



## %10 Balık Yağı Biyodizeli-%90 Dizel Yakıt Karışımı İle Çalışan Direkt Enjeksiyonlu Bir Dizel Motorunda Yanma ve Performans Karakteristiklerinin İncelenmesi

Fatih AKSOY<sup>1</sup>, Emre YILMAZ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 03200, Merkez/AFYONKARAHİSAR

<sup>2</sup>Hakkari Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 31000, Merkez/HAKKARİ

### Öz

Bu çalışmada dizel ve %10 balık yağı biyodizeli-%90 dizel yakıt karışımı ile (B10) çalışan direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda yanma ve motor performansı deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla deney motoru maksimum tork devri olan 2200 d/d'da 3.75, 7.5, 11.25 ve 15 Nm motor yüklerinde çalıştırılmıştır. Silindir basıncı, ısı dağılımı, yanma süresi, tutuşma gecikmesi, indike termik verim ve özgül yakıt tüketimi gibi yanma ve motor performans parametrelerinin değişimleri incelenmiştir. Balık yağı biyodizeli ile silindir basıncı ve ısı dağılımının arttığı yanma süresinin kısaldığı görülmüştür. Deney sonuçlarında balık yağı biyodizeli katkılı yakıt kullanımı ile silindir içi sıcaklığın arttığı görülmüştür. Balık yağının düşük ısıl enerjisinden dolayı biyodizel ile indike ortalama efektif basınç ve indike termik verim azalmıştır. 11.25 Nm motor yükünde dizel yakıtı ile %28.27 termik verim elde edilirken B10 yakıtı ile %25.58 olarak belirlenmiştir. Özgül yakıt tüketimi ise aynı motor yükünde dizel yakıtı ile 0.162 kg/kWh hesaplanırken B10 yakıtı ile yaklaşık %32 artarak 0.214 kg/kWh olarak belirlenmiştir. Deney sonuçları balık yağı biyodizeli-dizel yakıt karışımının dizel motorda değişikliğe gidilmeden kullanılabileceğini ve yanma karakteristiklerinin iyileştiğini göstermiştir.

### Makale Bilgisi

Başvuru: 02/10/2018

Düzeltilme: 04/11/2018

Kabul: 16/11/2018

### Anahtar Kelimeler

Balık yağı biyodizeli

Dizel motoru

Yanma

Motor performansı

### Keywords

Fish oil biodiesel

Diesel engine

Combustion

Engine performance

## An Investigation of Combustion and Performance Characteristics of a Direct Injection Diesel Engine Fuelled With The Blends of 10% Fish Oil Biodiesel and 90% Diesel Fuel

### Abstract

In the current study, combustion and performance characteristics of a direct injection diesel engine fuelled with the blends of 10% fish oil biodiesel and 90% diesel fuel were investigated experimentally. For this reason, the test engine was run at 2200 rpm and 3.75, 7.5, 11.25 and 15 Nm engine loads. The variations of in-cylinder pressure, heat release, combustion duration, ignition delay, thermal efficiency and specific fuel consumption were observed. In-cylinder pressure and heat release increased while combustion duration was shortened with fish oil biodiesel. Test results showed that in-cylinder temperature increased with fish oil biodiesel. Indicated mean effective pressure (imep) and indicated thermal efficiency (ITE) decreased owing to lower calorific value of fish oil biodiesel. ITE was determined as 28.27% with diesel whereas 25.58% with B10 at 11.25 Nm engine load. Specific fuel consumption (SFC) was computed as 0.162 kg/kWh with diesel while 0.214 kg/kWh with B10 with the increase of about 32%. Test results showed that the blends of fish oil biodiesel-diesel can be utilized without modifications in diesel engines and combustion characteristics were improved.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünyada ulaşım için enerji tüketimi gittikçe artmaktadır. Sürekli yenilenen egzoz emisyon standartları, fosil kökenli yakıtların azalması, biyodizel gibi alternatif yakıtların geleneksel yakıtların yerini almasına yol açmaktadır. Biyodizel yakıt özelliklerinin dizel yakıtına benzer olması, toksik olmayan, düşük sülfürlü bir yakıt olması sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda kullanımını arttırmaktadır [1-3]. Dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında düşük HC, CO ve is emisyonları ve makul performans değerleri ile biyodizel gelecek vaat etmektedir. Aynı zamanda yapısında oksijen içeriğinin fazla olması içten yanmalı motorlarda yanma ve performans özelliklerini iyileştirmektedir [3-5]. Bunun yanında bitkisel ve hayvansal kaynaklı yağlardan üretilmekte, biyolojik olarak kolayca parçalanabilmektedir. Bahsi geçen biyodizel yakıtlar içinde balık

yağı atık balık parçalarından ve vücut uzuvlarından elde edilebilmektedir [5-10]. Bitkisel esaslı biyodizel yakıtlar ile karşılaştırıldığında hayvansal esaslı biyodizelin setan sayısının daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum yanma sonucu daha fazla ısının açığa çıkmasını sağlamaktadır. Bunun birlikte oksidasyon için yanma ısısı daha az stabildir. Bu nedenle hayvansal esaslı biyodizel yakıtların dizel yakıtı ile karıştırılarak kullanılması daha uygundur. Balık yağı yapı itibari ile çok miktarda doymuş ve doymamış yağ asidi içermektedir. Bunlar arasında yüksek setan içerikli yağ asidi bulunmaktadır. İçten yanmalı motorlarda kullanımı ile ilgili literatürde bazı çalışmalar bulunmaktadır [4-15]. Gharehghani ve ark. [1] dizel ve atık balık yağı yakıt karışımlarının (B25, B50, B75) yanma, performans ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini karşılaştırmışlardır. Deney sonuçlarında atık balık yağı biyodizeli katkısı ile daha fazla silindir basıncı ve daha kısa ısı dağılımı süresinin elde edildiğini göstermişlerdir. Bunun yanında biyodizel yakıt karışımları ile daha stabil bir yanmanın olduğunu çevrimsel farklılıkların azaldığını ifade etmişlerdir. Balık yağı biyodizel karışımı ile termik verimin yaklaşık %2.92 oranında ve aynı zamanda CO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında sırasıyla %7.2 ve %1.9-12.8 oranlarında arttığını gözlemlemişlerdir. Varuvel ve ark. [7] atık balık yağı biyodizelinin tek silindirli bir dizel motorunda 1500 d/d'da denemişlerdir. %80 motor yükünde fren termik verimini dizel, damıtılmamış ve damıtılmış biyoyakıtlar için sırasıyla %29.98, %32.12 ve %32.4 olarak belirlemişler. Sakthivel ve ark. [8] balık yağından üretilen biyodizelin yoğunluk, viskozite, parlama noktası ve setan sayısı gibi özelliklerini araştırmışlar, dizel-biyodizel yakıt karışımlarının yanma, performans ve emisyonlar üzerindeki etkilerini tek silindirli bir dizel motorunda farklı motor yüklerinde incelemişlerdir. NO<sub>x</sub>, CO ve HC emisyonlarında azalma gözlemlemişlerdir. Biyodizel karışımları ile fren termik verimi dizele göre artmıştır. Tutuşma gecikmesi, maksimum ısı dağılımı ve yanma süresinin biyodizel yakıt karışımları ile azaldığını rapor etmişlerdir. Balık yağı biyodizelinin optimizasyonu ile ilgili olarak yapılan çalışmada Hong ve ark. [12] üretim için optimum şartların 120 dakika reaksiyon süresi, 55°C reaksiyon sıcaklığı, 12 metanol/balık yağı molar oranı, %2.0 alkalın katalizör içeriği olduğunu göstermişlerdir. 0.20 mgKOH/g asit değeri, 40°C de 4.60 cSt kinematik viskozite 42.1 MJ/kg ısı değer olarak tespit etmişlerdir. Lin ve Li [16] ham balık yağından elde edilmiş biyodizelin özelliklerini analiz etmişlerdir. Balık yağı biyodizelinin oleik (C18:1) ve palmitik (C16:0) asit içerdiğini göstermişlerdir. Ayrıca önemli miktarda çoklu doymamış yağ asidi içerdiğini belirtmişlerdir. Hossain ve ark. [17] balık yağından üretilen çoklu doymamış biyodizelin oksidasyon stabilitesini iyileştirmek için farklı sentetik antioksidantlar denemişlerdir. Oksidasyon stabilitesi için bütil hidrokinonun en iyi performansı verdiğini görmüşlerdir. Aksoy [18] %50 haşhaşyağı biyodizeli %50 dizel yakıt karışımlarının motor performansı ve emisyonlar üzerindeki etkilerini incelemiştir. Motor torku ve gücünün sırasıyla %4 ve %5.73 azaldığını görmüştür. Bununla birlikte biyodizel yakıt karışımı ile CO ve NO<sub>x</sub> emisyonlarının sırasıyla %15.5 ve %5.9 azaldığını görmüştür. Eryılmaz ve ark. [19] nötrale edilmiş atık kızartma yağını KOH kullanarak optimize etmiştir. Optimum metil ester dönüşüm verimi %25 metanol/yağ oranında, 90 dakika reaksiyon süresi ve 60°C reaksiyon sıcaklığında %90.1 olarak belirlenmiştir. Elde edilen biyodizel tek silindirli bir dizel motorunda denenmiş, motor gücünün ve torkunun dizele göre azaldığını, NO<sub>x</sub> emisyonlarının yaklaşık %18.4 arttığını görmüşlerdir. Behçet [20] balık yağı ve balık yağı biyodizelinin tek silindirli, dört zamanlı bir dizel motorunda denemiş ve dizel yakıtı ile karşılaştırmıştır. Balık yağı biyodizelinin dizel yakıtı ile benzer özelliklere sahip olduğunu görmüştür. Motor torku ve gücünün biyodizel yakıtlar ile dizele göre azaldığını görmüştür. Mrad ve ark. [21] balık yağından biyodizel üretmişler ve tek silindirli bir dizel motorunda 1500 d/d'da denemişlerdir. Saf biyodizel ile yapılan deneylerde NO<sub>x</sub> emisyonlarının arttığını CO, HC ve is emisyonlarının azaldığını görmüşlerdir. Ayrıca yakıt karışımlarındaki biyodizel oranı arttıkça silindir basıncının arttığını, yanma süresinin azaldığını görmüşlerdir. Jiaqiang ve ark. [22] balık yağı biyodizeli yakıt karışımları (B0, B10, B20, B30, B40 ve B50) ile çalışan bir dizel motorunda enjeksiyon zamanlamasının ve basıncının performans ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Karışım yakıtlardaki biyodizel oranı arttıkça motor gücünün azaldığını görmüşlerdir. Özgül yakıt tüketimi ve NO<sub>x</sub> emisyonu biyodizel yakıt karışımları ile artmıştır. Enjeksiyon zamanlaması arttırıldıkça fren gücü ilk önce artmış daha sonra azalma eğilimine girmiştir.

Bu çalışmada balık yağı biyodizeli-dizel yakıt karışımının (B10) yanma ve motor performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmış, dizel yakıtı ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla tek silindirli, dört zamanlı bir dizel motoru 3.75, 7.5, 11.25 ve 15 Nm motor yüklerinde 2200 d/d'da çalıştırılmış, elde edilen sonuçlar dizel yakıtı ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada balık yağı biyodizelinin yanma üzerindeki etkilerini görmek amacı ile detaylı bir yanma analizi ve motor performans değerlendirmesinin yapılması amaçlanmıştır. B10

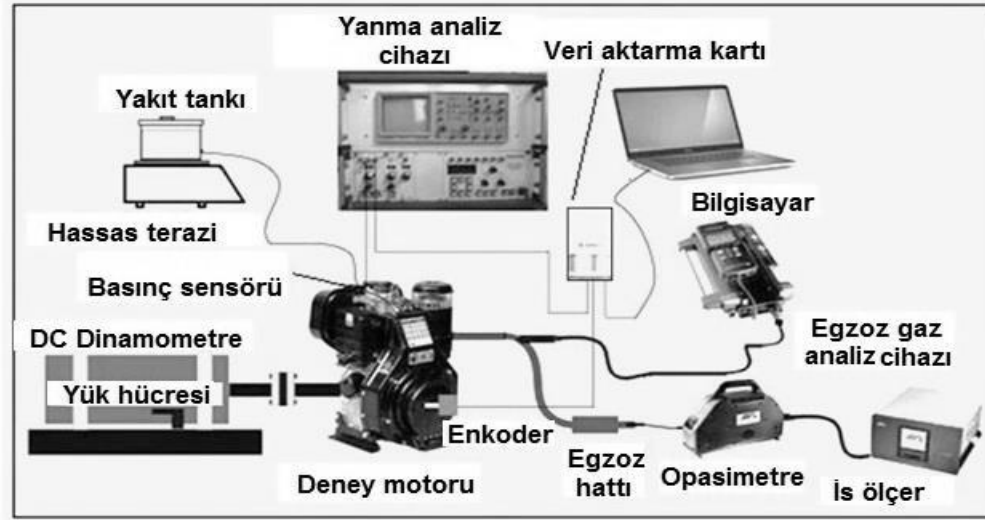
yakıtı ile çalıştırılan dizel motorunda silindir basıncı, ısı dağılımı, yanma süresi, tutuşma gecikmesi, termik verim ve özgül yakıt tüketimi gibi parametrelerin değişimi deneysel olarak araştırılmıştır.

## 2. DENEY DÜZENİĞİ VE PROSEDÜRÜ (EXPERIMENTAL SETUP AND PROCEDURES)

Testler 2200 d/d'da 3.75, 7.5, 11.25 ve 15 Nm motor yüklerinde dizel ve B10 yakıtları ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümsel farklılıkların ortadan kaldırılması için motor deneylere başlanmadan önce çalışma sıcaklığına getirilmiş ve motor yağ sıcaklığı 85 °C'de sabitlenmiştir. Deneylerde teknik özellikleri Tablo 1'de görülen tek silindirli direkt enjeksiyonlu dizel motoru kullanılmıştır. Deney düzeneğinin görünümü Şekil 1'de görülmektedir. Deney motorunun yüklenebilmesi için Cussons P8160 marka DC dinamometre kullanılmış, deney motoru dört farklı motor yükünde test edilmiştir. Dinamometre şaftından 0.25 m ilerisinde bulunan yük hücresi ile motor yükü tespit edilmiştir. Kullanılan DC dinamometre 4000 d/d'da 10 kW güç absorbe edebilmektedir. Motor torku ve motor devri dinamometre kontrol panelinden kontrol edilebilmektedir. Silindir basıncı su soğutmalı AVL 8QP500c marka piezoelektrik basınç sensörü ile ölçülmüştür. Deney motorunun krank miline bir turda 1000 pals üreten enkoder bağlantısı yapılmıştır. Enkoder ile üst ölü nokta (ÜÖN) ve motor devri ölçülebilmektedir. Silindir basınç verileri 0.36 krank açısı (°KA) aralıklarla tespit edilmiştir. Silindir basınç sinyalleri enkoderden alınan motor devir bilgisine göre alınarak bilgisayara aktarılmıştır. Bu amaçla alınan analog silindir içi basınç sinyalleri National Instruments USB 6259 veri toplama kartı kullanılarak dijital verilere dönüştürülmüş ve bilgisayara kaydedilmiştir. Silindir basınç verileri matlab dilinde hazırlanan bir programda işlenerek yanma karakteristikleri, imep, termik verim gibi değişkenler belirlenerek grafiklere aktarılmıştır.

**Tablo 1.** Deney motorunun teknik özellikleri (Technical properties of test engine)

Model	Antor / 6LD400
Motor tipi	Direkt enjeksiyon, doğal emişli
Silindir sayısı	1
ÇapxKurs [mm]	86 x 68
Silindir hacmi [cm <sup>3</sup> ]	395
Sıkıştırma oranı	18:1
Maksimum güç [kW]	5.4 @ 3000 d/d
Maksimum tork [Nm]	19.6 @ 2200 d/d
Yanma odası geometrisi	ω tipi
Yakıt enjeksiyon sistemi	PF Jerk tipi yakıt pompası
Enjeksiyon nozulu	0.24 [mm] x 4 delik x 160°
Nozul açılma basıncı [bar]	180
Püskürtme zamanlaması[°KA]	24 ÜÖN'dan önce



**Şekil 1.** Deney düzeneğinin şematik görünümü (Schematic view of the experimental setup)

Deneylerde dizel ve hacimsel olarak %10 balık yağı biyodizeli %90 dizel (B10) karıştırılmış ve kullanılmıştır. Tablo 2’de deney yakıtlarının özellikleri görülmektedir.

**Tablo 2.** Deney yakıtlarının özellikleri (Properties of test fuels) [22-27]

	Dizel	Balık yağı biyodizeli
Yakıtın alt ısıl değeri [kJ/kg]	45343	37580
Yoğunluk [kg/m <sup>3</sup> @ 15°C]	842	866
Kinematik viskozite [cst @ 40°C]	2.44	4.4
Parlama noktası [°C]	67	142
Setan sayısı	49	56
Sülfür [ppm]	428	26

Deneylerde CO, CO<sub>2</sub>, NO egzoz emisyonlarının ölçülebilmesi için Tablo 3’de özellikleri verilen Testo marka egzoz gaz analizörü kullanılmıştır.

**Tablo 3.** Testo egzoz gaz analiz cihazının özellikleri (Properties of the testo exhaust gas analyzer)

Yanma ürünleri	Çalışma aralığı	Doğruluk
O <sub>2</sub> [vol.%]	0–25	±2 mV
CO [ppm]	0–10000	5 ppm (0–99 ppm)
CO <sub>2</sub> [vol.%]	0–50	±0.3 vol.% +1 mV.% (0–25)
HC [%]	0.01–4	<400 ppm (100–4000 ppm)
NO <sub>x</sub> [ppm]	0–3000	5 ppm (0–99 ppm)

İs emisyonları ise AVL Di-Smoke 4000 is ölçer ile ölçülmüştür. Tablo 4’de AVL Di-Smoke 4000 is ölçerin teknik özellikleri verilmektedir.

**Tablo 4.** AVL Di-Smoke 4000 is ölçerin teknik özellikleri (Technical specifications of the VL Di-Smoke 4000 smoke meter)

Analiz cihazı	AVL DiSmoke 4000	
Ölçüm metodu	Kısmi akışlı	
	Opasite	K değeri
Çalışma aralığı	0-100 %	Doğruluk
Doğruluk [ $m^{-1}$ ]	0-99,99	0,01

Isı dağılımı hesabında termodinamiğin birinci yasasına bağlı Eş (2.1) kullanılmıştır. Isı dağılımı hesabı yapılırken silindir içi dolgunun ideal gaz olduğu ve gaz kaçaklarının olmadığı kabulleri yapılmıştır. Bu eşitlikte  $dQ$ ,  $dQ_{heat}$  ve  $d\theta$  ısı dağılımı, silindir cidarlarına transfer edilen ısıyı ve krank açısını  $k$  ise özgül ısıların oranını göstermektedir [28-30].

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{k}{k-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k-1} V \frac{dP}{d\theta} + \frac{dQ_{heat}}{d\theta} \quad (2.1)$$

Vuruntu yoğunluğu Eş. (2.2) ile hesaplanmıştır.  $P_{max}$  ve  $T_{max}$  maksimum basınç ve sıcaklıkları,  $\gamma$  politropik indeksi,  $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{max}$  maksimum basınç artış oranını,  $\beta$  ise basınç dalgalanmaları ile pik basınç artış oranı arasındaki ilişkiyi veren ayar parametresini göstermektedir.

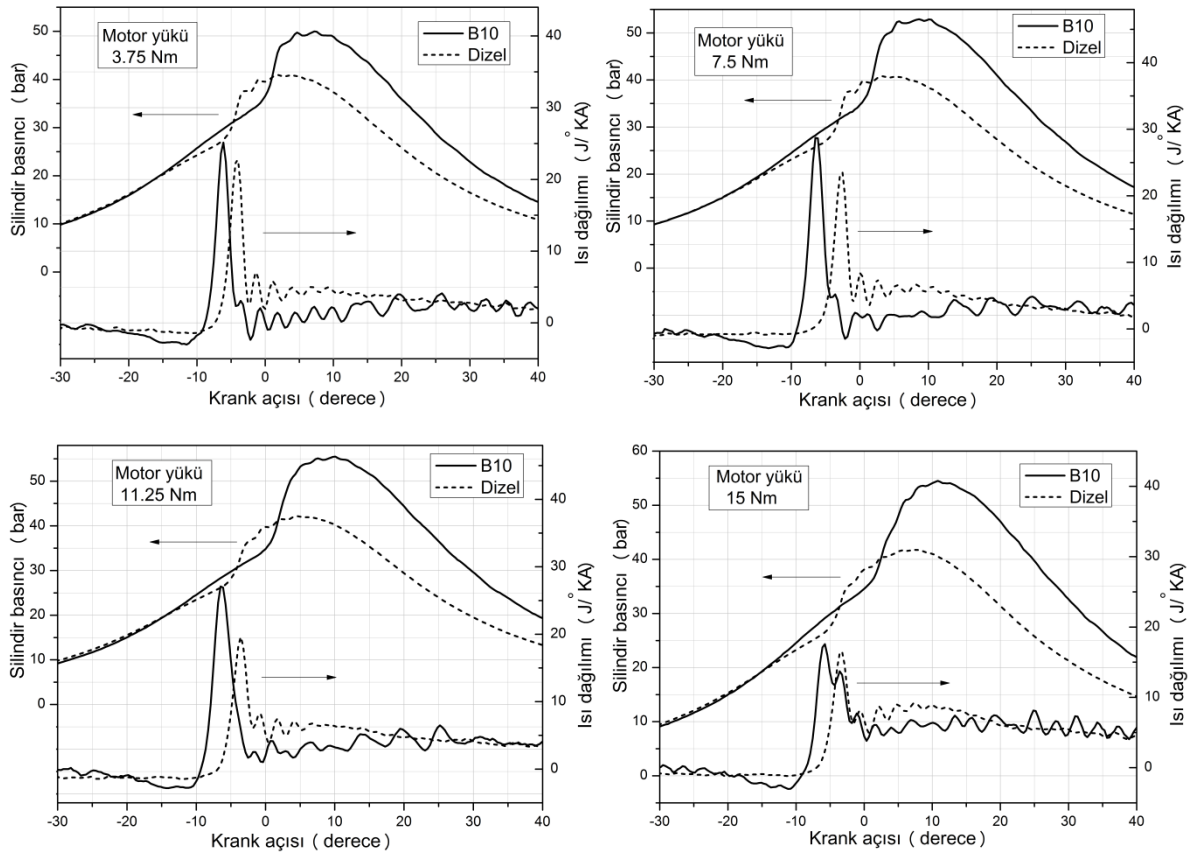
Dizel motorlarda tutuşma gecikmesi devrini sınırlamaktadır. Tutuşma gecikmesi süresi arttıkça vuruntu eğilimi artış göstermektedir. Vuruntulu çalışmada maksimum silindir basıncı ve sıcaklığı ani olarak artar ve motor parçalarının ömrü kısılır [30-32].

$$RI = \frac{1}{2\gamma} \frac{\left(\beta \left(\frac{dP}{dt}\right)_{max}\right)^2}{P_{max}} \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_{max}} \quad (2.2)$$

Isı dağılımı ile yanma başlangıcı ve yanmanın bitişi tespit edilebilir. Yapılan deneylerde yanma başlangıcı krank açısına göre ısı dağılımının negatif değerden pozitif değere geçiş yaptığı krank açısı belirlenerek tayin edilmiştir. Krank açısına göre püskürtme avansı ile yanma başlangıcı arasındaki zaman tutuşma gecikmesini vermektedir. Bu çalışmada yanma süresi olarak silindire alınan karışımın %10’unun yanmasını tamamladığı nokta ile %90’ının yanmasının tamamladığı nokta arasındaki süre hesaplanarak belirlenmiştir.

### 3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

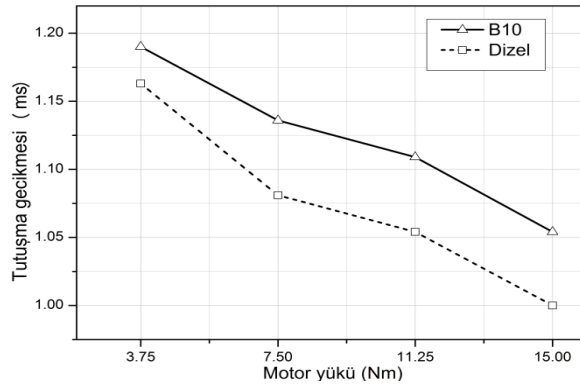
Balık yağı biyodizelinin silindir basıncı ve ısı dağılımı üzerindeki etkileri Şekil 2’de görülmektedir. Biyodizelin yüksek yoğunluk ve viskozite değerlerinden dolayı bu çalışmada yüksek oranda balık yağı miktarı yerine düşük miktarda balık yağı biyodizeli dizel yakıtı ile karıştırılmıştır. Yüksek oranda biyodizel ilave edildiğinde karışım yakıtın viskozite, yoğunluk değerleri artmakta, kalorifik enerji miktarı azalmaktadır. Bu durumda yanma karakteristikleri olumsuz etkilenmekte, motor performansı azalabilmektedir. Özellikle fazla biyodizel ilavesi enjeksiyon karakteristiklerini kötüleştirmekte, yakıtın atomizasyonu zorlaşmaktadır. Bu durumda yanma odasında homojen bir karışım sağlanamamakta ve yanma oranı azalmaktadır. Şekil 2 incelendiğinde tüm motor yüklerinde B10 yakıtı ile silindir basıncının ve ısı dağılımının dizele göre arttığı görülmektedir. Biyodizelin yüksek viskozitesinden dolayı kütleli olarak püskürtülen yakıt miktarı artmakta daha fazla ısı enerjisi ortaya çıkmaktadır. Bunun yanında motor yükü arttıkça yanmanın rötara alındığı görülmektedir. Motor yükü arttıkça maksimum silindir basıncının daha geç elde edildiği görülmektedir. Balık yağı biyodizelinin ısıl enerjisinin dizele göre düşük olmasına rağmen setan sayısının ve viskozitesinin yüksek olmasından daha fazla silindir basıncının ve ısı dağılımının elde edilmesine neden olmaktadır.



Şekil 2. Silindir basıncı ve ısı dağılımı değişimi (In-cylinder pressure and heat release rate variations)

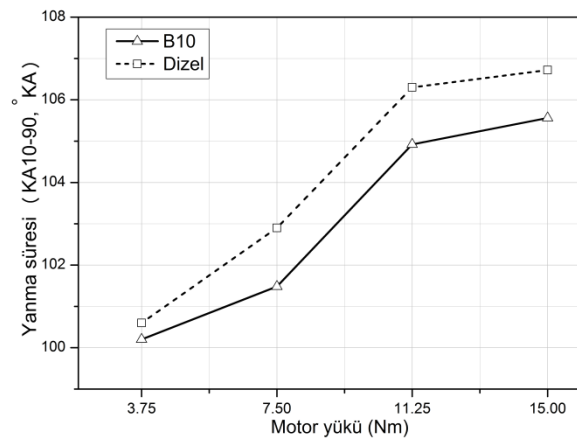
Şekil 3’de dizel ve B10 yakıtları ile belirlenen tutuşma gecikmesi değişimleri görülmektedir. Motor yükü arttıkça silindire sürülen karışım miktarı ve sıkıştırma zamanı sonunda basınç ve sıcaklık daha fazla artmaktadır. Bunun sonucunda yanma sonu elde edilen silindir içi sıcaklık daha fazla yükselmektedir. Yanma odasındaki bu yüksek sıcaklık yakıtın püskürtülmesinin ardından ilk alev çekirdeğinin oluşmasına kadar geçen süreyi azaltmaktadır. Daha sıcak bir yanma odasında oksidasyon reaksiyonları daha kolay gerçekleşebilmekte ve yük arttıkça tutuşma gecikmesi süresi azalmaktadır. Biyodizel yakıtının

yoğunluğunun ve viskozitesinin dizele göre daha fazla olması sonucu yakıtın fiziksel olarak parçalanması, atomizasyonu ve buharlaşarak tutuşmaya başlaması gecikmektedir.



Şekil 3. Tutuşma gecikmesi (Ignition delay)

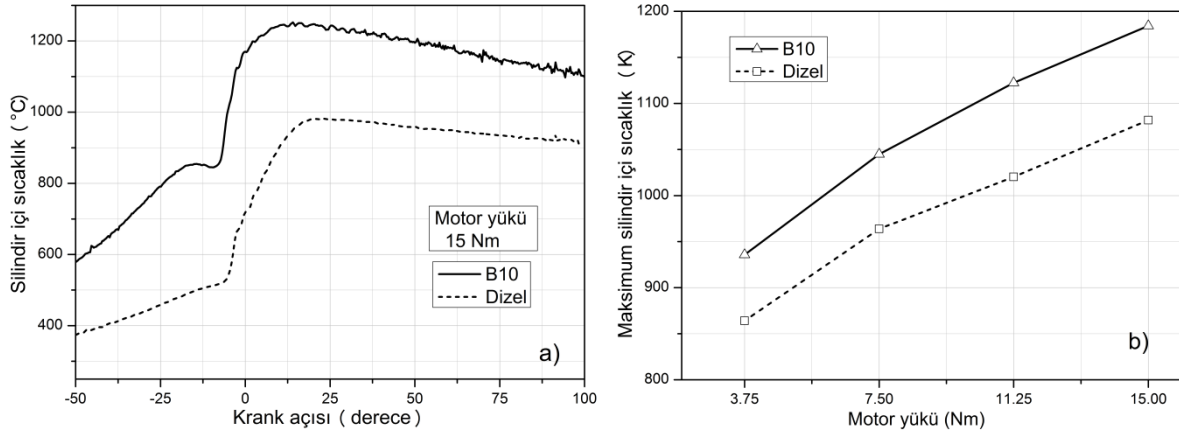
Şekil 4'de yanma süresinin motor yüküne bağlı değişimlerini göstermektedir. Kümülatif ısı dağılımı normalizasyon işlemine tabi tutulduğunda karışımın yanma kademeleri (KA10, KA90) belirlenebilmektedir. Bu çalışmada yanma süresi olarak karışımın %10'nun yanmasını tamamladığı krank açısı ile %90'ının yanmasını tamamladığı krank açısı arasındaki fark (KA10-90) olarak belirlenmiştir. Motor yükü arttıkça yanmayı tamamlamak isteyen karışım miktarı artmaktadır. Bu nedenle daha fazla karışımın yanmasını tamamlaması için daha fazla süreye ihtiyaç duyulmaktadır. Yük arttıkça yanma süresi uzamaktadır. B10 yakıtı ile yanma süresi azalmaktadır. Biyodizelin setan sayısının yüksek olması sonucu oksidasyon reaksiyonları iyileşmekte yanma daha kısa sürede tamamlanabilmektedir. Ayrıca balık yağı biyodizelinin daha fazla oksijen içermesi kimyasal yanma reaksiyonlarını hızlandırmakta ve buda yanma süresini kısaltmaktadır. 15 Nm motor yükünde dizel ve B10 yakıtları ile yanma sırasıyla 106.72 °KA ve 105.56 °KA sürmüştür.



Şekil 4. Yanma süresi (Combustion duration)

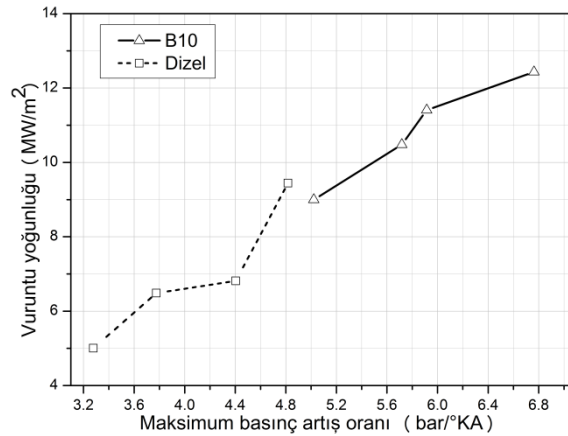
Şekil 5'de B10 ve dizel yakıtları ile elde edilen silindir içi sıcaklık ve maksimum silindir içi sıcaklık değişimleri görülmektedir. 15 Nm motor yükünde krank açısına göre hesaplanan silindir içi sıcaklık değerleri B10 yakıtı ile artış göstermektedir. Benzer şekilde yanma sonu elde edilen maksimum silindir içi sıcaklık B10 yakıtı ile elde edilmiştir. Maksimum silindir içi sıcaklık 15 Nm yükte elde edilmiştir. Balık yağı biyodizelinin yüksek oksijen içeriği ve setan sayısına bağlı olarak sıcaklık artmaktadır. Aynı zamanda silindire birim hacimde püskürtülen yakıt miktarı dizele göre daha yüksek olduğundan açığa çıkan ısı ve

yanma odası sıcaklığı artmaktadır. Maksimum silindir içi sıcaklık dizel ve B10 yakıtları ile 15 Nm yükte sırasıyla 1081.8 K ve 1184.2 K olarak belirlenmiştir.



Şekil 5. Silindir içi sıcaklık değişimleri (In-cylinder temperature variations)

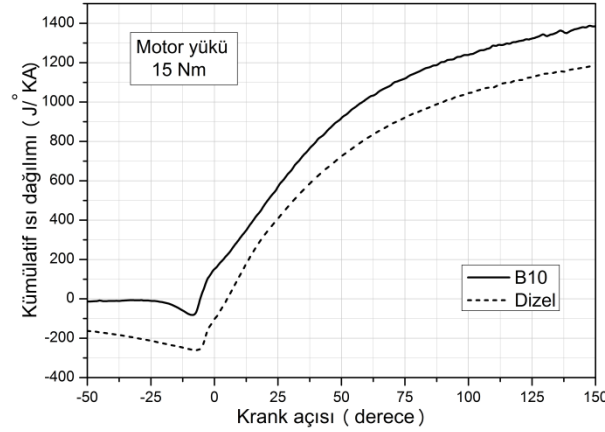
Vuruntu, dizel motorlarda artan tutuşma gecikmesine bağlı olarak tüm karışımın yanmaya bir anda iştirak etmesi sonucu meydana gelen ani patlamadır. Bu durum motor parçalarına ve yataklara gelen yükü arttırmakta ve yağ boşluğunu kapatarak motora zarar verebilmektedir. Aynı şekilde basınç artış oranı birim krank açısı başına piston üzerine uygulanan basıncı ifade etmektedir. Vuruntu yoğunluğu motor devrine, maksimum basınç artış oranına bağlı olarak hesaplanabilmektedir. Şekil 6 maksimum basınç artış oranına bağlı vuruntu yoğunluğu değişimini göstermektedir. Beklendiği gibi motor yükü arttıkça basınç artış oranı ve vuruntu yoğunluğu artmaktadır. Daha fazla karışımın yanması sonucu açığa çıkan ısı enerjisi artış göstermekte, silindir basıncı aniden yükselmektedir. Şekil 6'dan açıkça görülmektedir ki B10 yakıtı ile vuruntu yoğunluğu ve maksimum basınç artış oranı dizele göre daha yüksektir. Balık yağı biyodizelinin yüksek yoğunluğu, oksijen içeriği ve setan sayısına bağlı olarak yanma oranının arttığını ifade etmek mümkündür. Sonuçta dizele göre maksimum basınç artış oranı B10 ile artmaktadır. Bu noktada düşük miktarlardaki balık yağı biyodizel oranının tercih edilmesi vuruntunun kontrol edilmesi ve yanma özelliklerinin iyileştirilmesinde önemli rol oynamaktadır.



Şekil 6. Maksimum basınç artış oranına bağlı vuruntu yoğunluğu değişimi (Knock density variation due to maximum pressure increase rate)

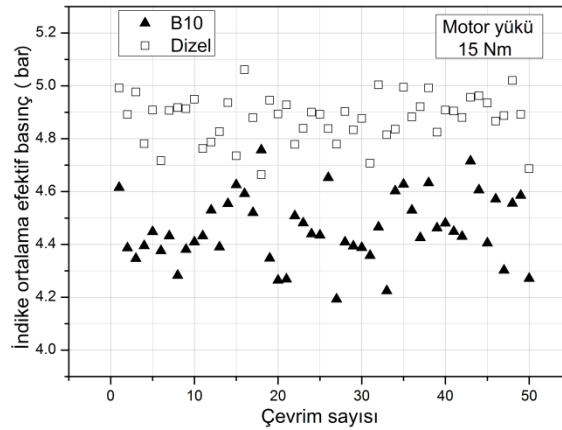


Şekil 7’de krank açısına bağlı kümülatif ısı dağılımının değişimi görülmektedir. Kümülatif ısı dağılımı krank açısına bağlı yanma odasında açığa çıkan ısı enerjisinin toplamı olarak ifade edilebilir. Ayrıca kümülatif ısı dağılımı normalize edilerek karışımın yanma aşamaları hakkında analiz yapılabilir. 15 Nm motor yükünde B10 yakıtı ile daha fazla ısının açığa çıktığını söylemek mümkündür. Bu durum biyodizelin yüksek oksijen içeriği, setan sayısı ve makul ısıl enerjisine bağlı olarak meydana gelmektedir.



Şekil 7. Kümülatif ısı dağılımı (Cumulative heat release rate)

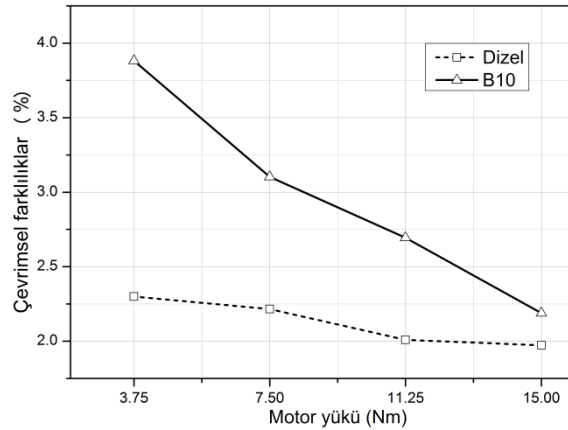
İndike ortalama efektif basınç bir çevrim boyunca piston üzerine etki ettirilen basınçların ortalamasını ifade eden motor performans parametrelerinden biridir. Şekil 8’de 15 Nm motor yükünde ardışık 50 çevrime bağlı indike ortalama efektif basınçları (imep) göstermektedir. 15 Nm motor yükünde silindire alınan enerji miktarı artış göstermektedir. Yanma sonu elde edilen basınç ve sıcaklık artmaktadır. Bu noktada imep değişimleri için 15 Nm motor yükü tercih edilmiştir. Şekil 8 incelendiğinde dizel yakıtı ile elde edilen imep değerlerinin B10 yakıtına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Dizel yakıtının ısıl enerjisinin balık yağı biyodizeline göre yüksek olması imep değerlerinin artmasına neden olmaktadır.



Şekil 8. İndike ortalama efektif basınç değişimi (Indicated mean effective pressure variation)

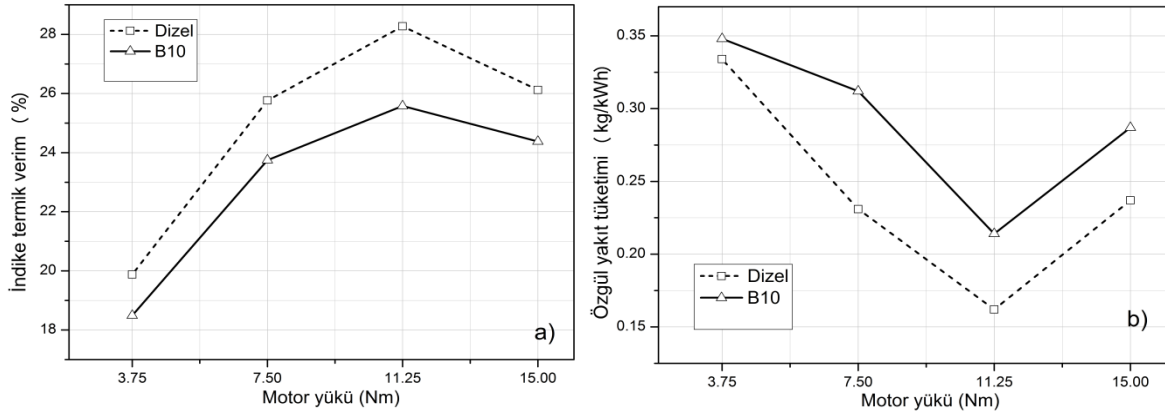
Silindire alınan karışımın kompozisyonu ve yanma odasındaki termodinamik şartlar çevrimden çevrime değişmektedir. Supap sisteminden, segmanlardan veya kapak contasından sızan karışım kütlesi ve egzoz zamanı sonunda yanma odasından dışarı atılmayan art egzoz gazları elde edilen silindir içi basıncı ve sıcaklığı değiştirmektedir. Sonuçta çevrimden çevrime farklılıklar görülmektedir. Bu durum motorun performans sürekliliğini ve yanma stabilitesini kötüleştirilmektedir. Bu nedenle yanma analizinde çevrimsel

farklılıkların tespiti önem arz etmektedir. Literatürde stabil bir yanma işleminde çevrimsel farklılıkların % 10'u geçmemesi istenmektedir [28-30]. Kararlı yanma sürecinde bu durum göz önüne alınmaktadır. Şekil 9 motor yüküne göre indike ortalama efektif basınca bağlı çevrimsel farklılıkların değişimini göstermektedir. Maksimum çevrimsel farklılıklar en düşük motor yükünde görülmüştür. Motor yükü arttıkça silindire alınan karışım miktarı artmakta, buna bağlı elde edilen silindir basıncı ve sıcaklık yükselmektedir bu durum oksidasyon reaksiyonlarının iyileşmesine çevrimden çevrime gözlenen farklılıkların azalmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte dizel yakıtı ile daha stabil bir yanmanın gerçekleştiğini söylemek mümkündür. Balık yağı biyodizelinin yüksek viskozitesi ve yoğunluğu enjeksiyon esnasında atomizasyon sürecini kötüleştirir. Bu durum tutuşma gecikmesi süresinin uzamasına dizel yakıtına göre daha kararsız bir yanmanın gerçekleşmesine sebep olabilmektedir. Sonuçta B10 yakıtı ile dizele göre çevrimsel farklılıklar artmaktadır.



Şekil 9. Çevrimsel farklılıklar (Cyclical variations)

Şekil 10'da motor yüküne bağlı indike termik verim ve özgül yakıt tüketiminin değişimi görülmektedir. Termik verim yakıt ile silindire sürülen ısı enerjisinin ne kadarının efektif güce dönüştüğünün bir ifadesidir. Maksimum indike termik verim her iki yakıt için 11.25 Nm motor yükünde elde edilmiştir. 11.25 Nm motor yükünde gaz kaçaqları ve ısı kayıpları en aza inmekte daha fazla ısı, efektif güce dönüştürülebilmektedir. 11.25 Nm motor yükü aynı zamanda yakıt enerjisinin en ekonomik kullanıldığı yüke karşılık gelmektedir. Şekil 10-a'da görüldüğü gibi 11.25 Nm motor yükünde dizel yakıtı ile %28.27 indike termik verim elde edilirken B10 yakıtı ile %9.51 azalma görülmüş ve %25.58 termik verim hesaplanmıştır. 11.25 Nm motor yükünden sonra karışımdaki yakıt konsantrasyonu artmakta ve yakıt, oksidasyon için yanma odasında yeterli oksijeni bulamamaktadır. Bunun sonucunda her iki test yakıtı için termik verim azalmaktadır. Dizel yakıtının ısı enerjisinin yüksek olmasına bağlı olarak termik verim B10 yakıtına göre artmaktadır. Şekil 10-b motor yüküne bağlı özgül yakıt tüketiminin değişimini göstermektedir. Her iki grafik incelendiğinde maksimum termik verimin elde edildiği yükte minimum özgül yakıt tüketimi belirlenmiştir. Özgül yakıt tüketimi motorun ürettiği birim güç başına birim zamanda tüketilen yakıt miktarını ifade etmektedir. Benzer şekilde 11.25 Nm motor yükünde dizel ve B10 yakıtları ile sırasıyla 0.162 kg/kWh ve 0.214 kg/kWh özgül yakıt tüketimi hesaplanmıştır. Dolayısıyla dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında aynı motor gücüne ulaşabilmek için daha fazla B10 yakıtı tüketilmelidir. 15 Nm motor yükünde ise yanma odasında oksijen konsantrasyonunun azalmasına bağlı olarak yanma kötüleşmekte özgül yakıt tüketimi artmaktadır. Bunun yanında biyodizelin yüksek viskozite ve yoğunluk değeri göz önüne alındığında silindire kütürece daha fazla yakıt püskürtülmektedir. Bu durum dizele göre yakıt tüketiminin artmasına neden olabilmektedir.



**Şekil 10.** a) İndike termik verim (Indicated thermal efficiency) b) Özgül yakıt tüketimi (Specific fuel consumption)

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada dizel ve balık yağı biyodizeli yakıt karışımı (B10) tek silindirli, dört zamanlı doğal emişli bir dizel motorunda farklı motor yüklerinde (3.75, 7.5, 11.25 ve 15 Nm) ve motorun maksimum tork devri olan 2200 d/d'da test edilmiş, sonuçlar dizel yakıtı ile karşılaştırılmıştır. Balık yağı biyodizelinin yanma ve performans üzerindeki etkilerini görmek amacı ile detaylı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarında silindir basıncı ve ısı dağılımının B10 yakıtı ile arttığını göstermiştir. Tutuşma gecikmesi süresi ve yanma süresi B10 yakıtı ile yüksek viskozite ve yoğunluk değerlerinden dolayı artmıştır. İndike termik verim dizele göre %9.51 azalarak %25.58 olarak belirlenmiştir. Özgül yakıt tüketimi ise dizel ile karşılaştırıldığında B10 yakıtı ile 11.25 Nm motor yükünde yaklaşık %32 artarak 0.214kg/kWh olarak belirlenmiştir. Biyodizelin yüksek oksijen içeriğine bağlı olarak yanma sonunda silindir içi sıcaklığın dizele göre arttığı görülmüştür. Deney sonuçları incelendiğinde balık yağı biyodizelinin ısı enerjisinin dizele yakın olması, setan sayısının dizelden fazla olması makul yanma ve performans değerlerinin elde edilmesini sağladığı görülmektedir. Aynı zamanda biyodizelin oksijen içeriğinin fazla olması kimyasal oksidasyon reaksiyonlarının iyileşmesini sağlamaktadır. Yapılan çalışma balık yağı biyodizeli-dizel yakıt karışımının (B10) yanma üzerinde olumlu etkileri olduğunu ve dizel motorlarda hiçbir değişiklik yapılmadan verimli bir şekilde yakıt olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. Ghareghani, M. Mirsalim, R. Hosseini, Effects of waste fish oil biodiesel on diesel engine combustion characteristics and emission, Renewable Energy 101 (2017) 930-936.
- [2] Veltman MK, Karra PK, Kong SC. Effects of Biodiesel Blends on Emissions in Low Temperature Diesel Combustion. SAE 2009-01-0458.
- [3] B.-F. Lin, J.-H. Huang, D.-Y. Huang, Experimental study of the effects of vegetable oil methyl ester on DI diesel engine performance characteristics and pollutant emissions, Fuel 88 (2009) 1779-1785.
- [4] T.D. Durbin, J.M. Norbeck, Effects of biodiesel blends and Arco EC-diesel on emissions from light heavy-duty diesel vehicles, Environ. Sci. Technol. 36 (2002) 1686-1691.
- [5] F. Wu, J.Wang, W. Chen, S. Shuai, A study on emission performance of a diesel engine fueled with five typical methyl ester biodiesels, Atmos. Environ. 43 (2009) 1481-1485.

- [6] E. Jiaqiang, M., Phama, D. Zhaoc, Y., Denga, D., Lea, W., Zuoa, H., Zhua, T., Liua, Q., Penga, Z., Zhanga, Effect of different technologies on combustion and emissions of the diesel engine fueled with biodiesel: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80 (2017) 620–647.
- [7] E. G., Varuvel, N., Mrad, F. Aloui, M., Tazerout, Experimental analysis of fuel from fish processing industry waste in a diesel engine, *Clean Techn Environ Policy* (2017) 19:1099–1108.
- [8] G., Sakthivel, G., Nagarajan, M., Ilangkumaran, A., Bajirao Gaikwad, Comparative analysis of performance, emission and combustion parameters of diesel engine fuelled with ethyl ester of fish oil and its diesel blends, *Fuel* 132 (2014) 116–124.
- [9] Mofijur M, Masjuki HH, Kalam MA, Atabani AE, Shahabuddin M, Palash SM, et al. Effect of biodiesel from various feedstocks on combustion characteristics, engine durability and materials compatibility: a review. *Renew Sust Energy Rev* 28 (2013):441–455.
- [10] Singh SP, Singh D. Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: a review. *Renew Sust Energy Rev* 14 (2010):200–216.
- [11] Lin CY, Li RJ. Fuel properties of biodiesel produced from the crude fish oil from the soapstock of marine fish. *Fuel Process Technol* 90 (2009):130–136.
- [12] I. Kwon Hong, J. W., Park, S. B., Lee, Optimization of fish-oil-based biodiesel synthesis, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 19 (2013) 764–768.
- [13] Behçet R., Performance and emission study of waste anchovy fish biodiesel in a diesel engine, *Fuel Processing Technology*, 92, 1187-1194, 2011.
- [14] N.J. Miller, S.M. Mudge, *Spill Science & Technology Bulletin* 4 (1) (1997) 17.
- [15] A.I. Mohamed, A.S. Hussein, S.J. Bhatena, Y.S. Hafez, The effect of dietary menhaden, olive, and coconut oil fed with three levels of vitamin E on plasma and liver lipids and plasma fatty acid composition in rats. *The Journal of Nutritional Biochemistry* 13 (7) (2002) 435-441.
- [16] C., Lin, R., Li, Fuel properties of biodiesel produced from the crude fish oil from the soapstock of marine fish, *Fuel Processing Technology*, 90 (2009) 130-136.
- [17] M. Hossain, M. Toba, Y. Abe, T., Mochizuki, Y. Yoshimura, Effect of Antioxidant Species on Oxidation Stability of Fish Oil Biodiesel, *Journal of the Japan Petroleum Institute*, 53, (6), (2010) 75-80.
- [18] F. Aksoy, The effect of opium poppy oil diesel fuel mixture on engine performance and emissions, *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, 8 (1), (2011) 57-62.
- [19] Eryilmaz, T., Aksoy, F., Aksoy, L., Bayrakceken, H., Aysal, F.E., Sahin, Seda, Y., M. Kadir., Process Optimization For Biodiesel Production From Neutralized Waste Cooking Oil and The Effect Of This Biodiesel On Engine Performance, *CT&F - Ciencia, Tecnologia y Futuro*, 8,121-127, 2018.
- [20] R. Behçet, A comparative study on anchovy fish oil, anchovy fish oil methyl ester and diesel fuels in a diesel engine, *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research* 27(2): (2011) 313-322.
- [21] N., Mrad, E. G., Varuvel, M., Tazerout, F., Aloui, Effects of biofuel from fish oil industrial residue-Diesel blends in diesel engine, *Energy* 44 (2012) 955-963.

- [22] Jiaqiang, E., MinhHieu P., Yuanwang D., Tuannghia N., VinhNguyen D., DucHieu L., Wei Z., Qingguo P., Zhiqing Z., Effects of injection timing and injection pressure on performance and exhaust emissions of a common rail diesel engine fueled by various concentrations of fish-oil biodiesel blends, *Energy* 149 (2018) 979-989.
- [23] Can, Ö., Öztürk, E., Solmaz, H., Aksoy, F., Çinar, C., Yücesu, H.S., Combined effects of soybean biodiesel fuel addition and EGR application on the combustion and exhaust emissions in a diesel engine, *Applied Thermal Engineering* 95, 115–124, 2016.
- [24] Agarwal, D., Kumarb, L., Agarwal, A.K., Performance evaluation of a vegetable oil fuelled compression ignition engine, *Renewable Energy*, 33, 1147–1156, 2008.
- [25] Misra, RD. Murthy, MS. Straight vegetable oils usage in a compression ignition engine:a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14:3005-3013, 2010.
- [26] Singh, SP. 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*, 14:200-216, 2010.
- [27] Karmakar, A., Karmakar, S., Mukherjee, S., Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production. *Bioresource Technology*, 101:7201-7210, 2010.
- [28] J.B.Heywood, *Internal Combustion Engines Fundamentals*, (1988) McGraw-Hill, USA.
- [29] H. Zhao, *HCCI and CAI Engines for the Automotive Industry*, (2007) Woodhead Publishing Limited, England.
- [30] R. Stone, *Introduction to Internal Combustion Engines*, (1999) Macmillan Press Ltd, ISBN 0-333-74013- 0, Tesseraux, I.; Toxicoll, Lett., 2004, 149, 295-300.
- [31] M.M. Andreae, W.K. Cheng, T.Kenney, J. Yang, 2007, On HCCI Knock, SAE Paper 2007-01-1858.
- [32] C. Wildman, R.J. Scaringe, W. Cheng, On the Maximum Pressure Rise Rate in Boosted HCCI Operation, SAE paper (2009) 2009-01-2727.
- [33] J. Eng, Characterization of pressure waves in HCCI combustion, SAE paper (2002) 2002-01-2859.