



MİKROALG VE MİKROALG – ETANOL KARIŞIMLARI KULLANIMININ MOTOR PERFORMANS VE EMİSYONLARI ÜZERİNE BİR İNCELEME

Göneç DURAN*, Muhammed DÖNMEZ** ve Cumali İLKİLİÇ***

*Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 16059 Nilüfer, Bursa
gonenccuran@uludag.edu.tr, ORCID: 0000-0001-8545-7621

**Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 16059 Nilüfer, Bursa
muhammeddonmez@uludag.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9046-4989

***Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 23100 Elâzığ
cumilkilic@firat.edu.tr, ORCID: 0000-0001-5651-7621

(Geliş Tarihi: 17.03.2022, Kabul Tarihi: 04.04.2023)

Öz: Sanayileşme, taşıt sayısı ve popülasyonda olan artışla beraber, artan fosil yakıt kullanımı enerji gereksinimi ve emisyon gibi sorunlara sebep olmaktadır. Bu çalışmada içten yanmalı motorlarda kullanılacak biyoyakıt üretimi, mikroalg yağı, sodyum metilat katalizörü eşliğinde metanol ile transesterifikasyon yapılarak gerçekleştirilmiştir. Günümüz trend çalışmalarında yer alan mikroalgler ekilebilir tarım alanlarının kullanılmasına gerek duymayan büyüme ortamı ve iyi hammadde/yağ dönüşüm oranından dolayı tercih edilmiştir. Ayrıca elde edilen biyoyakıtın, farklı oranlarda etanol ile karışım elde edilerek yakıtların motor performansı ve emisyonlar üzerine olan etkisi incelenmiştir. Deneyler tam yükte 1000-3000 d/dk motor devir aralığında gerçekleştirilmiştir. Motordaki maksimum tork 1800 d/dk elde edilirken en yüksek güç ise 2600 d/dk'da elde edilmiştir. %15 oranında etanol ile karıştırılmış biyodizel için dizele göre 1800 d/dk'da torkta %0.86 artış elde edilirken, 2600 d/dk'da güçte %0.42 azalma olmuştur. Mikroalg biyoyakıtı ve etanol karışımli yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan emisyon değerleri dizel yakıt kullanımına göre oldukça düşmüştür. Bu bağlamda insana ve çevreye zararlı emisyonlar, özellikle küresel ısınmaya sebep olan karbondioksit emisyonu önemli ölçüde azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: etanol, mikroalg, biyodizel, chlorella protothecoides, metil ester.

AN INVESTIGATION ON ENGINE PERFORMANCE AND EMISSIONS OF USING MICROALGAE AND MICROALGAE-ETHANOL BLENDS

Abstract: Increasing use of fossil fuels with the increase in industrialization, number of vehicles and population causes problems such as energy requirement and emissions. In this study, biodiesel production was carried out by transesterification using microalgae oil, methanol, and sodium methylate as catalyst which can be used in internal combustion engines. In today's trend studies of Microalgae has been preferred because of its growth environment that does not require the use of arable land and its good raw material/oil conversion ratio. In addition, the effect of fuels on engine performance and emissions was investigated by obtaining a mixture of obtained biodiesel and ethanol at different rates. Experiments were carried out at full load in the engine speed range of 1000-3000 rpm. The maximum engine torque is obtained at 1800 rpm, while the maximum power is obtained at 2600 rpm. For biodiesel mixed with 15% ethanol, there was a 0.86% increase in torque at 1800 rpm compared to diesel, and a decrease of 0.42% in power at 2600 rpm. The emission values resulting from the combustion of biodiesel and ethanol blended fuels have decreased considerably compared to the use of diesel fuel. Thus, emissions harmful to humans and the environment, especially carbon dioxide emissions that cause global warming, have decreased significantly.

Keywords: ethanol, microalgae, biodiesel, chlorella protothecoides, methyl ester.

SEMBOLLER

TSE	: Türk Standartları Enstitüsü	C ₂ H ₅ OH	: Etanol
EN	: Avrupa Birliği Standartları	EGS	: Egzoz Gazı Sıcaklığı
ISO	: Uluslararası Standart Organizasyonu	ÖYT	: Özgül Yakıt Tüketimi
BG	: Beygir güç	HC	: Hidrokarbon
NaOH	: Sodyum Hidroksit	CO	: Karbonmonoksit
KOH	: Potasyum Hidroksit	CO ₂	: Karbondioksit
NaOCH ₃	: Sodyum Metilat	O ₂	: Oksijen
		IAK	: Işık Absorban Katsayısı

GİRİŞ

Dünya genelinde fosil yakıtlarının ciddi miktardaki azalışıyla beraber ani ve olağan fiyat değişimleri yeni ve yenilenebilir enerji kaynak arayış çalışmalarına yönlendirmektedir. Genellikle taşıma araçlarında kullanılan enerjilerin günden güne azalmasına karşılık alternatif çözümler gerekmektedir. Hibrit ve elektrikli araçların verimli kullanımını yaygınlaştırma ve geliştirme çalışmalarıyla birlikte, petrol kullanan araçlarda kompleks değişikliklere gidilmeden kullanılabilir uygulamalar bulunmaktadır. En yaygın uygulama olan biyodizel yakıtı; yağlardan elde edilmektedir. Bu bağlamda, yakın geçmişin yağ keşfi olan mikroalglerden elde edilen ve temel gıda olarak kullanılmayan bu yağ ile ilgili çalışmalar büyük önem arz etmektedir (Çakmak ve Özcan, 2021; Yeşilyurt vd, 2018). Mikroalglerin yüksek oranda yağ içeriğinden dolayı verimli biyoyakıt üretimleri sağlanabilmektedir. Ekonomik ve yenilenebilir oluşundan dolayı enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi için pek çok çalışmalar yapılmaktadır (Pandey vd, 2014; Chisti, 2007).

Birçok bitki türlerinden farklı olarak mikroalgler doğal koşullarda suda ve karada yaşayabilirler. Kolay, hızlı üreyebilen ve fotosentez yapan pek çok çeşitli türleri bulunmaktadır. Mikroalgleri üretmek için ekin toprakları ve tatlı sular gibi özel ortamlar gerekmemektedir (Harun vd, 2011; Nagarajan vd, 2017). Ortalama hasat miktarı yüksek verimli olup küçük ölçekli optimum alanlarda büyük hacimde yetiştirilmektedir (Mota vd, 2022; Oni vd, 2022).

Mikroalglerin en cazip olan özelliklerinden biri ise yağ olarak depo edebilen, sentez sonucu oluşan ürünleridir (Ianda vd, 2022; Rajak vd, 2022). Mikroalgler dizel motorlarda organik nitelik taşıyan ve çevreye duyarlı biyoyakıt olarak kullanılabilir (Chhandama vd, 2021; Oni vd, 2021). %90'dan fazla yağ elde edilebilen mikroalgler, fotobiyoreaktör veya küçük arazilerde üretilebilmesi önemli bir hammadde potansiyeli oluşturmaktadır. Bu bağlamda çoğu bitkiden daha verimli biyoyakıt üretilme yeteneğine sahiptir (Rajak vd, 2022; Ge vd, 2022; Li vd, 2022). Mikroalg kullanımı posa artığı oluşturmamaktadır.

Gıda, ek takviye ürün, gübreleme ve kozmetik gibi endüstrilerde de kullanılmaktadır (Ganesan vd, 2022). Ayrıca klorofil taşıyan mikroalgler, fotosentez ile yüksek oranda CO₂ kullanarak küresel ısınmayı ve karbon ayak izi atıklarını önlemede büyük ölçekte destek olmaktadır (Jakob vd, 2022; Viguera vd, 2016; Farooq vd, 2022).

Biyoyakıtlar, hammadde olarak pek çok doğal yağların transesterifikasyon ile reaksiyonu sonucunda üretilen, yenilenebilir bir yakıt çeşididir (Rasim vd, 2015; İlkılıç vd, 2011; Wong vd, 2022). Ev tipi ve endüstriyel atık

yağların geri dönüşümünden de büyük ölçekte üretilmektedir (Kass vd, 2022; Karthikeyan ve Prathima, 2016). Önemli bir değişikliğe gidilmeden direkt olarak biyodizel ya da dizel-biyodizel karışımları kullanılmaktadır (Wu vd, 2019; Kontses vd, 2019; Lebedevas vd, 2021; Ushakov ve Lefebvre, 2019).

Etanol, bitkilerden elde edilen alkol çeşidi olup kimyasal formülü C₂H₅OH'tır (Ladanai ve Vinterback, 2009; Yılmaz ve Sanchez, 2012). Ulaştırma endüstrisinde de kullanılan etanolün, yakıt karışımlarına eklenebilmesi için en az %99.5 saflıkta, sudan uzaklaştırılmış olarak kullanılması gerekmektedir (Kwanchareon vd, 2007; Lui vd, 2016).

Biyoyakıtlar günümüz ve yakın gelecek için büyük avantaj sağlamaktadır (Hussan vd, 2013; Jafari vd, 2021). Biyodizel çalışmalarında termik verimliliğin yüksek olması da önem arz etmektedir (Çelik vd, 2016; Şahin ve Durgun, 2016). Biyoyakıtların sorunsuz bir şekilde verimli çalışması için yanma parametreleri üzerine pek çok çalışma yapılmaktadır (Gongora vd, 2022; Yesilyurt vd, 2020, Jacob vd, 2007, Alkidas, 2007).

Biyoyakıt kullanım oranının artırılması, petrol tüketimi ve çevre kirletici gazları azaltıcı etkisiyle hibrit motor geçiş süreci planlamasında büyük önem arz etmektedir.

Bu çalışma ile ülkemizin petrol kullanım ihtiyacını ve dışa bağımlılığı azaltacak çevre dostu yerli üretimi desteklemek hedeflenmiştir. Mevcut dizel motorlarında tasarımsal bir değişiklik yapılmadan mikroalglerin yakıt olarak kullanılması ve TS EN 14214 standardında biyoyakıt üretilip ve belirli oranlarda etanol ile karışımlarının bir dizel motorda kullanılabilirliği araştırılmıştır.

MATERYAL VE METOD

Bu bölümde mikroalglerden yüksek verimli biyoyakıtı geliştirmek için kullanılan üretim yöntemi ve prosesinden bahsedilmiştir. Ayrıca mikroalg biyoyakıtının uygunluğu ve değerlerinin tespiti için yapılan akredite analiz deney sonuçları yer almaktadır. Son ürün olan biyoyakıt ile (ve) biyoetanol karışım yakıtlarının, egzoz emisyon deneyleri ve motor performans ölçümlerinde kullanılan test düzeneği yer almaktadır. Bu çalışmada mikroalg türü olan *Chlorella protothecoides*'lerden (Heterotrofik) elde edilen yağdan transesterifikasyon yöntemi kullanılarak biyoyakıt üretilmiştir. Mikroalg yağının yağ asidi profili Tablo 1'de verilmiştir. Palmitik yağ asidi oranının yüksek oluşu metil ester üretiminin kapasitif verimliliğine işaret etmiştir. Su barındırmayan alkali katalizör ve metanol kullanılarak transesterifikasyon reaksiyonu Şekil 1'de gösterilen düzenek ile gerçekleştirilmiştir. Mikroalg yağından elde edilen biyoyakıt eldesi ester oranını arttırmak amacıyla

çeşitli varyasyon numuneleri analiz edilmiştir. Yüksek verimli transesterifikasyon reçetesi ar-ge laboratuvarlarında geliştirilerek son ürün biyoyakıt üretimi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Mikroalg yağ asit profili

Yağ Asidi Profili (%)			
Yağ Asidi	C Bileşimi	Kimyasal Formülü	Yüzdesel Oranı (%)
Stearik	C 18:0	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	2
Palmitik	C 16:0	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	51
Diğer	-	-	1
Oleik	C 18:1	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	39
Linoleik	C 18:2	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	7



Şekil 1. Transesterifikasyon düzeneği

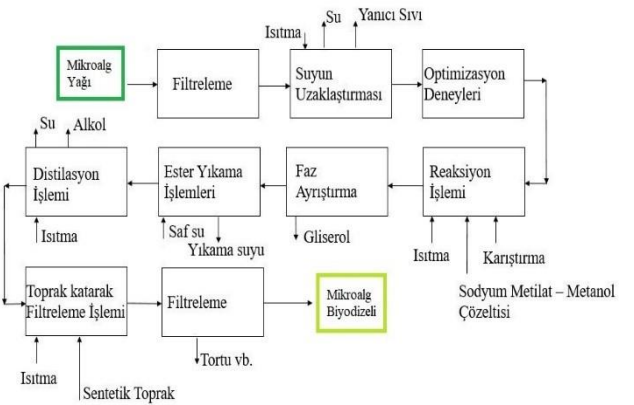
Bu çalışmada kullanılan mikroalg yağının özellikleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Mikroalg yağ özellikleri

Organik Kaynak:		
Chlorella protothecoides / Heterotrofik Mikroalgler		
Yetiştirme Yöntemi:		
Yüksek Teknoloji Piramid Fotobiyoreaktörü		
Özellikler	Yağ Değerleri	Birimi
Viskozite	3,6	mm ² /s
Isıl Değer	45.8	MJ/kg
Su	140	mg/kg
İyot	67	mg. iyot/100g
Karbon Kalıntısı	0,1	%(m/m)
Fosfor	0,0008	%(mg/kg)
Asit Sayısı	0,2	mg KOH/g
Sülfür	2	mg/kg
Renk	Yeşilimtrak / Açık Sarı	-
Görünüş	Berrak	-
Yoğunluk	912	kg/m ³
Özgül ağırlık	0,91 – 0,92	-

Toplam Kirlilik	2	mg/kg
Peroksit Değeri	0,5	-
Parlama Noktası	220	°C

Endüstriyel ve de geleneksel katalizörlerden olan, zor çözülen sodyum hidroksit (NaOH) ve diğer taraftan daha fazla oranda potasyum hidroksit (KOH) kullanımı çeşitli maliyetler ve sorunlar içermektedir. Gaz kromatografisi analizlerinde ester sayısı sonuçlarının yüksek çıkması farklı bir katalizör olan sodyum metilatı (NaOCH₃) cazip hale getirmiştir. NaOCH₃ kullanılmasıyla faz ayrılma süresi yaklaşık olarak %80 oranında azalmıştır. Yapılan ön deneylerde en uygun yağ/alkol oranı, reaksiyon sıcaklığı, süresi ve katalizör oranı tespiti ile son ürün biyoyakıt üretimi gerçekleştirilmiştir. Mikroalglerden biyodizel üretimi Şekil 2'deki aşamalara göre yapılmıştır.



Şekil 2. Biyodizel üretim akış şeması

Filtrasyon işleminde kullanılan kil toprak adımı, çeşitli safsızlıkları (büyük hücreli yağ asitleri, aromatik bileşikler vb.) gözeneklerinde absorban edebilme yeteneği sayesinde geleneksel biyodizel üretim akışına dahil edilmiştir. Transesterifikasyon işleminin uygulama literatürüne ve endüstriye, verimli biyodizel eldesi için katkı sağlayacak bu adım Şekil 3'te gösterilen distilasyon işleminden hemen sonra %0.3 oranda katılmıştır. Bu adımla yakıt berraklaşmış olup metil ester oranı iyileştirilmiş ve temiz yakıtın saflığı artırılmıştır.

TSE standart deney metotlarına göre; ester içeriği, iyot ve asit sayısı tayini, sabun ve su tayini, yoğunluk ve viskozite tayini, setan sayısı, kirlilik ve parlama noktası tayinleri, soğuk filtre tıkanma noktasının tayini (SFTN), akma-bulutlanma noktası tayini, ısıl değer ve bakır şerit korozyon standart deney metotları uygulanmış ve akredite sonuçlar elde edilmiştir.



(a) (b)

Şekil 3. (a) Kil toprak eklenmesi, (b) Aktif metil esterleşme

Motor performans ve emisyon testleri TS1231 ve TS ISO 3930 standartları içeriğine göre deney düzeneği kurulmuştur. Elektrikli dinamometre kullanılarak bilgisayar kontrollünde motor testleri gerçekleştirilmiştir. Tek silindirli dizel motorun stabil çalışma sıcaklık aralığına ulaşması için dizel yakıtı kullanılmıştır. Deney yakıtlarının tam yükte 400 devir artırılarak 1000-3000 d/dk'da emisyon ve performans etkileri incelenmiştir.

Motor testlerinde, torku 83 Nm, maksimum gücü 26 kW ve maksimum devri 5000 d/dk olan T-T Elektric marka dinamometre kullanılmıştır. Motor testleri standart kapsamında tolerans belirsizlikleri aralığında gerçekleşmiştir. Hata payına göre çoklu tekrarlanmıştır. Bu kapsamda, tekrarlı testler sonuçlarının aritmetik ortalamaları alınmıştır. M100 yakıtı, mikroalg yağından elde edilen saf biyoyakıtı temsil etmektedir. %99,8 saflıkta, hacimsel olarak %5, %10 ve %15 oranlarında etanol ile karıştırılmıştır. Deneyde kullanılan yakıtlar Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Mikroalg biyoyakıtı ve karışım yüzdeleri

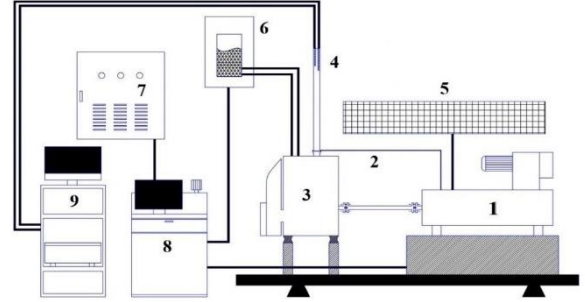
Yakıtlar	Mikroalg Biyodizel Oranı	Etanol Oranı	Dizel Yakıt Oranı
M100	%100	-	-
ME15	%85	%15	-
ME10	%90	%10	-
ME5	%95	%5	-
Dizel	-	-	%100

Tablo 4. Yakıtların termo-fiziksel özellikleri

Özellikler	Dizel	Etanol	M100	ME5	ME10	ME15
Saflık (% v/v)	-	>99,8	98,9	98,94	99	99,05
Setan Sayısı	min 51	13	57,3	56,1	55,8	54,7
Isıl Değer (MJ/kg)	42,7	29,7	40,9	40,7	40,5	40,2
Yoğunluk 15°C'de (kg/m3)	820-845	789	880	877,1	874,2	871,4
Viskozite 40 °C'de (mm ² /s)	2-4,5	1,13	4,35	4,024	3,698	3,378

Deney yakıtlarının özellikleri TSE EN 14214 standartlarına uygun aralıklarda olup mikroalg biyoyakıtı ve mikroalg-etanol karışımıyla elde edilen yakıtların termo-fiziksel özellikleri Tablo 4'te sunulmuştur.

Test düzeneğinin Şekil 4'te şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 4. Deney düzeneği şematik görünüm

Şekil 4'teki şematik görünümde sırasıyla; Dinamometre, EGS ölçer, Dizel motor, Emisyon ölçüm problemleri, Rezistans, Yakıt haznesi, Güç ünitesi, Test ve ölçüm kontrol ünitesi, Emisyon test cihazı yer almaktadır.

Yapılan motor performans testlerinde güç ve tork, ayrıca özgül yakıt tüketimi, EGS (egzoz gazı sıcaklığı) kontrol panelinde anlık olarak hesaplanmıştır. Emisyonları testlerinde HC, CO, CO₂, IAK (ışık absorban katsayısı) ve is yoğunluğu ölçülmüştür.

Tek silindirli dizel motoru olan Antor Lombardini 4 LD 640 deney motorunda testler yapılmıştır (İnternet 1, 2022). Test düzeneğinde kullanılan tek silindirli dizel motorun teknik spesifikasyonları Tablo 5'te listelenmiştir.

Tablo 5. Motorun teknik özellikleri

Özellik	Değer
Sıkıştırma oranı	17:1
Maksimum güç	13 BG
Soğutma sistemi	Hava Soğutmalı
Silindir hacmi	638 cm ³
Maksimum motor devri	3000 d/dk
Püskürtme sistemi	Direkt
Çap x Strok	95 x 90 mm
Silindir sayısı	1
Maksimum tork (1800 d/dk)	3,5 Kg.m

Egzoz gazları emisyonları için TS ISO 3930 standardına göre kalibreli Mobydic 5000 cihazı kullanılmıştır (İnternet 2, 2022). Bu cihazın teknik özellikleri Tablo 6'da sunulmuştur. Egzoz gazı sıcaklık değişimlerini belirlemek amacıyla motorun egzoz çıkışı ile egzoz tahliye bağlantı arasına bir ısı çift bağlanmıştır.

Tablo 6. Egzoz gazı emisyon test cihazı teknik özellikleri

Ölçüm	Birim	Ölçüm Değerleri	Hassasiyet
HC	ppm	0-20000	1
CO	% Vol	0-10	0.02
CO ₂	% Vol	0-20	0.02
Partikül	mg/m ³	0-1000	0.01
IAK	1/m	0-20	0.01

Deneylerde net kalibrasyon, çevre şartları, gözlem, veri işleme ve çoklu test cihazlarından dolayı çeşitli hatalar ve genel bariz belirsizlikler olmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada Holman (2012) tarafından önerilen belirsizlik analizi kullanılmıştır. Tablo 7'de belirsizlik analizi sonuçları görülmektedir.

Tablo 7. Hesaplanan sonuçların belirsizlikleri

Hesaplanan değerler	Birim	Belirsizlik (%)
Motor Torku	Nm	±1.64
Motor Gücü	kW	±1.8
Yakıt Tüketimi	g/s	±1.6
Özgül Yakıt Tüketimi	g/kWh	±2
Dinamometre - Yük	g	±1.15
Süre	s	±0.5
Devir Göstergesi	rpm	±5
Egzoz gazı sıcaklığı	°C	±2
İs koyuluğu	1/m	±0.1
CO	ppm	±2
CO ₂	%	±4
HC	ppm	±2

Bu tablodaki belirtilen sonuçlara göre, deney düzeneğinin genel belirsizliği ±%2.1-2.6 kayıplar aralığında hesaplanmıştır. Test belirsizliği için kabul edilebilir olup, sistemin genel belirsizliği de kabul edilebilir sınıır içerisinde.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Elde edilen biyoyakıtın, gerçek anlamda verimli bir biyodizel oluşunun tespiti için metil ester tayini yapılmaktadır. Bu bağlamda mikroalg biyoyakıtı Petrol Analiz Laboratuvarında TSE EN 14214 standardına akredite uygunluğu onaylanmıştır.

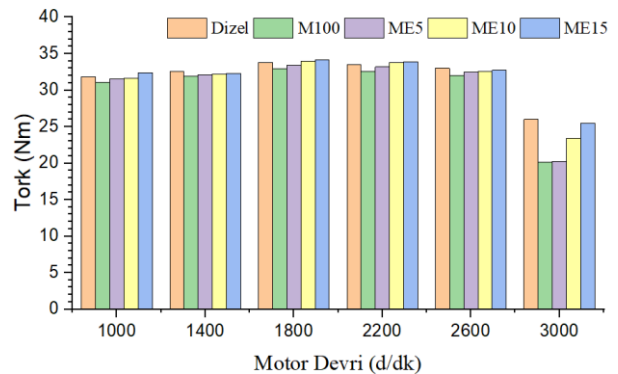
Mikroalg biyoyakıtının sonuç raporu Tablo 8'de verilmiştir. Bu çalışmada geliştirilen reçetenin, biyoyakıtın %98.9 gibi yüksek verimli ester içeriğine sahip oluşu yeni yapılacak ve geliştirilecek benzer çalışmalar adına literatüre önemli bir katkı sağlamıştır.

Ayrıca deney yakıtlarının yanması sonucu ortaya çıkan emisyonlar ve egzoz gazı sıcaklıkları ölçülmüştür. Test sonuçları çoklu yapılan testlerin aritmetik ortalaması alınarak elde edilmiştir.

Bütün deney yakıtları kullanımında 1800 d/dk'da maksimum tork noktasına varılmıştır. Tam yükte farklı devirlerde motor torku Şekil 5'te verilmiştir. Bu devirde maksimum tork %85 mikroalg biyodizel + %15 etil alkol olan ME15 yakıtında 33.8 Nm ölçülürken dizel yakıt için motor torku 34.2 Nm ölçülmüştür.

Motor devirlerinde elde edilen motor torku değerlerinin ortalaması alındığında dizele göre M100 kullanımında %4.6, ME5 yakıtında %3.7 ve ME15 kullanımında %0.8, ME15'de %0.86 azalış ölçülmüştür.

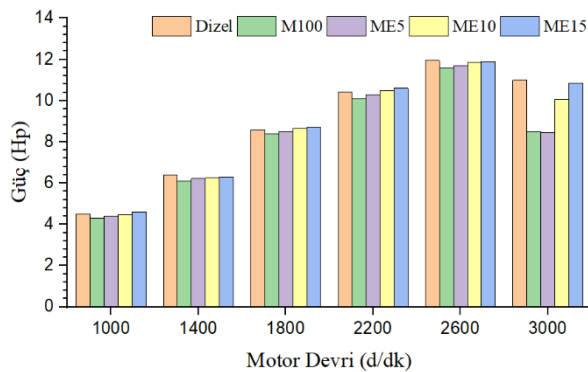
Motor devrinin 2600 d/dk'dan 3000 d/dk'ya çıkmasıyla mekanik verim değişimi meydana gelmektedir. Sürtünme kayıplarının artması ve volümetrik verimin azalması ile torkta düşüş olmaktadır. Bu düşüş dizele göre daha yüksek viskoziteye sahip olan mikroalg biyodizeli için daha fazla olmuştur. Mikroalg biyoyakıtına etanol ilave edilmesiyle yakıtın viskozitesinin azalmaktadır. Dolayısıyla motor devri 2600 d/dk'dan 3000 d/dk'ya çıktığında motor torkundaki düşüş azalmaktadır.

**Şekil 5.** Tam yükte motor torku değişimleri

Tablo 8. Mikroalg biyodizeli TS EN 14214 analiz sonuçları

Özellik	Kullanılan DeneY Yöntemi	Sınır Değerleri TS EN 14214		Ölçüm Değeri	Birim
		En az	En çok		
Ester içeriği	TS EN 14103	96.5	-	98.9	% (m/m)
Viskozite (40°C)	TS 1451 EN ISO 3104	3.5	5	4.35	mm ² /s
Yoğunluk (15°C)	TS EN ISO 12185	860	900	880	kg/m ³
Akma Noktası	TS 1233 ISO 3016	-	-	-18	°C
Isıl Değer	TS 1740	35	-	40.9	MJ/kg
Toplam Kirlilik	TS EN 12662	-	24	4.2	mg/kg
Parlama noktası	TS EN ISO 3679	101	-	182	°C
Su içeriği	TS 6147 EN ISO 12937	-	500	182.76	mg/kg
Setan Sayısı	TS EN 15195	51	-	57.2	-
Asit sayısı	TS EN 14104	-	0.5	0.21	mg KOH/g
İyot sayısı	TS EN 14111	-	120	103	g. iyot/100 g
Sabun Tayini	TS 5038	-	-	0	≈ % (m/m)
Bulutlanma Noktası	TS 2834 EN 23015	-	-	-11	°C
SFTN	TS EN 116	-	+5 Yaz -15 Kış	-16	°C
Bakır şerit korozyonu	TS 2741 EN ISO 2160	Sınıf 1		1A	Derece

Motor gücü Şekil 6'da gösterilen motor torku, dizel yakıtına kıyasla mikroalg biyoyakıtı, ME5 ve ME10 yakıtları için azalırken, ME15 yakıt kullanımında ise yakın sonuçlar gözlemlenmiştir.

**Şekil 6.** Tam yükte motor gücü değışimleri

Etanol oranı biyoyakıt karışımında arttıkça güç değerleri artmıştır. DeneY yakıtları için en yüksek motor güçleri 2600 d/dk'da elde edilmiştir. Bu devirde deneY yakıtları için elde edilen güç değerleri ME15'te 11.9 BG ortalamasında iken; ME10 yakıt karışımı kullanımında 11.87 BG ölçülmüştür. Yakıt ME5 yakıtı kullanımında 11.7 BG ve M100 deneY yakıtında ise 11.6 BG'dir. Dizel kullanımında bu durum 11.95 BG'dir.

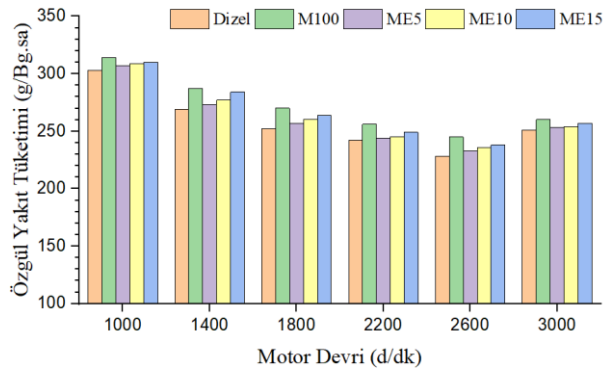
Dizel'e göre M100 biyoyakıtının düşük ısıl değeri ve yüksek viskozitesinden dolayı yanma kötüleştirmiştir. Yüksek saflığa sahip etanol katılması karışımın parlama noktasını ve ısıl değeri azaltmıştır. Bu duruma karşılık, yakıt karışımında etanol miktarı arttıkça yoğunluk ve viskozite azaldığından iyi bir atomizasyon elde edilmekte olup ve buna bağlı olarak enjektörden daha verimli püskürtme sağlanabilmektedir (Zaharin vd, 2017; Gongora vd, 2022).

Yüksek setan sayısına sahip biyoyakıtta etanol ilave edilerek setan sayısı azalmış ve tutuşma gecikme süresi ise artmıştır. Bu ilaveyle viskozite azaltılarak atomizasyonda iyileşme ve elde edilen homojenize karışım sağlanmıştır.

Karışımındaki oksijen zenginliği ile tutuşma gecikmesi kısalmıştır. Ayrıca bu sayede yanma verimi artırılmış ve güç artışı sağlanmıştır.

Motor gücü, karışımının oranlarına bağlı olarak etanol ilavesiyle dizel kullanımdaki efektif güce yaklaşmıştır (Jafari vd, 2021; Zafarin vd, 2017; Wong vd, 2022). Motorun tam yükte ve 1000-3000 d/dk'da özgül yakıt tüketimleri Şekil 7'de görülmektedir. Deney devir aralığında M100 yakıtının 1000 d/dk'da özgül yakıt tüketimi (ÖYT) 314 g/BG.h olmuştur. 2600 d/dk'da tüm yakıtlar için ÖYT en az seviyelere ulaşmıştır.

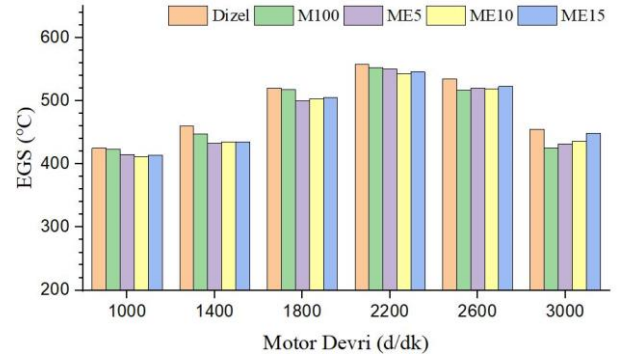
Motor deney devirlerinde elde edilen özgül yakıt tüketimleri dizele göre M100'de %5.6, ME5 yakıtında %2.46, Yakıt ME10'da %3.1 ve ME15 kullanımında ise %3.7 fazladır. Mikroalg biyodizeline etanol ilavesi ile ısıl değerine karşılık yakıtın viskozitesi iyileşmiştir (Noorollahi vd, 2018; Neel vd, 2008). Özgül yakıt tüketimi motorun devrine ve etanol oranına bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 7. Özgül yakıt tüketimi

Artan motor devrine bağlı olarak egzoz gazı sıcaklığında artış olmakta ve 2200 d/dk'dan sonra da sıcaklık düşmektedir. Maksimum egzoz gazı sıcaklığı dizel kullanımında 558 °C, en düşük sıcaklık ise M100 için 426 °C 3000 d/dk'da ölçülmüştür.

Saf mikroalg biyodizeline etanol eklenerek elde edilen yakıt karışımlarının oksijen yoğunluğunun zengin olmasından dolayı tutuşma gecikmesi süresi kısılırken, termal verimi artmıştır (Al-lwayzy ve Yusaf, 2017). Şekil 8'de egzoz gazı sıcaklık değişimleri verilmiştir.



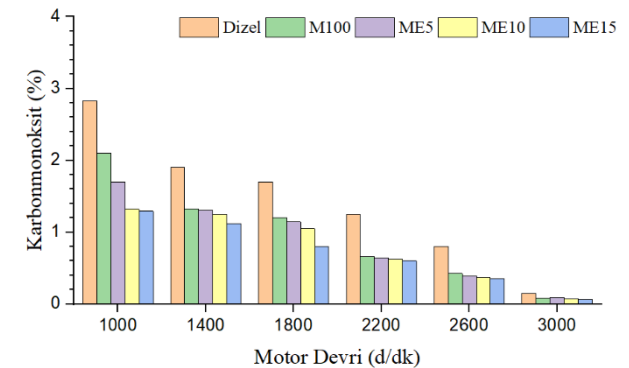
Şekil 8. Egzoz gazı sıcaklık değişimleri

Kısmi yanma sonucu oluşan, canlıya ve çevreye zararlı olan karbonmonoksit (CO) emisyonlarının değişimleri Şekil 9'da verilmiştir.

Hidrokarbonların (HC) oksijenle (O₂) oksidasyonu yeterli seviyede olmayınca tam yanma olmamakta ve CO emisyonu oluşmaktadır (Zui vd, 2011; Ushakov ve Lefebvre, 2017). CO oluşumunun en önemli nedeni hava-yakıt karışımının yeteri düzeyde homojen olmaması veya bölgesel farklılıkların kısmi yanmaya sebep olmasından dolayı olduğu bilinmektedir. Fakir karışimli yanmalarda ise CO miktarı az olmaktadır (Rajak vd, 2022; Subbaiah vd, 2010).

Maksimum torkun elde edildiği devirde dizele göre CO emisyonlarında M100 için %30 Yakıt ME5'te %32.5, ME10'te %42 ve ME15 yakıtında %52 oranlarında azalma meydana gelmiştir.

Mikroalg biyodizelin moleküler yapısında oksijen bulunması ve setan sayısı verimli bir yanmaya işaret etmiş, dizel yakıtına göre CO emisyonlarında düşüşe neden olmuştur. Etanol bünyesinde daha fazla oksijen içermesi ve daha az karbon bulunmasından dolayı, karışımda etanol oranı arttıkça CO emisyonlarında azalma olmuştur.



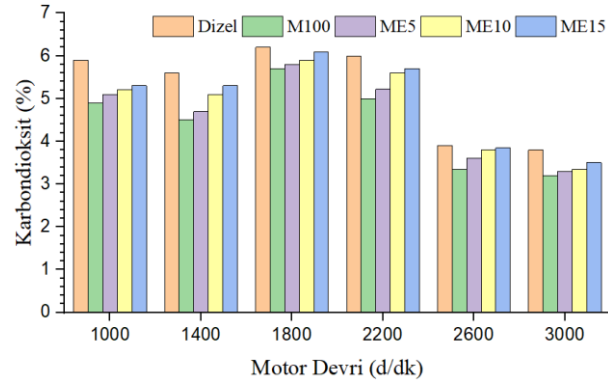
Şekil 9. CO emisyon değişimleri

Hidrokarbonların tam yanmasıyla birlikte karbondioksit (CO₂) gazı oluşmaktadır. Karbondioksit gazının atmosferde belli bir seviyeden fazla olması sera etkisi gösterdiğinden küresel ısınmaya sebep olarak iklim

değişimi üzerinde büyük bir etkiye sebep olmaktadır (Oni vd, 2021; Viguera vd, 2016).

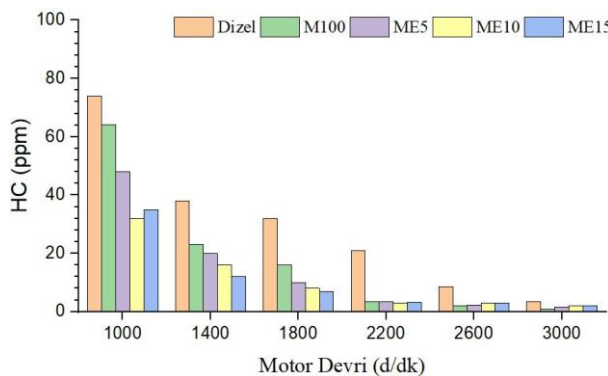
Motor testlerinde kullanılan deney yakıtlarının CO₂ emisyon değişimleri Şekil 10'daki grafikte gösterilmiştir. Her test devrinde M100 ve etanol katkılı karışımlar için karbondioksit emisyonları dizel yakıtı kıyasla düşük çıkmıştır. Mikroalg biyodizeli kullanımında CO₂ emisyonları önemli derecede düşüş olsa da etanol ilavesi ile CO₂ emisyonları artmıştır (Farooq vd, 2022). Ancak bu artışa rağmen etanol karışımı biyodizelin karbondioksit emisyonları dizel yakıtın emisyon değerlerinden kıyasla daha düşük sonuçlar vermiştir.

Mikroalg biyodizeli %98.9 metil esterinde yaklaşık ağırlıkça %71 karbon, %12 hidrojen ve %17 oksijen bulunmaktadır. Dizel ise yaklaşık %85 ve üssü karbon içeriğine sahiptir. Deney yakıtların kullanılmasıyla dizel yakıtı kıyasla mikroalg biyodizelinde daha az CO ve CO₂ emisyonları oluşmuştur.



Şekil 10. CO₂ emisyon değişimleri

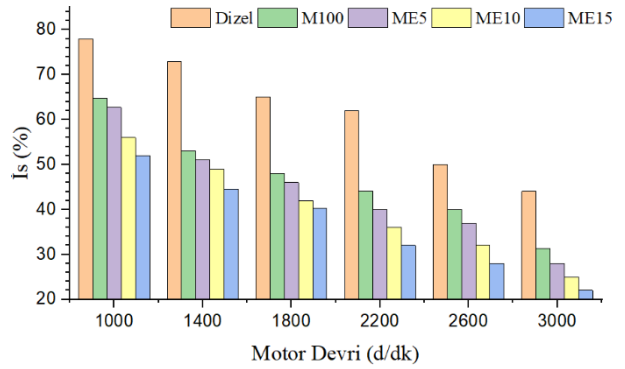
Silindirde hava-yakıt oranının bölgesel olarak yer yer fakir ve zengin olmasından dolayı oksidasyon reaksiyonu yavaşlamakta dolayısıyla yanma tamamlanmamaktadır (Jacob vd, 2022; Ge vd, 2022). Silindir ve piston arasında oluşan alevin aniden sönmeye ve ısı kayıpları hidrokarbon emisyonlarının oluşmasına sebep olmaktadır (Makareviciene vd, 2014; Wahlen vd, 2013). Hidrokarbonların egzoz gazı emisyon oranlarının grafiği Şekil 11'de gösterilmiştir.



Şekil 11. HC emisyon oranları grafiği

Daha düşük motor devirlerinde HC emisyonları fazla iken, artan motor devriyle beraber bu emisyonlar da azalmaktadır. HC emisyonlarının mikroalg ve mikroalg-etanol karışımlarında önemli derecede azaldığı görülmektedir (Jacob vd, 2022; Ge vd, 2022).

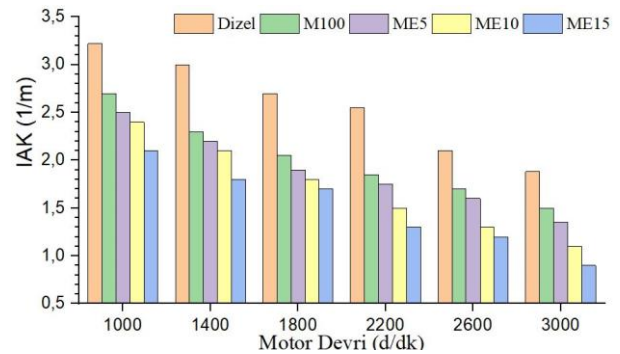
İs emisyonları; partiküller, yakıt karbon artıkları, sülfür, aromatik bileşikler ve hidrokarbonlardan oluşmaktadır (Satputaley vd, 2017). Şekil 12'de is değerleri görülmektedir. Mikroalg biyoyakıtı ve etanol yakıt karışımlarında O₂ miktarının artmasından dolayı is oluşumu büyük ölçüde azalmıştır. İs emisyonları motor devrinin artmasıyla azalmıştır.



Şekil 12. İs emisyonu

İs emisyonları, maksimum torkun elde edildiği devirde M100 için %23.6, Yakıt ME5'te %28.3, ME10 karışımında %34.6 ve ME15 yakıtında %37.5 oranında dizel'e göre azalmıştır. 2600 d/dk ise bu azalma M100, ME5, ME10 ve ME15 için sırasıyla %20.5, %26, %36.5 ve %44.2 olmuştur.

IAK (Işık absorpsiyon katsayısı) ise emisyonların aydınlatma şiddetini azaltan bir katsayıdır. Emisyonların mikroalg biyodizel yakıtlarda önemli derecede düşmesinden dolayı dizel yakıtı kıyasla düşüktür (Zhu vd, 2010; Wong vd, 2022). Devire bağlı ışık absorpsiyon katsayısı Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13. Işık absorpsiyon katsayısı değerleri

SONUÇLAR

Mikroalgler, ekim yapılan verimli tarım alanlarını işgal etmemesi, büyüme hızı ve hammaddeden yağ elde oranının çok yüksek olmasından dolayı biyodizel olarak kullanımına en uygun ürün olarak nitelendirilmektedir. Bu çalışmada tam yükte farklı motor devirlerinde mikroalg, mikroalg-etanol biyoyakıt kullanımı ile motor torku, gücü ve emisyon değerleri ölçülmüştür. Bu bağlamda önemli sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Transesterifikasyon işleminde yüksek verimli bir esterleşme sonucunda sodyum metilatın kullanılmasıyla faz ayrılma süresi yaklaşık %80 oranında azaltılmıştır.

Geleneksel katalizör kullanımı yerine sodyum metilat kullanılması ve gözenekli kil toprak ilavesi ile filtre işlemi, bu çalışmada önemli ölçüde enerji sarfiyatı ve proses süresini azaltmasıyla endüstriye önemli bir çözüm sunmaktadır.

Chlorella protothecoides mikroalg yağından iyileştirilmiş ve geliştirilmiş transesterifikasyon sonucunda yağın %99'dan fazla biyodizel elde edilmiştir. "0 Atık" ürün olan mikroalg posası da kozmetik, temizlik, gıda, tarım toprak besini, ek gıda takviyesi sektöründe de kullanılmaktadır.

TSE Petrol Analiz Laboratuvarında EN 14214 standardına akredite uygunluğu onaylanmıştır. Yapılan benzer çalışmalara kıyasla, bu çalışmada geliştirilen reçetenin, biyoyakıtın %98.9 gibi yüksek verimli ester içeriğine sahip oluşu literatüre önemli bir katkı sağlamıştır. Mikroalg biyodizelinin dizel yakıtı göre setan sayısı ve yoğunluğu artarken, ısıl değer ve viskozitesi düşmüştür. Mikroalg biyodizelinde yoğunluk ve viskozitenin artmasıyla püskürtme kayıpları artmaktadır.

Mikroalg biyoyakıtına etanol katılmasıyla yakıtın oksijen içeriği artarken setan sayısı, yoğunluğu, ısıl değeri ve viskozitesi düşmüştür; fakat viskozite düşüşü ile yakıtın atomizasyonu sağlamış olup, püskürtme penetrasyonu ve dispersiyonu iyileşmiştir. Dizele kıyasla mikroalg biyoyakıtı ile CO, CO₂ ve HC emisyonlarında azalış olmaktadır. Mikroalg biyodizeline etanol ilavesi bu emisyonların azalmasında olumlu katkı sağlamıştır.

Mikroalg biyodizelinin yanması sonucu ortaya çıkan is emisyonu dolayısıyla IAK değeri dizele göre azalmıştır. Bu azalış oranı M100'e etanol ilavesiyle artmaktadır.

Motor testlerinde en yüksek güç; dizel ve ME15 yakıtında olurken, M100 kullanımında dizele göre %2,81 daha düşük güç elde edilmiştir. Bu duruma rağmen fosil yakıtı önemli bir alternatif olmuştur. ME15 kullanımında maksimum motor gücünün elde edildiği

devirde dizel yakıt kullanımına göre motor gücü %0,67 daha düşük çıkarken, ME15 için elde edilen maksimum tork dizele göre çok benzerdir.

Mikroalg biyoyakıtına, etanol ilavesi ile motor gücü ve torkunda artış olmuştur. Bu durum aynı zamanda atık yağlardan elde edilen biyodizellere ek; mikroalg biyodizelinin, biyoetanol ve dizel yakıt karışımları ile de kullanılmasına teşvik etmiştir.

Mikroalg biyoyakıtı ve farklı oranlarda etanol karışımıyla elde edilen yakıtların farklı devirlerde yanması sonucu ortaya çıkan emisyon değerleri dizel yakıtı göre önemli oranda azalmıştır. Küresel ısınmaya sebep olan CO₂ emisyonlarında, maksimum motor torku ve gücün elde edildiği devirlerde M100 yakıtının dizel yakıtı göre sırasıyla %6 ve %15,5 oranında düşmüştür. Bu düşüş ME15 için %0,8 ve %2,7 olmuştur.

Sonuç olarak dizel yakıtı kıyasla ME15 yakıtı kullanımında ortalama tork değerleri benzer ve motor gücünde minimal kayıplar meydana gelmesine rağmen egzoz emisyon gazları ciddi oranlarda azalmıştır. Mikroalg biyoyakıtı ve biyoetanol karışımı kullanımının uygunluğu bu çalışma ile ülkemiz için önerilmiştir.

TEŞEKKÜR

Gönenç DURAN, BİDEB 2210-C ve 2211 Bilim insanı destekleme programı kapsamındaki ilgi ve özenlerinden dolayı TÜBİTAK'a ve YÖK'e teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

Alkidas A. C., 2007, Combustion advancements in gasoline engines, *Energy Conversion and Management*, 48, 2751-2761.

Al-lwayzy H. S. and Yusaf T., 2017, Diesel engine performance and exhaust gas emissions using microalgae *Chlorella protothecoides* biodiesel, *Renewable Energy*, 101, 690-701.

Sanni S., Ezurike B., Okoro E., 2022, Effect of corrosion rates of preheated *Schinzochytrium* sp. microalgae biodiesel on metallic components of a diesel engine, *Alexandria Engineering Journal*, 61, 7509-7528.

Behçet R., Oktay H., Çakmak A. and Aydın H., 2015, Comparison of exhaust emissions of biodiesel-diesel fuel blends produced from animal fats, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46,157–165.

Chhandama M., Satyan K., Changmai B., Vanlalveni C., Rokhum S., 2021, Microalgae as a feedstock for the

- production of biodiesel: A review, *Bioresource Technology Reports*, 15, 100771.
- Chisti Y., 2007, Biodiesel from microalgae, *Biotechnology Advances*, 25, 294-306.
- Çakmak A., Özcan H., 2021, Gliserin eterlerinin ikinci nesil biyoyakıt olarak dizel motorda kullanımının araştırılması, *J. of Thermal Science and Technology*, 41,2, 191–204.
- Çelik M., Solmaz H., Yücesu S. H., Yılmaz E., 2016, Kanola metil esterine n-heptan katkısının motor performansı ve yanma karakteristiklerine etkilerinin incelenmesi, *J. of Thermal Science and Technology*, 36,1, 9-16.
- Farooq W., Naqvi S., Sajid M., Shrivastav A., Kumar K., 2022, Monitoring lipids profile, CO₂ fixation, and water recyclability for the economic viability of microalgae *Chlorella vulgaris* cultivation at different initial nitrogen, *Journal of Biotechnology*, 345, 30–39.
- Ganesan A., Nawkarkar P., Kumar S., 2022, Chapter 17- Algal biodiesel: technology, hurdles, and future directions, Handbook of Biofuels, *Academic Press*, 331-351.
- Ge S., Brindhadevi K., Xia C., Khalifa A., Elfakhany A., Unpaprom Y., Doan H., 2022, Enhancement of the combustion, performance and emission characteristics of spirulina microalgae biodiesel blends using nanoparticles, *Fuel*, 308, 121822.
- Gongora B., Souza S. N., Bassegio D., Santos R. F., Siqueira J. A., Bariccatti R. A., Gurgacz F., Secco D., Tokura L. K., Sequinel R., 2022, Comparison of emissions and engine performance of safflower and commercial biodiesels, *Industrial Crops & Products*, 179, 114680.
- Harun R., Davidson M., Doyle M., Gopiraj R., Danquah M., and Forde G., 2011, Technoeconomic analysis of an integrated microalgae photobioreactor, biodiesel and biogas production facility, *Biomass and Bioenergy*, 35, 741-747.
- Hussan M. J., Hassan M. H., Kalam M. A., Memon L. A., 2013, Tailoring key fuel properties of diesel, biodiesel, ethanol blends for diesel engine, *Journal of Cleaner Production*, 51, 118-125.
- Holman P., 2012, Experimental methods for engineers, 8th Edition, *McGraw-Hill*, New York, USA.
- Ianda T., Kalid R., Rocha L., Padula A., Zimmerman W., 2022, Techno-economic modeling to produce biodiesel from marine microalgae in sub-Saharan countries: An exploratory study in Guinea-Bissau, *Biomass and Bioenergy*, 158, 106369.
- İlkilic C., Aydın S., Behcet R., Aydın H., 2011, Biodiesel from safflower oil and its application in a diesel engine, *Fuel Processing Technology*, 92:356-362.
- İnternet 1, 2022, Anadolu Motor, et:24.02.2022, <https://www.anadolumotor.com/tr/urunler/antor-4-ld-640>
- İnternet 2, 2022, Mobydic Egzoz Emisyon Cihazı, et:24.02.2022, <https://www.ozenektronik.com/egzoz-gaz-analiz-dizel-duman-test-cihazı-kombi-p.html>
- Jacob A., Ashok B., Usmand K., 2022, Production of *Chlorella pyrenoidosa* biodiesel by heterotrophic pathway to improve CI engine output characteristics using statistical approaches, *Process Safety and Environmental Protection*, 160, 478-490.
- Jacobs T. J., and Assanis D. N., 2007, The attainment of premixed compression ignition low-temperature combustion in a compression ignition direct injection engine, *Proceedings of the Combustion Institute*, 31, 2913-2920.
- Jafari A., Esmaeilzadeh F., Mowla D., Sadatshojaei E., Heidari S., Wood D. A., 2021, New insights to direct conversion of wet microalgae impregnated with ethanol to biodiesel exploiting extraction with supercritical carbon dioxide, *Fuel*, 285, 119199.
- Karthikeyan S., Prathima A., 2016, Emission analysis of the effect of doped nano additives on biofuel in a diesel engine, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1556-7230.
- Kass M., Kaul B., Armstrong B., Szybist J., Lobodin V., 2022, Stability, rheological and combustion properties of biodiesel blends with a very-low sulfur fuel oil (VLSFO), *Fuel*, 316, 123365.
- Kontsesa A., Dimaratos A., Keramidass C., Williams R., Hamjed H., Ntziachristosa L., Samarasa Z., 2019, Effects of fuel properties on particulate emissions of diesel cars equipped with diesel particulate filters, *Fuel*, 255, 115879.
- Kwanchareon P., Luengnaruemitchai A., Jai-In S., 2007, Solubility of a diesel-biodiesel-ethanol blend, its fuel

- properties, and its emission characteristics from diesel engine, *Fuel*, 86, 2007, 1053-1061.
- Ladanai S., Vinterback J., 2009, Global Potential of Sustainable Biomass for Energy, SLU Institutionen för energi och teknik report, *Swedish University of Agricultural Sciences Department of Energy and Technology*, 13, 1654-9406.
- Lebedevas S., Lazareva N., Rapalis P., Dauksys V., Cepaitis T., 2021, Influence of marine fuel properties on ignition injection delay and energy efficiency, *Vilnius Tech*, 36, 4: 339-353.
- Li S., Li X., Ho S., 2022, Microalgae as a solution of third world energy crisis for biofuels production from wastewater toward carbon neutrality: An updated review, *Chemosphere*, 291, 132863.
- Liu H., Hu B., Jin C., 2016, Effects of different alcohols additives on solubility of hydrous ethanol/diesel fuel blends, *Fuel*, 184, 440-448.
- Makareviciene V., Lebedevas S., Rapalis P., Gumbyte M., Skorupskaite V., Zaglinskis J., 2014, Performance and emission characteristics of diesel fuel containing microalgae oil methyl esters, *Fuel*, 120, 233-239.
- Mota G., Sousa I., Oliveira A., Cavalcante L., Moreira K., Cavalcante F., Souza J., Falcao I., Rocha T., Valerio R., Carvalho S., Neto C., Serpa J., Lima R., Souza M., Santos J., 2022, Biodiesel production from microalgae using lipase-based catalysts: Current challenges and prospects, *Algal Research*, 62, 20102616.
- Nagarajan R., Jain A., and Vora K., 2017, Biodiesel from Microalgae, *SAE Technical Paper*, 2017-26-0077.
- Neel C., Johnson D., Wardlow G., 2008, Performance, efficiency, and NO_x emissions of a compact diesel tractor fueled with D2, B20, and B100 under steady-state loads, *Appl. Eng. Agric.*, 24, 717-721.
- Noorollahi Y., Azadbakht M., Ghobadian B., 2018, The effect of different diesterol (diesel -biodiesel-ethanol) blends on small air-cooled diesel engine performance and its exhaust gases, *Energy*, 142, 196-200.
- Oni B., Sanni S., Daramola M., Olawepo A., 2021, Effects of oxy-acetylation on performance, combustion and emission characteristics of *Botryococcus braunii* microalgae biodiesel-fuelled CI engines, *Fuel*, 296, 120675.
- Pandey A., Lee D. J., Chisti Y., Soccol C. R., 2014, Biofuels from Algae, *Elsevier*, 978-0-444-59558-4.
- Rajak U., Nashine P., Dasore A., Balijepalli R., Chaurasiya P., Verma T., 2022, Numerical analysis of performance and emission behavior of CI engine fueled with microalgae biodiesel blend, *Materials Today: Proceedings*, 49, 301-306.
- Rajak U., Nashine P., Dasore A., Verma T., 2022, Utilization of renewable and sustainable microalgae biodiesel for reducing the engine emissions in a diesel engine, *Fuel*, 311, 122498.
- Satputaley S. S., Zodpe D. B. and Deshpande N. V., 2017, Performance, combustion and emission study on CI engine using microalgae oil and microalgae oil methyl esters, *Journal of the Energy Institute*, 90, 513-521.
- Subbaiah G. V., Gopal K. R., Hussain S. A., Prasad B., and Reddy K. T., 2010, Rice bran oil biodiesel as an additive in diesel-ethanol blends for diesel engines, *Int. J. Res. Rev. Appl. Sci.*, 3, 334-342.
- Şahin Z., and Durgun O. J., 2016, Improving of diesel combustion-pollution-fuel economy and performance by ethanol fumigation, *J. of Thermal Science and Technology*, 36,2, 69-82.
- TSE, TS EN 116, 2015, Dizel yakıtlar ve konut ısıtmada kullanılan yakıtlar, soğuk filtre tıkanma noktasının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TSE, TS EN 12662, 2009, Sıvı petrol ürünleri, orta destile yakıtlar, kirlilik tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TSE, TS EN 14103, 2011, Hayvansal ve bitkisel yağ türevleri, yağ asidi metil esterleri (yame), ester ve linolenik asit metil ester içeriğinin tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TSE, TS EN 14214, 2014, Otomotiv yakıtları, yağ asidi metil esterleri (yame/biyodizel), dizel motorlar için özellikler ve deney yöntemleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TSE, TS ISO 3930, 2009, Karayolu taşıtları için egzoz emisyon ölçüm cihazları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TSE, TS-1231, 2010, İçten yanmalı motorlar, muayene ve deney esasları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

- Ushakov S., Lefebvre N., 2019, Assessment of Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) Applicability as an Alternative Marine Fuel Based on Its Performance and Emissions Characteristics, *SAE International J. Fuels Lubr.*, 04-12-02-0007.
- Viguera M., Marti A., Masca F., Prieto C., Calvo L., The process parameters and solid conditions that affect the supercritical CO₂ extraction of the lipids produced by microalgae, *J. of Supercritical Fluids*, 113, 16–22.
- Wahlen B. D., Morgan M. R., Curdy A. T., Willis R. M., Morgan M. D., Dye D. J., Bugbee B., Wood B. D., and Seefeldt L. C., 2013, Biodiesel from microalgae, yeast, and bacteria: engine performance and exhaust emissions, *Energy Fuels*, 27, 220–228.
- Wong P. K., Ghadikolaie M. A., Chen S. H., Fadairo A. A., Ng K. W., Lee S. M., Xu C. J., Lian Z. D., Li S., Wong H., Zhao J., Ning Z., Gali, N., 2022, Physicochemical and cell toxicity properties of particulate matter (PM) from a diesel vehicle fueled with diesel, spent coffee ground biodiesel, and ethanol, *Science of the Total Environment*, 824, 153873.
- Wu Y., Wang P., Farhan S. M., Yi J., Lei L., 2019, Effect of post-injection on combustion and exhaust emissions in DI diesel engine, *Fuel*, 258, 116131.
- Yeşilyurt M. K., Arslan M. Ve Eryılmaz T., 2018, Biyodizel-Dizel Yakıt Karışımlarına Etanol Katılmasının Performans, Yanma ve Emisyon Karakteristiklerine Etkisinin Deneysel İncelenmesi, *J. of Thermal Science and Technology*, 38, 129–150.
- Yeşilyurt M. K., Cesur C., Aslan V., Yılbaşlı Z., 2020, The production of biodiesel from safflower (*Carthamus tinctorius* L.) oil as a potential feedstock and its usage in compression ignition engine: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109574.
- Yilmaz N., and Sanchez T. M., 2012, Analysis of operating a diesel engine on biodiesel-ethanol and biodiesel-methanol blends, *Energy*, 46, 126-129.
- Yilmaz N., Vigil F. M., Donaldson A. B., Darabseh T., 2014, Investigation of CI engine emissions in biodiesel–ethanol–diesel blends as a function of ethanol concentration, *Fuel*, 115, 790-793.
- Zaharin M. S., Abdullah N. R., Najafi G., Sharudin H., Yusaf T., 2017, Effects of physicochemical properties of biodiesel fuel blends with alcohol on diesel engine performance and exhaust emissions: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 475–493.
- Zhu L., Cheung C. S., Zhang W. G., and Huang Z., 2010, Emissions characteristics of a diesel engine operating on biodiesel and biodiesel blended with ethanol and methanol, *Science of the Total Environment*, 408, 914–921.
- Zhu L., Cheung C. S., Zhang W. G., and Huang Z., 2011, Combustion, performance and emission characteristics of a DI diesel engine fueled with ethanol–biodiesel blends, *Fuel*, 90, 1743-1750.