yakıt olduğu açıkça görülmektedir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasının amacı, kanola-aspir yağı karışımı biyodizel yakıtının ortak hatlı direkt enjeksiyonlu (CRDI) bir dizel motorda performans, enjeksiyon, yanma ve emisyonlarının analiz edilerek motorin ile karşılaştırmasını yapmaktır. Öncelikle, kanola ve aspir yağı (%50-%50 oranla) hacimsel karışımından üretilmiş biyodizel, bir biyodizel üreticisinden temin edilmiştir. Kullanılacak standart motorin ise çevredeki yerel yakıt istasyonundan satın alınmıştır. Bu çalışmada, kanola-aspir yağı karışımı biyodizel (KAB), dört silindirli bir CRDI dizel motorda yakıt olarak kullanılmış ve performans, enjeksiyon, yanma ve emisyon karakteristikleri 2000 dev/dk'da beş farklı yük (FOEB: 3,3, 5,0, 6,6, 8,3 ve 9,9 Bar) test koşulları altında incelenmiştir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasının ilk bölümünde, Türkiye ve dünyadaki enerji görünümü petrol şirketlerinin endüstriyel analizleri ile rapor edilmiştir. Bu kapsamda, niçin alternatif enerji kaynaklarının kullanılması gerektiği ve alternatif yakıt olarak biyodizelin Türkiye'deki ve dünyadaki politikaları özetlenmiştir. Daha sonra dünyada ve Türkiye'deki biyodizel üretim ve tüketim ihtiyaçları analiz edilmiştir. Son olarak, kanola ve aspir bitkilerinin yetiştiği yerler ve özellikleri ifade edilmiştir.

İkinci bölümde ise, kanola veya aspir biyodizel yakıtları ile gerçekleştirilmiş çalışmalar incelenmiştir. Ayrıca, dizel motorlarda kanola veya aspir biyodizel yakıtlarının kullanılması ile yapılan enjeksiyon zamanlaması, yanma ve emisyon özelliklerinin analizini içeren deneysel çalışmalar da incelenerek özetlenmiştir.

Üçüncü bölümde ise, biyodizel hakkında genel bilgiler verilmiş ve bitkisel yağların fiziko-kimyasal özellikleri araştırılarak çalışmaya eklenmiştir. Ayrıca, biyodizel üretiminde temel alınan standartlar tablolar halinde açıklanmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan kanola ve aspir bitkilerinin kimyasal yapıları ve Türkiye'de kanola ve aspir bitkilerinin yetiştirilmesi konusunda genel bilgiler verilmiştir.

Dördüncü kısımda, test yakıtlarının genel özellikleri incelenmiştir. Buna bağlı olarak, motor testleri esnasında kullanılan materyal ve uygulanan metotlardan bahsedilmiştir. Testlerde kullanılan dinamometre ve motor donanımlarının özelliklerine yer verilmiştir. Bütün test yakıtlarının özellikleri tablo halinde gösterilmiştir.

Beşinci bölümde ise, "Bulgular ve Tartışmalar" ana başlığı altında dizel motor üzerinde gerçekleştirilen sabit-hız motor testleriyle biyodizel yakıtının performans, enjeksiyon, yanma ve egzoz emisyon değerleri grafikler aracılığıyla yorumlanmıştır.

Altıncı bölümde ise, "Sonuçlar ve Öneriler" ana başlığı altında yapılan yüksek lisans tez çalışması ile motor testlerinden elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve değerlendirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda çıkarılan önemli noktalar belirtilmiş ve ileride yapılacak çalışmalara yönelik önerilerde bulunulmuştur.

1. GENEL BİLGİLER

Dünya rezervlerinin tükenmeye başladığı ve petrole olan bağımlılığın her geçen gün artmasının kaçınılmaz bir sonucu olarak ortaya çıkan biyoyakıtlar, günümüz koşullarında ekolojik ve ekonomik alternatif olarak sunulmaktadır. Avrupa birliği düzenlemeleri artan petrol fiyatlarını dizginlemek için biyoyakıtları bir teşvik olarak kullanmaktadır. Öyle ki; dünya perspektifinde fosil yakıtlara bağlı enerji tüketimleri artan petrol fiyatları ve tükenmeye başlayan rezervlerle ilintili olarak çeşitli alternatif enerji kaynaklarına yöneliş başlatmış ve bu kaynaklardan yararlanmak için yakıt kullanımı ile daha da çok tüketim ölçeğinde artışa neden olmuştur.

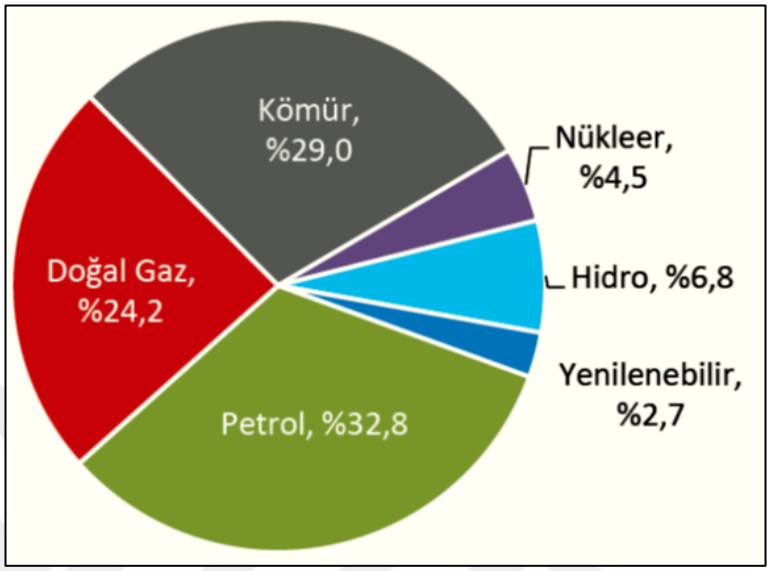
BP şirketinin 2017 Ocak ayı enerji görünümü verilerine göre 1990 yılından itibaren 2035 yılına kadar yenilenebilir enerji miktarının giderek arttığı istatiksel olarak verilerden görülmektedir(Tablo 1.1)[1]. Enerji tüm ülkelerin vazgeçilmez ihtiyacıdır.

Tablo 1.1. BP Enerji Görünümü 2035: Ocak 2017 Yakıt kullanımı ile enerji tüketim verileri

Enerji tüketimi *										
Milyon ton petrol eşdeğer	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035
Kuzey Amerika	16,5	19,0	21,1	24,9	45,3	82,6	135,8	183,0	235,9	286,0
G & M[1] Amerika	1,9	2,5	3,3	5,2	11,1	24,2	37,5	50,2	65,7	86,0
Avrupa	4,4	7,0	15,0	34,8	70,7	142,2	191,9	242,8	285,0	327,7
BDT[2]	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,6	1,9	4,7	9,8	17,7
Orta Doğu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,5	3,2	9,5	18,4	29,4
Afrika	0,2	0,2	0,4	0,7	1,3	3,8	10,0	20,0	35,9	60,0
Asya Pasifik	4,6	7,4	10,9	17,4	41,2	110,9	259,7	416,6	593,9	778,9
Toplam Yenilenebilir Enerji Tüketimi**	27,5	36,0	50,6	83,2	169,9	364,9	640,1	926,9	1244,6	1585,7

*Enerji tüketimi, elektrik üretmek için kullanılan modern yenilenebilir enerjileri de içeren ticari olarak ticareti yapılan yakıtlardan oluşur., **Rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi ve diğer yenilenebilir enerjileri içerir., [1]G&M: Güney ve Merkez, [2]BDT: Bağımsız Devletler Topluluğu

Bugün, dünyada enerji farklı kaynaklar kullanılarak tüketilirken, fosil kaynaklara (Petrol, kömür ve doğal gaz) olan bağımlılığın bütün kaynakların %86'sını oluşturduğu Şekil 1.1'de görülmektedir[2].



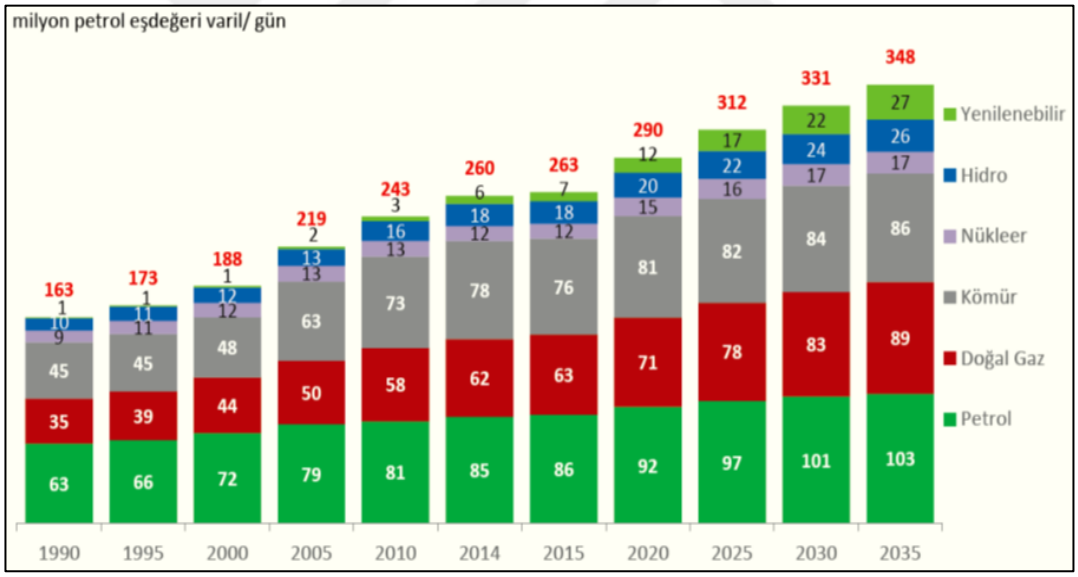
Şekil 1.1. 2015 yılı dünya'daki birincil enerji kaynaklarının tüketim oranları

Ulaştırma alanında da kullanılan geleneksel enerji kaynağı olarak petrolün, dünyada birincil tüketilen enerji kaynakları içerisinde oldukça yüksek bir paya sahip olduğu bilinmektedir. Doğalgaz ve kömür kaynakları petrolün hemen ardından elektrik üretimi için kullanılan diğer kaynaklardır.

2014 yılında, dünya petrol rezervi, 1,7 trilyon varil olarak açıklanmıştır. 2013 yılına göre, %0,06'lık bir azalma anlamına gelmektedir. Aynı yılda Suudi Arabistan 1 milyar varil ve Brezilya ise 600 milyon varil ile 2014 yılında en fazla rezerv ekleyen ülkeler olmuştur. 1983 yılında, 83 milyon varil olan ortalama petrol keşif büyüklüğünün, 2014 yılı sonu itibariyle, ortalama 28 milyon varil civarına gerilediği dikkat çekmektedir. Ayrıca, geçmişte önemli oranda kara alanlarında eklenen rezervler, son dönemlerde yüksek teknoloji gerektiren derin deniz alanlarında gerçekleşmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı (UEA), Şubat 2016'da hazırladığı Orta Vade Petrol Piyasaları Raporu'nda (IEA MTOMR 2015-2021), önümüzdeki dönem eğilimlerini değerlendirmiştir. Rapora göre, petrol arzında, önümüzdeki 5 yıllık dönemde, 3,3 milyon varil/yıl üretim artışı beklenmektedir. UEA daha önce gerçekleştirdiği, üretim artış rakamlarını, aşağı yönlü revize etmiştir. Bu durumun

nedeni ise, petrol fiyatlarının 30 $/varil seviyelerine kadar ulaşmasıdır. Rapor düşük fiyatların hâkim olduğu 2015 yılında, OPEC (Petrol ihraç eden ülkelerin organizasyonu) dışı ülkelerin esneklik gösterdiği ve üretim artışında önemli pay sahibi olduğu belirtilmektedir. 2021 yılında da, %3,3'lük üretim artışının 2 milyon varil/yıl yakın bölümünün OPEC dışı ülkelerden gelmesi öngörülmektedir [3].

2015 yılı ilk verileri itibariyle petrol, dünya enerji talebinin Şekil 1.1'den %32,8 ile 86 MPE (Milyon petrol eşdeğeri) varil/gün (Şekil 1.2) ve doğalgaz kaynakları Şekil 1.1'den %24,2 ile 63 MPE varil/gün (Şekil 1.2) olduğu görülmektedir. Şu an itibariyle, dünyadaki uluslararası kurum ve kuruluşlar (Uluslararası Enerji Ajansı, ABD Enerji İdaresi, BP, ExxonMobil vb.) aracılığıyla yapılan analizler sonucu öngörülen, gelecekte de petrol ve doğalgaz kaynaklarının tüketilen kaynaklar içerisindeki yerlerini koruyacakları ve bütün kaynaklar arasında başta olacaklarıdır (Şekil 1.2)[2].



Şekil 1.2. 1990-2035 yılları arasında kaynak bazında dünya'daki enerji talebi

Türkiye'nin mevcut enerji durumu, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'ndan alınan veriler çerçevesinde Tablo 1.2'de gösterilmiştir. 2015 yılında kaynaklar bazında Türkiye'deki toplam enerji tüketiminde ilk sırada %30,7 doğalgaz yer alırken, arkasından onu %30,4 petrol ve %26,3 ile kömür takip etmiştir. Yapılan tahminlere göre, toplam birincil enerji arzının 2015 yılı sonunda 165, 2020 yılı sonunda 146, 2023 yılı sonunda 157, 2030 yılı sonunda 185 ve 2035 yılı sonunda ise 208 Milyon Ton Petrol Eşdeğeri (MTEP) olması beklenmektedir. Türkiye'nin toplam

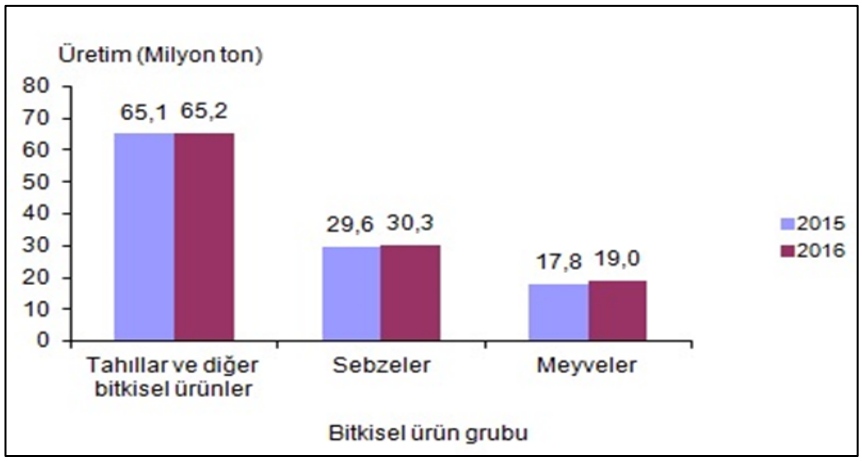
enerjisindeki yerli üretimi 1980 yılında %53 iken, bu oran 1990 yılından itibaren günümüze kadar azalarak 2015 yılında %12,7'ye kadar gerilemiştir. 2015 yılında Türkiye enerji tüketiminde kömürün %64'ünü, petrolün %95'ini ve doğalgazın ise %99'unu ithal etmektedir. Ülkemizdeki birincil enerjinin %87,3'ü ithal edilmektedir. Enerji tüketiminde büyük oranda dışa bağımlı olan ülkemizde bu bağımlılığı azaltmak için yerli kaynakların hayata geçirilmesi büyük önem taşımaktadır. Yerli kaynağa dayalı üretimi arttırmak için yenilenebilir enerji kaynak yatırımları arttırılmalıdır. Ülkemizde 2015 yılında yenilenebilir enerjinin enerji tüketimi arasındaki payı %5,4 ile en yüksek noktaya ulaşmıştır. Dolayısıyla, ülkemizde rüzgâr, güneş, hidrojen, jeotermal ve dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının daha çok değerlendirilmesi, enerjide kaynak çeşitliliğini ve yerli üretimi arttırarak dışa bağımlılığı azaltacaktır [4].

Tablo 1.2. 1980-2015 yılları arasında Türkiye'nin Toplam Enerji Tüketiminde Kaynakları ve Miktarları (*Bin TEP) ile oranları

Yıl	Kömür	Petrol	Doğalgaz	Hidroelektrik	Yenilenebilir	Diğer
1980	6794(%20,6)	16074(%48,8)	21(%0,1)	976(%3)	60(%0,2)	9024(%27,4)
1990	15915(%30,2)	23901(%45,4)	2804(%5,3)	1991(%3,8)	398(%0,8)	7672(%14,6)
2000	22452(%28,4)	32297(%40,8)	12378(%15,6)	2656(%3,4)	1266(%1,6)	8101(%10,2)
2005	21840(%24,6)	32192(%36,3)	22294(%25,2)	3402(%3,8)	1297(%1,5)	7617(%8,6)
2010	30864(%29,2)	29221(%27,6)	31474(%29,7)	4454(%4,2)	2582(%2,4)	7232(%6,8)
2015	33942(%26,3)	39238(%30,4)	39651(%30,7)	5775(%4,5)	6974(%5,4)	3687(%2,9)

*BTEP: Bin ton petrol eşdeğeri

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerinde, bitkisel ürün gruplarına göre üretimi gerçekleştirilen tahıllar ve diğer bitkisel ürünlerin miktarları 2016 yılından bir önceki yıla göre %8,7 oranında azalarak 35 milyon 281 bin ton olarak gerçekleştiği ifade edilmiştir. Üretim miktarları, 2016 yılından bir önceki yıla göre tahıllar ve diğer bitkisel ürünlerde %0,2 artış göstermiştir. Üretim miktarları 2016 yılında tahıllar ve diğer bitkisel ürünlerde 65 milyon 184 bin ton olarak gerçekleşmiştir. Bunun yanı sıra, yağlı tohumlardan soya üretimi %2,5 oranında artış sonucunda 165 bin ton olmuştur (Şekil 1.3) [5].

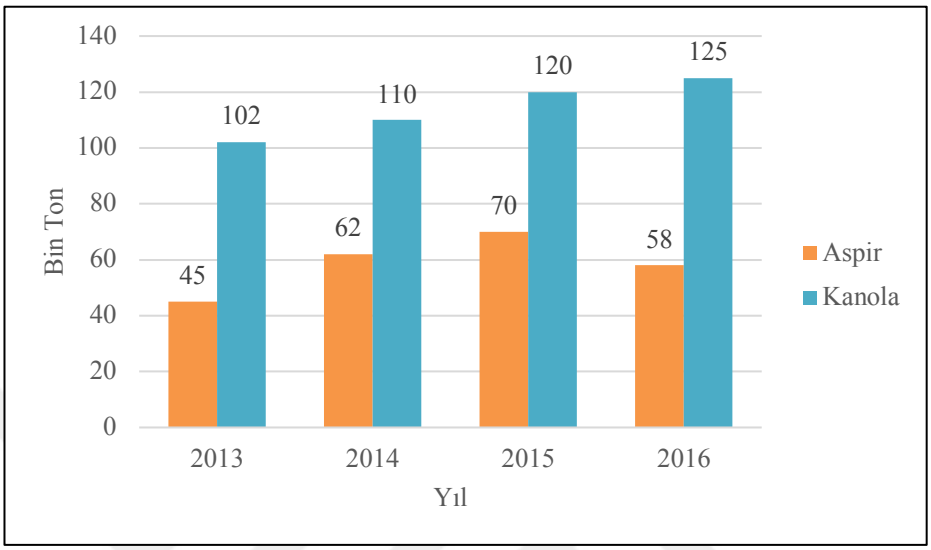


Şekil 1.3. Türkiye Bitkisel Ürün Üretim İstatistikleri, 2016

Yağlı tohum üretim istatistikleri incelendiğinde kanola ve aspir gibi yağlı tohumlardan üretilen biyodizel yakıtının motorin yakıtı ile karışımı için gereken üretim miktarlarının yeterli olmayacağı ortadadır. Biyodizelin ham maddesi olarak önem taşıyan aspir ve kanola, 2008 yılında biyodizel üretiminin gelişmesi ile artmış ve Türkiye'de popüler hale gelmiştir [6]. Şekil 1.4'de, aspir ve kanola üretiminin 2013 ve 2016 yılları arasındaki artışı görülmektedir [7]. Buna bağlı olarak Şekil 1.4'den anlaşılacağı üzere aspir bitkisinin üretimi 2013 yılından başlayarak 2016 yılına kadar kademeli olarak artış göstererek 70 bin tona ulaşmıştır. 2016 yılında 58 bin tona düşmüştür. Kanola bitkisinin üretimi ise, aspir bitkisiyle karşılaştırıldığında 2016'ya kadar tüm yıllar içerisinde daha fazla artış gösterirken 2016 yılında 125 bin tona ulaşmıştır. 2015 yılı Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) [8] verileri dikkate alındığında farklı türlerden motorin yakıtının 20 milyon tonun üzerinde satışı gerçekleştirildiği bilinerekten %1 oranında biyodizel yakıtının motorin ile karışımı kabaca 200 bin ton biyodizel yakıtının üretilmesini ve kullanılmasını sağlayacaktır. Karışım oranının %2 olması durumunda; kabaca 400 bin ton ve %3 olması durumunda ise 600 bin ton biyodizel üretimine ihtiyaç duyulacaktır.

Öngörülen 2023 vizyonu ve hedefleri kapsamında tarım, gıda ve hayvancılık alanlarında, sektörel öncelikler tespit edilmiş ve gelecek yaklaşık 10 yıllık süreç boyunca politika hedefleri belirlenmiştir. 2023 hedefleri kapsamında bitkisel ürün üretiminde sektörel bazdaki bu politikalarda, yağlı tohumların üretimini (pamuk, ayçiçeği, soya, kanola, aspir dâhil) toplam 5,4 milyon tona çıkarma hedefleri açık bir şekilde ifade edilmektedir. İfade edilen bu hedeflerin günümüz üretim koşullarında

birbiriyle tutarlılığı ve bu hedeflere ulaşılması için yapılması gereken yatırımlar ve destekleme maliyetleri üzerinde çalışılmadığından öngörülen hedeflere ulaşılması konusunda nitelikli araştırma ve yasalar çerçevesinde oluşturulacak politikalara ihtiyaç duyulmaktadır [9].

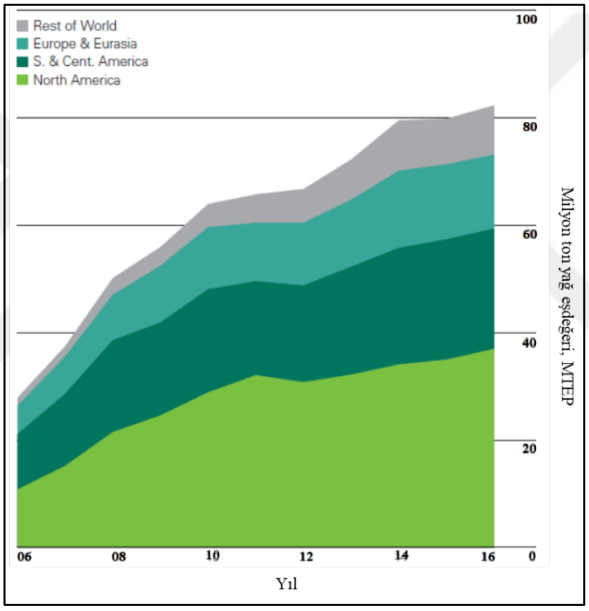


Şekil 1.4. 2013-2016 yılları arasında enerji bitkisi olarak aspir ve kanola üretiminin miktarı

Biyoyakıtlar, çevre açısından tercih edilen ve sürdürülebilir kalkınmanın temel öğelerinden biridir. İklim değişikliğine olumlu etki yapmak, enerji arz güvenliği artışını sağlamak, kırsal kalkınmayı arttırmak, tarım ve kırsal bölgelerde kazanç ve istihdam sağlamak, atık yönetimini desteklemek ve ulusal kaynak kullanımını artırmak biyoyakıtların temel avantajlarından bir kısmıdır. Biyoyakıtlar Türkiye'nin enerji yol haritasında yeşil bir alternatif olarak yer alacaktır. Biyoyakıtlar, ulusal kaynakların kullanımı açısından ülkeler için son derece önemli ekonomik ve çevresel avantajlar sunmaktadır. Biyoyakıtlar içerisinde yer alan biyodizel, motorin ile %2 oranında karıştırıldığında, yaklaşık 200 bin hektarlık bir alanda yağlı tohumculuk yapılmasına ve yakıt ithalatımızın 200 bin ton petrol eşdeğerinde azalmasını sağlayacaktır. Türkiye'de biyodizel yakıt üretimi için ürün yetiştiriciliğinde pancar rotasyonu ve atık alanları kullanıldığında, 2,3 milyon hektarlık bir tarla alanının kullanılabilir hale gelmesi söz konusudur. Türkiye'de yüksek maliyet seviyesinden dolayı, biyolojik yakıt üretimi, yağ çekirdeği için üretime yardımcı maddeler olarak uygulanan teşvik mekanizmaları ile desteklenmelidir. Tarım ve biyoyakıt sektörlerine sağlanan destek seviyesi diğer ülkelerde Türkiye'ye kıyasla daha

yüksektir. Gelişmiş ülkelerdeki katma değer vergisinin tarımsal girdilere oranı diğer sektörlerle karşılaştırıldığında bu oranın 1/5 olduğu görülmektedir. Türkiye'de bu oran lüks tüketim mallarının oranına eşittir. Biyoyakıt üretiminde birincil sınırlayıcı faktör olan mevzuatın gözden geçirilmesi Avrupa Birliği ve dünya biyoyakıt pazarlarında Türkiye'nin rekabetçi gücüne katkı sağlayacaktır [10].

Dünya biyoyakıt üretimi, 2016 yılında %2,6 oranında artarken, bu artış 10 yıllık ortalama değerin (%14,1) altında kalmış, ancak 2015'ten (%0,4) daha hızlı yükseldiği görülmüştür. 2016 yılında biyodizel üretimi %6,5 oranında artış göstermiştir (Şekil 1.5) [11].



Şekil 1.5. dünya'da biyoyakıt üretimi MTEP
(Milyon ton petrol eşdeğeri)

Türkiye'de ise biyoyakıt olarak biyodizel yakıtının üretilmesi, Resmi gazetede yayınlanan 25 Şubat 2011 tarih ve 27857 sayılı Bakanlar Kurulu Kararı ile yakıtlar kapsamında Oto-biyodizel ve Yakıt biyodizeline 0,91 TL/Litre ÖTV (Özel Tüketim Vergisi) uygulaması getirilmiştir [12]. 2017 tarihli Resmi Gazete'de yayınlanan 30098 sayılı EPDK'nın motorin türlerine biyodizel harmanlanması hakkında tebliği gereğince motorine %0,5 oranında yerli tarım ürünlerinden ve/veya bitkisel atık yağlardan üretilmiş biyodizelin harmanlanması zorunlu kılınmıştır [13]. EPDK'nın tebliğ etmiş olduğu bu düzenleme ile 2018 yılı başından itibaren akaryakıt piyasasında satışa sunulan her 1litre motorinde 1000'de 5 biyodizel katkısı zorunlu

hale gelmiş olacaktır. Bu durumda, ürünün biyodizel ile harmanlanması ÖTV'ye de belli oranda muafiyet getirecektir. EPDK verilerine göre, Türkiye'de 2016 yılındaki 26,7 milyon tonluk petrol ürünü tüketiminin 22,3 milyon tonunun motorin satışlarından gerçekleştiği bilinmektedir. EPDK'nın yürürlüğe koyduğu 1000'de 5 biyodizel oranı 22,3 milyon ton motorinin 115 bin tonluk kısmına tekabül edeceği göz önüne alındığında 70 bin ton olan biyodizel üretimini %50 arttıracağı anlaşılmaktadır.

Biyodizelin Türkiye'de üretimi konusunda üreticilere büyük bir maliyet getiren hammadde teminidir. Türkiye'de uygulanan Özel tüketim vergisi (ÖTV) kapsamına biyodizel yakıtlarının dâhil edilmesi ile biyodizel üretim maliyetleri artmıştır. Maalesef, yapılan yanlış uygulamaların sonucunda biyodizel üretim miktarları düşmüş ve sektörde üretim yapan fabrikalar üretimi yavaşlatmak zorunda kalmışlardır. Biyodizel üretim lisansı alan üreticilerin büyük çoğunluğunun lisanslarını iptal etmek zorunda kaldıkları görülmektedir. Lisansı olan üreticilerin de bu vaziyette üretim yapamaz durumda oldukları ifade edilmektedir. Türkiye'de 2017 yılında EPDK verileri kapsamında işletme lisansı olan 13 firmanın 11'i biyodizel üretimi gerçekleştirmektedir. EPDK'nın 2016 yılı petrol piyasası raporunda dağıtıcıya teslim edilen biyoyakıt teslim miktarı 129,922 ton olarak belirtilmiştir [14]. Biyodizel kullanımını zorunlu kılan yasal düzenlemeler, ancak üretim miktarları artarsa gerçek bir çözüm olarak görülmelidir. Çünkü yağlı tohum üretim miktarları incelendiğinde, yiyecek kullanımı için gereken ihtiyacı karşılamada başarısız olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle, yerli yağlı tohum üretiminin hızla arttırılması gerekmektedir. Mevcut uygulamalar devam ettiği sürece, yağlı tohum ithaline bağımlılığın Türkiye için her geçen yıl daha da artacağı açıktır. Bunu önlemek ve hızlı bir üretim seviyesine ulaşabilmek için, tartışma konusu olan doğrudan üretim ve tüketimi teşvik eden, önemli altyapı ve lojistik yatırımlar ile araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) desteği ile öngörülen sübvansiyonların önemli araç olarak kullanılabileceği göz ardı edilmemelidir. Biyoyakıtlar için akılda tutulması gereken nokta; bu ürünler fosil yakıtların daha ucuz olanlarla değiştirilmesi için üretilmemesine karşın, yukarıda sözü edilen enerji-çevre ve tarım politikalarını etkileyebilecek temel bir duruma sahiptir. Bu nedenle, teknolojik gelişmelere, özellikle de talep yönündeki enerji verimliliğine paralel bazı iyileştirmeler yapılarak,

fosil yakıtlara alternatif yenilenebilir kaynakların yaygın şekilde kullanılması gereklidir [15]. Bütün bu sebeplere dayanarak biyoyakıt olarak biyodizelin kullanımı önem arz etmektedir.

Fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan emisyonların atmosfere zarar verdiği iyi bilinmektedir. Bunlardan bazıları CO, HC, NO_x ve partikül emisyonları gibi egzozdan çıkan ve atmosferi kirleterek sera etkisine neden olan gazlardır. Karbondioksit ve su buharı gibi belirli gazların yeteneği, gezegenin güneş enerjisinin yeniden tesirini etkili bir şekilde yakalama kabiliyeti sağlayan, dünya üzerindeki yaşam için gerekli bir bileşendir [16]. Bununla birlikte, insan faaliyetleri, karbon dioksit ve diğer birkaç sera gazı yoğunluğunu artırarak, önümüzdeki yüzyılda dünyanın 1-58°C'lik bir sıcaklıkta ısınmasına neden olacağı öngörülmektedir. Geçtiğimiz on yılda küresel ortalama sıcaklıklardaki son artışlara göre, son bin yıldaki sıcaklık değişikliklerinin normal değişkenliğinin dışında olduğu tespit edilmiştir. Küresel anlamda analiz edilen ve önlenemeyen bu kirliliğin sonucunda araştırmacılar yenilenebilir ve çevre dostu enerji kaynaklarına yönelmişlerdir. Bu sebeple [17], biyodizel, yenilenebilir, biyolojik olarak parçalanabilen ve toksik olmayan bir yakıt olarak dikkate değer bir ilgi çektiği ve küresel ısınmaya neden olan gazların etkilerini önemli ölçüde azaltarak enerji sorunlarının çözümüne katkıda bulunabileceği kaydedilmiştir. Biyodizel üretimi için kullanılan yöntem, bitkisel yağların bir alkol ile bir katalizör varlığında transesterifikasyonudur. Bu yolla işlenmemiş materyallerin biyodizel yakıtlarına dönüşümü sağlanmaktadır. Biyodizel üretimi günümüz koşullarında kaliteli bitkisel yağlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Avrupa ülkelerinin standartları çerçevesinde kanola yağının kullanımının yanı sıra Türkiye'de aspir bitkisinin yetişmesinden ötürü biyodizel yakıtı olarak üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu bağlamdan yola çıkılarak kanola ve aspir yağlarının karakteristikleri incelenerek farklı üretim metotlarının uygulanması ile standartları sağlamış olan biyodizel yakıtların hiçbir değişiklik yapılmadan dizel motorlarda kullanımı sağlanmaktadır. Her iki yakıtın birbiriyle karıştırılarak elde edilen biyodizel yakıtının dizel motorda performans, enjeksiyon, yanma ve egzoz emisyonları üzerine etkilerinin araştırılması daha çevreci bir yakıt olarak kanola-aspir karışımı biyodizel yakıtının kullanımına olanak sağlayacaktır. Böylece, standartlar sağlanarak çevre kirliliğinin önüne geçilecek ve Türkiye'de zaten yetişen

aspir bitkisinin enerji içeriğine sahip bir bitki olarak yakıt üretiminde kullanılmasına fayda sağlayacaktır. Daimi olarak kullanımıyla da Türkiye'nin uzun vadede petrol bağımlılığını düşürerek maliyetlerin azaltılmasına katkı sağlayacaktır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Günümüzde belli oranlarda biyodizel yakıtının motorine karışımı gerçekleştirilmiş olsa da petrol kaynaklarının yoğun kullanımını ve kirlilik artışını önlemek için her geçen gün bu oranın artırılması gereklilik arz etmektedir. Ayrıca, artan petrol fiyatları ve standartlar çerçevesinde öngörülen emisyon değerlerinin sağlanabilmesi için alternatif yakıt olarak biyodizel yakıtlarının kullanılmasının büyük faydalar sağlayacağı kaçınılmazdır.

Bu bölümde, kanola veya aspir biyodizel yakıtlarının saf halde veya belirli oranlarda motorin ile karışımı sonucu direkt enjeksiyonlu veya CRDI dizel motorlarda gerçekleştirilmiş performans, yanma ve egzoz emisyonlarının detaylı testlerini içeren literatür taraması sonucu elde edilmiş olan makalelere yer verilmiştir.

Özsezen ve arkadaşları, atık palmiye yağı metil esteri (APYME) ve kanola yağı metil esteri (KYME) yakıtları ile çalışan direkt enjeksiyonlu bir dizel motorun performans ve yanma özelliklerini incelemişlerdir [18]. Deneyler, motor tam yük koşulu altındayken ve sabit devirde (1500 dev/dk) gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, test motoru APYME ve KYME yakıtları ile çalıştırıldığında, maksimum motor tork değerleri bir miktar düşerken, özgül yakıt tüketimi (ÖYT) değerlerinin motorinden sırasıyla %7,48 ve %6,18 daha yüksek olduğu ifade edilmiştir. Bu durumun biyodizel yakıtlarının ısıl değerlerinin motorinden yaklaşık %8-10 daha düşük olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Tam yük şartlarında motorine kıyasla APYME ve KYME biyodizel yakıtlarının ısıl verimlerinde sırasıyla %1,42 ve %0,12'lik düşüş gözlendiği kaydedilmiştir. Her iki biyodizel yakıtının da yaklaşık olarak aynı ısıl değere sahip olmalarına rağmen, ÖYT ve yakıt özellikleri içerisindeki küçük farklılıklar nedeniyle silindir içi gaz basıncı ve ısı dağılımlarında çok küçük farklılıklar görülmüştür. Motorin ile karşılaştırıldığında APYME ve KYME kullanımıyla tutuşma gecikmesinin azaldığı gözlemlenmiştir. Daha kısa tutuşma

gecikmesi ve daha erken yakıt enjeksiyonunun, yanma başlangıcını, maksimum silindir içi basıncı ve sıcaklığı etkilediği gözlemlenmiştir. APYME ve KYME yakıtlarının NO_x emisyon değerleri sırasıyla %22,13 ve %6,48 oranında artarken, yanmamış HC, CO emisyonları ve duman koyuluğunun APYME yakıtının kullanımı ile sırasıyla %14,29, %9,52, %86,89 olarak ve KYME yakıtının kullanımı ile sırasıyla %72,68, %67,65 ve %47,96 olarak azaldığı tespit edilmiştir.

Alptekin, üç farklı motor hızında (1500, 2000 ve 2500 dev/dk) ve orta motor yükü (100 Nm) test koşulları altında CRDI bir dizel motorda, motorin, kanola-aspir biyodizel (KAB) yakıtı ve solketal ve etanol gibi oksijen içerikli yakıt katkılarının harmanlarını test etmiştir [19]. Yapılan bu çalışmada, biyodizel ve oksijenli yakıtlarla olan karışımların ÖYT değerlerinin motorinden daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Benzer şekilde, biyodizel yakıtına solketal ve etanol ilavesi ÖYT değerlerini arttırmıştır. Buna ek olarak, KABE15 (%15 etanol-%85 KAB) ve KABS15 (%15 solketal-%85 KAB) karışımlarının ÖYT değerlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Emisyon sonuçlarına bakıldığında, CO emisyonlarındaki ortalama düşüşlerin motorin ile karşılaştırıldığında KAB, KABE15 ve KABS15 yakıtları için sırasıyla %22,2, %28 ve %31,5 oranlarında olduğu gözlemlenmiştir. KAB, KABE15 ve KABS15 yakıtlarının CO_2 emisyonları ise sırasıyla ortalama %5,8, %5,9 ve %5,5 oranlarında artmıştır. KAB kullanımıyla THC emisyonlarının, motorine kıyasla yaklaşık %47'ye kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Solketal ve etanol karışımlarının THC emisyonları, KAB yakıtına göre sırasıyla ortalama %20,6 ve %10,2 daha düşük olmuştur. Oksijenli yakıtların katkı olarak kullanılması ile birlikte motorine kıyasla THC emisyonlarında önemli ölçüde azalma sağlanmıştır. Oksijenli yakıtların kullanılmasıyla motorine kıyasla THC emisyonlarında, %56,5'e kadar azalma sağlanmıştır. KAB, KABE15 ve KABS15 yakıtlarının motorine göre sırasıyla ortalama %24,4, %31,7 ve %28,3 daha yüksek NO_x emisyonu yaydığı gözlemlenmiştir. Diğer yandan, KABE15 ve KABS15 karışımlarının NO_x emisyonları KAB yakıtına göre sırasıyla ortalama %5,8 ve %3,1 oranında artmıştır.

McCarthy ve arkadaşları, bir dizel motorda iki farklı biyodizel kullanarak motor performans ve emisyon karakteristiklerini ISO 8178 standartlarının belirtmiş olduğu 1560 dev/dk ve 2600 dev/dk'da 100, 75, 50, %10 motor yüklerinde araştırmışlardır [20]. A tipi (%80 don yağı ve %20 KYME) ve B tipi (%70 tavuk don yağı ve %30

atık yemeklik yağ metil ester) olmak üzere iki farklı biyodizel karışımı kullanılmıştır. Bu yakıtlar, motorin ile karıştırılmış B5, B10, B20, B50 ve B100 olmak üzere beş farklı karışım hazırlanmıştır. Araştırma sonucunda, yakıt tüketimi değerlerinde A tipi biyodizel için %7 oranında artış olurken, B tipi biyodizelde %10'luk artış görülmüştür. Bu durum, biyodizelin motorin ile karşılaştırıldığında daha düşük enerji içeriğine atfedilmiştir. Emisyon sonuçlarına bakıldığında, B100 için NO_x emisyon değerlerinde motorine kıyasla %10'luk bir artış rapor ederlerken, bütün karışımlar için karışım içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla A tipi biyodizel yakıtı için %14 oranında azalma, B tipi biyodizel yakıtı için %17 oranında artış gösterdiği tespit edilmiştir. Her iki biyodizel yakıtının CO emisyon değerlerinde motorine kıyasla karışım içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla önemli düşüşler gösterdiği ifade edilmiştir.

Sayın ve arkadaşları, KYME ve motorinin yakıt olarak kullanıldığı tek silindirli, dört zamanlı, direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda enjeksiyon basıncının motor performansı ve yanma karakteristikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır [21]. Testler, sabit motor devrinde ve farklı yüklerde (FOEB: 25kPa, 50kPa) dört farklı enjeksiyon basıncı (18, 20, 22 ve 24 MPa) ile gerçekleştirilmiştir. Deneylerde KYME, motorin ile hacimsel olarak karıştırılmış ve B5, B20 ve B50 olmak üzere üç farklı karışım hazırlanmıştır. Yakıt özellikleri açısından, KYME'nin alt ısıl değerinin motorinden yaklaşık %9,78 daha düşük olduğu ve setan sayısının motorine göre yaklaşık %6,9 daha yüksek olduğu görülmüştür. KYME'nin viskozitesi ve parlama noktasının daha yüksek olduğu ifade edilirken, 331-348°C arasında kaynama aralığına sahip olduğu gözlemlenmiştir. KYME'nin ÖYT ve özgül enerji tüketimi (ÖET) değerlerinin motorinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlar, yakıtların farklı motor yükleri ve enjeksiyon basıncı için farklı enjeksiyon, yanma ve performans özellikleri sergilediğini göstermiştir. Yakıtların enjeksiyon karakteristikleri üzerine yapılan araştırmalar, motorin yerine KYME kullanmanın daha erken enjeksiyon zamanlamaları ile sonuçlandığını göstermiştir. Motorin ile karşılaştırıldığında KYME'nin düşük uçuculuğu ve yüksek viskozitesi nedeniyle KYME ve karışımları için maksimum silindir basıncı (MSB), maksimum basınç artış oranı ve maksimum ısı dağılım oranı (MIDO) değerlerinin biraz düşük olduğu ifade edilmiştir. Artan enjeksiyon basıncı, orijinal (20 MPa) ve azaltılmış enjeksiyon

basınçlarına kıyasla ÖYT, ÖET ve ısıl verim için daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

Roy ve arkadaşları, farklı devirlerde (1200, 1500 ve 1800 dev/dk) ve farklı yüklerde (FOEB: 57, 68, 86 kPa) direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda kanola biyodizel-motorin, yemeklik kanola biyodizel-motorin ve kanola yağı-motorin karışımlarının performansları ve emisyonlarını araştırmışlardır [22]. Testlerde, farklı karışım oranlarında (%2, %5, %10 ve %20) saf kanola biyodizel-motorin, yemeklik atıklardan elde edilmiş kanola biyodizel-motorin ve saf kanola yağı motorin karışımları yakıt olarak kullanılmıştır. Ayrıca, saf kanola yağı için %86 ve yemeklik kanola yağı için %90 verimle transesterifikasyon yöntemi uygulanarak biyodizel üretimi gerçekleştirilmiştir. Yakıt özellikleri açısından, setan indisi yaklaşık 50 ve ısıl değeri motorinden yaklaşık %10 daha azdır. Tüm yakıtlar için CO emisyonlarının daha yüksek motor devirlerinde daha düşük olduğu ve biyodizel-motorin karışımlarında biyodizel yüzdesi ne kadar yüksekse, CO emisyonlarının o kadar düşük olduğu görülmüştür. Tüm yakıtlar için HC emisyonlarının daha yüksek motor devirlerinde daha düşük olduğu ve biyodizel-motorin karışımlarında biyodizel yüzdesi ne kadar yüksekse, HC emisyonlarının o kadar düşme eğilimi gösterdiği kaydedilmiştir. Karışımlarda %5'e kadar biyodizel ve kanola yağı, NO, NO_2 ve NO_x emisyonlarında artış olmazken; %5'e varan kanola yağı-motorin karışımlarının NO, NO_2 ve NO_x emisyonlarında küçük bir azalma olduğu belirtilmiştir.

İlkılıç ve arkadaşları, aspir tohumu yağından biyodizel üretmişler ve daha sonra biyodizel karışımlarını motorin ile (hacimsel olarak, %5, %20 ve %50) karıştırarak tek silindirli bir dizel motor üzerinde performans ve emisyon testleri gerçekleştirmişlerdir [23]. Testler, sabit motor yükü (Ortalama efektif basınç, OEB: 5,6 Bar) ile dokuz farklı motor hızında (1000-3000 dev/dk arasında 250 dev/dk aralıklarla) ve B5, B20, B50 ve motorin olmak üzere dört farklı yakıt kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Motorinle karşılaştırıldığında, B5, B20 ve B50 yakıtlarının ortalama performans düşüşleri %2,2, %6,3 ve %11,2 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, bütün motor hızlarında B50 yakıtı en düşük tork değerini vermiştir. Tüm motor hızlarında B50 yakıtı en yüksek ÖYT değeri verirken, motorinin en düşük ÖYT değeri verdiği gözlenmiştir. Sonuçlara bakıldığında karışım içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla partikül madde (PM) emisyonlarının azaldığı görülmüştür. En

düşük PM ve CO emisyonları B50 yakıtı kullanımı ile elde edilmiştir. NO_x ve HC emisyonlarının biyodizel karışımlı yakıtlar için motorine göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Can ve arkadaşları, motorin ile (hacimsel olarak) %5, %10, %15 ve %20 oranlarında kanola biyodizel karışımlarının etkilerini, tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda dört farklı yükte (FOEB: 4,8, 3,6, 2,4 ve 1,2 Bar) ve sabit motor hızında (2200 dev/dk) araştırmışlardır [24]. Sonuçlara bakıldığında, kanola biyodizel yakıtının enjeksiyon başlangıcının daha erken krank açılarında gerçekleştiği ve buna rağmen daha kısa tutuşma gecikmesi değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Böylece, karışımdaki biyodizel oranı arttıkça, MIDO değerleri azalmış ve daha erken krank açısı değerlerinde elde edilmiştir. Tüm yükler için kanola biyodizel ilavesi ile MSB ve MSB artış oranı değerleri hafifçe düşmüş ve %50 yanan kütle kesri (KA50) konumlarında daha uzun yanma sürelerinin oluştuğu kaydedilmiştir. Yüksek yükte (4,8 Bar) ve karışım içerisindeki kanola biyodizel oranı %20'ye kadar çıktığında, ÖYT %6,56 yükselmiş ve ısıl verim %4,2 düşmüştür. Yüksek motor yükünde, B20 yakıt için NO_x emisyonlarındaki artış %8,9 ve is emisyonlarındaki azalma yaklaşık %53,5 olarak gerçekleşmiştir. Karışım içerisindeki kanola biyodizel oranının artmasıyla THC emisyonlarında yüksek yükte %30,3, kısmi ve düşük yüklerde (2,4 ve 1,2 Bar) altında %6'ya kadar düşüş kaydedilmiştir. Kanola biyodizel yakıtının kullanılmasıyla CO emisyonları yüksek yükte yaklaşık %32 azalırken, düşük ve orta yükler (1,2 ve 3,6 Bar) altında önemli oranda düşüş gözlemlenmiştir. Kanola biyodizel yakıtının kullanılmasıyla, CO_2 emisyonları tutarlı bir şekilde hafif bir artış göstermiş ve tüm yüklerde %5,49'a kadar artışların meydana geldiği ifade edilmiştir.

Işığıgür ve arkadaşları, referans motorin ve aspir tohumu yağı metil esteri (AYME) ile çalışan bir dizel motorun performans ve emisyon özelliklerini araştırmışlardır [25]. Motor performans testleri, motorin kullanılarak dört motor hızında (1200, 1600, 1800 ve 2200 dev/dk) gerçekleştirilirken, AYME kullanılarak altı motor hızında (1200, 1400, 1600, 1800, 2000 ve 2200 dev/dk) tam yük koşulunda gerçekleştirilmiştir. Metil esterin ısıl değerinin motorine kıyasla daha düşük olduğu kaydedilmiştir. Metil ester ile çalışan motorun fren gücü, fren torku ve FOEB değerleri referans motorin ile karşılaştırıldığında hafif bir düşüş gözlendiği belirtilmiştir. Ester yakıt kullanıldığında, ÖYT ve motorun ısıl veriminin daha

yüksek olduğu ifade edilirken, CO ve HC emisyonlarının azaldığı ve metil ester kullanımı ile partikül emisyonlarında belirgin bir düşüş gözlemlendiği ifade edilmiştir. Yakıt özellikleri ve motor testleri sonuçları, aspir tohumu yağının transesterifikasyonu ile elde edilen metil esterin, dizel motorlar için alternatif bir yakıt olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, özellikle aspir yağından üretilen biyodizelin CRDI bir dizel motorlarda yakıt olarak kullanıldığı ve performans, enjeksiyon, yanma ve egzoz emisyonlarının karakteristikleri üzerine yapılmış çalışma bulunmamaktadır. Literatürdeki bu eksikliği gidermek için yapılan bu yüksek lisans çalışmasında, kanola ve aspir yağı karışımından üretilmiş olan biyodizel yakıtı CRDI bir dizel motorda 2000 dev/dk sabit motor hızında ve beş farklı yükte (FOEB: 3,3, 5, 6,6, 8,3, 9,9 Bar) test yakıtı olarak kullanılmış ve performans, enjeksiyon, yanma ve egzoz emisyon karakteristikleri incelenmiş ve referans yakıt olan motorin ile karşılaştırılmıştır. Aspir yağının yüksek iyot içeriğine sahip olması nedeniyle daha düşük iyot içeriğine sahip olan kanola yağı ile karıştırılarak iyot değeri düşürülmüş EN 14214 Avrupa birliği biyodizel üretim standartlarında belirtilmiş olan değerlerin sağlanmasıyla NO_x emisyonlarının düşürülmesi hedeflenmiştir.

3. BİYODİZEL

Biyoyakıtların fosil yakıtlara bir alternatif olarak kullanıldığı bilinmektedir. Biyoyakıt olarak biyodizel yakıtının kullanımı biyolojik olarak doğada çözünebilir olması ve düşük karbon döngüsüne sahip olması nedeniyle her geçen gün artmaktadır [26]. Bu nedenle biyodizel ve üretimi her geçen gün daha da önem arz etmektedir. Bu bölümde, biyodizel yakıtının genel olarak tanımı yapılmış ve kullanılan biyodizel yakıtının üretildiği hammadde olan bitkisel yağların fiziko-kimyasal özellikleri ve bu yağların kullanımıyla biyodizel üretimi konularına değinilmiştir. Biyodizel kullanımına bağlı olarak tüm dünyada oluşturulmuş olan standartlar incelenmiştir. Son olarak, Türkiye'de kanola ve aspir bitkilerinden biyodizel üretimi ve tarihçeleri hakkında bilgi verilmiştir.

3.1. Biyodizel

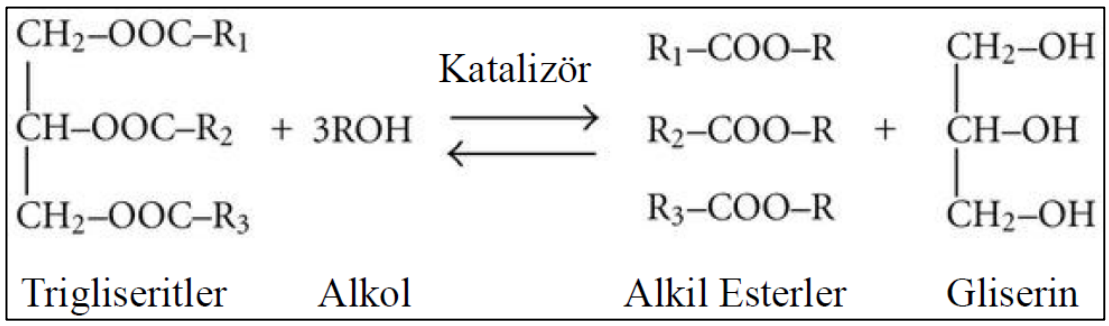
Biyodizel, temelde bitkisel, hayvansal ve atık yemeklik yağlardan farklı metotlar kullanılarak üretilmektedir. Günümüzde, çoğunlukla motorin ile belli oranlarda karıştırılarak kullanılmaktadır. Üretim sürecinde mono alkil ester olarak adlandırılan yapı alkol ve katalizör yardımıyla kimyasal tepkime sonucunda biyodizel yakıtına dönüştürülür. Elde edilen temiz biyodizel, B5 (%5 biyodizel ve %95 motorin karışımı) veya B100 (%100 biyodizel) olarak dizel motorlarda hiçbir değişiklik yapılmadan veya ufak değişikliklerle kullanılabilmektedir. Özellikle, bitkisel yağların sıkıştırmalı ateşlemeli motorlarda başarılı bir şekilde kullanımı motor üzerinde yapılan değişiklikler ve yakıt özelliklerindeki değişiklikler ile mümkün kılınmıştır. Motorda yapılan değişiklikler çift yakıt kullanımı, enjeksiyon sistemi değişiklikleri, ısıtılmış yakıt hatları vb. içerir. Yakıt özelliklerindeki değişiklikler, bitkisel yağların motorin ile karıştırılması, transesterifikasyon, kraking/piroliz, mikro-emülsiyon ve hidrojenasyon ile polimerizasyon ve viskozitesinin azaltılmasını içerir [27]. Biyodizel üretiminde kullanılan hammadde kaynaklarının farklı

özelliklere sahip olması nedeniyle fiziko-kimyasal yapıları değişiklik göstermektedir. Bu nedenle, testler gerçekleştirilmeden önce kullanılacak olan yakıtların yakıt özellikleri ve kimyasal olarak içeriklerinin incelenmesi gerekmektedir. Kaliteli biyodizel üretiminde hammadde olarak kullanılan bitkisel yağların kimyasal yapısı yapılan çalışmalarla bilinmektedir.

3.1.1. Bitkisel yağların özellikleri

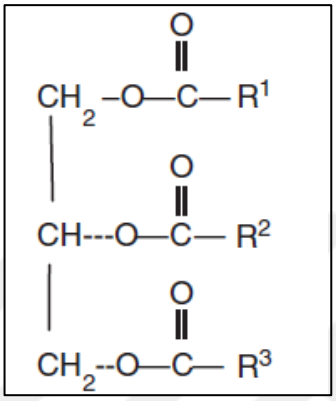
Bitkisel yağların kullanımı ile gerçekleştirilen biyodizel üretimi içeriğinde bulunan hammaddenin özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bitkilerin yaşamsal faaliyetlerini sürdürebilmeleri için fotosentez olayı ile karbon döngüsüne müdahale ettikleri bilinmektedir. Bu durumda, bitkisel yağlardan üretilebilecek olan biyodizel yakıtının doğaya salacağı karbonun doğada bulunan diğer bitkiler aracılığıyla gerçekleştirilecek olan fotosentez olayı ile karbon döngüsüne katılacaktırlar. Aynı durum, petrol kökenli yakıtlar için geçerli olmayacaktır. Petro-motorinin yakıt molekülleri, 12 ila 18 arasında değişen karbon atomları ile doymuş dallı olmayan moleküllerdir, oysa bitkisel yağlar basit düz zincir bileşiklerinden, proteinlerin ve yağda çözünür vitaminlerin karmaşık yapısına kadar değişen organik bileşiklerin karışımıdır [28].

Şekil 3.1'de görüldüğü üzere, trigliseritler (bitkisel yağların yapısını oluşturur) metanol ile tepkimeye girdiklerinde nihai ürün olarak tepkime sonucunda gliserin ve metil ester meydana gelmektedir. Bitkisel yağların genellikle farklı uzunluklarda dallanmış zincir sayısına sahip trigliseritlerden oluştuğu bilindiğinden, tepkimenin girenler kısmındaki ilk kimyasal yapı olarak ifade edilmektedir.



Şekil 3.1. Transesterifikasyon reaksiyonunun kimyasal tepkime denklemi

Şekil 3.2'de ifade edilen R^1, R^2 ve R^3 yağ asitlerinin hidrokarbon zincirlerini temsil etmektedir. Yağ asitleri, karbon zincirinin uzunluğuna ve doymamış bağ sayısıyla (çift bağ) değişiklik göstermektedir [28]. Yağ asitleri, çift sayıda karbon atomu olan düz zincirli karboksilik asitlerle yapılan doğal bileşiklerdir. Gerçekleşen kimyasal reaksiyonda bir karboksilik asit ile ester meydana getiren bir alkolün bağlanması sağlanmış olur [29].



Şekil 3.2. Trigliseritlerin kimyasal yapısı

Çoğu sıvı bitki yağları (soya fasulyesi, kanola, aspir, ayçiçeği vs.) ağırlıklı olarak 18 karbonlu yağ asitlerinden oluşur. Oda sıcaklığında sıvı olma eğiliminde olan yağlar, daha fazla çift bağa sahip olma eğilimi gösterirler, yağ asit zincirlerinde karşılık gelen bükülmeler sıvı halde olmalarına neden olur. Doymuş yağ asidi zinciri, karbon atomu başına mümkün olan en fazla sayıda hidrojen atomu içerir. Stearik asit doymuş yağ asitlerinden biridir. Doymamış yağ asidi zinciri, bazı karbon atomlarında bulunan çift bağlar nedeniyle mümkün olan en fazla sayıda hidrojen atomu içermez. Linoleik asit doymamış yağ asitlerinden biridir. Çift bağların yeri ve sayısı önemlidir, çünkü yağ asidi zincirini dengesiz hale getirmek için oluşabilecek reaksiyonları etkilerler [30].

Hayvansal ve bitkisel yağlar trigliseritlerdir veya gliserol ve yağ asitlerinin esterleridir. Çünkü tüm trigliseritlerin özdeş gliserol bileşenleri bulunduğundan, farklı özellikler yağ asitleri tarafından katkıda bulunulmaktadır. Yağ asidi bileşenlerinin ayırt edilebilmesi için, (1) zincir uzunluğu, (2) çift bağların sayısı ve konumu ve (3) gliserol açısından yağ asitlerinin konumu belirleyicidir. Trigliserit yapısı, yağ asit bağının gliserol ile olan konumundan, şayet üç yağ asidinin aynı ya

da farklı olmasından ve her birinin pozisyonundan etkilenir. Bu yağ asidi ve yapısal değişikliklerin tümü sonuçtaki trigliseridlerin kimyasal ve fiziksel özelliklerini etkiler. Bu nedenle, yağ asidi ve trigliserit bileşimi analizleri hayvansal yağ ve bitkisel yağ ürünlerinin en iyi karakterizasyonunu sağlar [31]. Soya yağı ile üretilen biyodizelin kanola yağı ile üretilen biyodizel ile aynı kimyasal özelliklere sahip olmamasının nedeni budur. Örneğin, soya yağının erime noktası -16°C iken, kanola yağı -10°C'de erir. Palm yağı ise (%45 C16 palmitik asit içeren bir yağ) 35°C'de erir [30].

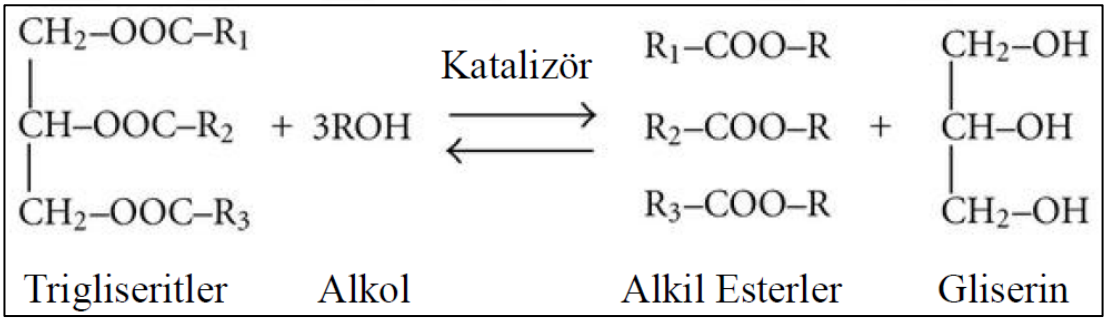
Uzun düz zincirli bir hidrokarbon olan hekzadekan ($C_{16}H_{34}$) 100 setan sayısı ile setan ölçeğinde yüksek kalite standardıdır. Bunun aksine zayıf ateşleme kalitesine sahip yüksek dallı 2,2,4,4,6,8,8, heptametilnonan (HMN) 15 setan sayısıyla düşük kalite standardıdır. Setan ölçeğinde belirlenen bu iki referans bileşim, setan sayısının zincir uzunluğunun azalması ve dallanmanın artmasıyla azaldığını göstermektedir [32].

3.1.2. Bitkisel yağlardan biyodizel üretimi

Bitkisel yağlar, yüksek kalitede biyodizel üretiminde kullanılan ve dizel yakıtlarına alternatif olan temelde biyodizel üretiminde kullanılan iki çeşit hammadde kaynağından biridir. Bitkisel hammaddeden üretilen biyodizel yakıtlarının kullanımıyla birlikte yüksek viskoziteye sahip olmaları dizel motorlarda olası bazı problemleri ortaya çıkarmıştır. Bitkisel yağın yüksek viskozitesi, pompalama ve püskürtme karakteristikleri (atomizasyon ve penetrasyon vs.) problemine neden olmaktadır. Yağın hava ile yetersiz karışımı, eksik yanmaya katkıda bulunmaktadır. Bütün bu sebepler, yüksek karbon kurum oluşumu, enjektör koklaşması, piston segmanı yapışması ve yağlama yağının seyreltilmesi ve yağ bozunumu ile sonuçlanır [28]. İfade edilen bu fiziksel sebepler bitkisel yağların dizel motorlarda kullanımı için sorun teşkil etmekle kalmamış aynı zamanda bitkisel yağların kimyasal yapısı da buna eşlik etmiştir. Bitkisel yağların çoklu doymamış doğası, sakızlaşma (yapışma) oluşumu, segman yapışması vb. uzun vadeli problemlere neden olmuştur. Bu sorunlardan dolayı, bitkisel yağların mevcut motorlarda daha uygun ve uyumlu bir yakıt olarak kullanılması için kimyasal olarak değiştirilmesi gerekmektedir [28]. Şüphesiz ki; bitkisel yağların kullanımı ile üretilen biyodizel yakıtlarının yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi viskozitelerinin düşürülmesi ile gerçekleştirilecektir. Bu

durumda, viskozitenin düşürülmesinde uygulanacak yöntemler sırasıyla, doğrudan kullanımı veya harmanlanması, mikroemülsiyon, piroliz (termal parçalama) ve en çok kullanılan transesterifikasyon olarak sıralanmaktadır. Seyreltme ve mikro emülsiyon işlemleri daha basittir, ancak daha yüksek viskozite ve kötü uçuculuk nedeniyle tercih edilmezler [33]. Piroliz işlemi basit ve çevre dostu olarak görülmektedir [34]. Bunların yanı sıra, viskozitenin düşürülmesinde etkili olan transesterifikasyon işlemi biyodizel üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Transesterifikasyon, bir bitkisel yağın ya da hayvansal yağın metil esterlerini ve gliserolü oluşturmak üzere yaygın olarak metanol vb. bir alkolle reaksiyonudur. Reaksiyon oranını ve verimi arttırmak için genellikle sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit katalizör olarak kullanılır [35]. Transesterifikasyon reaksiyonunun kimyasal olarak gerçekleştirilen tepkime formülü Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Ham yağ içerisindeki serbest yağ asidi içeriği <%1 olduğunda homojen katalizörlerin performansı daha iyi olmaktadır [36]. Katalizörün karışımdan bir şekilde ayrılması işleminin pahalı oluşu ve istenmeyen yan ürünün (sabun) oluşumu homojen katalizörün kullanımının sınırlandırıcı özelliklerindendir [37].



Şekil 3.3. Alkolle trigliseritlerin transesterifikasyonu

Genel olarak, katalizör, transesterifikasyon reaksiyonunun hızını arttırır ve aynı zamanda alkolün çözünürlüğünü de arttırır. Asit katalizli reaksiyon, esterifikasyon olarak bilinen bir ön-işlem basamağı sayesinde hammaddelerin daha yüksek asit değerini düşürmek için kullanılır. Bununla birlikte, reaksiyon hızı transesterifikasyondan nispeten daha yavaştır [38]. Bazı çalışmalarda, reaksiyon sıcaklığını ve reaksiyon süresini arttırarak daha yüksek bir dönüşüm sağlanabileceği gösterilmiştir [40, 41]. Biyodizel üretiminde kullanılan transesterifikasyon yöntemi zaman içerisinde kullanılan hammaddeye ve özelliklerine bağlı olarak biyodizel

yakıtının kalitesine etki etmiştir. Reaksiyonun stokiyometrisinde alkolün yağa oranı 3:1 molar orandır, ancak reaksiyon tersine çevrilebilir olduğu bilindiğinden pratikte ürün verimini yükseltmek ve oluşacak gliserolde faz ayrımına izin vermek için dengeyi ürün tarafına kaydırarak fazla alkole (6:1) ihtiyaç duyulur [38, 42]. Düşük maliyeti, fiziksel ve kimyasal avantajları (polar ve en kısa zincirli alkol) nedeniyle metanol ve etanol en sık kullanılan alkollerden, özellikle metanol reaksiyonlarda oldukça sık kullanılan alkoldür. Transesterifikasyon reaksiyonu hem homojen hem de heterojen katalizörler ile katalize edilebilir. Homojen katalizörler alkaliler ve asitlerdir. En sık kullanılan alkali katalizörler NaOH, KOH ve bunlara tekabül eden sırasıyla, sodyum ve potasyum metoksitlerdir [38, 43, 44]. Asit katalizli reaksiyonda katalizörler olarak genellikle sülfürik asit, sülfonik asit ve hidroklorik asit kullanılır. Bitkisel yağların alkali ile katalize edilen transesterifikasyonu asit katalizli reaksiyona göre daha hızlı ilerlemektedir [44]. Bir alkali katalizli transesterifikasyon için trigliseridlerin düşük serbest yağ asidi (SYA) içeriğine sahip olması gerekmektedir. Sabun oluşumu esterlerin verimini düşürür ve ester ile gliserolün ayrışmamasına neden olur [38, 46, 47]. Yaklaşık %5 SYA'ya kadar reaksiyon, bir alkali katalizör kullanılarak katalize edilebilir [38]. Transesterifikasyon ve yan reaksiyonların derecesi, hammadde türüne, katalizör formülasyonuna, katalizör konsantrasyonuna, alkol-yağ oranına, reaksiyon sıcaklığına ve reaksiyon süresine bağlıdır [47,48]. Yüksek serbest yağ asidine sahip yağlarda, baz katalizli reaksiyon asit katalizli reaksiyona göre daha hızlıdır, ancak sabun oluşumu nedeniyle biyodizelin verimi düşer [49].

3.1.3. Biyodizel ve motorin standartları

Biyoyakıtların dünya çapında kullanımının artması ile birlikte içten yanmalı motorlarda kullanımının incelenmesi ve belirli parametreler çerçevesinde normlara oturtulması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu durum, üreticiler açısından büyük bir yük olarak görülmüş olsa da biyoyakıt sektörünün gelişmesi için büyük bir önem teşkil etmektedir. Farklı hammaddelerden üretilen biyodizel yakıtlarının dizel motorlarda kullanımı ile ortaya çıkan problemlerin giderilmesi gerekmektedir. O yüzden yalnızca kült bir şekilde elde edilen her ürünün kullanılması uzun süreli olarak içten yanmalı motorlarda enjektör koklaşması veya karbon birikimi vb. mekanik parçalara zarar vermektedir. Bu sorunların giderilebilmesi ve farklı hammaddeler kullanılarak

üretilen esterlerin dizel motorlarda uzun vadede kalıcı olarak kullanılması için her ülke kendi yasal çerçeveleri içerisinde standartlar oluşturmuşlardır. Bu standartlar, Amerika'da ASTM D6751 ve Avrupa'da EN 14214 olarak bilinmektedir.

Tablo 3.1. ASTM D6751[a] biyodizel standardı

Özellikleri	Test Metodu	Değerler	Birim
Parlama Noktası (kapalı kap)	D 93	130 min.	°C
Su ve Tortu	D 2709	0,050 mak.	% hacimsel
Kinematik Viskozite, 40°C	D 445	1,9 – 6,0	mm^2/s
Sülfatlı Kül	D 874	0,020 mak.	% kütlece
Sülfür	D 5453	0,0015 mak. (S15)	% kütlece, ppm
		0,05 mak. (S500)	% kütlece
Bakır Şerit Korozyonu	D 130	No. 3 mak.	
Setan Sayısı	D 613	47 min.	
Bulutlanma Noktası	D 2500	-	°C
Karbon Kalıntısı	D 4530	0,050 mak.	% kütlece
Asit değeri	D 664	0,50 mak.	mg KOH/g
Serbest Gliserin	D 6584	0,020	% kütlece
Toplam Gliserin	D 6584	0,240	% kütlece
Fosfor İçeriği	D 4951	0,001 mak.	% kütlece
Sodyum/Potasyum	UOP 391	5 mak.	ppm
Distilasyon Sıcaklığı, Atmosferik Eşdeğer Sıcaklığı, %90	D 1160	360 mak.	°C

[a]Değerler, Grade S15 ve Grade S500 biyodizel için, S15 ve S500 maksimum kükürt özelliklerine (ppm cinsinden) ilişkin olarak verilmiştir.

Avrupa Birliği ve Amerika Birleşik Devletlerinde endüstriyel ölçekte biyodizel üretimi için oluşturulan bu standartlar kaliteli biyodizel üretilmesini ve uzun vadede içten yanmalı motorlarda hiçbir değişiklik yapılmadan güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Aşağıda Amerika ve Avrupa'da halen daha yürürlükte olan ve biyodizel yakıtının dizel motorlarda kullanımına yönelik değerleri içeren ASTM D6751 ve EN 14214 standartları tablolar halinde ifade edilmiştir. Tablo 3.1'de Amerikan biyodizel standartları gösterilmiştir.

Türkiye'de bu standartlar Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu tarafından TS EN 14214 adıyla piyasaya sunulacak olan biyodizel yakıtları için zorunlu hale getirilmiştir. Standartlar çerçevesinde analiz edilmesi gereken birçok parametre (ester içeriği, iyot sayısı, asit değeri, parlama noktası gibi) mevcuttur. Bunlar içerisinde en önemlisi olarak gördüğümüz enjektörlerdeki pompalama basıncına etki eden viskozite değeri EN 14214 standartlarına göre 3,5-5,0 mm^2/s arasında ASTM D6751'e göre 1,9-6,0 mm^2/s arasında değişiklik göstermektedir. Tablo 3.2'de ise Avrupa Birliği biyodizel standartları verilmiştir. Her iki standart arasında ufak farklılıklar bulunmaktadır. Amerikan standartlarına göre belirlenen setan sayısı 47 iken Avrupa Birliği standartlarında en düşük 51 olarak belirlenmiştir. Buna ek olarak, Avrupa Birliği standartlarında ifade edilen sülfür içeriği 10 mg/kg iken Amerikan standartlarında S15, 0,0015% (kütlece) ve S500 için 0,05% (kütlece) olarak belirtilmiştir.

Avrupa birliği ve Amerikan standartlarının yanı sıra farklı kıtalarda, başka ülkelerde kendi yasaları çerçevesinde coğrafi koşullarını da göz önünde bulundurarak kendi biyodizel standartlarını oluşturmaktadırlar. Biyodizel ve motorinin Avrupa ve Amerikan standartlarının yer aldığı tablolarda bulutlanma noktası ve soğukta filtre tıkanma noktası (SFTN) değerleri "-" işareti ile gösterilmiştir. Bu durum, üretilmiş olan biyodizel veya motorinin coğrafi olarak o bölgenin koşullarına göre değişiklik göstermesinden kaynaklanan nedenlerden ötürü bu şekilde ifade edilmektedir.

Tablo 3.3'de Avrupa motorin standardı (EN 590) değerleri ve Tablo 3.4'de Amerikan motorin standardı (ASTM D 975) değerleri verilmiştir. Avrupa motorin standardında belirtilen setan sayısı en düşük 51 iken, Amerikan motorin standardında bu değer en düşük 40 olarak belirtilmiştir. Genel olarak, Amerikan ve Avrupa standartlarının hem motorin hem de biyodizel için ifade ettiği bakır şerit korozyon özelliği farklılık göstermektedir. Bu değer Avrupa standartlarında 1. Sınıf (No 1) olarak ifade edilirken Amerikan standartlarında No 3 olarak ifade edilmiştir.

Tablo 3.2. EN 14214 Avrupa Birliği biyodizel standardı değerleri

Özellikleri	Test Metodu	Değerler	Birim
Parlama Noktası, min.	EN ISO 2719	101	°C
Su	EN ISO 12937	500 mak.	mg/kg
Toplam Kirlenme	EN 12662	24	mg/kg
Kinematik Viskozite	EN ISO 3104	3,5 – 5,0	mm^2/s
Yoğunluk	EN ISO 3675 EN ISO 12185	860 - 900	kg/m^3
Ester İçeriği	EN 14103	96,5 min.	%
Sülfatlı kül	ISO 3987	0,02	% kütlece
Sülfür	EN ISO 20846 EN ISO 20884	10,0	mg/kg
Bakır Şerit Korozyonu	EN ISO 13032 EN ISO 2160	Sınıf 1	
Setan Sayısı	EN ISO 5165	51,0 min.	
Bulutlanma Noktası	EN 23015	-	°C
SFTN	EN 116	-	°C
Asit değeri	EN 14104	0,50 mak.	mg KOH/g
Oksidasyon Kararlılığı	EN 14112	8	Saat
İyot Değeri	EN 14111 EN 16300	120	g I/100g
Linolenik Asit Metil Ester	EN 14103	12,0 mak.	% kütlece
Çoklu Doymamış Metil Ester	EN 15779	1,0	% kütlece
Alkol içeriği	EN 14110	0,20	% kütlece methanol mak.
Monogliseritler, Digliseritler, Trigliseritler	EN 14105	MG 0,70 DG 0,20 TG 0,20	% kütlece
Grup 1 Metalleri (Na + K)	EN 14108 EN 14109	5,0 mak.	mg/kg
Grup 2 Metalleri (Ca + Mg)	EN 14538 EN 14538	5,0 mak.	mg/kg
Serbest Gliserin	EN 14105 EN 14106	0,02	% kütlece
Toplam Gliserin	EN 14105	0,25	% kütlece
Fosfor İçeriği	EN 14107 prEN16294	4,0	mg/kg

Tablo 3.3. Avrupa motorin standardı değerleri (EN 590)

Özellikleri	Test Metodu	Değerler	Birim
Parlama Noktası,	EN 22719	55 min.	°C
Su,	EN ISO 12937	500 mak.	mg/kg
Toplam Kirlenme	EN 12662	24	mg/kg
Damıtma Sıcaklığı	EN ISO 3405	%65: 250°C min. %85: 350°C mak.	
Kinematik Viskozite	EN ISO 3104	2,0 – 4,5	mm^2/s
Yoğunluk	EN ISO 3675 EN ISO 12185	820 - 845	kg/m^3
Ester İçeriği, mak.	EN 14078	5	% hacimsel
Kül, mak.	EN ISO 6245	0,01	% kütlece
Sülfür, mak. (kütlece)	EN ISO 14596 EN ISO 8754 EN ISO 24269	İki sınıfta: 50 10	mg/kg
Bakır Şerit Korozyonu	EN ISO 2160	Sınıf 1	
Setan Sayısı, min.	EN ISO 5165	51,0	
Setan İndeksi, min.	EN ISO 4264	46,0	
PAH, mak.	IP 391 EN 12916	11	% kütlece
Bulutlanma Noktası	EN 23015	-	°C
SFTN	EN 116	-	°C
Karbon kalıntısı, mak. (% 10 distilasyon kalıntısı)	EN ISO 10370	0,30	% kütlece
Oksidasyon kararlılığı, mak.	EN ISO 12205	25	g/m^3
Yağlayıcılık, mak.	ISO 12156-1	460	µm

Tablo 3.4. Amerikan motorin standartları (ASTM D975)

Özellikleri	Test Metodu	Değerler	Birim
Parlama Noktası, min.	D93	No 1D 38 No 2D 52	°C
Su ve Tortu, mak.	D 2709	0,05	% hacimsel
Damıtma Sıcaklığı (% hacimce geri kazanılan)	D 86	%90: 1D: 288 min. 2D: 282 - 338 mak	°C
Kinematik Viskozite	D 445	1D 1,3 – 2,4 2D 1,9 – 4,1	mm^2/s
Ester İçeriği, mak.	EN 14078	5	% hacimsel
Kül, mak.	D 482	0,01	% kütlece
Sülfür, mak. (kütlece)	D 5453 D 2622 D 129[2]	1D ve 2D: S15 15 S500 0,05 S5000 0,50	mg/kg % %
Bakır Şerit Korozyonu	D 130	No 3	
Setan Sayısı, min.	D 613	40	
Bir tanesinin, - Setan indeksi - Aromatikliği	D 976-80 D 1319	40 min. 35% hacimce mak.	% hacimce
İşletilebilirliği, Bir tanesinin, - Bulutlanma noktası - LTFT/SFTN	D 2500 D 4539 D 6371	-	-
karbon kalıntısı, mak. (% 10 distilasyon kalıntısı)	D 524	1D: 0,15 2D: 0,35	% kütlece
Oksidasyon kararlılığı, mak.	EN ISO 12205	25	g/m^3
Yağlayıcılık, mak.	D 6079	520	µm
İletkenlik, min.	D 2624 D 4308	25	pS/m

[2]D129 test metodu sadece S5000 sınıfları için geçerlidir.

Tablo 3.5. B6 – B20 karışımları için Amerikan standartları (ASTM D7467-17)

Özellikleri	Test Metodu	B6-B20 S15	B6-B20 S500	B6-B20 S5000
Asit Değeri, mg KOH/g, mak.	D664	0,3	0,3	0,3
Viskozite, 40°C'de mm^2/s	D 445	1,9 – 4,1	1,9 – 4,1	1,9 – 4,1
Parlama Noktası, °C, min.	D93	52	52	52
Bulutlanma noktası veya SFTN, °C, mak.	D2500 D4539 D6371	-	-	-
Sülfür içeriği, (g/g)	D5453	15	-	-
Kütlece yüzdesi, mak.	D2622	-	0,05	-
Kütlece yüzdesi, mak.	D129	-	-	0,50
Su ve Tortu, % hacimsel, mak.	D 2709	0,05	0,05	0,05
Damıtma Sıcaklığı (%90 hacimce geri kazanılan), °C	D 86	343	343	343
Setan sayısı, min.	D613	40	40	40
Kül, % kütlece, mak.	D 482	0,01	0,01	0,01
Bakır Şerit Korozyonu, 50°C'de 3 saat	D 130	No 3	No 3	No 3
Setan Sayısı, min.	D 613	40	40	40
Bir tanesi karşılanmalı, - Setan indeksi - Aromatikliği	D 976-80 D 1319-03	40 min. 35% hacimce mak.	40 min. 35% hacimce mak.	40 min. -
Biyodizel içeriği, % hacimce	D 7371	6-20	6-20	6-20
karbon kalıntısı, mak. (% 10 distilasyon kalıntısı)	D 524	0,35	0,35	0,35
Oksidasyon kararlılığı, saat, min.	EN 15751	6	6	6
Yağlayıcılık, (HFRR 60°C), micron (m), mak.	D 6079	520	520	520
İletkenlik, pS/m, min.	D 2624 D 4308	25	25	25

Biyodizel yakıtları dizel motorlarında farklı karışımlarla kullanılmaktadır. Tablo 3.5'de %6 ile %20 (hacimsel olarak) arasında biyodizel içeren motorin-biyodizel karışımlarının özellikleri yer almaktadır. Birçok farklı çalışmada %20'ye kadar biyodizel yakıtının motorinle karışımı dizel motorlarda hiçbir değişiklik yapılmadan test edilmiştir [20, 22, 23, 51, 52]. Bu durumda, %20 Amerikan standartlarına göre biyodizel kullanımı ve %7'ye kadar da Avrupa standartlarına göre biyodizel yakıtının motorine karıştırılarak dizel motorlarda kullanılabileceği ifade edilmiştir.

3.2. Türkiye'de Biyodizel

Biyoyakıt olarak biyodizel dizel motorun icadından bu yana her geçen gün farklı hammaddelerle üretilmeye devam etmektedir. Gün geçtikçe artan petrol fiyatları ve atmosfere olan zararları nedeniyle gelişmiş ülkeler ve gelişmekte olan ülkeler yasalar çerçevesinde kendi mevzuatlarını hazırlayarak alternatif yakıtların kullanımının önünü açmaktadırlar. Türkiye'de de biyodizel 2000'li yılların başında petrol kökenli yakıtlarla harmanlanan ürünler arasında yerini almıştır. Bu süreçle birlikte günümüze kadar ülkemizde biyodizel çok farklı yasal değişikliklere uğramıştır. Türkiye'de akaryakıt piyasası, Enerji Piyasası Düzenleme Kurulunun (EPDK) kontrolü altındadır. Ülkemizde üretilen veya ithal yollarla temin edilen petrol kökenli yakıtların belirli süreçlerden geçirildikten sonra petrol şirketlerine dağıtımı 5015 sayılı petrol kanunu ile gerçekleşmektedir. Bu kanunla, petrol kökenli yakıtların piyasada denetimi yapılmış olacaktır. Çıkan bu kanunla biyodizel üretimi teşvik edilmiş ve Türkiye'de üretimi hız kazanmıştır. Devam eden süreçte 25579 sayılı 10.09.2004 tarihli Resmi Gazete'de "Petrol Piyasasında Uygulanacak Teknik Kriterler Hakkında Yönetmelik" ve 25495 sayılı 17.06.2004 tarihli Resmi Gazetede "Petrol Piyasası Lisans Yönetmeliği" çıkarılmış ve biyodizelin akaryakıt kapsamına alınması sonucunda EPDK denetiminde tüm işlemler lisans verilerek yapılmaya başlanmıştır. Biyodizel konusunda standartların oluşturulması için çalışmalar başlatılmış ve Türk Standartları Enstitüsü tarafından 2005 yılından itibaren TS EN 14214 oto biyodizeli ve TS EN 14213 yakıt biyodizel olarak uygulamaya konulmuştur. Devam eden süreçte biyodizel yakıtına uygulanan özel tüketim vergisi (ÖTV) biyodizel üreticisini zor duruma sokmuştur. Bu gelişmeler sonrasında yasal mevzuata uygun olmayacak şekillerde üretim yapan tesisler ortaya çıkmış ve kayıt dışı üretim hızla artış göstermiştir. 2006 yılında çıkan EPDK'nın 630/26 sayılı kararı

aracılığıyla biyodizel üretmek için lisans alınması zorunlu kılınmıştır. Lisans alınımına ilişkin yasal süreç işlerken sektörde haksız rekabet problemleri ortaya çıkmıştır. Haksız rekabet problemlerini giderebilmek için yine 2006 yılı içerisinde 5479 sayılı gelir vergisi kanununda yapılan değişiklikle 0,64 TL/litre ÖTV uygulanmaya başlanmıştır. Devam eden süreç içerisinde biyodizel için ÖTV vergisi 0,72 TL/litre olmuştur. Yapılan en son düzenlemeyle Oto biyodizel ve yakıt biyodizeline 0,91 TL/litre ÖTV uygulaması getirilmiştir. Bu düzenleme sonucunda maliyetler artmış çoğu fabrika üretim yapamaz hale gelmiştir. Bu durumun yasal olarak düzeltilmesinin Türkiye'nin petrole olan bağımlılığını azaltıp ekonomik anlamda rahatlamasını sağlayacağı bir gerçektir. EPDK, 2018 yılından itibaren motorine %0,5 oranında biyodizel harmanlanmasını zorunlu hale getirilmiştir. Bütün bu durum, EPDK'nın yürürlüğe koyduğu bu tebliğ ile 22,3 milyon ton motorinin 115 bin tonluk kısmına tekabül eden biyodizel miktarı göz önüne alındığında 70 bin ton olan biyodizel üretimini %50 arttıracağı anlaşılmaktadır. Ülkemizin enerjiye olan bağımlılığının önündeki en önemli engel petroldür. Bu konunun aşılması için biyodizel yakıtlarının bir an evvel devreye alınması gerekmektedir.

3.2.1. Kanola ve aspir bitkilerinin kimyasal yapıları ve özellikleri

Türkiye'de her geçen gün artan çalışmalar biyodizel üretimi için farklı kaynakların varlığına ışık tutmaktadır. Biyodizel yakıtının düşük karbon döngüsüne sahip temiz yenilenebilir bir yakıt olması nedeniyle üretimi için farklı bitki türleri araştırılmaktadır. Türkiye'de yetiştirilen fakat varlığı az duyulan bir bitki olan aspir çiçeğinin tohumlarının kullanılmasıyla biyodizel üretimi yapılmaya başlanmıştır. Yine, daha çok Avrupa'da biyodizel üretiminde kullanılan kanola bitkisi Türkiye'de de kullanılmaktadır.

Bileşikgiller ailesinden gelen bir bitki olan aspir (Carthamus tinctorius L.) çeşitli çevre koşullarına uyum sağlaması nedeniyle dünyanın birçok bölgesinde yetişebilmektedir [53-55]. Çok dallı, otsu, dikenli, yıllık ve genellikle yaprakları üzerinde çok uzun keskin dikenlere sahiptir. Bu bitkiler, küresel çiçek başlıkları (kapitülum) ve genellikle parlak sarı, turuncu veya kırmızı renkli çiçeklerle 30 ila 150 cm yüksekliğinde olup, temmuz ayında çiçek açar. Çiçek açtıktan sonra her dal genelde baş başına 15 ila 20 tane tohum içeren bir ile beş çiçek başlığına sahip

olacaktır. Aspir, başta renkli taç yapraklarının sebze yağı için gıda boyası olarak ve aroma ajanı olarak ve ayrıca, Uzak Doğu, Orta ve Kuzey Asya, Amerika, Kuzey Afrika, Avrupa ve Kafkasya'da tekstil boyası hazırlamak için kullanılmak üzere yüzyıllardır yetiştirilmektedir. Günümüzde bilinen diğer aspir yetiştirilen ülkeler Hindistan, ABD, Meksika, daha az oranda Kazakistan, Etiyopya, Arjantin, Çin, Özbekistan, Avustralya, Rusya Federasyonu, Pakistan ve İspanya'dır [54]. Bu durumda, aspir bitkisinin dünyanın farklı bölgelerinde yetişebildiği anlaşılmaktadır.

Aspir, doğu Akdeniz kökenli bir yağlı tohumlu ürünüdür. Çiçeklenme ve olgunlaşma sırasında kuru bir atmosfer ile kış ve ilkbahar yağış alan nispeten düşük yağış alanlarına adapte edilmiştir. Kuraklığa karşı toleranslı ve kuru bir mahsuldür, çünkü toprak katmanının derinlerde suyu alabilen uzun kökleri vardır. Tüm yağlı tohum yıllık bitkilerinin arasında en çok kuraklığa karşı dayanıklı olanı olduğu düşünülmektedir [53]. Aspir yağı, dünyanın bazı yarı çöl bölgelerinde yetişen, uzun ömürlü çok yıllık çalı olan aspirin tohumlarından çıkarılır. Bu yağ tatsız ve renksizdir ve besleyici olarak ayçiçeği yağı gibidir. [54, 57].

Biyodizel üretiminde kullanılacak olan aspir bitkisinden öncelikle ne kadar yağ çıkacağı bilinmelidir. Bu bitkinin tohumları %27-32 yağ, %5-8 nem, %14-15 protein, %2-7 kül ve %32-40 ham lif içermektedir. Yağ asidi içeriğinin çeşitliliği için değerli bir bitkidir. Standart aspir yağı bileşimi %6-8 palmitik asit, %2-3 stearik asit, %16-20 oleik asit ve %71-75 linoleik asittir [55]. Aspir bitkisinin gıda renklendirici, renk verici madde ve hayvansal yem olarak kullanılmasının yanı sıra tıbbi amaçlı olarak da kullanılmaktadır. Kozmetikteki sarı, kırmızı ve turuncu çiçekler için bir gıda renklendirici ve renklendirme maddesi olarak kullanılır. Hayvan yemi olarak kullanılmasının başlıca nedeni yüksek protein içeriğidir. Medikal olarak, osteoporozu önlemek için kullanılır. Ayrıca, aspirin serbest radikallerin oluşumunu engelleyen antioksidan bileşikler içerdiği bildirilmiştir [56]. Bütün bu kimyasal yapısı ve kullanıldığı yerler aspir bitkisinin yalnızca bir alternatif yakıt kaynağı olarak karşımıza çıkmasının yanı sıra sağlığımıza da büyük faydalarının olduğunu göstermektedir. Yalnızca aspir bitkisi değil, kanola bitkisinin de çok farklı özelliklere sahip olduğu bilinmektedir.

Kanola, kolza yetiştiriciliğinin konvansiyonel bitki ıslahıyla genetik modifikasyonuyla Kanada'da üretilmiştir [57]. Düşük bir seviyede doymuş yağ asidi ile birlikte erüsik asidin başarılı bir şekilde azaltılması kanola yağını dünyanın en popüler yenilebilir yağlarından biri haline getirmiştir. Kanola yağındaki yüksek talep, üretiminde önemli bir artış sağlamış ve şimdi soya fasulyesi ve mısırdan sonra üçüncü en yaygın şekilde yetiştirilen genetiği değiştirilmiş mahsul haline gelmiştir [58]. Yenilenebilir yağ olarak kullanılmasının yanı sıra, kanola yağı biyolojik esaslı poliüretanların üretimi için polialkollere dönüştürülmüştür [59–61].

Yapısal olarak bakıldığında %40'dan fazla yağ içeriğine sahip olan kanolanın, dünyadaki en yüksek yağ içeren bitkilerden biri olduğu ifade edilmiştir. Kanola, yüksek oleik asit içeriğine (~%65) ve düşük oranda doymuşluğa (~%6) sahiptir ve bu da bu yağı çeşitli yiyecekler ve endüstriyel uygulamalar için arzu edilir kılmaktadır [62–64]. Kanola'nın yüksek oleik asit içeriğine sahip türevleri, oldukça yüksek oranda tekli doymamış bir yağın oksidatif kararlılığının artması nedeniyle çok çeşitli yakıtlar ve yağlayıcılar için daha da uygun olacağı belirtilmiştir. Kanola yağının düşük doymuş içeriği, özellikle düşük sıcaklıklarda kanola yağının arzulanan biyodizel yakıtı için temel olarak kullanılmasına imkân sağlamaktadır. [65].

4. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada, motorin yerel bir yakıt istasyonundan satın alınmıştır. Kanola yağı ve aspir yağı (%50-50, hacimsel olarak) karışımından üretilen biyodizel, bir biyodizel üreticisinden elde edilmiştir. Deneylerde kullanılan, kanola-aspir yağı karışımı biyodizel yakıtının temel yakıt özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir. IUPAC 2.301 test yöntemine göre belirlenen biyodizelin ($C_{18.94}H_{34.99}O_2$) yağ asidi dağılımı Tablo 4.2'de gösterilmiştir. Kullanılan test yakıtları, motorin ve kanola-aspir yağı karışımı (KAB) biyodizel dir. Literatürde görüldüğü üzere kanola veya aspir biyodizel yakıtları farklı oranlarda karışımlarla ve farklı metotlarla üretilerek, araştırmacılar tarafından en çok tercih edilen yakıtlardır [66–75]. Test yakıtları, Kocaeli Üniversitesi Alternatif Yakıt Ar-Ge Merkezi'nde (AYARGEM) ve TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi'nde karakterize edilmiş ve bazı veriler DB Tarımsal Enerji tarafından temin edilmiştir.

Tablo 4.1. Test yakıtlarının temel özellikleri

Yakıt	Yoğunluk (15°C, kg m^{-3})	Viskozite (40°C, mm^2 s^{-1})	Alt ısıl Değer (MJ kg^{-1})	Parlama Noktası (°C)	Setan Sayısı
Test Metodu	ASTM D4052	ASTM D445	ASTM D240	ASTM D93	ASTM D613
Motorin	831,7	2,58	43,11	63	54,9
KAB	884,3	4,35	37,58	168	53

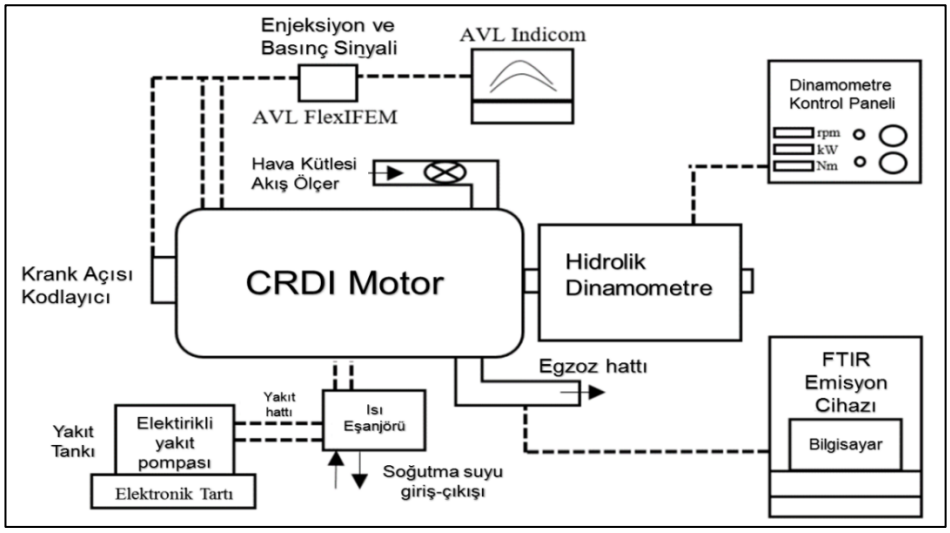
Tablo 4.2. KAB yağ asidi dağılımı

Ürün	Yağ asidi dağılımı (%)											
	16:0	16:1	18:0	18:1	18:2	18:3	20:0	20:1	22:0	20:5	24:0	24:1
KAB	5.87	0.16	2.05	40.78	45.16	3.75	0.50	0.80	0.34	0.30	0.15	0.14

KAB ve motorin, su soğutmalı, turbo şarjlı, ortak hat yakıt enjeksiyon (CRDI) sistemine sahip bir dizel motorda test yakıtı olarak kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan motorun özellikleri Tablo 4.3'de gösterilmiştir. Dizel motora sahip binek otomobillerde, motor genellikle düşük veya orta dereceli yüklerde ve 1000-3000 dev/dk aralığında olacak şekilde kullanılmaktadır. Bu nedenle, motor testleri için 2000 dev/dk motor devri ve beş farklı motor yükü (FOEB: 3,3, 5,0, 6,6, 8,3 ve 9,9 Bar) seçilmiştir. Motor testleri sırasında dizel motor üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Motor kurulumunun şematik diyagramı Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Emme havası, yakıt, motor yağı ve motor soğutma suyu sıcaklığını ölçmek için dijital göstergeli K tipi termokupllar kullanılmıştır.

Tablo 4.3. Test motorunun özellikleri

Motor	1.9 L, Fiat JTD
Tipi	Direkt enjeksiyonlu, turboşarjlı, Ara soğutuculu, dört zamanlı, su soğutmalı, CRDI
Silindir Sayısı	4
Silindir çapı – Strok uzunluğu	82 mm – 90.4 mm
Sıkıştırma Oranı	18,45:1
Maksimum Güç	4000 dev/dk'da 77 kW
Maksimum Fren Torku	1750 dev/dk'da 205 Nm



Şekil 4.1. Test ekipmanının deneysel kurulumu

Emme havası kütle akışı AVL Flowsonix-Air ürünü ile belirlenmiştir. Yakıt sıcaklığı bir ısı eşanjörü tarafından kontrol edilmiş ve yaklaşık 40±3°C 'de tutulmuştur. Test motoru, fren yükünü sağlamak için bir hidrolik dinamometreye bağlanmıştır. Dinamometre teknik özellikleri Tablo 4.4'de gösterilmiştir.

Tablo 4.4. Hidrolik dinamometrenin özellikleri

Dinamometre Modeli	BT-190 FR
Maksimum Güç	100 kW
Maksimum Yük	750 Nm
Maksimum Hız	6000 dev/dk
Yük Ölçümü	Yük Hücresi

Enkoder, krank milinin konumunu belirlemek için motor krank mili kasnağı üzerine sabitlenmiştir. Silindir üzerine, dizel motor uygulamaları için kullanılan ve kızdırma bujisi yerine takılabilen bir basınç sensörü (AVL-Tablo 4.5) monte edilmiş ve silindir gaz basıncı verilerini toplamak için AVL FlexIFEM marka ürün kullanılmıştır. Enjeksiyon sinyallerini almak için bir akım probu (Fluke) kullanılmıştır. Enjeksiyon zamanlarının başlangıcı ve bitişi enjektör akımından bulunmuştur.

Tablo 4.5. Kızdırma bujisi basınç sensörünün özellikleri

Ölçüm Aralığı	0-250 Bar
Aşırı Yükleme	300 Bar
Hassaslık	16 pC/Bar
Doğrusallık	±0.3%
Doğal Frekansı	130 kHz
Hızlanma Hassasiyeti	0.001 Bar/g
Yük Değişim Kayması	1.5 mbar/ms

Silindir gaz basıncı ve enjeksiyon zamanlaması verilerini elde etmek ve analiz etmek için AVL IndiCom yanma analiz programı kullanılmıştır. 50 çevrimin silindir gaz basınç verileri, 0,2° krank açısı (°KA) çözünürlükte toplanmıştır. Ölçüm sisteminin olmaması nedeniyle, yakıt enjeksiyon hattı basıncı ölçülememiştir. Yakıt tüketimi,

elektronik tartıda tartılarak belirlenmiştir. Egzoz emisyonlarını ölçmek için AVL SESAM FTIR emisyon cihazı kullanılmıştır. Egzoz emisyon cihazının teknik özellikleri Tablo 4.6'da gösterilmiştir.

Tablo 4.6. Egzoz emisyon cihazının özellikleri

Parametre	Birim	Hassaslık
THC	ppm	Ölçülen değerin < ± 2% ya da tam ölçeğin ≤ ± 1%, Hangisi küçük ise
CO	ppm	Ölçülen değerin 2% ±
CO_2	%	Ölçülen değerin 2% ±
NO_x	ppm	Ölçülen değerin 2% ±

Silindir içi gaz basınç verileri, Termodinamiğin I. kanunundan [76] yola çıkılarak serbest akışlı açık sistem için,

$$\frac{dU}{dt}=\dot{Q}+\dot{W} \tag{4.1}$$

Denklem (4.1) çıkarılır. Isı içerisindeki mekanik işin sürtünmesi ihmal edilerek, hacim işi için aşağıdaki ifade çıkarılır,

$$\dot{W}=-P\frac{dV}{dt} \tag{4.2}$$

Emme ve egzoz supaplarının kapalı olduğu varsayılarak aşağıda ifade edildiği şekliyle,

$$\frac{dU}{dt}=\dot{Q}-\dot{W} \tag{4.3}$$

$\frac{dU}{dt}$, sistemin birim zamandaki iç enerjisi, $\dot{Q}$, Sistemin sınırlarına karşı yapılan ısı transfer oranı ve $\dot{W}$, sistem sınırlarının değişimi ile oluşan sınır işini ifade etmektedir. Denklem (4.3)'de birim zamandaki iç enerji ve sınır işi değişimi yerine aşağıdaki denklem (4.4) ve (4.5) konulursa, denklem (4.6) elde edilir.

$$\frac{dU}{dt}=mc_v\frac{dT}{dt} \tag{4.4}$$

$$\dot{W}=-P\frac{dV}{dt} \tag{4.5}$$

$$\dot{Q}=mc_v\frac{dT}{dt}+P\frac{dV}{dt} \tag{4.6}$$

İdeal gaz denklemindeki kütlenin sabit olduğu kabul edilip zamana göre türevi alınırsa,

$$\frac{dT}{dt}=\frac{1}{mR}\left[P\frac{dV}{dt}+V\frac{dP}{dt}\right] \tag{4.7}$$

Denklem (4.7) elde edilir. Elde edilen bu denklem yukarıdaki denklem (4.6)'da yerine yazılırsa,

$$\dot{Q}=\left[\frac{C_v}{R}+1\right]P\frac{dV}{dt}+\frac{C_v}{R}V\frac{dP}{dt} \tag{4.8}$$

Denklem (4.8) elde edilir. Bu durumda, denklem içerisindeki $\frac{C_v}{R}$, k özgül ısı oranı cinsinden ifade edildiğinde,

$$\frac{C_v}{R}=\frac{1}{k-1} \tag{4.9}$$

Denklem (4.9)'da gösterildiği şekilde olacağından, elde edilen denklem (4.9), denklem (4.8)'de yerine yazılırsa ve zamana göre değişim (dt) katsayısı yerine (dθ) şeklinde krank açısı cinsinden ifade edilirse,

$$\dot{Q}=\frac{k}{k-1}P\frac{dV}{d\theta}+\frac{1}{k-1}V\frac{dP}{d\theta} \tag{4.10}$$

Denklem (4.10)'da yazıldığı şekilde sonuca ulaşılır. Bu denklem çoğunlukla ısı dağılım hesaplamasında kullanılan Krieger ve Borman [77] Denklem (4.10)'da elde edilen formül ısı dağılımının oluşturulmasında kullanılır. Denklem (4.10)'dan da anlaşıldığı üzere basınç ve hacim değerlerinin krank açısına göre türevinin alınarak ısı dağılım oranı oluşturulmaktadır. Yakıt tüketim değerleri, belirli bir süre için elektronik tartı kullanılarak elde edilmiştir. Bunun sonucunda, fren özgül yakıt tüketimi formülü [78] olarak,

$$b_e = \frac{\dot{m}_f}{P_e} \times 3600 \tag{4.11}$$

Denklem (4.11)'de, b_e, (g/kWh) fren özgül yakıt tüketimi, $\dot{m}_f$, (g/s) saniyede tüketilen yakıt miktarı ve P_e, (kW) efektif güç olarak ifade edilmektedir.

İçten yanmalı motorlarda ÖYT değerinin düşük olması arzu edilir. Oysa motorlardan almayı beklediğimiz çıkış işi veya gücün (çevrim başına iş veya güç) motorun hareketi için sağlanan gerekli girdi enerjisine (yakıttan elde edilen enerji) oranı olarak ifade edilen boyutsuz bir parametre olan verimi tanımlamak daha faydalıdır. Yanma sonucu ortaya çıkan yakıt enerjisi Q_y, çevrim başına motorun hareketi için sağlanan yakıtın (yakıt debisi, $\dot{m}_y$) g/h cinsinden değeri ile kJ/kg cinsinden yakıtın alt ısıl değerinin (H_u) çarpımı olarak ifade edilmektedir.

$$\eta_t = \frac{3{,}6 \times 10^6}{b_e \times H_u} \tag{4.12}$$

Denklem (4.12)'de ifade edilen motorun efektif verimi (η_t) dir [105]. Burada ifade edilen yakıtın ısıl değeri kJ/kg olarak H_u, belirli miktardaki yakıtın oksijen ile tam yanması sonucu belirlenir. Denklem'de yer alan efektif özgül yakıt tüketimi g/kWh olarak b_e, olarak ifade edilirken motordan elde edilen faydalı güç veya fren gücünün denklem (4.11)'den hesaplamasıyla bulunur. Efektif güç P_e (kW) ise, aşağıdaki denklem (4.13)'de gösterildiği şekilde ifade edilmektedir[106].

$$P_e = 2\pi.n.\tau \tag{4.13}$$

Denklem'de belirtilen motor devri n, dev/dk olarak gösterilirken, motor dönme momenti τ, Nm cinsinden ifade edilmektedir.

Motorun maksimum fren dönme momentini hesaplayabilmek için silindir strok hacminin bilinmesi gerekmektedir. Pistonun alt ölü noktadan (AÖN) üst ölü noktaya (ÜÖN) doğru hareketi strok (süpürülen) hacmini (V_s) verir.

$$V_s = \frac{\pi}{4} \times B^2 \times S \times N_c \tag{4.14}$$

Denklem (4.14)'de silindir sayısı N_c kadar, Silindir çapı B (m) ve strok uzunluğu S (m) olarak çarpılarak toplam strok hacmi (m^3) çıkarılmaktadır[106].

Buna bağlı olarak aşağıdaki denklem (4.15) yardımıyla 4 zamanlı motorlar için fren dönme momenti (τ) ortalama efektif basınç değerlerine bağlı olarak hesaplanır[106].

$$\tau = \frac{(FOEB) \times V_s}{4\pi} \tag{4.15}$$

Denklem'de yer alan fren ortalama efektif basınç değerleri (FOEB) Nm cinsinde, strok hacmi (V_s) ise (m^3) cinsinden yazılmıştır.

4.1. Deneylerin Yapılışı

Deneylere başlamadan, rutin motor bakımları yapılmış, motor yağı ve filtreler değiştirilmiştir. Motor, motorin ile çalıştırılarak yakıt hattı temizlenmiştir. Veri kaydı almadan evvel KAB yakıtı ile yüklü motor 15-20 dk süresince çalıştırılarak ısınması için beklenilmiştir. Beş farklı yükte ve sabit hızda gerçekleştirilecek olan bu testler sırasında önce dinamometre kontrol panelinde hız göstergesinde 2000 dev/dk'ya ulaşılana kadar ivmelendirilmiş ve daha sonra ilk olarak yüksek yükten başlanarak düşük yüke doğru motor testleri yapılmıştır. İstenilen sabit motor hızı ayarlandıktan sonra yük değerine ulaşılması için beklenilmiş ve bu aşamada bir süre beklenildikten sonra AVL yanma analiz programı kullanılarak değerler alınmaya başlanılmıştır. Sabit motor hızında ölçülmesi için ayarlanan motor belirli bir sürede çalıştırılırken dijital kronometre ile yakıt değerleri elektronik tartı üzerinden okunarak not edilmiştir. Bu esnada motor testi yapılan ortamın sıcaklık koşulları, bağıl nemi ve

emme manifoldundaki hava debisi AVL ekipmanları yardımıyla okunarak not edilmiştir. Yakıt tüketiminin ölçülmesi esnasında silindir içi basınç değişim verileri kaydedilmiştir. Aynı zamanda, AVL egzoz emisyon cihazından da egzoz emisyonu ölçümü yapılmıştır. Tüm ölçümler en az üç kere yapılmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır.

4.2. Biyodizelin Yakıt Özellikleri

Biyodizelin yakıt özelliklerinin dizel motorlarda performans, enjeksiyon, yanma ve emisyon karakteristiklerine etki ettiği bilinmektedir. Kanola-aspir yağı karışımı biyodizel yakıtının özellikleri Tablo 4.7'de belirtilmiştir. Analiz edilen özellikler EN 14214 biyodizel üretimi için Avrupa birliği standartları ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.7. KAB yakıtının özellikleri

Özellikleri	KAB	EN 14214[1]	Birim
Parlama Noktası, min.	168	101	°C
Su	240	500 mak.	mg/kg
Toplam Kirlenme	14,3	24	mg/kg
Kinematik Viskozite	4,35	3,5 – 5,0	mm^2/s
Yoğunluk	884,3	860 - 900	kg/m^3
Ester İçeriği	98,3	96,5 min.	%
Sülfatlı kül	0,004	0,02	% kütlece
Bakır Şerit Korozyonu	1A	Sınıf 1	3sa./50°C
Setan Sayısı	53	51,0 min.	
SFTN	-9	-	°C
Asit değeri	0,28	0,50 mak.	mg KOH/g
Oksidasyon Kararlılığı	10,4	8	Saat
İyot Değeri	112,8 - 116	120 mak.	g I/100g
Linolenik Asit Metil Ester	2,2	12,0 mak.	% kütlece
Çoklu Doymamış Metil Ester	0,03	1,0	% kütlece
Monogliseritler, Digliseritler, Trigliseritler	0,49 – 0,15 – 0,01	MG 0,70 DG 0,20 TG 0,20	% kütlece
Serbest Gliserin	0,001	0,02	% kütlece
Toplam Gliserin	0,15	0,25	% kütlece
Fosfor İçeriği	0	4,0	mg/kg

[1]Biyodizel üretimi için Avrupa birliği standartları

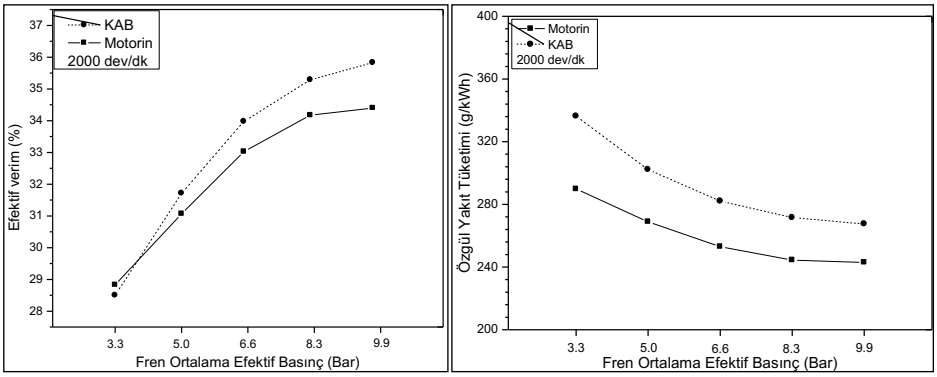
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Test Yakıtlarının Özellikleri

Tablo 4.1'de test yakıtlarının yakıt özellikleri yer almaktadır. KAB yakıtının yoğunluğu, viskozitesi ve parlama noktası motorinden daha yüksek iken üst ısıl değeri daha düşüktür. Ayrıca, motorinin setan sayısı KAB yakıtından büyüktür. Biyodizel yakıtı üretimine ve hammaddesine bağlı olarak motorinden farklı özellikler göstermektedir. Kimyasal olarak bileşimi incelendiğinde biyodizel yakıtlarının daha yüksek oksijen içeriğine sahip olduğu bilinmektedir [101].

5.2. Özgül Yakıt Tüketimi ve Efektif Verim

Özgül yakıt tüketimi (ÖYT), içten yanmalı motorlarda ölçülen motor performans karakteristiğinin bir parçasıdır. ÖYT değerlerinin hesaplanabilmesi için motorun yüklenerek çıkış milindeki momentin belirlenmesi gerekmektedir. Bu durumda, incelenmesi gereken farklı türden yakıtların motor devrine veya yüküne bağlı olarak performansları karşılaştırılabilmektedir. KAB yakıtı ile karşılaştırmalı olarak motorin testlerinden elde edilen ÖYT değerleri Şekil 5.1'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, FOEB değerleri arttıkça ÖYT değerleri azalmıştır. Ayrıca, KAB yakıtının ÖYT değerlerinin motorinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bazı çalışmalarda farklı türden biyodizel yakıtlarının kullanımıyla ÖYT değerlerinin arttığı ifade edilmiştir [18-20, 22, 51, 83-85]. Bunun nedeni, ÖYT değerlerinin artan FOEB değerleriyle düşmesine rağmen motorine benzer şekilde maksimum fren motor dönme momentini elde etmek için daha yüksek miktarda yakıt tüketmesidir.



Şekil 5.1. Motor performansları ve ÖYT değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 5.1'de görüldüğü üzere efektif verim motor yükünün artması ile birlikte artmıştır. Motorinle karşılaştırıldığında başlangıçta biyodizelin efektif veriminde %1,1'lik bir düşüş olurken FOEB değerlerinin artmasıyla 9,9 Bar basınçta %3,9'luk bir artış görülmüştür. Biyodizelin ısıl değerinin daha düşük olmasına rağmen efektif veriminin ortalama olarak motorine kıyasla daha yüksek olmasının nedeninin, nispeten daha yüksek silindir içi basınç değelerine sahip olması ve yanmayı iyileştiren oksijen içeriğinin olduğu söylenebilir [22, 24, 107].

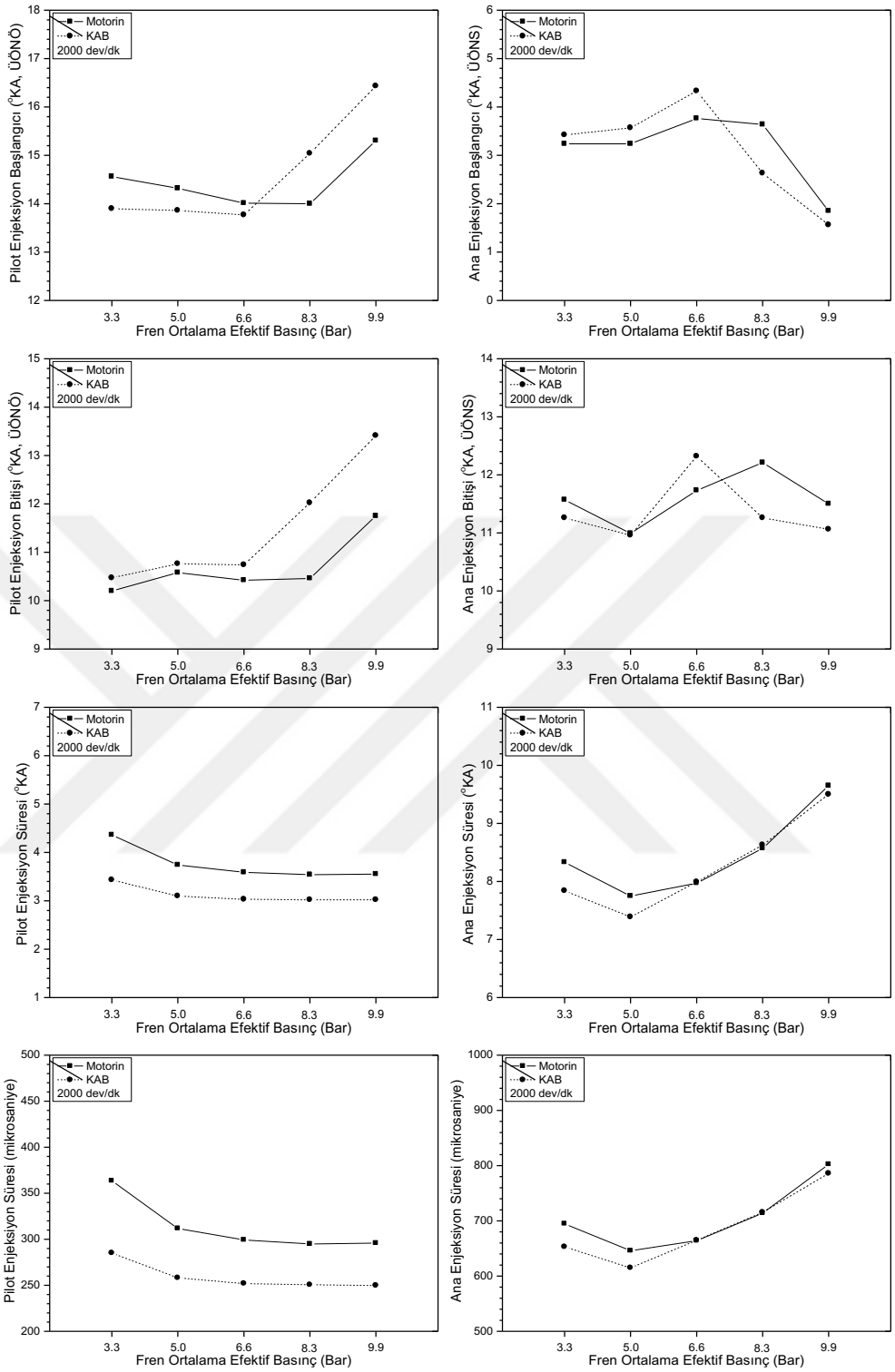
Tablo 4.1'de KAB yakıtının motorinden daha düşük ısıl değere sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle, KAB yakıtının ÖYT değerlerinin motorinden yüksek olması ısıl değerinin düşük olmasına bağlanmaktadır. KAB yakıtının düşük ısıl değere sahip olmasından dolayı artan motor yükleriyle yakıt tüketiminin motorinle karşılaştırıldığında daha fazla olduğu anlaşılmıştır. En yüksek ÖYT değerlerinin 3,3 Bar motor yükünde (düşük yükte), motorin ve KAB yakıtları için sırasıyla 289,8 g/kWh ve 336,3 g/kWh değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Düşük yükte KAB yakıtının ÖYT değerinin, motorin ile karşılaştırıldığında %16 daha fazla olduğu belirlenmiştir. 9,9 Bar motor yükünde ise, biyodizel yakıtının ÖYT değeri motorinden %10,1 daha fazla olmuştur. Genel olarak bakıldığında, biyodizel yakıtının ÖYT değerlerinin motorinden ortalama %12,2 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

5.3. Enjeksiyon ve Yanma Sonuçları

Motor testlerinden, genel olarak çıkarılan ana enjeksiyon ve pilot enjeksiyon verileri yakıtların enjeksiyon karakteristiklerini analiz etmek için kullanılmaktadır. Yapılan dizel motor testlerinde, farklı karakteristiklerdeki yakıtlar için motor kontrol ünitesinin (Engine Control Unit, EKÜ) farklı tepkiler gösterdiği anlaşılmaktadır. Bunun nedeni, yakıtların enjeksiyon zamanlamalarının dizel motorunda iki aşamalı bir enjeksiyonla ayarlanmasıdır. Şekil 5.2'de KAB ve motorinin pilot enjeksiyon başlangıçları ve bitişleri, ana enjeksiyon başlangıçları ve bitişleri bunun yanı sıra pilot enjeksiyon ve ana enjeksiyon süreleri krank açısı ve mikro saniye cinsinden gösterilmiştir.

Şekil 5.2'de her iki yakıt için pilot enjeksiyon başlangıçları düşük motor yüklerinden orta motor yüküne doğru üst ölü noktaya (ÜÖN) yaklaşırken, yüksek motor yüklerine doğru ÜÖN'dan uzaklaşmıştır. Bu durumda, 9,9 Bar motor yükünde pilot enjeksiyon başlangıcının üst ölü noktadan önce (ÜÖNÖ) KAB yakıtı için 16,43°KA'da ve motorin için 15,30°KA'da gerçekleştiği tespit edilmiştir. Her iki yakıtın pilot enjeksiyon bitiş değerleri, düşük motor yükünden orta motor yüküne doğru ÜÖN'ya yaklaşırken, yüksek motor yüküne doğru ÜÖN'dan uzaklaşmıştır. Bu durumda 9,9 Bar motor yükünde pilot enjeksiyon bitişinin, başlangıcına paralel olarak KAB yakıtı için 13,41°KA'da ve motorin için 11,75°KA'da gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu durum karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, KAB yakıtının enjeksiyon zamanlamalarının motorine göre pilot enjeksiyon başlangıcında yaklaşık 1°KA daha erken başladığı ve pilot enjeksiyon bitişinde 1,5°KA daha erken bittiği anlaşılmaktadır.

Farklı biyodizel yakıtları ile direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda yapılan [18, 19, 81, 82] çalışmalarda, biyodizel yakıtının yüksek yoğunluğa, ÖYT, viskozite ve daha düşük sıkıştırılabilirliğe sahip olması nedeniyle motorin ile karşılaştırıldığında enjeksiyon başlangıçlarının daha erken gerçekleştiği ifade edilmiştir. Biyodizelin yüksek hacim modülü (düşük sıkıştırılabilirliği) enjeksiyon sürecinde etkili olmuştur. Bazı araştırmacılar [108, 109], biyodizelin sıkıştırılabilirliğinin motorinden daha düşük olduğunu göstermişlerdir.



Şekil 5.2. Yakıtların enjeksiyon karakteristiklerinin karşılaştırılması

Boehman ve arkadaşları [110], çeşitli yakıt örneklerinin sıkıştırılabilirlik modülü ile yakıt enjeksiyon zamanlaması arasındaki etkileşimi incelemişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda, bitkisel yağların ve onların metil esterlerinin yüksek sıkıştırılabilirlik modülüne sahip olmaları ileri enjeksiyon avansına yol açtığını göstermiştir.

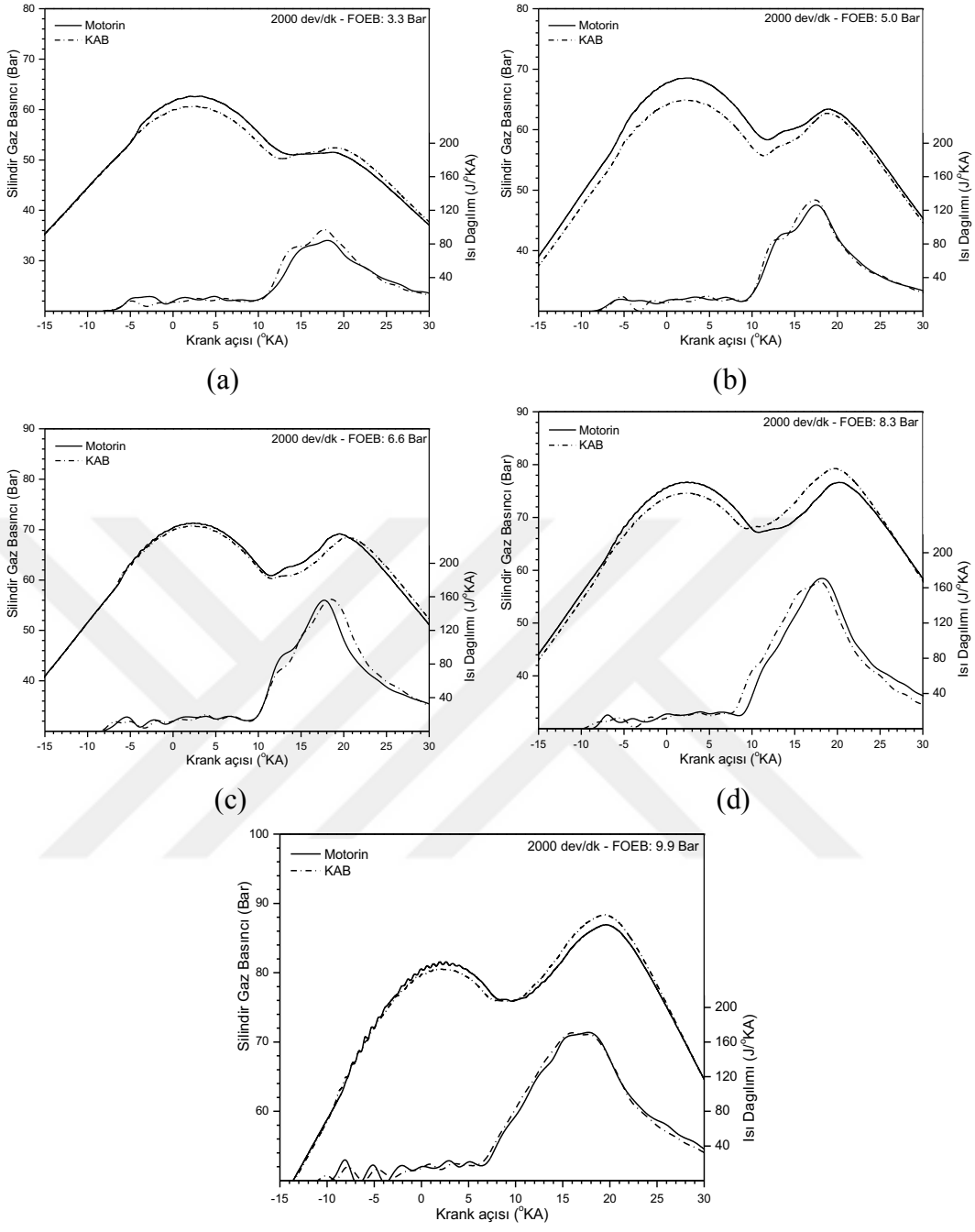
Pilot enjeksiyonun aksine, ana enjeksiyon başlangıcı (AEB) her iki yakıt için düşük motor yükünden orta motor yüküne ÜÖN'dan uzaklaşırken orta motor yükünden yüksek motor yüküne doğru ÜÖN'ya yaklaştığı görülmüştür. Bu durumda motor orta yükteyken (FOEB: 6,6 Bar) ana enjeksiyon başlangıcının KAB yakıtı için üst ölü noktadan sonra (ÜÖNS) 4,33°KA'da ve motorin için 3,76°KA'da gerçekleştiği tespit edilmiştir. Ana enjeksiyon başlangıç değerlerinden farklı olarak, her iki yakıtın ana enjeksiyon bitiş değerlerinde hafif bir dalgalanma olduğu görülmektedir. Genel olarak, düşük motor yükünden orta motor yüküne doğru ÜÖN'ya yaklaştığı görülürken, orta motor yüklerinde ÜÖN'dan uzaklaşmış ve daha sonra da yüksek motor yüküne doğru tekrar ÜÖN'ya yaklaştığı görülmüştür. Bu durumda, ana enjeksiyon bitişi 6,6 Bar motor yükünde KAB yakıtı için 12,32°KA'da ve 8,3 Bar motor yükünde motorin için 12,21°KA'da gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Pilot enjeksiyon süresi (PES), KAB yakıtı için düşük motor yükünden (FOEB: 3,3 Bar) orta motor yüküne (FOEB: 6,6 Bar) doğru hafifçe azalırken yüksek motor yüküne doğru sabit devam etmiş ve motorin için düşük motor yükünden yüksek motor yüküne doğru bir düşüş yaşandığı görülmüştür. Ana enjeksiyon süresi (AES), her iki yakıt için düşük motor yükünden orta motor yüküne doğru bir düşüş gerçekleştirirken, yüksek yüke doğru krank açısı cinsinden bir artış olduğu görülmüştür. Genel olarak, motorinin hem PES hem de AES değerlerinin KAB yakıtından krank açısı cinsinden daha fazla olduğu çıkarılmaktadır. Ana enjeksiyonun süresi (mikro saniye), düşük motor yükünden orta motor yüküne doğru düşmüş ve daha sonra yüksek yüke doğru artmıştır, buna karşın pilot enjeksiyon süresi (mikro saniye), motor devri arttıkça azalmıştır. Genel olarak, KAB yakıtının PES ve AES değerleri motorin ile karşılaştırıldığında sırasıyla, ortalama %20,8 ve %2,51 daha düşük olduğu analiz edilmiştir.

Bütün test yakıtları için silindir gaz basıncı ve ısı dağılımı grafikleri Şekil 5.3'de gösterilmektedir. Şekil 5.3'de görüldüğü üzere, silindir gaz basınç değerleri motor yükünün artmasıyla artış göstermiştir. EKÜ'nün pilot ve ana enjeksiyon stratejileri ile silindir gaz basıncı grafiklerinde iki farklı tepe noktası görülmektedir. Maksimum silindir basınç (MSB) değerleri, 8,3 Bar motor yüküne kadar ikinci tepe noktasında elde edilirken; 8,3 ve 9,9 Bar motor yükü değerlerinde ilk tepe noktasında oluştuğu tespit edilmiştir. İkinci tepe noktası için motorinin MSB değerlerinin 8,3 Bar'a kadar olan motor yüklerinde KAB yakıtına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte orta motor yükünde her iki test yakıtının MSB değerlerinin birbirlerine çok yakın oldukları görülmektedir.

MSB değerlerinin 8,3 Bar motor yüküne kadar ikinci tepe noktalarında olduğu görülürken, 8,3 ve 9,9 Bar motor yüklerinde ilk tepe noktalarında olduğu görülmektedir. EKÜ'nün enjeksiyon karakteristiklerine müdahale ederek MSB değerlerinin oluştuğu bölgeleri düzenlediği anlaşılmıştır. Isı dağılım oranı grafiklerinde, 8,3 Bar yüke kadar maksimum ısı dağılım oranı (MIDO) değerleri artarken, 8,3 ve 9,9 Bar motor yüklerinde birbirlerine yakın değerlere sahip oldukları görülmüştür. Maksimum ısı dağılımının oluştuğu krank açısı değerlerinin aynı test koşulları altında her iki yakıt için 1°KA'dan daha az oldukları tespit edilmiştir.

Tutuşma gecikmesi (TG), içten yanmalı motorlarda enjeksiyonun başlamasıyla yanmanın başlaması arasındaki süredir[106]. Bu tez çalışmasında TG, ana enjeksiyonun başlaması (AEB) ve yanmanın başlaması (KA10, yanan kütle kesri (mass burn fraction)) arasındaki süre olarak ifade edilirken, yanma süresi KA90 ve KA10 arasındaki krank açısı cinsinden farkıdır[19, 111]. Tablo 5.1'de görüldüğü üzere, test yakıtlarının tutuşma gecikmesi süreleri (mikro saniye) artan motor yüküyle hafif bir şekilde artmıştır. 6,6 Bar motor yükünde motorinin TG değeri KAB yakıtından büyük iken, diğer bütün yüklerde KAB yakıtının TG değerleri motorinden daha büyüktür.



Şekil 5.3. Silindir gaz basıncı ve ısı dağılımlarının karşılaştırılması a) 3,3 Bar b) 5,0 Bar c) 6,6 Bar d) 8,3 Bar e) 9,9 Bar

Tablo 5.1. Bütün test yakıtlarının yanma ve enjeksiyon sonuçları

Yakıt	Motor Hızı(dev/dk)	FOEB (Bar)	TG (µs)	KA10 (°KA, ÜÖNS)	KA90 (°KA, ÜÖNS)	YS (°KA)	PEM (mg)	AEM (mg)
D	2000	3,3	330,4	7,32	30,49	23,17	4,34	8,3
KAB	2000	3,3	585,9	10,45	29,21	18,76	4,46	10,21
D	2000	5	558,1	9,94	29,26	19,32	5,73	11,86
KAB	2000	5	598,4	10,76	27,93	17,17	5,84	13,93
D	2000	6,6	602,7	10,99	29,48	18,49	6,86	15,21
KAB	2000	6,6	576,2	11,25	28,59	17,34	6,76	17,84
D	2000	8,3	602,7	10,87	29,61	18,74	7,79	18,86
KAB	2000	8,3	615,6	10,02	27,7	17,68	7,68	21,93
D	2000	9,9	644,5	9,59	29,08	19,49	8,56	23,22
KAB	2000	9,9	650,3	9,36	27,96	18,6	8,44	26,55

Dizel motorlarda, setan sayısı arttıkça TG süresinin azaldığı bilinmektedir [106]. Bu durumda, artan motor yüküyle KAB yakıtının TG süresinin motorine göre daha fazla olması KAB yakıtının setan sayısının motorinden düşük olmasıyla açıklanabilir. Motor yükünün artmasıyla, 3,3, 5,0 ve 6,6 Bar motor yüklerinde KAB yakıtı için ÜÖNS 10°KA'da daha geç gerçekleşirken, 8,3 ve 9,9 Bar motor yüklerinde motorin için daha erken gerçekleştiği tespit edilmiştir. KAB ve motorinin ortalama tutuşma gecikmeleri 7,26°KA ve 6,60°KA olarak hesaplanmıştır. KA90 değerleri motorin için KAB yakıtına kıyasla bütün motor yüklerinde daha geç krank açılarında elde edilmiştir. Bu durumda, yanma süresi (YS) bütün motor yüklerinde KAB yakıtı için daha kısa sürmüştür. İleri enjeksiyon zamanlamaları yanmanın hızlı bir şekilde gerçekleşmesini sağlayarak yanma başlangıçlarında daha yüksek ısı dağılım oranlarının elde edilmesine neden olmuştur [112]. Bu durumda KA10 değerlerine daha erken ulaşıldığı gözlemlenmiştir.

Pilot enjeksiyon ve ana enjeksiyon miktarları için çevrim başına elde edilen değerler Tablo 5.1 5.1'de gösterilmiştir. Sonuçlar, artan motor yükleriyle pilot enjeksiyon miktarı (PEM) ve ana enjeksiyon miktarı (AEM) değerlerinin arttığını göstermiştir. KAB yakıtının AEM değerlerinin motorinden yaklaşık olarak %16,8 (ortalama) daha fazla olduğu, motorin ve KAB yakıtının PEM değerlerinin ise birbirlerine yakın olduğu belirlenmiştir. Özetle, motorinin pilot enjeksiyon süresi (PES) ve ana enjeksiyon süresi (AES) KAB yakıtından daha fazla olmuştur. Yani, KAB yakıtının toplam enjeksiyon süresi, aynı miktarda yakıtın enjeksiyonu için motorinden daha düşüktür. Bunun nedeni, KAB yakıtının daha düşük pilot enjeksiyon süresi ve ana enjeksiyon süresine sahip olmasından dolayı olabilir. Genel olarak, EKÜ'nün farklı

yakıtlara verdiği bir tepkinin sonucu olarak farklı enjeksiyon stratejileri ortaya çıkmıştır. Bu durum yakıt özellikleri, yakıt hattı basıncı, enjeksiyon süresi ve enjekte edilen yakıt miktarı üzerinde etkili olmuştur. Bununla birlikte motorun kalibrasyonu için gerekli olan gaz pedalının konumu önemli bir etken oluşturmaktadır. Gaz pedalının pozisyonundaki değişimler farklı enjeksiyon parametrelerine yol açmıştır [19].

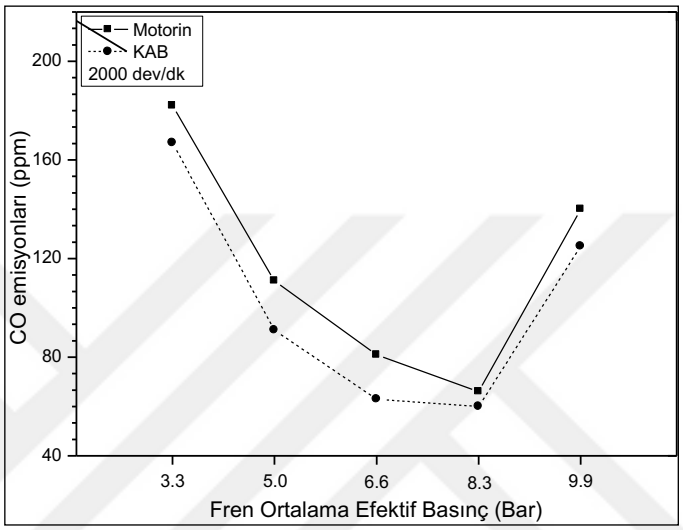
5.4. Motor Emisyonları

Bu çalışmada, karbon monoksit (CO), karbondioksit (CO_2), toplam hidrokarbon (THC) ve azot oksit (NO_X - $NO+NO_2$) emisyonları ölçülmüştür. AVL Sesame FTIR emisyon cihazı, is emisyonlarının ölçümü için herhangi bir ekipmana sahip olmadığından dolayı is emisyonları ölçülememiştir. Egzoz emisyon cihazı ölçümü gerçekleştirilmeden evvel gerekli gazlarla kalibre edilmiştir.

5.4.1. CO emisyonları

Emme zamanında silindir içerisine alınan hava ve daha sonra püskürtülen yakıtla karışarak içerideki ısıyı çekip yüksek sıcaklık ve basınç yardımıyla yanma işlemi gerçekleşmektedir. Bu durumda, içerideki yanma işlemi eksik oksijenle gerçekleştiğinde egzoz zamanında CO oluşumuna neden olduğu bilinmektedir. Yakıtça zengin eşdeğerlik oranıyla çalıştırılan motorlarda CO oluşmaktadır [106]. Şekil 5.4'de her iki yakıt için ölçülen CO emisyonları yer almaktadır. Şekil'de görüldüğü gibi, CO emisyonlarının motor yükü arttıkça azaldığı 8,3 Bar motor yükünden sonra artış gösterdiği görülmüştür. Bunun nedeni, 8,3 Bar motor yükünden sonra Hava fazlalık katsayısı (HFK) değerlerinin düşmesiyle silindir içerisinde yakıtça zengin karışımın oluşması CO emisyonlarını arttırmıştır. Silindir içi gaz basıncının artması silindir içerisine alınan hava ve yakıtın yanmasına olumlu etki yapması nedeniyle CO emisyonlarını iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Enjeksiyon zamanlamalarının daha erken gerçekleşmesi silindir içerisindeki sıcaklığın artmasına böylece yanmanın erken başlamasına neden olması karbon ve oksijen molekülleri arasındaki oksitlenmeyi ve kimyasal reaksiyon hızının artmasını sağlayarak CO emisyonlarını düşürmektedir [85, 86]. Hava/yakıt oranı, birim saatteki gerçek hava tüketim ve teorik yakıt tüketim değerlerinin birbirine oranıdır. Bu parametrelere bağlı olarak hava fazlalık katsayısı (λ - HFK) hesaplanabilmektedir. Tablo 5.2'de sabit

motor hızı ve farklı yük değişimlerinde motorin ve KAB yakıtlarının HFK değerleri gösterilmektedir. Motor yükünün artmasıyla HFK değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. HFK değerlerindeki düşüş, 8,3 ve 9,9 Bar motor yükleri ile karşılaştırılınca 3,3 ile 6,6 Bar motor yükleri arasındaki farkın daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, her iki test yakıtının HFK değerlerinin 8,3 ve 9,9 Bar motor yükleri arasında birbirlerine yakın değerlere sahip olmasıdır.



Şekil 5.4. CO emisyonlarının karşılaştırılması

Tablo 5.2. Test yakıtlarının Hava Fazlalık Katsayısı (λ) değerleri

Motor Hızı (dev/dk)	FOEB (Bar)	D	KAB
2000	3,3	2,83	2,82
2000	5	2,14	2,21
2000	6,6	1,78	1,85
2000	8,3	1,59	1,65
2000	9,9	1,35	1,42

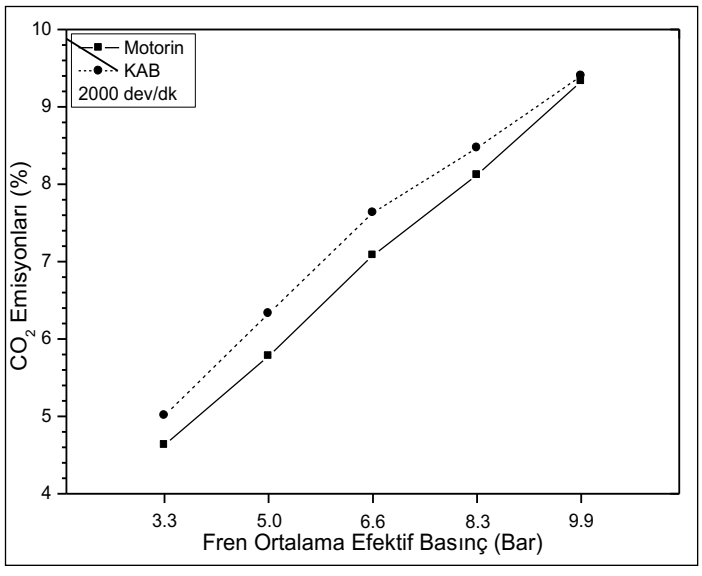
KAB yakıtının CO emisyonlarının bütün motor yüklerinde motorinden daha düşük olduğu görülmüştür. KAB yakıtının CO emisyonlarında ki ortalama düşüşünün motorin ile karşılaştırıldığında %13,7 olduğu tespit edilmiştir.

Farklı türden biyodizel yakıtlarıyla yapılmış olan birçok çalışmada CO emisyonlarının düşüş gösterdiği kaydedilmiştir[18–20, 22–25, 50, 102, 103, 107]. Bu durum, biyodizel kullanımıyla genel olarak gerçek hava-yakıt oranının teorik hava-yakıt oranının stokiyometrik yanmaya yaklaşmasıyla alev sıcaklığının artmasına

böylece hava ve yakıtın yanmasına olumlu etki yaparak CO emisyonlarını iyileştirdiği anlaşılmaktadır.

5.4.2. CO_2 emisyonları

Yanma odasında yeterli miktarda oksijen yakıtla karşılaşırsa karbon elementine bağlanacak olan oksijenler CO_2 emisyonlarına dönüşerek egzozdan atılırlar. Yakıtların CO_2 emisyonları Şekil 5.5'de verilmiştir. Motor yükünün artmasıyla yakıtların CO_2 emisyonlarının kademeli olarak arttığı görülmektedir. Bütün motor yüklerinde KAB yakıtının CO_2 emisyon değerlerinin motorinden daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, biyodizel kullanımı ile enjeksiyon başlangıcının daha erken gerçekleşmesi yanma süresini uzatmış böylece silindir içerisinde stokiyometrik yanma gerçekleşerek CO_2 emisyonlarını arttırmıştır. Bu durum, artan motor yükleriyle HFK değerlerindeki düşüş sonucu silindir içerisindeki hava tüketiminin artmasıyla desteklenmektedir. Böylece, biyodizel yakıtı stokiyometrik yanmaya yaklaştıkça CO molekülleri CO_2'ye dönüşmüştür. KAB yakıtının CO_2 emisyon değerlerindeki artış motorin ile karşılaştırıldığında ortalama %6,1'dir. Farklı türden biyodizel yakıtlarının kullanımıyla yapılan dizel motor testlerinde CO_2 emisyon değerlerinde benzer şekilde artış görülmüştür[18–20, 24].



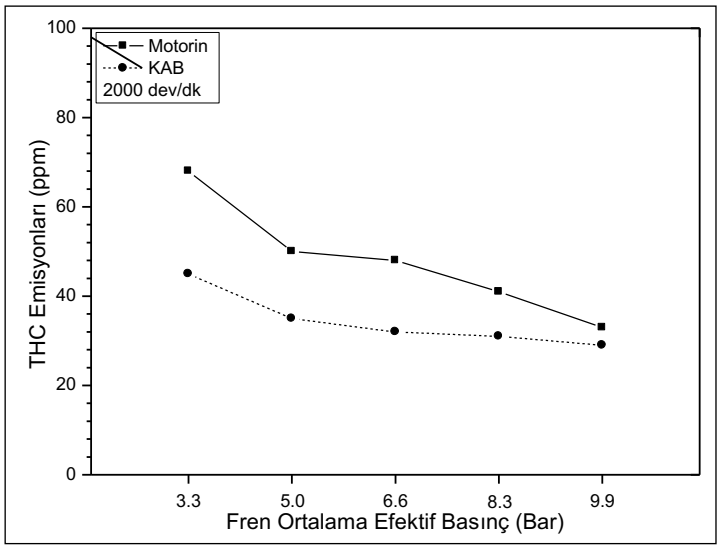
Şekil 5.5. CO_2 emisyonlarının karşılaştırılması

Bazı çalışmalarda [18–20], farklı türden biyodizel yakıtları motorinle karşılaştırıldığında CO_2 emisyon değerlerinde artış görülmüştür. Bunun aksine, atık

palmiye yağı ve kanola yağı metil esterleri ile yapılmış olan bir çalışmada ise CO_2 emisyonlarında düşüş gözlemlendiği ifade edilmiştir [102]. Yanma işleminin daha çok tam yanmaya yakın olması nedeniyle CO_2 emisyonlarında ki artış, CO ve THC emisyonlarının düşük olmasıyla tutarlı olduğunu göstermektedir.

5.4.3. THC emisyonları

Silindir içerisinde meydana gelen yanma olayında, yanma odasına alınan bütün karbon atomlarının yeterli miktarda oksijenle yanmamasının egzoz ürünlerinde yüksek seviyelerde HC oluşumuna neden olduğu bilinmektedir [106]. Bu duruma, hava ile yakıtın tamamlanmamış karışımı sonucunda, bazı yakıt parçacıklarının oksijen bulamaması neden olmaktadır. Buna bağlı olarak eksik yanma gerçekleşir. Şekil 5.6'de test yakıtlarının karşılaştırmalı olarak toplam hidrokarbon (THC) emisyon değerleri gösterilmiştir. Şekilden görülebileceği gibi, test yakıtlarının THC emisyonları, motor yükü arttıkça azalmıştır. Motor yükünün artmasıyla her iki yakıtın THC emisyon değerleri birbirine yaklaşmış olsa da motorinin THC emisyon değerlerinin KAB yakıtından daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, biyodizel yakıtının yüksek yoğunluğa sahip olmasıyla enjeksiyon başlangıçlarının daha erken gerçekleşmesine ve sonuç olarak THC emisyonlarını düşürülmesine öncülük etmiştir. Motorinle karşılaştırıldığında, KAB yakıtı kullanımının THC emisyonlarını yaklaşık %26,7 düşürdüğü analiz edilmiştir. KAB yakıtının motorin ile karşılaştırıldığında 3,3 Bar düşük yükte %33,8 daha düşük THC emisyonları verdiği anlaşılmaktadır.

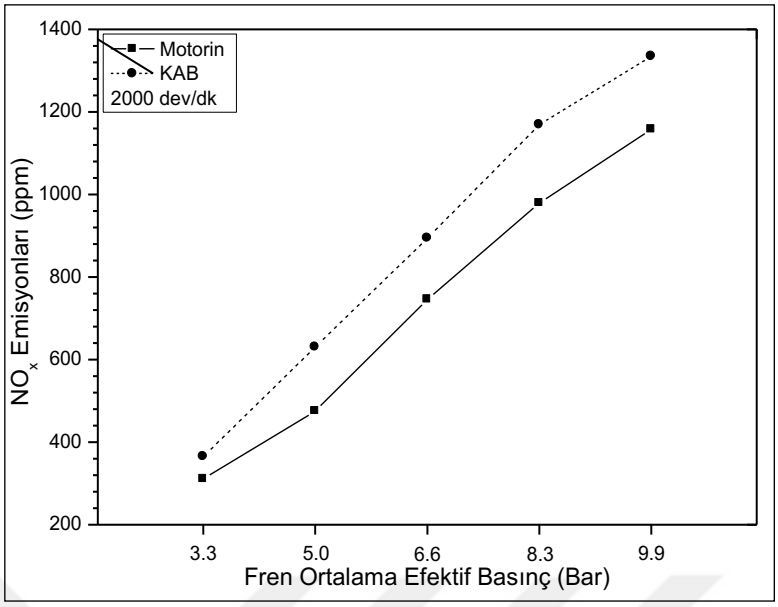


Şekil 5.6. THC emisyonlarının karşılaştırılması

Farklı türden biyodizel yakıtlarının dizel motorlarda kullanımıyla yanmamış HC ve THC emisyonlarının düştüğü gözlemlenmiştir[18, 19, 22, 24, 25, 50, 102, 103, 107].

5.4.4. NO_x emisyonları

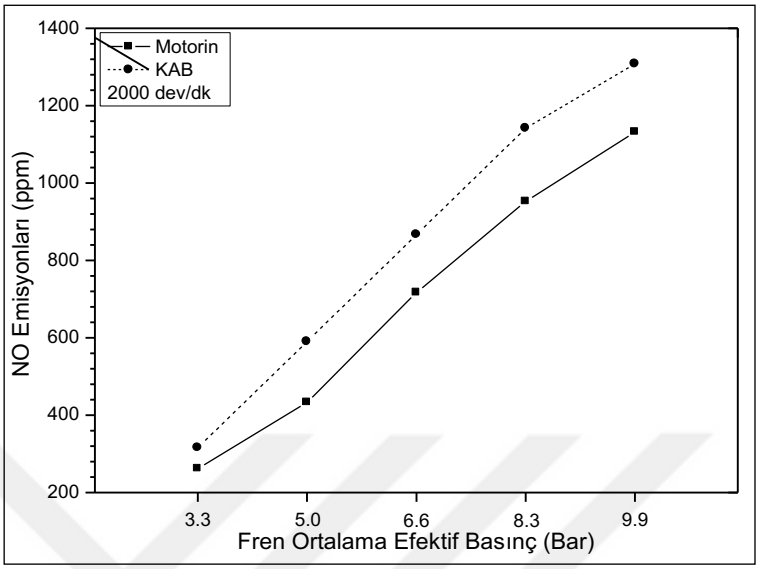
Egzoz emisyonlarında ortaya çıkan ve çevreye zarar veren bir başka kirletici gaz ise azot oksitlerdir (NO_x). NO_x, nitrik oksit (NO), dinitrojen dioksit (N_2O_2), azot oksit (N_2O), azot oksit (N_2O_3), azot dioksit (NO_2), dinitrojen tetroksit (N_2O_4) ve dinitrojen pentoksit (N_2O_5) içeren gazların bir karışımıdır. NOx'un çoğunluğu (% 95), çoğu yüksek sıcaklık yanma sürecinde üretilen nitrik oksit (NO) formundadır[115]. NO_x oluşumu bazı çalışmalarda da görüldüğü üzere termal, istenen ve yakıt olarak ortaya çıkan NO_x şeklinde ifade edilmiştir [116–120]. NO, NO_2 ve diğer azot oksit türevleri NO_x emisyonları içerisinde yer almaktadır. Dizel motorlarda biyodizel yakıtının kullanımı, NO_x oluşumuna farklı etkiler yapmaktadır. Bazı çalışmalar, silindir içerisindeki yanma işlemi sırasında gerçekleşen maksimum sıcaklıkların NO_x oluşumuna etki yaptığını ortaya koymuştur [121–123]. Bunun yanı sıra, NO_x oluşumuna etki eden diğer faktörler arasında silindir içerisindeki basınç, hava-yakıt oranı ve yanma süresinin de olduğu bilinmektedir [106]. Şekil 5.7'de her iki yakıt için motor testlerinde elde edilen NO_x emisyonlarının değişimini göstermektedir. Şekilde görüldüğü üzere, motor yükünün artmasıyla her iki yakıtında NO_x emisyonları kademeli olarak artmıştır. Yukarıda ifade edildiği üzere motor yükünün artmasıyla doğru orantılı olarak maksimum silindir basınç değerleri artmıştır. Buna göre, yanma basıncının artması, enjeksiyon zamanlaması çeşitliliği ve biyodizel kullanımıyla birlikte NO_x emisyonlarındaki aşamalı artış, tüm motor yüklerinde motorinden daha yüksektir.



Şekil 5.7. NO_x emisyonlarının karşılaştırılması

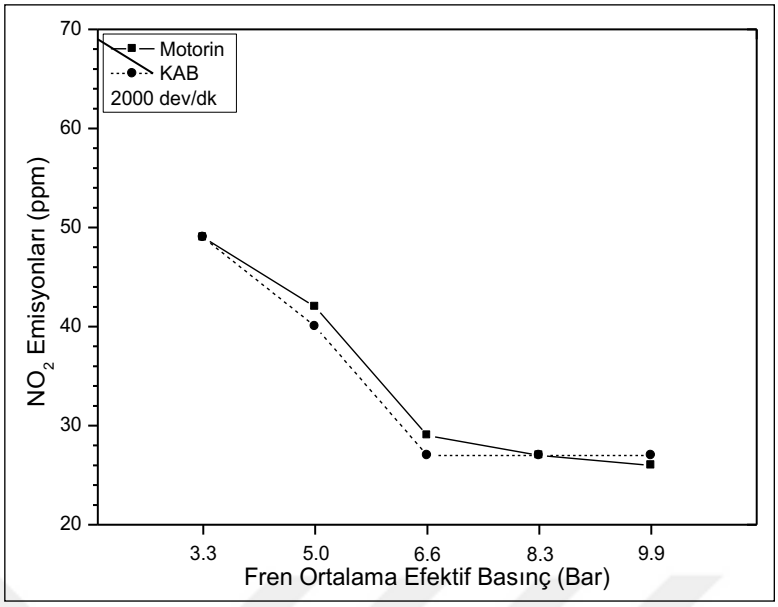
Önceki araştırmalarda ifade edildiği üzere biyodizel yakıtının kullanımıyla NO_x emisyonlarının motorine göre oldukça yüksek olduğu ifade edilmiştir[124–128]. KAB yakıtının NO_x emisyonlarının, motorine göre ortalama %20,9 daha fazla olduğu analiz edilmiştir. KAB yakıtı ile motorinin NO_x emisyonları arasındaki en büyük fark 5,5 Bar yükte %32,6 olarak tespit edilmiştir. Daha erken enjeksiyon başlangıcı, silindir basıncını arttırarak NO_x emisyonlarının artmasına neden olmuştur [129]. O nedenle, enjeksiyon zamanlamalarının NO_x emisyonlarının üzerinde oldukça etkili olduğu görülmektedir[106, 130, 105, 131–133]. İkinci bir sebep olarak, biyodizel yakıtının yüksek yoğunluğa sahip olması nedeniyle NO_x emisyonlarının yüksek olduğu söylenebilir. Yapılan bir çalışmada, biyodizel yakıtlı bir motorda yakıt yoğunluğunun NO_x emisyonları üzerine etkisi araştırılmıştır[134]. Sonuçlar, NO_x konsantrasyonunun biyodizelin yoğunluğunun artmasıyla arttığını göstermiştir. Bu duruma etki eden, yüksek yoğunluklu yakıtın atomizasyonun, düşük yoğunluklu yakıtın atomizasyonundan daha zayıf olması ve bu da daha büyük bir yakıt damlacık çapının oluşmasına neden olmaktadır. Böylece, yakıtın enjekte edildikten sonra yanmaya başlaması arasındaki fiziksel süre olan tutuşma gecikme süresi artacaktır. Diğer bir deyişle, eğer damlacık çapı artarsa, damlacığın buharlaştırılması için gerekli olan süre artacaktır. Devam edecek olursak daha uzun tutuşma gecikmesi yanma sürecinin başlangıcında maksimum silindir içi basıncı ve sıcaklıkları artırarak NO_x konsantrasyonunun artmasına neden olacaktır. Farklı

türden biyodizel yakıtlarının kullanımıyla yapılan birçok çalışmada, NO_x emisyonlarında artış görülmüşür[18, 19, 22–24, 102, 103].



Şekil 5.8. NO emisyonlarının karşılaştırılması

NO emisyonları, başta atmosferik azotun oksidasyonu (Zeldovich mekanizması ile) ve ikinci olarak yakıta bağlı nitrojenin varlığı nedeniyle oluşur [105]. Ayrıca, yüksek yanmış gaz sıcaklıklarının oluştuğu bölgelerde de NO emisyonları oluşur. Şekil 5.8'de her iki yakıtın NO emisyon oluşumları FOEB değerlerine bağlı olarak gösterilmiştir. Motor yükü arttıkça, her iki yakıtın NO emisyonlarının kademeli olarak arttığı görülmektedir. KAB yakıtının NO emisyonlarının, motorine göre ortalama %22,7 daha fazla olduğu analiz edilmiştir. KAB yakıtı ile motorinin NO emisyonları arasındaki en büyük fark 5,5 Bar motor yükünde %36,3 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.9. NO_2 emisyonlarının karşılaştırılması

Şekil 5.9'de her iki yakıtın NO_2 emisyon oluşumları gösterilmiştir. Motor yükü arttıkça her iki yakıtın da NO_2 emisyonlarının kademeli olarak azaldığı görülmektedir. KAB yakıtının NO_2 emisyonlarının, motorine göre ortalama %1,6 daha düşük olduğu analiz edilmiştir. KAB yakıtı ile motorinin NO_2 emisyonları arasındaki en büyük fark 6,6 Bar motor yükünde %6,9 olarak belirlenmiştir. Bu düşüşün nedeni, enjeksiyon başlangıcının erken olması, setan sayısının düşük ve tutuşma gecikmelerinin uzun olması silindir içerisinde yüksek sıcaklıkların meydana gelmesine NO_2 emisyonlarının ayrışmasına neden olmuştur. Ayrışma sonucunda, NO_2 emisyonları NO emisyonlarına dönüşmüştür[105,130,134–141]. Böylece, NO_2 emisyonları düşmüş ve NO emisyonları artış göstermiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, CRDI bir dizel motorda KAB yakıtının performans, enjeksiyon, yanma ve egzoz emisyon karakteristikleri incelenerek motorin ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

Test yakıtlarının özelliklerine bakıldığında KAB yakıtının yoğunluk, viskozite ve parlama noktası değerlerinin motorinden yüksek, setan sayısı ve üst ısıl değerinin ise motorinden düşük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, Aspir yağının yüksek iyot içeriğine sahip olması nedeniyle daha düşük iyot içeriğine sahip kanola yağı ile karıştırılarak iyot değeri düşürülmüştür. Bu sayede, NO_x emisyonlarının düşürülmesi hedeflenmiştir.

Motor performansları karşılaştırılacak olursa, her iki yakıtın ısıl verim ve efektif verimleri artış göstermiştir fakat biyodizelin ısıl verimi ve efektif verim değerleri FOEB değerlerinin artmasıyla motorinden daha yüksek olmuştur. FOEB değerlerinin artmasıyla fren dönme momenti ve efektif güç değerleri de artmıştır. Her iki yakıt için, FOEB değerlerinin artmasıyla ÖYT değerlerinin azaldığı görülmüştür. KAB yakıtının düşük ısıl değere sahip olması nedeniyle ÖYT değerleri motorine göre daha yüksek çıkmıştır. KAB yakıtının ÖYT değerlerinin motorinden ortalama %12,2 daha fazla olduğu belirlenmiştir.

KAB yakıtının pilot enjeksiyon zamanlamalarının motorin ile karşılaştırıldığında PEB'de yaklaşık 1°KA daha erken başlayıp, pilot enjeksiyon bitişinde 1,5°KA daha erken bittiği tespit edilmiştir. Motorinin hem PES hem de AES değerlerinin KAB yakıtından krank açısı cinsinden daha fazla olduğu görülmüştür.

Silindir gaz basınç değerleri motor yükünün artmasıyla artış göstermiştir. EKÜ'nün enjeksiyon karakteristiklerine müdahale ederek MSB değerlerinin oluştuğu bölgeleri

düzenlediği anlaşılmıştır. Her iki yakıt için MIDO'nun elde edildiği krank açısı değerleri arasındaki farklılıklar aynı test koşullarında 1°KA'dan daha az olarak tespit edilmiştir. Artan motor yüküyle KAB yakıtının TG süresinin motorine göre daha fazla olması biyodizelin setan sayısının motorinden düşük olmasıyla açıklanmıştır.

Artan motor yüküyle AEB değerlerinin daha erken olması YS'nin artmasına neden olmuştur. KAB yakıtının AEM değerleri motorinden yaklaşık olarak %16,8 daha fazlayken her iki yakıtın PEM değerlerinin birbirilerine yakın oldukları görülmüştür. Ayrıca, motorinin PES ve AES değerleri KAB yakıtından daha fazla olmuştur.

Emisyon sonuçları, KAB yakıtının kullanımıyla motorine kıyasla daha düşük CO, THC ve NO_2 emisyonları ve daha yüksek CO_2, NO_x ve NO emisyonları ürettiğini göstermiştir. Enjeksiyon zamanlamasının silindir içerisindeki sıcaklığın artmasına ve yanmayı iyileştirerek THC emisyonlarına olumlu etki yaptığı görülmüştür. Böylece, verimli bir yanma işleminin gerçekleşmesi ve KAB yakıtının kullanımının THC emisyonlarını motorin ile karşılaştırıldığında yaklaşık %26,7 düşürdüğü analiz edilmiştir.

KAB yakıtının CO ve NO_2 emisyonlarının, motorine göre ortalama %13,7 ve %1,6 daha düşük olduğu görülürken, NO_x emisyonlarının %20,9 daha fazla olduğu ifade edilmiştir. CO_2 ve NO emisyonlarının motorinle karşılaştırıldığında ortalama %6,1 ve %22,7 daha fazla olduğu analiz edilmiştir.

Bütün sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde; KAB yakıtının yakıt tüketimine olumsuz etki yaparken CO, THC ve NO_2 emisyonlarına olumlu etki yapmıştır. EKÜ'nün, farklı yakıtların kullanımına bağlı olarak verdiği tepkiler enjeksiyon zamanlamalarına bağlı olarak yanma ve emisyon karakteristiklerini etkilemiştir. Ayrıca, biyodizel yakıtının setan sayısının motorinden düşük olmasının da etkisi kaçınılmazdır. Bu durumda, KAB yakıtının CRDI dizel motorlarda hiçbir değişiklik yapılmadan kullanılmasında bir sakınca görünmemektedir. Bu çalışmalar hacimsel olarak %50-%50 kanola-aspir yağı karışımı biyodizel kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İleriki çalışmalarda çeşitli motor devirleri veya yüklerinde farklı oranlarda karışımlarla yapılacak motor testleri incelenmelidir. Bunula birlikte setan iyileştirici katkı maddeleri kullanılarak yapılacak çalışmaların da incelenmesi faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

[1] Henry A., BP Energy Outlook 2017 Summary Tables, USA, BP Energy Corp, https://www.bp.com/content/dam/bp/excel/energy-economics/energy-outlook-2017/bp-energy-outlook-2017-summary-tables.xlsx (Ziyaret tarihi: 10 Nisan 2017)

[2] EPDK, Ham Petrol ve Doğalgaz Sektör Raporu 2015, Ankara, TPAO, http://www.tpao.gov.tr/tp5/docs/rapor/sektorrapor3105.pdf (Ziyaret tarihi: 5 Nisan 2017).

[3] Birol F., Medium-Term Oil Market Report, *International Energy Agency*, 1-127, 2016.

[4] Koç E., Kaplan E., Dünya'da ve Türkiye'de Genel Enerji Durumu-II Türkiye Değerlendirmesi, *Termodinamik Dergisi,* 2008, **188**, 116-118.

[5] Uzunpınar İ., Bitkisel Üretim İstatistikleri 2016, Ankara, Türkiye istatistik kurumu, http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=21664 (Ziyaret tarihi: 24 Nisan 2017).

[6] Bayrakcı A. G., Koçar G., Utilization of Renewable energies in Turkey's Agriculture, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, **16**(1), 618-633.

[7] Uzunpınar İ., Tahıllar ve Diğer Bitkisel Ürünler 2017, Ankara, Türkiye istatistik kurumu, http://www.tuik.gov.tr/PdfGetir.do?id=24584 (Ziyaret tarihi: 28 Nisan 2017).

[8] EPDK, 2015 Yılı Sektör Raporu, Ankara, Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu, http://www.epdk.org.tr/TR/Dokuman/6760 (Ziyaret tarihi: 28 Nisan 2017).

[9] Ceyhan V., Bitkisel Üretim Özel İhtisas Komisyonu Raporu 2023, Ankara, T.C. Tarim ve Kalkınma Bakanlığı, http://tarim.kalkinma.gov.tr/wp-content/uploads/2014/12/Bitkisel_uretim_oik.pdf (Ziyaret tarihi: 5 Mayıs 2017).

[10] Acaroğlu M., Aydoğan H., Biofuels Energy Sources and Future of Biofuels Energy in Turkey, *Biomass and Bioenergy*, 2012, **36**, 69-76.

[11] Henry A., BP Statistical Review of World Energy 2017, USA, BP, http://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf (Ziyaret tarihi: 28 Nisan 2017).

[12] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Yenilenebilir Enerji, Biyokütle ve Biyokütle Enerjisi Nedir?, Ankara, YEGM (Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü), http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/biyokutle_enerjisi.aspx (Ziyaret tarihi: 29 Nisan 2017).

[13] Çiftçi A., Başbakanlık Mevzuatı Geliştirme ve Yayın Genel Müdürlüğü, Ankara, EPDK, http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2017/06/20170616-8.htm (Ziyaret tarihi: 8 Kasım 2017).

[14] EPDK, Petrol Piyasası Sektör Raporu 2016, Ankara, EPDK, http://www.epdk.org.tr/TR/Dokumanlar/Petrol/YayinlarRaporlar/Yillik/ (Ziyaret tarihi: 8 Mayıs 2017).

[15] Aytav E., Koçar G., Biodiesel from the Perspective of Turkey: Past, Present and Future, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, **25**, 335-350.

[16] Wuebbles D. J., Jain A. K., Concerns About Climate Change and The Role of Fosil Fuel Use, *Fuel Processing Technology*, 2001, **71**(1-3), 99-119.

[17] Varanda M. G., Pinto G., Martins F., Life Cycle Analysis of Biodiesel Production, *Fuel Processing Technology*, 2011, **92**(5), 1087-1094.

[18] Özsezen A. N., Çanakci M., Turkcan A., Sayin C., Performance and Combustion Characteristics of a DI Diesel Engine Fueled with Waste Palm Oil and Canola Oil Methyl Esters, *Fuel*, 2009, **88**(4), 629-636.

[19] Alptekin E., Emission, Injection and Combustion Characteristics of Biodiesel and Oxygenated Fuel Blends in a Common Rail Diesel Engine, *Energy*, 2017, **119**, 44-52.

[20] McCarthy P., Rasul M. G., Moazzem S., Analysis and Comparison of Performance and Emissions of an Internal Combustion Engine Fuelled with Petroleum Diesel and Different Bio-diesels, *Fuel*, 2011, **90**(6), 2147-2157.

[21] Sayin C., Gümüş M., Çanakci M., Effect of Fuel Injection Pressure on The Injection, Combustion and Performance Characteristics of a DI Diesel Engine Fueled with Canola Oil Methyl Esters-Diesel Fuel Blends, *Biomass and Bioenergy*, 2012, **46**, 435-446.

[22] Roy M. M., Wang W., Bujold J., Biodiesel Production and Comparison of Emissions of a DI Diesel Engine Fueled by Biodiesel–Diesel and Canola Oil–Diesel Blends at High Idling Operations, *Applied Energy*, 2013, **106**, 198-208.

[23] İlkılıç C., Aydın S., Behcet R., Aydin H., Biodiesel from Safflower Oil and Its Application in a Diesel Engine, *Fuel Processing Technology*, 2011, **92**(3), 356-362.

[24] Can Ö., Öztürk E., Yücesu H. S., Combustion and Exhaust Emissions of Canola Biodiesel Blends in a Single Cylinder DI Diesel Engine, *Renewable Energy*, 2017, **109**, 73-82.

[25] Işığıgür A., Karaosmanoğlu F., Aksoy H. A., Hamdullahpur F., Gülder Ö. L., Performance and Emission Characteristics of a Diesel Engine Operating on Safflower Seed Oil Methyl Ester, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 1994, **45**(1), 93-102.

[26] Sheehan J., Camobreco V., Duffield J., Graboski M., Shapouri H., Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus, *National Renewable Energy Laboratory*, NREL/SR-580-24089, 1-314, 1998.

[27] Ramadhas A. S., Jayaraj S., Muraleedharan C., Use of Vegetable Oils as I.C. Engine Fuels—A Review, *Renewable Energy*, 2004, **29**(5), 727-742.

[28] Agarwal A. K., Biofuels (Alcohols and Biodiesel) Applications as Fuels for Internal Combustion Engines, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2007, **33**(3), 233-271.

[29] Nicotra F., *Organic and Bio-molecular Chemistry-Volume I*, EOLSS Publications, Oxford, 2009.

[30] Ahmad M., Khan M. A., Zafar M., Sultana S., *Practical Handbook on Biodiesel Production and Properties*, CRC Press, USA, 2013.

[31] O'Brien RD. *Fats and Oils: Formulating and Processing for Applications*, 2nd edition, CRC Press, Florida, 2004.

[32] Knothe G., Razon L. F., Biodiesel Fuels, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2017, **58**, 36-59.

[33] Lin L., Cunshan Z., Vittayapadung S., Xiangqian S., Mingdong D., Opportunities and Challenges for Biodiesel Fuel, *Applied Energy*, 2011, **88**(4), 1020-2619.

[34] Singh S. P., Singh D., Biodiesel Production Through the Use of Different Sources and Characterization of Oils and Their Esters as the Substitute of Diesel: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, **14**(1), 200-216.

[35] Yunus khan T. M., Atabani A. E., Badruddin I. A., Badarudin A., Khayoon M. S., Triwahyono S., Recent Scenario and Technologies to Utilize Non-Edible Oils for Biodiesel Production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, **37**, 840-851.

[36] Karmakar A., Karmakar S., Mukherjee S., Properties of Various Plants and Animals Feedstocks for Biodiesel Production, *Bioresource Technology*, 2010, **101**(19), 7201-7210.

[37] Sharma Y. C., Singh B., Development of Biodiesel: Current Scenario, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, **13**(6-7), 1646-1651.

[38] Van Gerpen J., Biodiesel Processing and Production, *Fuel Processing Technology*, 2005, **86**(10), 1097-1107.

[39] Çanakci M, Van Gerpen J., Biodiesel Production via Acid Catalysis, *Transactions of the American Society Agricultural Engineers*, 1999, **42**(5), 1203–1210.

[40] Meher L. C., Kulkarni M. G., Dalai A. K., Naik S. N., Transesterification of Karanja (Pongamia pinnata) Oil by Solid Basic Catalysts, *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2006, **108**(5), 389–397.

[41] Ma F., Hanna M. A., Biodiesel Production: a Review, *Bioresource Technology*, 1999, **70**(1), 1-15.

[42] Srivastava A., Prasad R., Triglycerides-Based Diesel Fuels, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2000, **4**(2), 111-133.

[43] Barnwal B. K., Sharma M. P., Prospects of Biodiesel Production from Vegetable Oils in India, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2005, **9**(4), 363-378.

[44] Vicente G., Martínez M., Aracil J., Integrated Biodiesel Production: a Comparison of Different Homogeneous Catalysts Systems, *Bioresource Technology*, 2004, **92**(3), 297-305.

[45] Freedman B., Pryde E. H., Mounts T. L., Variables Affecting the Yields of Fatty Esters from Transesterified Vegetable Oils, *Journal of American Oil Chemists' Society*, 1984, **61**(10), 1638–1643.

[46] Muniyappa P. R., Brammer S. C., Noureddini H., Improved Conversion of Plant Oils and Animal Fats into Biodiesel and Co-Product, *Bioresource Technology*, 1996, **56**(1), 19-24.

[47] Phan A. N., Phan T. M., Biodiesel Production from Waste Cooking Oils, *Fuel*, 2008, **87**(17-18), 3490-3496.

[48] Leung D. Y., Wu X., Leung M., A Review on Biodiesel Production Using Catalyzed Transesterification, *Applied Energy*, 2010, **87**(4), 1083–1095.

[49] Shahid E. M., Jamal Y., A Review of Biodiesel as Vehicular Fuel, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, **12**(9), 2484–2494.

[50] Zou L., Atkinson S., Characterising Vehicle Emissions from the Burning of Biodiesel Made from Vegetable Oil, *Environmental Technology*, 2002, **24**(10),1253–1260.

[51] Baümler E., Cuniberti A., Nolasco S. M., Riccobene I. C., Moisture Dependent Physical and Compression Properties of Safflower Seed, *Journal of Food Engineering*, 2006, **72**(2), 134-140.

[52] Beis S. H., Onay Ö., Koçkar Ö. M., Fixed-Bed Pyrolysis of Safflower Seed: Influence of Pyrolysis Parameters on Product Yields and Compositions, *Renewable Energy*, 2002, **26**(1), 21-32.

[53] Yau S. K., Winter Versus Spring Sowing of Rain-Fed Safflower in a Semi-Arid, High-Elevation Mediterranean Environment, *European Journal of Agronomy*, 2007, **26**(3), 249-256.

[54] Standard A, Compression Test of Food Materials of Convex Shape, *ASAE* S368 1998, **3**, 554–6.

[55] Carvalho I. S., Miranda I., Pereira H., Evaluation of Oil Composition of Some Crops Suitable for Human Nutrition, *Industrial Crops and Products*, 2006, **24**(1), 75-78.

[56] Geçgel Ü., Demirci M., Esendal E., Taşan M., Fatty Acid Composition of the Oil from Developing Seeds of Different Varieties of Safflower (Carthamus tinctorius L.), *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2006, **84**(1), 47–54.

[57] Shahidi F., Rapeseed and Canola: Global Production and Distribution: Editors: Shahidi F, *Canola and Rapeseed*, Springer, Boston, 3–13, 1990.

[58] Gunstone F. D., *Rapeseed and canola oil: production, processing, properties and uses,* CRC Press, Oxford, 2004.

[59] Kong X., Liu G., Curtis J. M., Novel Polyurethane Produced from Canola Oil Based Poly (Ether Ester) Polyols: Synthesis, Characterization and Properties, *European Polymer Journal*, 2012, **48**(12), 2097-2106.

[60] Hong J., Shah B. K., Petrović Z. S., Vegetable Oil Cast Resins via Click Chemistry: Effects of Cross-Linker, *European Journal of Lipid Science Technology*, 2013, **115**, 55–60.

[61] Dumont M-J., Kharraz E., Qi H., Production of Polyols and Mono-Ols from 10 North-American Vegetable Oils by Ozonolysis and Hydrogenation: A Characterization Study, *Industrial Crops and Products*, 2013, **49**, 830-836.

[62] Sakurai H., Pokorný J., The Development and Application of Novel Vegetable Oils Tailor-Made for Specific Human Dietary Needs, *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2003, **105**(12), 769–778.

[63] Beare-Rogers J., Dietary Fatty Acids in an Era of Genetic Modification, *US National Library of Medicine National Institutes of Health*, 2003, **56**, 63-64.

[64] Dyer J. M., Stymne S., Green A. G., Carlsson A. S., High- Value Oils from Plants, *The Plant Journal*, 2008, **54**(4), 640–655.

[65] Luo Y., Ahmed I., Kubátová A., Šťávová J., Aulich T., Sadrameli S. M., Seames W. S., The Thermal Cracking of Soybean/Canola Oils and Their Methyl Esters, *Fuel Processing Technology*, 2010, **91**(6), 613–617.

[66] Eryılmaz T., Yeşilyurt M. K., Influence of Blending Ratio on The Physicochemical Properties of Safflower Oil Methyl Ester-Safflower Oil, Safflower Oil Methyl Ester-Diesel and Safflower Oil-Diesel, *Renewable Energy*, 2016, **95**, 233–247.

[67] Düz M. Z., Saydut A., Öztürk G., Alkali Catalyzed Transesterification of Safflower Seed Oil Assisted by Microwave Irradiation, *Fuel Processing Technology*, 2011, **92**(3), 308–313.

[68] Aksoy F., Alkaline Catalyzed Biodiesel Production from Safflower (Carthamus tinctorius L.) Oil: Optimization of Parameters and Determination of Fuel Properties, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects,* 2017, **38**(6), 845-831.

[69] Moser B. R., Influence of Blending Canola, Palm, Soybean, and Sunflower Oil Methyl Esters on Fuel Properties of Biodiesel, *Energy and Fuels,* 2008, **22**(6), 4301–4306.

[70] Leung D. Y. C., Guo Y., Transesterification of Neat and Used Frying Oil: Optimization for Biodiesel Production, *Fuel Processing Technology,* 2006, **87**(10), 883–890.

[71] Patil P. D., Deng S., Optimization of Biodiesel Production from Edible and Non-Edible Vegetable Oils, *Fuel,* 2009, **88**(7), 1302–1306.

[72] Zhao L., Qiu Z., Stagg-Williams S. M., Transesterification of Canola Oil Catalyzed by Nanopowder Calcium Oxide, *Fuel Processing Technology*, 2013, **114**, 154–162.

[73] Işığıgür A., Karaosmanoğlu F., Aksoy H. A., Methyl Ester from Safflower Seed Oil of Turkish Origin as a Biofuel for Diesel Engines, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 1994, **45**(1), 103–112.

[74] Rashid U., Anwar F., Production of Biodiesel Through Base-Catalyzed Transesterification of Safflower Oil Using an Optimized Protocol, *Energy and Fuels*, 2008, **22**(2), 1306–1312.

[75] Ataya F., Dubé M. A., Ternan M., Acid-Catalyzed Transesterification of Canola Oil to Biodiesel under Single- and Two-Phase Reaction Conditions, *Energy and Fuels*, 2007, **21**(4), 2450–2459.

[76] Boles M. A., Çengel Y. A., *Thermodynamics :an engineering approach*, 8th ed., McGraw-Hill Higher Education, Singapore, 2008.

[77] Krieger R. B., Borman G. L., *The computation of applied heat release for internal combustion engines*, ASME, New York, 1966.

[78] Çetinkaya S., *Motor dinamiği*, 1. baskı, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 1999.

[79] Balat M., Potential Alternatives to Edible Oils for Biodiesel Production - A Review of Current Work, *Energy Conversion and Management,* 2011, **52**(2), 1479–1492.

[80] Giannelos P.N., Zannikos F., Stournas S., Lois E., Anastopoulos G., Tobacco Seed Oil as an Alternative Diesel Fuel: Physical and Chemical Properties, *Industrial Crops and Products*, 2002, **16**(1), 1–9.

[81] Rashid U., Anwar F., Moser B. R., Knothe G., Moringa Oleifera Oil: A Possible Source of Biodiesel, *Bioresource Technology*, 2008, **99**(17), 8175–8179.

[82] Rizwanul Fattah I. M., Masjuki H. H., Liaquat A. M., Ramli R., Kalam M. A., Riazuddin V. N., Impact of Various Biodiesel Fuels Obtained from Edible and Non-Edible Oils on Engine Exhaust Gas and Noise Emissions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, **18**, 552–567.

[83] No S. Y., Inedible Vegetable Oils and Their Derivatives for Alternative Diesel Fuels in CI Engines: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 2011, 15(1), 131–149.

[84] Çanakci M., Şanli H., Biodiesel Production from Various Feedstocks and Their Effects on The Fuel Properties, *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology,* 2008, **35**(5), 431–441.

[85] Alptekin E., Çanakci M., Determination of The Density and The Viscosities of Biodiesel-Diesel Fuel Blends, *Renewable Energy,* 2008, **33**(12), 2623–2630.

[86] Ashraful A. M., Masjuki H. H., Kalam M. A., Rizwanul Fattah I. M., Imtenan S., Shahir S. A., Mobarak H. M., Production and Comparison of Fuel Properties, Engine Performance, and Emission Characteristics of Biodiesel from Various Non-Edible Vegetable Oils: A Review, *Energy Conversion and Management*, 2014, **80**, 202–228.

[87] Shahabuddin M., Kalam M. A., Masjuki H. H., Bhuiya M. M. K., Mofijur M., An Experimental Investigation into Biodiesel Stability by Means of Oxidation and Property Determination, *Energy*, 2012, **44**(1), 616–622.

[88] Tate R. E., Watts K. C., Allen C. A. W., Wilkie K. I., The Viscosities of Three Biodiesel Fuels at Temperatures up to 300°C, *Fuel,* 2006, **85**(7-8), 1010–1015.

[89] Alptekin E., Çanakci M., Characterization of The Key Fuel Properties of Methyl Ester-Diesel Fuel Blends, *Fue,l* 2009, **88**(1), 75–80.

[90] Boog J. H. F., Silveira E. L. C., De Caland L. B., Tubino M., Determining The Residual Alcohol in Biodiesel Through Its Flash Point, *Fuel,* 2011, **90**(2), 905–907.

[91] Carareto NDD, Kimura CYCS, Oliveira EC, Costa MC, Meirelles AJA., Flash points of mixtures containing ethyl esters or ethylic biodiesel and ethanol, Fuel, 2012, **96**, 319–26.

[92] Musa I. A., The Effects of Alcohol to Oil Molar Ratios and The Type of Alcohol on Biodiesel Production Using Transesterification Process, *Egyptian Journal of Petroleum*, 2016, **25**(1), 21–31.

[93] Mittelbach M., Claduia R., *Biodiesel: The Comprehensive Handbook*, 3rd ed., Martin Mittelbach, Graz, Austria, 2004.

[94] Knothe G., Matheaus A. C., Ryan T. W., Cetane Numbers of Branched and Straight-Chain Fatty Esters Determined in an Ignition Quality Tester, *Fuel,* 2003, **82**(8), 971–975.

[95] Klopfenstein W. E., Effect of Molecular Weights of Fatty Acid Esters on Cetane Numbers as Diesel Fuels, *Journal of the American Oil Chemists Society,* 1985, **62**(6), 1029–1031.

[96] Martins G. I., Secco D., Rosa H. A., Bariccatti R. A., Dolci B. D., Melegari De Souza S. N., Physical and Chemical Properties of Fish Oil Biodiesel Produced in Brazil, *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 2015, **42**, 154–157.

[97] Oliveira L. E., Da Silva M. L. C., Comparative Study of Calorific Value of Rapeseed, Soybean, Jatropha Curcas and Crambe Biodiesel, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality,* 2013, **1**(11), 679–682.

[98] Atabani A. E., Silitonga A. S., Ong H. C., Mahlia T. M. I., Masjuki H. H., Badruddin I. A., Non-Edible Vegetable Oils: A Critical Evaluation of Oil Extraction, Fatty Acid Compositions, Biodiesel Production, Characteristics, Engine Performance and Emissions Production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 2013, **18**, 211–245.

[99] McCormick R. L., Graboski M. S., Alleman T. L., Herring A. M., Tyson K. S., Impact of Biodiesel Source Material and Chemical Structure on Emissions of Criteria Pollutants from a Heavy-Duty Engine. *Environmental Science and Technology*, 2001, **35**(9), 1742–1747.

[100] Hazebroek JP., Analysis of Genetically Modified Oils, *Progress in Lipid Research*, 2000, **39**(6), 477–506.

[101] Hoekman S. K., Broch A., Robbins C., Ceniceros E., Natarajan M., Review of Biodiesel Composition, Properties, and Specifications, *Renew Sustain Energy Rev,* 2012, **16**(1), 143–169.

[102] Özsezen A. N., Çanakci M., Determination of Performance and Combustion Characteristics of a Diesel Engine Fueled with Canola and Waste Palm Oil Methyl Esters, *Energy Convers Manag,* 2011, **52**(1), 108–116.

[103] Li Q., Backes F., Wachtmeister G., Application of Canola Oil Operation in a Diesel Engine with Common Rail System, *Fuel,* 2015, **159**, 141–149.

[104] Öztürk E., Performance, Emissions, Combustion and Injection Characteristics of a Diesel Engine Fuelled with Canola Oil-Hazelnut Soapstock Biodiesel Mixture, *Fuel Process Technol*, 2015, **129**, 183–191.

[105] Heywood J. B., *Internal combustion engine fundamentals*, 1st ed., Mcgraw-hill, New York, 1988.

[106] Pulkrabek W. W., *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*, 1st ed., Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2004.

[107] Usta N., Öztürk E., Can Ö., Conkur E. S., Nas S., Çon A. H., Combustion of Biodiesel Fuel Produced from Hazelnut Soapstock/Waste Sunflower Oil Mixture in a Diesel Engine, *Energy Convers Manag*, 2005, **46**(5), 741–755.

[108] He C., Ge Y., Tan J., Han X., Spray Properties of Alternative Fuels: A Comparative Analysis of Biodiesel and Diesel, *Int J Energy Res,* 2008, **32**, 1329–1338.

[109] Yamane K., Ueta A., Shimamoto Y., Influence of Physical and Chemical Properties of Biodiesel Fuels on Injection, Combustin and Exhaust Emission Characteristics in a Direct Injection Compression Ignition Engine, *Int J Engine Res,* 2001, **2**(4), 249–261.

[110] Boehman A. L., Morris D., Szybist J., Esen E., The Impact of the Bulk Modulus of Diesel Fuels on Fuel Injection Timing, *Energy and Fuels,* 2004, **18**(6), 1877-1882.

[111] Liu H., Ma X., Li B., Chen L., Wang Z., Wang J., Combustion and Emission Characteristics of a Direct Injection Diesel Engine Fueled with Biodiesel and PODE/Biodiesel Fuel Blends, *Fuel,* 2017, **209**, 62–68.

[112] Agarwal A. K., Srivastava D. K., Dhar A., Maurya R. K., Shukla P. C., Singh A. P., Effect of Fuel Injection Timing and Pressure on Combustion, Emissions and Performance Characteristics of a Single Cylinder Diesel Engine, *Fuel,* 2013, **111**, 374–383.

[113] Sayin C., Uslu K., Çanakcı M., Influence of Injection Timing on The Exhaust Emissions of a Dual-Fuel CI Engine, *Renew Energy*, 2008, **33**(6), 1314–1323.

[114] Sayin C., İlhan M., Çanakcı M., Gümüş M., Effect of Injection Timing on The Exhaust Emissions of a Diesel Engine Using Diesel-Methanol Blends, *Renew Energy,* 2009, **34**(5), 1261–1269.

[115] Environmental Protection Agency (EPA), Technical Bulletin, Nitrogen oxides (NOx), why and how they are controlled, *EPA*, Epa-456/F-99-006R, 1-48, 1999.

[116] States U., Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions Draft Technical Report, *United States Environ Prot Agency,* 1-118, 2002.

[117] Fernando S., Hall C., Jha S., NOx Reduction from Biodiesel Fuels, *Energy & Fuels,* 2006, **20**(1), 376–382.

[118] Miller J. A., Bowman C. T., Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion, *Prog Energy Combust Sci*, 1989, **15**(4), 287–338.

[119] McCormick R., Williams A., Ireland J., Brimhall M., Hayes R., Effects of Biodiesel Blends on Vehicle Emissions: Fiscal Year 2006 Annual Operating Plan Milestone 10.4, *National Renewable Energy Laboratory*, NREL/MP-540-40554, 1-69, 2006.

[120] Sun J., Caton J. A., Jacobs T. J., Oxides of Nitrogen Emissions from Biodiesel-Fuelled Diesel Engines, *Prog Energy Combust Sci,* 2010, **36**(6), 677–695.

[121] Mueller C. J., Boehman A. L., Martin G.C., An Experimental Investigation of The Origin of Increased NOx Emissions When Fueling a Heavy-Duty Compression-Ignition Engine with Soy Biodiesel, *SAE Int J Fuels Lubr,* 2009, **2**(1), 789-816.

[122] Cheng A. S., Upatnieks A., Mueller C.J., Investigation of The Impact of Biodiesel Fuelling on NOx Emissions Using an Optical Direct Injection Diesel Engine, *Int J Engine Res,* 2006, **7**(4), 297–318.

[123] Ban-Weiss G. A., Chen J. Y., Buchholz B. A., Dibble R. W., A Numerical Investigation into the Anomalous Slight NOx Increase When Burning Biodiesel; A New (old) Theory, *Fuel Process Technol,* 2007, **88**(7), 659–667.

[124] Monyem A. H., Van Gerpen J., The Effect of Biodiesel Oxidation on Engine Performance and Emissions, *Biomass and Bioenergy,* 2001, **20**(4), 317–325.

[125] Labeckas G., Slavinskas S., The Effect of Rapeseed Oil Methyl Ester on Direct Injection Diesel Engine Performance and Exhaust Emissions, *Energy Convers Manag,* 2006, **47**(13-14), 1954–1967.

[126] Lapuerta M., Armas O., Rodríguez-Fernández J., Effect of Biodiesel Fuels on Diesel Engine Emissions, *Prog Energy Combust Sci*, 2008, **34**(2), 198–223.

[127] Raheman H., Phadatare A. G., Diesel Engine Emissions and Performance from Blends of Karanja Methyl Ester and Diesel, *Biomass and Bioenergy,* 2004, **27**(4), 393–397.

[128] Gattamaneni R., Subramani S., Santhanam S., Kuderu R., Combustion and Emission Characteristics of Diesel Engine Fuelled with Rice Bran Oil Methyl Ester and Its Diesel Blends, *Therm Sci,* 2008, **12**(1), 139–150.

[129] Lešnik L., Vajda B., Žunič Z., Škerget L., Kegl B., The Influence of Biodiesel Fuel on Injection Characteristics, Diesel Engine Performance, and Emission Formation, *Appl Energy,* 2013, **111**, 558–570.

[130] Ferguson C. R., Kirkpatrick A. T., *Internal combustion engines: applied thermosciences,* 3rd ed.*,* John Wiley & Sons, UK, 2015.

[131] Tat M. E., Van Gerpen J., Soylu S., Çanakcı M., Monyem A., Wormley S., The Speed of Sound and Isentropic Bulk Modulus of Biodiesel at 21°C from Atmospheric Pressure to 35 MPa, *J Am Oil Chem Soc*, 2000, **77**(3), 285–289.

[132] Bittle J. A., Knight B. M., Jacobs T. J., Interesting Behavior of Biodiesel Ignition Delay and Combustion Duration, *Energy and Fuels,* 2010, **24**(8), 4166–4177.

[133] Jha S. K., Fernando S., To S. D. F., Flame Temperature Analysis of Biodiesel Blends and Components, *Fuel*, 2008, **87**(10-11), 1982–1988.

[134] Gopinath A., Puhan S., Nagarajan G., Numerical Modeling of Oxides of Nitrogen Based on Density of Biodiesel Fuels, *Int J Energy Environ,* 2010, 1(2), 313–320.

[135] Szybist J. P., Boehman A. L., Taylor J.D., McCormick R. L., Evaluation of Formulation Strategies to Eliminate The Biodiesel NOx Effect, *Fuel Process Technol,* 2005, **86**(10), 1109–1126.

[136] Saravanan S., Nagarajan G., Anand S., Sampath S., Correlation for Thermal NOx Formation in Compression Ignition (CI) Engine Fuelled with Diesel and Biodiesel, *Energy,* 2012, **42**(1), 401–410.

[137] Varatharajan K., Cheralathan M., Influence of Fuel Properties and Composition on NOx Emissions from Biodiesel Powered Diesel Engines: A Review, *Renew Sustain Energy Rev*, 2012, **16**(6), 3702–3710.

[138] Thangaraja J., Anand K., Mehta P. S., Biodiesel NOx Penalty and Control Measures - A review, *Renew Sustain Energy Rev,* 2016, **61**, 1–24.

[139] Lanjekar R. D., Deshmukh D., A Review of The Effect of The Composition of Biodiesel on NOx Emission, Oxidative Stability and Cold Flow Properties, *Renew Sustain Energy Rev,* 2016, **54**, 1401–1411.

[140] Rajasekar E., Murugesan A., Subramanian R., Nedunchezhian N., Review of NOx Reduction Technologies in CI Engines Fuelled with Oxygenated Biomass Fuels, *Renew Sustain Energy Rev*, 2010, **14**, 2113–21.

[141] Agarwal D., Sinha S., Agarwal A. K., Agarwal A. K., Experimental Investigation of Control of NOx Emissions in Biodiesel-Fueled Compression Ignition Engine, *Renew Energy*, 2006, **31**, 2356–2369.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] Alptekin E., **Özbilgi C.**, Çanakcı M., Özsezen A. N., Ortak Hatlı Bir Dizel Motorda Kanola-Aspir Karışımı Biyodizel ve Dizel Yakıtlarının Enjeksiyon, Yanma ve Emisyon Karakteristiklerinin Karşılaştırmalı Analizi, *Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu (UMAS' 2017)*, Düzce Üniversitesi, Düzce, 11-13 Eylül 2017.

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Antalya'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Türkiye'de tamamladı. 2013 yılında Doğu Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2014 yılında İngiltere'deki Coventry Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği bölümünde tezli yüksek lisansa kabul aldı. Daha sonra İngiltere'deki eğitimini yarıda bırakıp 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Bölümünde tezli yüksek lisans öğrenimine başladı. Şuan, Kocaeli Üniversitesi Otomotiv mühendisliği anabilim dalında tezli yüksek lisans öğrencisi olarak öğrenimine devam etmektedir.