



BİYODİZEL-DİZEL YAKIT KARIŞIMLARINA ETANOL KATILMASININ PERFORMANS, YANMA VE EMİSYON KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Murat Kadir YEŞİLYURT*, **Mevlüt ARSLAN****, **Tanzer ERYILMAZ*****

* Yozgat Bozok Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü
66200, Yozgat, kadir.yesilyurt@bozok.edu.tr (Sorumlu yazar)

** Yozgat Bozok Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü
66200, Yozgat, mevlut.arslan@bozok.edu.tr

*** Yozgat Bozok Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Biyosistem Mühendisliği Bölümü
66200, Yozgat, tanzer.eryilmaz@bozok.edu.tr

(Geliş Tarihi: 26.01.2018, Kabul Tarihi: 26.10.2018)

Özet: Fosil kökenli yakıtların sınırlı ve yakın bir gelecekte tükenecek olması, petrol krizleri ve fiyat artışları, taşıtlardan kaynaklı hava kirliliklerinin artması yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının araştırılmasını gerektirmektedir. Bu kaynaklar içerisinde en büyük teknik potansiyele sahip enerji kaynağı biyodizeldir. Bu çalışmada, biyodizel üretiminde hammadde olarak ülkemizde ticari olarak üretimi bulunmayan sarı hardal (*Sinapis alba* L.) tohumları kullanılmıştır. Sarı hardal tohumlarından vidalı pres yardımı ile elde edilen sarı hardal ham yağdan tek aşamalı transesterifikasyon yöntemi ile biyodizel üretimi gerçekleştirilmiştir. Deneylerde hacimsel olarak %2 biyodizel, %20 biyodizel, %2 biyodizel ile %5 etanol, %2 biyodizel ile %10 etanol, %20 biyodizel ile %5 etanol, %20 biyodizel ile %10 etanol içeren altı farklı yakıt karışımı ve dizel yakıtı kullanılmıştır. Bu yakıtların bazı önemli fiziksel ve kimyasal özellikleri standart metotlar kullanılarak tespit edilmiştir. Ardından test yakıtları tek silindirli, dört zamanlı, su soğutmalı, direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda farklı motor devirlerinde test edilerek performans, yanma ve egzoz emisyon karakteristikleri incelenmiştir. Sonuç olarak, dizel yakıtına biyodizel ilavesi ile ısıl değer, kinematik viskozite, su içeriği, yoğunluk, asit sayısı ve soğuk akış özelliklerinin olumsuz yönde etkilendiği; parlama noktası değerinin iyileştiği belirlenmiştir. Karışım yakıtlara etanol ilavesi ile kinematik viskozite, yoğunluk ve soğuk akış özelliklerinin iyileştiği; su içeriği, parlama noktası ve ısıl değer özelliklerinin kötüleştiği belirlenmiştir. Dizel yakıtına %2 oranında biyodizel katılması ile performans değerlerinin iyileştiği, biyodizel oranının daha da artması ve alkol katılması ile performans değerlerinin olumsuz yönde etkilendiği tespit edilmiştir. Test yakıtlarının yanma karakteristikleri dizel yakıtınınki ile benzerlik göstermiştir. Ayrıca, alkol ilavesinin egzoz gazı sıcaklığını, duman yoğunluğunu, CO, CO₂ ve NO_x emisyonlarını azalttığı ve O₂ emisyonlarını ise artırdığı belirlenmiştir. Motor gürültü emisyonları ise motor devrine bağlı olarak dalgalanmalar göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Biyodizel, etanol, dizel yakıtı, performans, yanma, egzoz emisyonları.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF ETHANOL ADDITION INTO BIODIESEL-DIESEL FUEL BLENDS ON THE PERFORMANCE, COMBUSTION AND EMISSION CHARACTERISTICS

Abstract: Fossil-based fuels are limited and will be consumed in the near future, the petroleum crises and price increases, the increase of air pollution caused by the vehicles necessitate the investigation of new and renewable energy sources. The energy source, which is the greatest technical potential, is biodiesel among these sources. In this study, yellow mustard (*Sinapis alba* L.) seeds which are not commercially produced in our country were used as a feedstock in the biodiesel production. The biodiesel production carried out from yellow mustard seed crude oil obtained from yellow mustard seeds with using a screw press by single-step transesterification method. A commercial diesel fuel and six different fuel blends prepared with 2% biodiesel, 20% biodiesel, 2% biodiesel and 5% ethanol, 2% biodiesel and 10% ethanol, 20% biodiesel and 5% ethanol, and 20% biodiesel and 10% ethanol used in the tests. Some important physical and chemical properties of these fuels have been measured using standard methods. Afterwards, the performance, combustion and exhaust emission characteristics were examined in a single-cylinder, four-stroke, water-cooled, direct-injection diesel engine fueled with the test fuels at different engine speeds. As a result, calorific value, kinematic viscosity, water content, density, acid value and cold flow properties adversely affected by biodiesel addition into the diesel fuel, and the improvement of the flash point value was determined. The kinematic viscosity, density and cold flow properties improved by ethanol addition to the blended fuels, however water content, flash point and calorific value deteriorated. The addition of 2% biodiesel into the diesel fuel improved

performance, and increasing the rate of biodiesel and addition to alcohol were negatively affected the performance. The combustion characteristics of the test fuels were similar to those of diesel fuel. Furthermore, it has been found that alcohol additions reduced exhaust gas temperature, smoke opacity, CO, CO₂ and NO_x emissions and increased O₂ emissions. Engine noise emissions were fluctuated depending on the engine speed.

Keywords: Biodiesel, ethanol, diesel fuel, performance, combustion, exhaust emissions.

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

ASTM	American society for testing and materials
CO	Karbon monoksit
CO ₂	Karbon dioksit
COV	Varyasyon katsayısı
E	Etanol
ED	Euro dizel yakıtı
EGS	Egzoz gazı sıcaklığı
HC	Hidrokarbon
imep	İndike ortalama efektif basınç
KMA, θ	Krank mili açısı
NaOH	Sodyum hidroksit
NISH	Net ısı salınımı hızı
NO	Azot monoksit
NO ₂	Azot dioksit
NO _x	Azot oksitler
O ₂	Oksijen
P	Silindir basıncı
PB	Püskürtme başlangıcı
PLC	Programlanabilir kontrol cihazı
PM	Partikül madde
Q	Enerji miktarı
R	Ölçülecek boyut
SO ₂	Kükürt dioksit
TG	Tutuşma gecikmesi
V	Silindir hacmi
w	Hata oranı
x	Ölçümü etkileyen değişken
YB	Yanma başlangıcı
YP	Yanma periyodu
YS	Yanma süresi
γ	Özgül ısılar oranı
σ	Standart sapma

GİRİŞ

Enerji talebi, modernleşme ve sanayileşmenin artışına bağlı olarak dünyada hızla artış göstermektedir. Çoğu gelişmekte olan ülkeler artan enerji ihtiyacını karşılamak için ham petrol ithal etmektedirler. Bu nedenle, gelirlerinin çoğunu petrol ürünlerini tedarik etmek için harcamaktadırlar (Hasan ve Rahman, 2017). Taşımacılık sektöründe, enerji santrallerinde, inşaat alanında ve sanayi faaliyetlerinde yaygın olarak kullanılan petrolün tüm enerji kaynaklarının arasında en büyük paya sahip olduğu bilinmektedir (Efe vd, 2018).

Uluslararası Enerji Görünümü'ne göre, 2030 yılında 2005 yılına kıyasla dünyanın enerji ihtiyacının %50 oranında artacağı ve bu enerji ihtiyacının %26-27'sinin fosil kökenli yakıtlardan elde edileceği öngörülmektedir (Çelik ve Özgören, 2017). Buna ek olarak, fosil kökenli

yakıt fiyatlarındaki sürekli artış, zamanla bilinen rezervlerin azalması ve hava kirliliği ile ilgili çevresel kaygılar alternatif yakıt arayışlarını artırmıştır (Gülüm ve Bilgin, 2016).

Dizel motorların sahip olduğu yüksek verim, kullanım maliyetlerinin düşük olması, yüksek dayanıklılık ve güvenilirlikleri bu motorları araç pazarında lider duruma getirmiştir (Keskin ve Sağıroğlu, 2010). Dizel motorlu taşıtlar özellikle kara, deniz ve demir yolu taşımacılığında, ziraat endüstrisinde, imalat endüstrisinde, askeriyede, madencilikte ve elektrik üretim sektöründe tercih edilmektedir (Çelik vd, 2017). Dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılacak en önemli potansiyel adaylardan biri de bitkisel yağlardır (Aksoy, 2011). Petrol kökenli yakıtlardan farklı bir kimyasal yapıya sahip olan bitkisel yağların, dizel motorlarda doğrudan yakıt olarak kullanılması çeşitli sorunlara yol açabilmektedir. Bitkisel yağın bileşiminde bulunan fosfatid, mum ve yüksek derecede ergiyen gliseritlerle birlikte depolama ve yanma odasında meydana gelen oksidasyon ve polimerizasyonlar, viskozite artışı ve kristalleşmeye bağlı olarak piston ve enjektör tıkanıklığı, motorda karbon kalıntısının fazla olması ve atomizasyonun zayıflığı gibi problemlere neden olmaktadır (Murugesan vd, 2009; Sidibé vd, 2010; Kegl vd, 2013).

Bitkisel yağların doğrudan yakıt olarak kullanımı üzerine yapılan kısa süreli denemelerde, yağlama yağlarında katı partiküllerin oluştuğu ve yağlama yağının bozulduğu görülmüştür. Ancak bitkisel yağların ısıtılarak kullanılması ile püskürtme özelliklerinin iyileştiği ve setan sayısında artışa neden olduğu belirlenmiştir. Kısa süreli denemelere karşın uzun süreli testlerde çeşitli sorunlar ile karşılaşmıştır. Bu sorunlar enjektörlerde karbon birikintisi, delik çapında küçülme, püskürtme karakteristiğinde bozulma, atomizasyon sorunu, enjeksiyon başlangıç ve bitiş sürelerinin belirsizliği, yağın yapışkanlaşması; yağlama yağının seyrelmesi, asit sayısının ve viskozitesinin artması, yanma artıkları ve yanmamış yakıt karışması ile kirlenmesi, katı madde içeriğinin artması ve temas yüzeylerinde birikinti oluşturmaları; motorda aşınma, yanma odası, subap, piston, segman bölgesinde ve manifoldda karbon birikmesi nedeniyle hareketliliğin azalması, segmanlarda yapışkanlaşma, vuruntu, ilk hareketin zorlukları ve yağ filtresinin tıkanması; motor karakteristik değerlerinde ve egzoz emisyonlarında olumsuz değişiklikler şeklinde sıralanabilir (Onurbaşı Avcıoğlu, 2011). Bu nedenlerden dolayı bitkisel yağların doğrudan dizel motorlarda kullanımının yerine viskozitesinin azaltılarak kullanılması gerekmektedir.

Bitkisel yağların yakıt olarak kullanılabilmelerini sağlamak amacı ile iki yönde çalışmalara ağırlık verilmiştir. Bunlardan birincisi, bitkisel yağların yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi, diğeri ise motor ayarlarının değiştirilmesidir (Ulusoy ve Alibaş, 2002). Bitkisel yağların yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalar, öncelikle yağların viskozitelerini azaltmaya yöneliktir. Bitkisel yağların viskozitelerinin azaltılmasında, ısıl ve kimyasal yöntem olmak üzere iki yöntem uygulanmaktadır. Isıl yöntemde, yakıt olarak kullanılacak yağın sıcaklığı ön ısıtma ile artırılarak viskozitesinin düşmesi sağlanmaktadır. Kimyasal yöntemler ise seyreltme (inceltme), piroliz (ısıl parçalanma), mikroemülsiyon oluşturma ve transesterifikasyon (yeniden esterleştirme) olarak sınıflandırılmaktadır (Çengelci vd, 2011). Biyodizel üretiminde en çok tercih edilen kimyasal yöntem transesterifikasyondur (Sharma vd, 2008). Biyodizel ASTM tarafından bitkisel veya hayvansal yağlardan türetilen yağ asidi zincirinin mono alkil esteri olarak tanımlanmaktadır. Baştaki 'biyo' kelimesi geleneksel petrol türevli dizel yakıtlarına göre yenilenebilir ve biyolojik kaynaklı olduğunu, 'dizel' kelimesi ise dizel motorlarda kullanımını ifade etmektedir (Çildir ve Çanakçı, 2006). Biyodizel yakıtları dizel motorlarda doğrudan ya da bazı küçük değişiklikler yapılarak kullanılabilir (Prabakaran ve Udhoji, 2016). Biyodizel bitkisel yağlardan, hayvansal yağlardan, atık kızartma yağlarından ve alg yağlarından üretilmektedir (Akar, 2016).

Konu ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde, farklı bitkisel ve hayvansal yağlardan üretilen biyodizellerin ve bunların dizel yakıtı ile değişik oranlardaki karışımlarının dizel motorlarda yakıt olarak kullanıldığı görülmektedir. Alkollerin ise genel olarak biyodizele ve dizel yakıtına ilave edilerek kullanıldığı, bununla birlikte bu üç yakıtın değişik oranlarda harmanlanarak da dizel motorlarda kullanıldığı çalışmalara rastlanmıştır. Can vd (2005) dizel yakıtına %10 ve %15 oranlarında etanol ilave ederek 4 silindirli, 4 zamanlı, indirekt püskürtmeli, turbo şarjlı, su soğutmalı bir dizel motorda farklı yüklerde (%50, %75 ve %100) deneyerek egzoz emisyonlarını dizel yakıtı ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, dizel yakıtına etanol ilavesinin NO_x emisyonlarını artırdığını; is, CO ve SO₂ emisyonlarını ise azalttığını, emisyonlardaki iyileşmenin kısmi yüklere göre tam yükte daha çok dikkate değer bir seviyede olduğunu belirtmişlerdir. Shi vd (2005) soya yağı biyodizeline %20 oranında etanol ekledikten sonra bu karışımı %15 ve %20 oranlarında dizel yakıtı ile karşılaştırmışlardır. Ayrıca, dizel yakıtına %20 oranında soya yağı biyodizeli ilave ederek bu üç karışım yakıtını 4 silindirli, 4 zamanlı, direkt püskürtmeli bir dizel motorda deneyerek performans ve egzoz emisyonlarını dizel yakıtı ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, tüm karışım yakıtların PM ve duman emisyonlarının dizel yakıtından düşük olduğunu, etanol kullanımı ile bu emisyonların daha da düştüğünü; tüm karışımların NO_x emisyonlarının dizel yakıtından yüksek olduğunu, etanol

kullanımı ile bu emisyonların daha da yükseldiğini; soya yağı biyodizelinin HC emisyonunun dizel yakıtından düşük olduğunu, etanol kullanımı ile HC emisyonlarının dizel yakıtından da yüksek olduğunu; düşük motor devirlerinde biyodizelin CO emisyonunu artırdığını, orta ve yüksek devirlerde ise azalttığını, etanol kullanımı ile biyodizel karışımına göre CO emisyonunu genelde düşürdüğünü belirtmişlerdir. Usta vd (2005) tütün tohumu yağından ve ayçiçek yağı ile fındık yağı sabun stoğunun eşit oranlarda karışımından elde edilen yağdan üretilen biyodizelleri dizel yakıtı ile ayrı ayrı %17,5 oranlarında karıştırmışlar, bununla birlikte dizel yakıtına %15 oranında etanol ve kararlı bir karışım elde etmek için %1 oranında izopropanol ilave etmişlerdir. Elde ettikleri tüm yakıtları 4 silindirli, 4 zamanlı, indirekt püskürtmeli, turbo şarjlı, su soğutmalı bir dizel motorda deneyerek performans ve egzoz emisyonlarını araştırmışlardır. Karışım yakıtların kullanımı ile dizel yakıtına göre CO, is ve SO₂ emisyonlarının azaldığını, NO_x emisyonlarının arttığını, etanol ilavesinin güçte bir miktar düşmeye sebep olduğunu, biyodizel ilavesinin ise çok az oranda güç artışı sağladığını belirlemişlerdir. Chen vd (2007) dizel yakıtı içerisine hacimsel olarak %10, %20 ve %30 oranlarında etanol ilave etmişler ve daha sonra bu yakıtlara %10 oranında kanola biyodizeli eklemişlerdir. Elde ettikleri yakıtları 4 silindirli, 4 zamanlı bir dizel motorda deneyerek yanma karakteristiklerini ve PM emisyonlarını incelemişlerdir. Karışım yakıtlardaki etanol oranının artışına bağlı olarak duman koyuluğu ve PM emisyonu değerlerinin azaldığını, tutuşma gecikmesinin arttığını, yanma süresinin kıaldığını, yanma parlaklığının düştüğünü ve zengin yakıt bölgelerinde kurum oluşumunun azaldığını tespit etmişlerdir. Randazzo ve Sodré (2011) soya yağı biyodizelinin dizel yakıtı ile %3, %5, %10 ve %20 oranlarında karıştırmışlar, %20 biyodizel ilave edilen yakıt karışımına %2 ve %5 oranlarında etanol ilave etmişler ve 4 silindirli, 4 zamanlı, common rail multijet püskürtmeli, hava soğutmalı bir dizel motorda deneyerek egzoz emisyonlarını incelemişlerdir. Karışımındaki biyodizel oranının artışına bağlı olarak CO₂ ve NO_x emisyonlarının arttığını, CO, HC ve PM emisyonlarının azaldığını, etanol ilavesi ile CO₂ ve NO_x emisyonlarının azaldığını, buna karşın CO, HC ve PM emisyonlarının arttığını belirlemişlerdir. Subbabbiah ve Gopal (2011) pirinç kepeği yağı biyodizeline %2,5, %5 ve %7,5 oranlarında etanol ilave etmişler ve tek silindirli, 4 zamanlı, direkt püskürtmeli, su soğutmalı bir dizel motorda farklı yük koşullarında deneyerek performans ve egzoz emisyonlarını dizel yakıtı ile karşılaştırmışlardır. Etanol ilaveli yakıtların tam yük koşullarında kullanılması ile dizel yakıtına göre termal verimlerinin, özgül yakıt tüketimlerinin, egzoz gazı sıcaklıklarının arttığını, gürültü, HC, NO_x emisyonlarının ve duman koyuluklarının azaldığını tespit etmişlerdir. Dizel yakıtına göre %2,5 ve %5 oranlarında etanol ilavesinin CO emisyonlarını sırasıyla %17,39 ve %13,04, O₂ emisyonlarını sırasıyla %14,4 ve %4,8 oranlarında azalttığını, ancak %7,5 oranında etanol ilavesinin CO emisyonunu %3,22 ve O₂

emisyonunu %4,8 oranında artırdığını tespit etmişlerdir. Su vd (2013) atık kızartma yağı biyodizelinin etanol ile hacimsel olarak %20 oranında karıştırmışlar ve tek silindirli, common rail püskürtme sistemine sahip bir dizel motorda deneyerek yanma ve emisyon karakteristiklerini incelemişlerdir. Biyodizelin yanma veriminin, maksimum silindir basıncının ve ısı salınımı hızının dizel yakıtından daha yüksek olduğunu, etanol ilavesi ile yanma veriminin ve silindir basıncının düştüğünü, ancak ısı salınımı hızının yükseldiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca, biyodizelin CO, HC, is ve NO_x emisyonlarının dizel yakıtından daha düşük olduğunu, etanol ilavesi ile tüm emisyonların az da olsa yükseldiğini tespit etmişlerdir. Noorollahi vd (2018) farklı oranlardaki dizel (%91, %94, %97 ve %100), biyodizel (%6, %4, %2) ve etanol (%3, %2, %1) karışımlarını hava soğutmalı bir dizel motorda farklı devirlerde ve tam yük koşulları altında deneyerek performans ve emisyon parametrelerini incelemişlerdir. Performans, verim ve emisyon açısından %6 biyodizel ile %3 etanol içeren yakıtın en iyi sonuçları verdiğini belirlemişlerdir.

Sarı hardal bitkisinin önemli bir yağ kaynağı olmasına rağmen ülkemizde ticari anlamda üretimi bulunmamaktadır. Yağ kaynağı olarak ise tüketimine rastlanmamıştır. Ayrıca literatür çalışmalarına bakıldığında sarı hardal yağı biyodizeli-dizel-etanol karışımının dizel bir motorun performans, yanma ve egzoz emisyonlarına etkilerini inceleyen bir çalışma olmamasından dolayı, bu çalışmanın öncü bir araştırma olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmanın amacı, sarı hardal tohumundan elde edilen ham yağdan transesterifikasyon yöntemi ile biyodizel üretmek, hacimsel olarak %2 biyodizel, %20 biyodizel, %2 biyodizel ile %5 etanol, %2 biyodizel ile %10 etanol, %20 biyodizel ile %5 etanol ve %20 biyodizel ile %10 etanol içeren altı farklı yakıt karışımı ve dizel yakıtını tek silindirli, dört zamanlı, su soğutmalı, direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda test ederek motor performans, yanma ve egzoz emisyon karakteristiklerine olan etkilerini araştırmaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal

Bu çalışmada kullanılan sarı hardal (*Sinapis alba* L.) tohumları İstanbul'da bulunan ticari bir firmadan temin edilmiştir. Sarı hardal ham yağından biyodizel üretmek için molekül ağırlığı 32,04 g/mol ve saflığı %99,8 olan Sigma-Aldrich marka metanol (CH₄O), karışım yakıtları hazırlamak için ise molekül ağırlığı 46,07 g/mol ve saflığı \geq 99,5 olan Sigma-Aldrich marka etanol (C₂H₆O) kullanılmıştır. Transesterifikasyon reaksiyonunda katalizör olarak molekül ağırlığı 40 g/mol ve saflığı \geq 97 olan Merck marka sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır. Fenolftaleyn indikatörü ve 0,1 N potasyum hidroksit çözeltisi Norateks Kimya'dan, dietil eter VWR Kimya'dan temin

edilmiştir. Kimyasallar herhangi bir saflaştırma işlemine gerek duyulmadan doğrudan kullanılmıştır. Yağın filtrelenmesi için 125 mm çapında Machinery-Nagel marka kalitatif filtre kağıdı kullanılmıştır.

Pilot biyodizel üretim tesisi

Sarı hardal ham yağından biyodizel üretimi Küçük Ölçekli Programlanabilir Kontrol Cihazı (PLC) destekli Pilot Biyodizel Üretim Tesisi'nde gerçekleştirilmiştir. Tesis, bitkisel ve hayvansal yağlardan biyodizel üretmek amacıyla kurulmuştur. Otomasyon sistemine sahip olan tesiste, ham yağ ve metoksit tanklarına gerekli malzemeler konulduktan sonra herhangi bir müdahaleye gerek olmadan biyodizel üretilmektedir. 2 mm Cr-Ni sacdan imal edilen tesis ham yağ (65 L), reaktör (105 L), yıkama/dinlendirme (105 L), metoksit (23 L), saf su (65 L), biyodizel (65 L), gliserol (65 L) ve atık su (65 L) tanklarından oluşmaktadır.

Yöntem

Sarı hardal tohumundan ham yağ elde edilmesi

Sarı hardal ham yağı vidalı yağ çıkarma presi kullanılarak elde edilmiştir. Sarı hardal tohumundan ham yağ elde etmek için 6 mm çapa sahip küspe çıkış ağızı kullanılmıştır. Vidalı yağ çıkarma presinin özelliği olarak, en yüksek yağ verimini elde etmek için tohum sıcaklığı minimum 15°C'de ve nem içeriği de %5-7 aralığında olması gerekmektedir. Sarı hardal tohumu 20±0,5°C ve %4,77±0,03 nemde preslenmiştir. Presleme yapılmadan önce başlık sıcaklığı 55±1°C'ye çıkartılmıştır. İlk çalıştırmada küspe ve yağ çıkışı 10 dakika kadar sonra gerçekleşmiştir. 3 tekerrürlü olarak gerçekleştirilen yağ sıkma işlemi 104,6±2,9 dakika devam etmiş ve 30 kg tohumdan 6,400±0,090 L (5,826±0,082 kg) yağ elde edilmiştir. Sarı hardal tohumundan vidalı presleme işlemi sonrasında %19,42 oranında ham yağ elde edilmiştir. Soxhlet ekstraksiyon işlemi sonunda elde edilen ham yağ oranı ise %26,50 olarak tespit edilmiştir. Elde edilen ham yağ cam kavanozlarda ağız kapalı olarak 1 hafta bekletildikten sonra yoğunluk farkı nedeniyle alt kısmında küspe parçacıklarının biriktiği gözlenmiştir. Üst kısımdaki yağ alınmış ve içerisinde asılı kalan küspe parçacıkları filtrelenerek giderilmiştir. Daha sonra elde edilen ham yağ biyodizel üretiminde kullanılmıştır.

Serbest yağ asidi içeriğinin belirlenmesi

Sarı hardal ham yağının serbest yağ asidi içeriği asit-baz titrasyon tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Sarı hardal ham yağının serbest yağ asidi içeriği %0,914 olarak tespit edilmiştir. Bu değer literatürde belirtilen sınır değer olan %1'den düşük olduğu için tek kademeli transesterifikasyon yöntemi tercih edilmiştir (Goyal vd, 2013).

Biyodizel üretimi

50 L sarı hardal yağı pilot tesiste ham yağ tankına konulmuştur. Buradan yağ selenoid vana ve yerçekimi yardımıyla reaktöre gönderilmiştir. Sarı hardal yağı reaktörde 61,8°C'ye kadar ısıtılmıştır. Termostat kontrolü sayesinde reaksiyon sıcaklığı sabit tutulmuştur. Karıştırıcı ile karıştırılarak sıcaklığın her yerde homojen olması sağlanmıştır. Optimizasyon çalışması sonucu bulunan 7,407:1 metanol/yağ molar oranına bağlı metanol ile %0,627 NaOH metoksit tankına konulmuş ve sirkülasyon pompası vasıtasıyla katalizörün çözünmesi beklenmiştir. Elde edilen metoksit çözeltisi yer çekimi vasıtasıyla reaktörde bulunan sarı hardal yağı üzerine gönderilmiştir. Reaktörde karıştırma işlemi 62,1 dakika devam etmiştir. Sonra karıştırıcı ve ısıtıcı durdurulmuştur. Gliserolün çökmesi için 8 saat beklenmiş ve çöken gliserol pompa vasıtasıyla gliserol tankına gönderilmiştir. Reaksiyon sonunda ortaya çıkan gliserol miktarı 5,2 L'dir. Daha sonra ham biyodizelin sıcaklığı 75°C'ye çıkartılmış ve eşanjör vasıtasıyla 3,3 L metanol geri kazanılmıştır. Reaktör içerisindeki ham biyodizel pompa yardımıyla dinlendirme/yıkama tankına gönderilmiş, burada ham biyodizelin sıcaklığının 55°C'ye düşmesi ile birlikte reaksiyon bazik karakterli olduğu için nötrleşinceye kadar mistleme yöntemi kullanılarak 55°C sıcaklıktaki 12,5 L ultra saf su ile yıkama işlemine tabi tutulmuştur. Yıkama işlemi sonrası atık suyun çökmesi için 8 saat beklenmiş ve atık su pompa vasıtasıyla atık su tankına gönderilmiştir. Dinlendirme/yıkama tankının ısıtıcısı çalıştırılmış ve 120°C sıcaklığa kadar yıkanmış biyodizel ısıtılmıştır. Biyodizelin içerisinde buharlaşan su bu tanka bağlı olan vakum pompası yardımıyla dışarı atılmıştır. Toplamda 120°C'de 2 saat kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Ardından, biyodizel soğuması için pompa yardımıyla biyodizel tankına gönderilmiştir.

Karışım yakıtların hazırlanması

Fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından petrol kökenli dizel yakıtlarıyla benzerlik gösteren biyodizel, dizel motorlarında saf olarak kullanılabilmesi gibi dizel yakıtlarıyla her oranda harmanlanarak da kullanılabilir. Ancak, iki karışım oranı önem arz etmektedir. Bunlar B20 ve B2 karışım yakıtlarıdır. B20 karışım yakıtının tercih edilmesinin nedenleri arasında; B100 kullanımını karşılayabilecek yeterli hammadde kaynağı olmaması, müşteri açısından maliyetlerin en aza indirilmesi, egzoz emisyonlarını azaltması, biyodizel üretiminde yakıt kalitesini bozan artıkları (gliserol, su, alkol vb.) engelleyebilmesi, biyodizelin çözücü özelliğinden dolayı ve yine çeşitli malzemeler ile uyumluluk konusunda %20 oranının sınır değer olması, yağlama özelliğini iyileştirmesi ve bazı bitkisel yağlardan (palm, pamuk vb.) üretilen biyodizellerin soğuk akış özelliklerinin kötü olmasından dolayı dizel yakıtı ile %20 oranında karıştırılarak bulutlanma, soğuk filtre tıkanma ve akma noktalarını düşürmesi sayılabilir. B2 karışım yakıtı ise yağlama özelliğini iyileştirmesinden dolayı tercih

edilmektedir (Sekmen, 2007; Onurbaş Avcıoğlu, 2011). Bu sebeplerden dolayı bu çalışmada B2 ve B20 karışım yakıtları tercih edilmiştir. Yakıt karışımları hacimsel olarak hazırlanmıştır. Karışımlar yapılırken dizel yakıtı biyodizele ilave edilmiş ve gözle görülür şekilde homojenlik sağlanana kadar mekanik karıştırıcıyla karıştırılmıştır. Daha sonra, alkol ilavesi yapılarak mekanik karıştırıcı ile 7,5 dakika ve homojenizatör ile 7,5 dakika olmak üzere toplam 15 dakika karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Tüm yakıtlar cam fermantasyon kavanozlarında ve ortam koşullarında depolanmıştır. Denemelere başlamadan önce yakıtlar tekrar karıştırılarak oluşabilecek herhangi bir faz ayrışımı önlenmeye çalışılmıştır. Denemelerde kullanılan yakıtların hacimsel olarak karışım oranları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Denemelerde kullanılan yakıtların hacimsel olarak karışım oranları (%)

No	Test yakıtı	Dizel	Biyodizel	Etanol
1	ED	100	-	-
2	E	-	-	100
3	B20	80	20	-
4	B20E5	75	20	5
5	B20E10	70	20	10
6	B2	98	2	-
7	B2E5	93	2	5
8	B2E10	88	2	10

Yakıtların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi

Yakıt örneklerinin önemli fiziksel ve kimyasal özellikleri standartlara göre tespit edilmiştir. Yakıt özellikleri ölçümünde kullanılan test cihazlarının teknik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Deney düzeneği

Motor karakteristik deneyleri, Aksaray Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Otomotiv Programı Otomotiv Laboratuvarı'nda kurulu olan motor test düzeneğinde yürütülmüştür. Motor denemeleri Antor marka 3 LD 510 model bir dizel motorda gerçekleştirilmiştir. Yakıt denemeleri sonucu ortaya çıkan CO, CO₂, NO, NO₂, O₂ emisyonlarının ve egzoz gazı sıcaklıklarının ölçümleri için MRU AIRfair marka OPTIMA 7 model emisyon ölçüm cihazı, duman koyuluğunu ölçmek için ise Bosch marka RTM 430 model duman koyuluğu ölçüm kiti ve Bosch-BEA 350 model emisyon ölçüm cihazı kullanılmıştır. Motor performansı denemelerinde motorun yüklenmesi için NetFren marka NF150 model hidrolik dinamometre test sistemine monte edilmiştir. Denemelerde kullanılan dizel motor, hidrolik dinamometre, egzoz emisyon cihazları ve diğer ölçüm cihazlarına ait teknik özellikler Tablo 3'te verilmiştir.

Motorun çalışması sırasında ortaya çıkan gürültü değerlerinin ölçümü için 30-130 dBA ölçüm aralığına ve

$\pm 1,4$ dBA hassasiyete sahip Extech marka HD600 model ses seviyesi ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ses seviyesi ölçüm cihazı test yakıtlarının dizel motorda

denenmesi sırasında motordan yaklaşık 1 m uzaklığa konularak tüm motor devirlerinde ölçüm yapılmıştır.

Tablo 2. Yakıt özellikleri test cihazlarının teknik özellikleri

No	Özellik	Cihaz	Ölçüm aralığı	Birim	Hassasiyet	Üretici	Standart
1	Yoğunluk/ Özgül ağırlık	Kem Kyoto DA-645	Yoğunluk: 0,00000- 3,00000 Sıcaklık: 0-93	g/cm ³ °C	$\pm 0,00005$ $\pm 0,03$	Kem Kyoto Electronics, Japonya	EN ISO 3675 EN ISO 12185
2	Kinematik viskozite	Polyscience 7306A12E	Ortam sıcaklığı-150 Ölçüm tüpü: 1,2-10 Ölçüm tüpü: 5-50 Kronometre: 0- 2400	°C mm ² /s mm ² /s s	$\pm 0,05$ $\pm 0,5$ ± 1 $\pm 0,01$	Polyscience, ABD	EN ISO 3104
3	Parlama noktası	Rapid Tester RT-1	-30-+300	°C	± 1	Paul N. Gardner Company, ABD	EN ISO 2719 EN ISO 3679
4	Su içeriği	Kem Kyoto MKC-520 Karl-Fischer	10-300000	μ g	$\pm 0,1$	Kem Kyoto Electronics, Japonya	EN ISO 12937
5	Kalori değeri	IKA C200	0-40000	J	$\pm 0,1$	IKA, UK	DIN 51900
6	pH	Labkits ELE- PHP3BW	pH: 0-14 Sıcaklık: 0-100	pH °C	$\pm 0,01$ ± 1	Labkits, Hong Kong	-
7	Bakır şerit korozyon	Koehler K25330	Banyo sıcaklığı: Ortam sıcaklığı-190	°C	± 1	Koehler Instrument, ABD	EN ISO 2160
8	Akma noktası, bulutlanma noktası, soğuk fitre tıkanma noktası	Labkits PT- SYD-510F1	-70-Ortam sıcaklığı	°C	$\pm 0,5$	Labkits, Hong Kong	GB/T510 GB/T3535 GB/T6986 SH/T0248
9	Renk	Lovibond PFX 880	0,5-8	birim	$\pm 0,1$	Lovibond, Birleşik Krallık	ASTM D 1500
10	Kül miktarı	Nabertherm B180	30-3000	°C	± 1	Nabertherm, Almanya	-
11	Distilasyon sıcaklıkları	Labkits PT- SYD-255G	0-400	°C	± 1	Labkits, Hong Kong	GB/T7534- 2004
12	Kükürt tayin cihazı	Sindie OTG	0,7 mg/kg-% 10	mg/kg	-	XOS, ABD	ASTM D7039 ISO 20884
13	Dizel yakıtı analiz cihazı	Grabner Instruments IROX Diesel	25-75	-	-	Grabner Instruments Messtechnik, Avusturya	ASTM D613

Silindir basıncı ölçüm sistemi silindir basınç sensörü, amplifikatör, manyetik devir algılayıcı, veri toplama kartı, sinyal koşullandırıcı ve filtresinden meydana gelmektedir. Kistler marka 6052C model piezoelektrik basınç sensörü silindir basıncının ölçülmesinde kullanılmıştır ve motor silindir kapağına açılan yer, dizel motoru üreten firma tarafından sensörü üreten firmanın önerdiği şekilde yapılmıştır. Silindir basıncına bağlı olarak sensör tarafından üretilen voltajın basınç sinyaline dönüştürülmesini sağlayan ve hassas filtreleme özelliğine sahip olan Kistler marka 5018A model amplifikatör kullanılmıştır. Silindir basıncının krank açısına bağlı değişiminin ölçülmesi için ise Kübler marka Sendix 5000 model manyetik devir algılayıcısı

kullanılmıştır. Silindir basıncı ölçüm sisteminde bulunan elemanların teknik özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.

Motor denemeleri sırasında ölçülen silindir basıncı-krank açısı verileri National firmasına ait NI usb 6210 model veri toplayıcısı, Nel Elektronik firması tarafından hazırlanan sinyal koşullandırıcı ve filtreleyici ve FebriS programı kullanılarak alınmıştır. Silindir basıncı, motorun her bir çevrimi için, bir iş çevrimi boyunca her 1°KMA aralığında 720°KMA boyunca alınan silindir basıncı verilerinin ölçülmesi ile tespit edilmiştir. Silindir basıncı verileri en az 50 çevrimin Savitzky-Golay filtreleme yöntemi uygulandıktan sonra ortalaması alınarak tespit edilmiştir.

Tablo 3. Test motoru, hidrolik dinamometre, egzoz emisyon cihazları ve diğer ölçüm cihazlarına ait teknik özellikler

Test motoru		Hidrolik dinamometre ve ölçüm cihazları			Egzoz gazı analizörü		
		Hidrolik dinamometre			MRU AIRFAIR OPTIMA 7		
Marka	Antor	Marka-model	Devir aralığı	Ölçüm aralığı	Emisyon	Birim	Ölçüm aralığı
Model	3 LD 510	Net Fren NF 150	0-6500 rpm	0-450 Nm	CO	ppm	0-40000
Motor tipi	Dört zamanlı, Direkt enjeksiyonlu	Yük hücresi (Tork için)			CO ₂	%	0-20
Silindir sayısı	1	Marka-model	Ölçüm aralığı		NO ₂	ppm	0-200
Silindir çapı	85 mm	CAS – SBA 200L	0-200 kg		NO	ppm	0-5000
Strok	90 mm	Yük hücresi (Yakıt tüketimi için)			O ₂	% v/v	0-21
Silindir hacmi	510 cm ³	Marka-model	Ölçüm aralığı		Egzoz gazı sıcaklığı	°C	0-750
Sıkıştırma oranı	17,5:1	CAS – BCL-1L	0-3 kg		BOSCH BEA 350		
Maksimum motor gücü	9 kW	Hava metre (Hava tüketimi için)			Emisyon	Birim	Ölçüm aralığı
Maksimum motor torku	32,8 Nm	Orifis çapı	Ölçüm aralığı		Duman koyuluğu	1/m	0-10
Maksimum motor devri	3300 rpm	27,5 mm	0-80 mmH ₂ O				
Soğutma şekli	Su soğutmalı						
Enjektör markası-püskürtme basıncı	STANADYNE 41445190-190 bar						

Tablo 4. Silindir basıncı ölçüm sistemi elemanlarının teknik özellikleri

Basınç sensörü		Amplifikatör		Manyetik devir algılayıcı	
Marka	Kistler	Marka	Kistler	Marka	Kübler
Model	6052C	Model	5018A	Model	Sendix 5000
Tip	Piezoelektrik	Kanal sayısı	1	Ölçüm aralığı, d/d	0-12000
Ölçüm aralığı, bar	0-250	Ölçüm aralığı, pC	2-2200000	Çalışma sıcaklığı, °C	(-40)-(+85)
Çalışma sıcaklığı, °C	(-20)-(+350)	Çıkış sinyali, V	(-10)-(+10)		
		Frekans, kHz	0-200		
		Çalışma sıcaklığı, °C	0-50		

Yanma sırasında iç enerji artışı ve mekanik işe dönüşen net ısı salınımı krank açısına bağlı olarak termodinamiğin birinci yasasına göre Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\frac{dQ_{net}}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dP}{d\theta} \quad (1)$$

burada; Q_{net} (J) yanma sonunda silindir duvarı ve yanma odası duvarına geçen enerjiyi, θ (°) krank açısını, γ özgül ısılar oranını, P (Pa) silindir basıncını ve V (m³) silindir hacmini ifade etmektedir. Motor denemelerinin yapıldığı test düzeneğinin şematik görünümü Şekil 1'de verilmiştir.

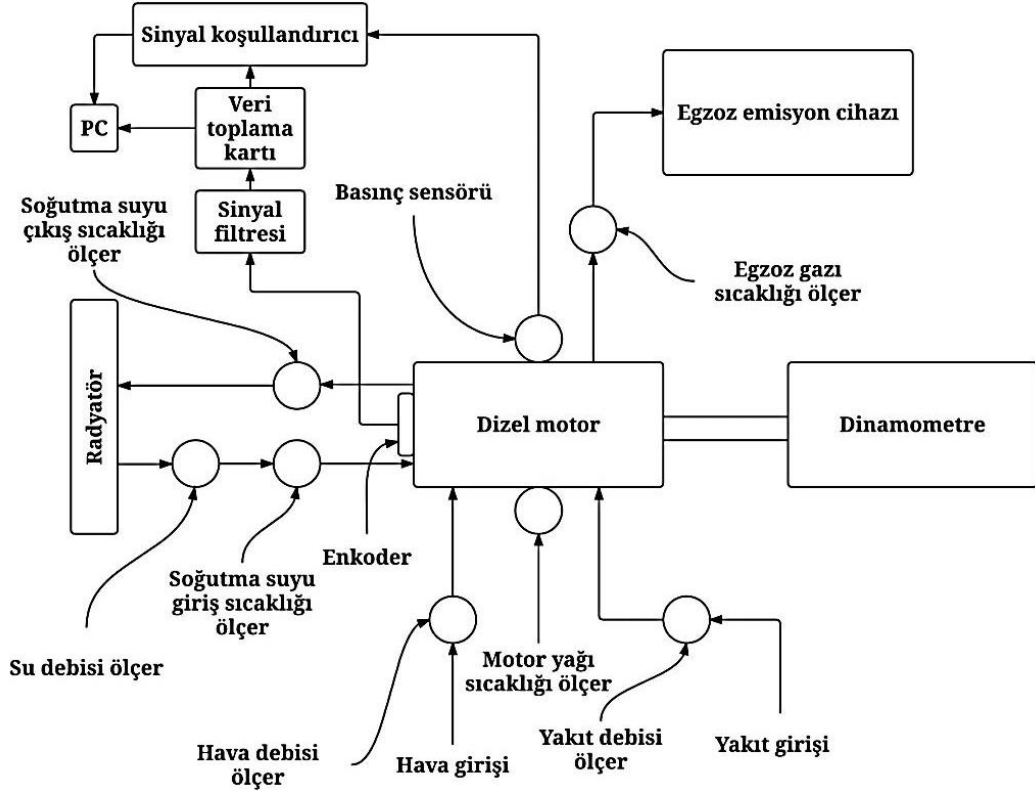
Deney prosedürü

Testlere başlamadan önce kullanılan cihazların kalibrasyonları yapılmış, motorun rodaj süresi geçirilmiş ve ön testler gerçekleştirilerek motorun çalışma şartları

belirlenmiştir. Ön testler sonucunda, motorun kararlı hale gelme süresi tespit edilerek tüm yakıtlar için motorun kararlı hale gelmesi sağlanmıştır. Ön testlerde karşılaşılan tüm eksiklikler giderildikten sonra ana test sürecine geçilmiştir. Dizel yakıtı referans yakıt olarak test edilmiş ve motor tam gaz keleşliği açıklığında, 3200 d/d motor devrinden başlayarak hidrolik dinamometre ile yüklenerek 200 d/d aralıklar ile motor devirleri sabit tutularak 1000 d/d motor devrine kadar motor performansı, egzoz emisyonları ve yanma karakteristikleri belirlenmiştir. Testler sırasında ortam sıcaklığı 25°C olarak tespit edilmiştir.

Belirsizlik analizi

Deneylerin hataları ve belirsizlikleri alet seçimi, koşullar, kalibrasyon, çevre şartları, gözlem, okuma ve test planlamasından kaynaklanabilir. Deneylerin doğruluğunu kanıtlamak için belirsizlik analizine ihtiyaç duyulduğu bilinmektedir.



Şekil 1. Motor test düzeneğinin şematik görünümü

Ölçülen parametrelerinin belirsizliklerini belirlemek için Holman (2012) tarafından önerilen aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

burada; R , $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ bağımsız değişkenlerinin bir fonksiyonudur. w_R belirsizlik sonucunu, w_1, w_2, \dots, w_n bağımsız değişkenlerin belirsizliğini ifade etmektedir.

Eşitlik 2 kullanılarak motor torkunun, motor gücünün, özgül yakıt tüketiminin ve termal verimin belirsizlikleri hesaplanmıştır. Ölçüm cihazlarının hassasiyetleri ve hesaplanan sonuçların belirsizlikleri Tablo 5'te verilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Yakıt özellikleri

Test yakıtlarının bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 6'da verilmiştir. Karışım yakıtlara etanol katılması ile kinematik viskozite, yoğunluk ve soğuk akış özelliklerinin iyileştiği, buna karşın setan sayısı, parlama noktası, su içeriği ve kalori değerinin kötüleştiği tespit edilmiştir.

Tablo 5. Ölçüm cihazlarının hassasiyetleri ve hesaplanan sonuçların belirsizlikleri

Ölçüm	Birim	Hassasiyet	Hesaplanan değerler	Birim	Belirsizlik (%)
Yakıt ağırlığı	g	±0,01	Motor torku	Nm	±1,32
Motor devri	rpm	%1			
Yük	g	±1			
Zaman	s	%0,5	Motor gücü	kW	±1,14
CO	ppm	%5			
CO ₂	%	%5	Yakıt tüketimi	g/s	±1,35
NO ₂	ppm	%5			
NO	ppm	%5	Özgül yakıt tüketimi	g/kWh	±1,80
O ₂	% v/v	%0,2			
Egzoz gazı sıcaklığı	°C	±2	Termal verim	%	±0,71
Duman koyuluğu	1/m	%1			

Tablo 6. Yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri

No	Özellik	Birim	Dizel	B2	B2E5	B2E10	B20	B20E5	B20E10	Etanol	TS EN 590	TS EN 14214	ASTM D6751
1	Karbon	% (m/m)	87,05	88,42	88,13	87,61	86,20	85,75	85,27	56	-	-	-
2	Hidrojen	% (m/m)	12,95	11,29	11,20	11,30	11,12	11,12	11,12	12	-	-	-
3	Oksijen	% (m/m)	-	0,29	0,67	1,09	2,68	3,13	3,61	32	-	-	-
4	C/H	-	6,722	7,832	7,869	7,753	7,752	7,711	7,668	4,667	-	-	-
5	Kimyasal formül	-	C ₁₄ H ₂₅	C _{14,07} H _{25,15} O _{0,04}	C _{13,47} H _{23,96} O _{0,09}	C _{12,87} H _{23,25} O _{0,14}	C _{14,69} H _{26,53} O _{0,04}	C _{14,09} H _{25,58} O _{0,45}	C _{13,49} H _{24,63} O _{0,5}	C ₂ H ₆ O	-	-	-
6	Mangan	mg/kg	0,035	-	-	-	-	-	-	-	2,0maks.	-	-
7	Yoğunluk(15°C'de)	kg/m ³	829,65	831,36	827,88	825,33	839,34	836,32	834,23	787,36	820-845	860-900	-
8	Kinematik viskozite(40°C'de)	mm ² /s	2,554	2,576	2,333	2,171	2,956	2,659	2,505	1,076	2-4,5	3,5-5	1,9-6
9	Kinematik viskozite(70°C'de)	mm ² /s	1,595	1,612	1,446	1,350	1,807	1,637	1,542	0,704	-	-	-
10	Kinematik viskozite(100°C'de)	mm ² /s	1,117	1,131	1,055	1,010	1,260	1,196	1,154	-	-	-	-
11	Parlama noktası	°C	60	65	- ¹	- ¹	88	- ¹	- ¹	14 ²	55min.	101min.	130min.
12	Kalori değeri	kJ/kg	45565	45153	43737	42070	44134	42616	41468	27493	-	-	-
13	Su içeriği	mg/kg	49,405	55,397	121,08	142,93	110,32	176,59	195,34	499,77	200maks.	500maks.	500maks.
14	Renk	-	1,3	1,4	1,3	1,3	1,6	1,5	1,5	1,5	-	-	-
15	pH	-	6,886	7,005	6,933	6,903	7,087	6,940	6,914	6,780	-	-	-
16	Bakır şerit korozyon ³	Korozyon derecesi	1a	1a	1a	1a	1a	1a	1a	-	No. 1	No.1	No.3
17	Bulutlanma noktası	°C	-4	-3	-3	-4	0	-1	-2	-	Rapor	Rapor	Rapor
18	Soğuk filtre tıkanma noktası	°C	-19	-17	-21	-22	-16	-20	-21	-	Rapor	Rapor	Rapor
19	Akma noktası	°C	-36	-35	-38	-39	-33	-33	-34	-	Rapor	Rapor	Rapor
20	Donma noktası	°C	-39	-36	-40	-41	-35	-35	-36	-	-	-	-
21	Setan sayısı	-	55,10	55,24	52,74	50,34	55,75	53,13	50,73	7,1	51min.	51min.	47min.
22	Asit sayısı	mg KOH/g	0,198	0,207	0,247	0,224	0,229	0,276	0,247	-	-	0,50maks.	0,50maks.
23	Kül miktarı	% (m/m)	0,0161	0,0160	-	-	0,0147	-	-	-	0,01maks.	0,02maks.	0,02maks.
24	Kükürt miktarı	mg/kg	6,7	6,6	-	-	5,8	-	-	-	6maks.	10maks.	S15 15maks. S500 500maks.
25	Damıtma (%90 geri kazanım)	°C	317	316	-	-	315	-	-	-	-	-	360maks.
26	Damıtma 250°C'de elde edilen	% (v/v)	51,67	-	-	-	-	-	-	-	65maks.	-	-
	Damıtma 350°C'de elde edilen	% (v/v)	97,14	-	-	-	-	-	-	-	85min.	-	-
	%95'in (v/v) elde edildiği sıcaklık	°C	335	-	-	-	-	-	-	-	360maks.	-	-

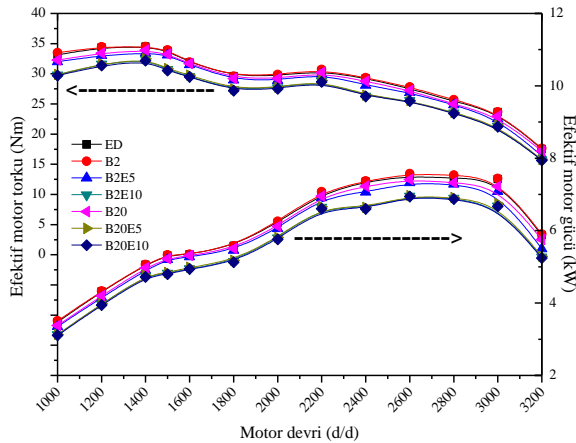
¹Etanolün parlama noktası düşük olduğu için ortam sıcaklığında parlamaktadır.

²Üretici firmadan alınmıştır.

³50°C'de 3 saat

Efektif motor torku

Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin efektif motor torku üzerine etkisi Şekil 2'de gösterilmiştir. Yakıtların maksimum torkları incelendiğinde en yüksek değer 1400 d/d'de gerçekleştiği görülmektedir. 1400 d/d'ye kadar efektif motor torku artmış ve daha sonra azalmaya başlamıştır. Maksimum efektif motor torkları B2E5, B2E10, B20E5 ve B20E10 için sırasıyla 33,44, 32,40, 32,49 ve 32,18 Nm olarak elde edilmiştir. B2E5 ve B2E10 yakıtlarının efektif motor torkları dizel yakıtına göre ortalama sırasıyla %3,07 ve %8,14, B2 yakıtına göre ortalama sırasıyla %3,51 ve %8,56 oranlarında azalmıştır. B20E5 ve B20E10 yakıtlarının efektif motor torkları ise dizel yakıtına göre ortalama sırasıyla %7,79 ve %8,54, B20 yakıtına göre ortalama sırasıyla %6,14 ve %6,89 oranlarında azalmıştır. Karışımdaki alkol oranının artışı ile efektif motor torku değerlerinin düştüğü görülmektedir. Bunun en büyük nedeni alkollerin dizel ve B100 yakıtlarına göre daha az kalori değerine sahip olmasıdır. Kalori değerinin azalması ile yanma sonucu oluşan ısı enerjisi düşmekte ve karışımdaki alkol oranının artması da efektif motor torkunu düşürmektedir. Aynı zamanda alkollerin sahip olduğu düşük setan sayısı tutuşma gecikmesini artırarak kontrollü yanma için gerekli olan zamanı azaltmakta ve yanmayı kötüleştirmektedir (Can vd, 2004; Rahimi vd, 2009; Çelik vd, 2017).



Şekil 2. Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin efektif motor torku ve gücü üzerine etkileri

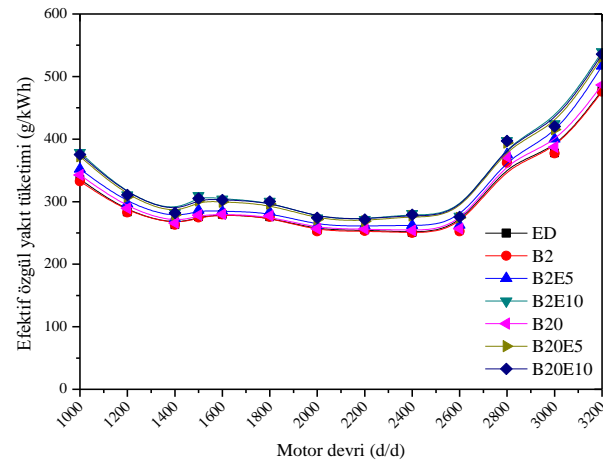
Efektif motor gücü

Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin efektif motor gücü üzerine etkisi Şekil 2'de görülmektedir. Yakıtların test edilmesi sonucunda en yüksek efektif motor gücü değerleri 2600 d/d motor devrinde gerçekleşmiştir. Dizel, B2 ve B20 yakıtlarının kullanılması ile elde edilen efektif motor gücü değerleri sırasıyla 7,51, 7,57 ve 7,41 kW olarak belirlenmiştir. Maksimum efektif motor güçleri B2E5, B2E10, B20E5 ve B20E10 için sırasıyla 7,32, 6,95, 6,96 ve 6,94 kW olarak elde edilmiştir. Yakıttaki alkol oranının artması ile birlikte efektif motor gücü değerlerinde düşme

meydana gelmiştir. Etanol ilaveli yakıtların efektif motor gücü değerlerinin düşük olmasının nedeni biyodizel ve dizel yakıtına göre daha düşük ısı değere ve setan sayısına sahip olması ile yanmayı kötüleştirmesidir. Etanolün sahip olduğu düşük viskozite ve yoğunluk yakıtların viskozite ve yoğunluklarını olumsuz yönde etkileyerek pompa ve enjektörlerde kaçaklara neden olmaktadır. Etanolün yüksek oranda oksijen içermesi birim zamanda silindire alınan yakıt miktarının düşmesine neden olarak efektif motor gücünü azaltmaktadır (Can vd, 2005; Cheenkachorn ve Fungtammasan, 2009; Aksoy ve Bayrakçeken, 2010; An vd, 2012; Çelik vd, 2017).

Efektif özgül yakıt tüketimi

Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin efektif özgül yakıt tüketimi üzerine etkisi Şekil 3'te verilmiştir. Dizel, B2 ve B20 yakıtlarının kullanılması ile elde edilen minimum efektif özgül yakıt tüketimleri 2400 d/d'de sırasıyla 250,51 g/kWh, 249,81 g/kWh ve 253,77 g/kWh olarak hesaplanmıştır. B2E5, B2E10, B20E5 ve B20E10 için ise 2200 d/d'de sırasıyla 260,70, 271,53, 268,66 ve 271,47 g/kWh olarak tespit edilmiştir. B2E5 ve B2E10 yakıtlarının efektif özgül yakıt tüketimleri dizel yakıtından ortalama sırasıyla %3,98 ve %9,91, B2 yakıtına göre ortalama sırasıyla %4,48 ve %10,44 oranlarında yüksek çıkmıştır. B20E5 ve B20E10 yakıtlarının efektif özgül yakıt tüketimleri dizel yakıtından ortalama sırasıyla %8,35 ve %9,41, B20 yakıtına göre ortalama sırasıyla %7,01 ve %8,06 oranlarında yüksek çıkmıştır.



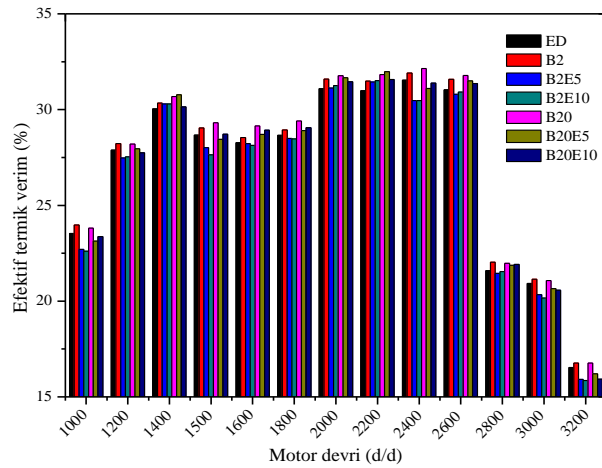
Şekil 3. Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin efektif özgül yakıt tüketimi üzerine etkisi

Karıışımdaki etanol oranının artışı ile efektif özgül yakıt tüketimlerinin yükseldiği görülmektedir. Etanol ilaveli yakıtların efektif özgül yakıt tüketimlerinin yüksek olmasının nedeni etanolün B100 ve dizel yakıtından daha düşük ısı değere sahip olması ile aynı efektif motor gücünü elde edebilmek için silindire daha fazla yakıt almasıdır. Ayrıca, etanolün gizli buharlaşma ısısı dizel yakıtına göre daha yüksek olmasından dolayı alkolün buharlaşması daha yavaş gerçekleşmekte ve yanma performansı olumsuz yönde etkilenmektedir. Bu

etkinin de efektif özgül yakıt tüketimini artırdığı düşünülmektedir (Aksoy ve Bayrakçeken, 2010; Park vd, 2012; Fang vd, 2013; How vd, 2014; Alptekin vd, 2015; Örs vd, 2017; Çelik vd, 2017).

Efektif termik verim

İçten yanmalı motorlarda yanma sonucu açığa çıkan enerji ısı transferi kayıpları nedeni ile tümüyle yararlı işe dönüştürülemez. Alternatif yakıtlar ile yapılan çalışmalarda motor performansının değerlendirilmesi açısından termik verim önemli bir parametredir. Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin efektif termik verim üzerine etkisi Şekil 4'te görülmektedir. B2 ve B20 yakıtları kullanımı ile elde edilen efektif termik verimlerin dizel yakıtından yüksek olduğu, karışımdaki biyodizel oranının artışına bağlı olarak da efektif termik verim değerinin arttığı görülmektedir. Dizel, B2 ve B20 yakıtlarının kullanılması ile elde edilen maksimum termik verimler sırasıyla 2400 d/d motor devrinde %31,54, %31,92 ve %32,14 olarak hesaplanmıştır. Maksimum efektif termik verimler B2E5, B2E10, B20E5 ve B20E10 yakıtları için ise 2200 d/d'de sırasıyla %31,57, %31,51, %31,44 ve %31,98 olarak elde edilmiştir.



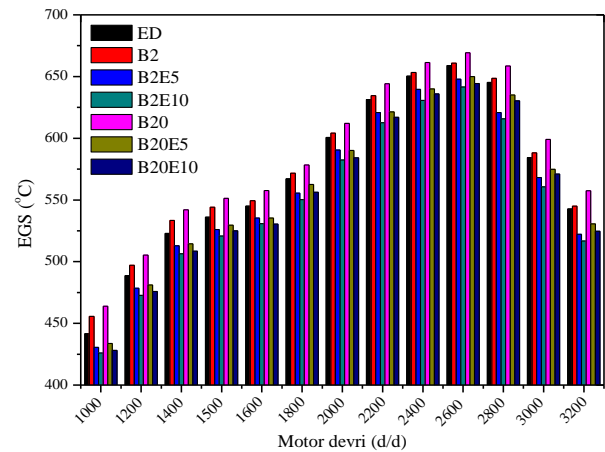
Şekil 4. Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin efektif termik verim üzerine etkisi

Yakıtların bir dizel motorda yanmasıyla oluşan efektif termik verimleri Tablo 5'te verilen belirsizliklerde dikkate alındığında sonuçların anlamlı değişikliklere sahip olmadığı söylenebilir. Ayrıca, bu duruma yakıtların özgül yakıt tüketimleri ve alt ısı değerlerinin birbirine yakın olması da neden olmaktadır. Çünkü yakıt karışımlarındaki katkı maddelerinin oranı çok düşük seviyelerdedir. Bundan dolayı, efektif termik verimlerin birbirine çok yakın değerler çıktığı sonucuna varılabilir. Genel eğilim olarak, etanol ilavesinin yakıtların efektif termik verimlerini düşürdüğü, etanol oranının artışına bağlı olarak bu düşüşün daha da arttığı görülmektedir. Bunun temel sebebi, etanol ilavesi ile yakıtların ısı değerlerinin azalmasıdır. Silindir içerisine alınan yakıtın ısı değerinin düşmesi, yanma sonu sıcaklığını düşürdüğü için efektif termik verimi de düşüreceği

söylenebilir. Aynı zamanda etanolün düşük setan sayısının tutuşma gecikmesini artırarak yanma verimini düşürmesi de efektif termik verimi düşürmüştür (An vd, 2012; Örs vd, 2017).

Egzoz gazı sıcaklığı (EGS)

Egzoz emisyonlarını etkileyen önemli parametrelerden biri olan egzoz gazı sıcaklığı (EGS) yakıt özelliğine (setan sayısı, yoğunluk, viskozite, ısı değer vb.) ve motor işletme parametrelerine (sıkıştırma oranı, püskürtme basıncı, püskürtme avansı vb.) bağlıdır. Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin EGS üzerine etkisi Şekil 5'te verilmiştir. Dizel, B2 ve B20 yakıtları için maksimum EGS'ler 2600 d/d motor devrinde sırasıyla 658,9°C, 660,8°C ve 669,2°C olarak tespit edilmiştir. B2 ve B20 yakıtlarının EGS'leri dizel yakıtına göre ortalama sırasıyla %1,03 ve %2,60 oranlarında yüksek elde edilmiştir. Karışım yakıtlarda biyodizel oranının artışına bağlı olarak EGS'lerinin yükseldiği görülmektedir. B2E5 ve B2E10 yakıtlarının EGS'leri dizel yakıtına göre ortalama sırasıyla %2,25 ve %3,35, B2 yakıtına göre ortalama sırasıyla %3,24 ve %4,33 oranlarında düşük çıkmıştır. B20E5 ve B20E10 yakıtlarının EGS'leri dizel yakıtına göre ortalama sırasıyla %1,58 ve %2,50, B20 yakıtına göre ortalama sırasıyla %4,06 ve %4,96 oranlarında düşük elde edilmiştir. Etanol ilavesi yapılan yakıtlardan elde edilen EGS'lerin karışımdaki alkol oranının artışına bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Alkollerin gizli buharlaşma ısılarının yüksek olmasından dolayı buharlaşabilmek için ortamdaki daha fazla ısı çekmekte, bu durum da EGS'leri düşürmektedir. EGS, yanma sonu sıcaklıklarının bir göstergesidir ve tutuşma gecikmesinin bir fonksiyonudur. Oksijence zengin ve düşük enerji içeriğine sahip yakıt karışımları genellikle yanma sonu sıcaklıklarının düşmesine sebep olur. Alkollerin bünyesinde bulunan yüksek orandaki oksijen yanma hızını artırarak EGS'leri düşürmüştür (Rakopoulos vd, 2007; İlkılıç vd, 2011; Ong vd, 2014; Örs vd, 2017).



Şekil 5. Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin EGS üzerine etkisi

Yanma analizi

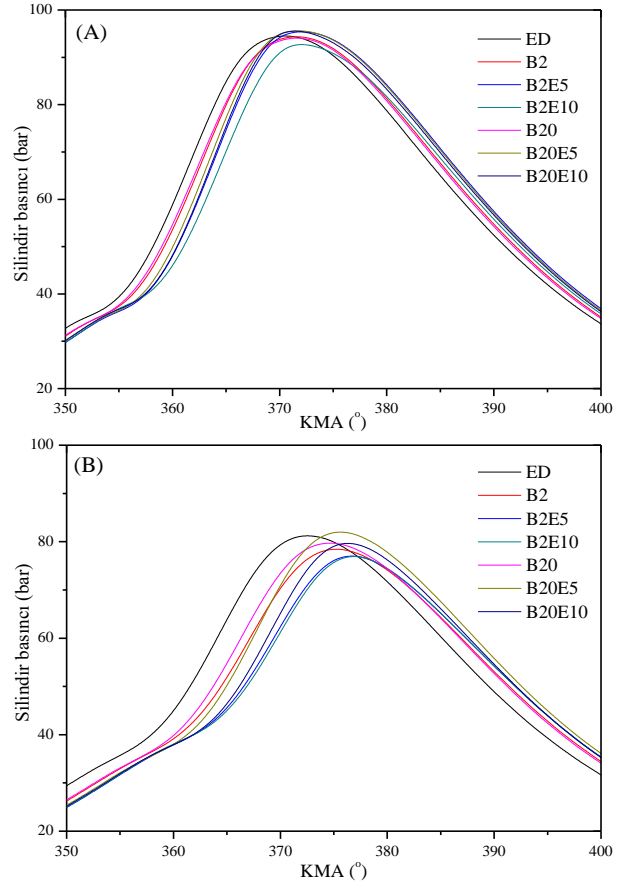
Yanma analizi; ED, B2, B20, B2E5, B2E10, B20E5 ve B20E10 yakıtları için maksimum efektif motor torkunun elde edildiği 1400 d/d ve maksimum efektif motor gücünün elde edildiği 2600 d/d motor devirlerinde, silindir basıncı ve ısı salınımı karakteristiklerinin karşılaştırılması şeklinde incelenmiştir.

Silindir basıncı analizi

Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin 1400 ve 2600 d/d motor devirlerindeki silindir basıncı üzerine etkisi Şekil 6'da verilmiştir. Dizel, B2 ve B20 yakıtlarının 1400 d/d motor devrinde maksimum silindir basıncı değerleri sırasıyla 94,52 bar, 94,37 bar ve 94,11 bar, 2600 d/d motor devrinde maksimum silindir basıncı değerleri ise sırasıyla 81,24 bar, 78,49 bar ve 79,75 bar olarak tespit edilmiştir. 1400 d/d motor devrinde maksimum silindir basıncı değerleri dizel yakıtı için 371°KMA'da, B2 ve B20 yakıtları için 372°KMA'da elde edilmiştir. 2600 d/d motor devrinde ise en yüksek basınç değerleri dizel yakıtı için 373°KMA'da, B2 ve B20 yakıtları için 375°KMA'da elde edilmiştir. B2E5 ve B2E10 yakıtlarının maksimum silindir basınçları sırasıyla 372°KMA'da 95,48 bar ve 92,77 bar olarak; B20E5 ve B20E10 yakıtlarının maksimum silindir basınçları sırasıyla 372°KMA'da 95,65 bar ve 371°KMA'da 95,61 bar olarak tespit edilmiştir. 1400 d/d motor devrinde B2E10 yakıtı hariç diğer alkol ilaveli yakıtların maksimum silindir basınçlarının dizel yakıtından daha yüksek olduğu belirlenmiştir. 2600 d/d motor devrinde ise B2E5 ve B2E10 yakıtlarının maksimum silindir basınçları sırasıyla 377°KMA'da 77,08 bar ve 77,01 bar olarak; B20E5 ve B20E10 yakıtlarının maksimum silindir basınçları sırasıyla 376°KMA'da 82,02 bar ve 79,75 bar olarak tespit edilmiştir. Etanol ilavesinin yakıtların maksimum silindir içi basınç değerlerini genel olarak üst ölü noktadan uzaklaştırdığı görülmektedir. Bunun nedeni etanolün setan sayısının dizel ve B100 yakıtından düşük olmasından dolayı tutuşma gecikmesini artırmasıdır (Anbarasu vd, 2013; Tse vd, 2015; Örs vd, 2017; Çelik vd, 2017).

Net ısı salınımı hızı (NISH)

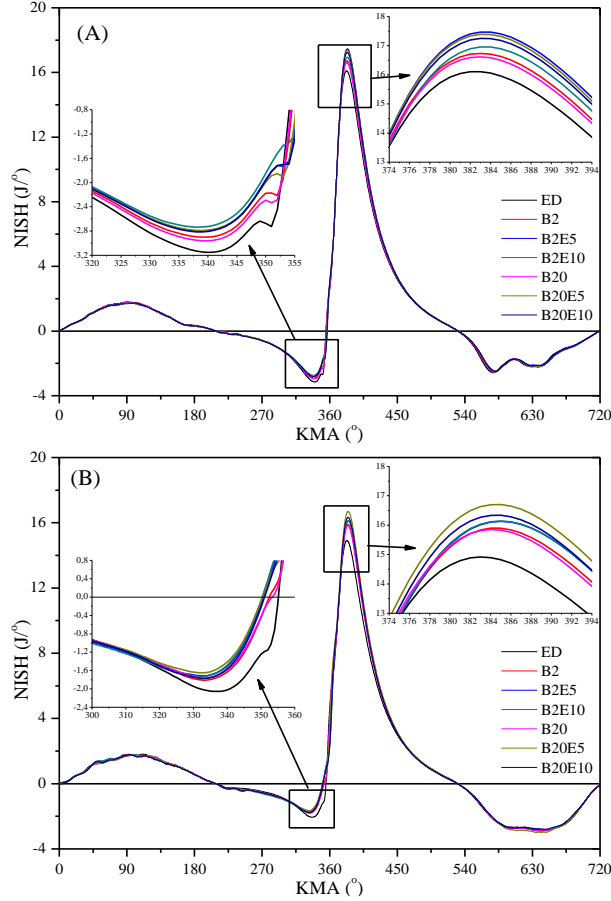
Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin 1400 ve 2600 d/d motor devirlerindeki net ısı salınımı hızı (NISH) üzerine etkisi Şekil 7'de görülmektedir. Dizel, B2 ve B20 yakıtları için 1400 d/d motor devrinde maksimum NISH'ler 383°KMA'da sırasıyla 16,11 J/°, 16,74 J/° ve 16,62 J/° olarak tespit edilmiştir. 2600 d/d motor devrinde maksimum NISH'ler ise B2 ve B20 yakıtları için 384°KMA'da sırasıyla 15,89 J/° ve 15,85 J/° olarak, dizel yakıtı için ise 383°KMA'da 14,92 J/° olarak belirlenmiştir. Etanol ilaveli yakıtların 1400 d/d motor devrindeki maksimum NISH'leri 383°KMA'da gerçekleşmiştir.



Şekil 6. Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin (A)1400 d/d ve (B)2600 d/d motor devirlerindeki silindir basıncı üzerine etkisi

Elde edilen maksimum NISH'ler B2E5, B2E10, B20E5 ve B20E10 yakıtları için sırasıyla 17,47 J/°, 16,96 J/°, 17,39 J/° ve 17,25 J/° olarak tespit edilmiştir. 2600 d/d motor devrinde maksimum NISH'ler 385°KMA'da gerçekleşmiştir. Elde edilen maksimum NISH'ler B2E5, B2E10, B20E5 ve B20E10 yakıtları için sırasıyla 16,13 J/°, 16,14 J/°, 16,70 J/° ve 16,34 J/° olarak tespit edilmiştir. Dizel-biyodizel karışım yakıtlarının NISH değerleri incelendiğinde tüm devirlerde dizel yakıtından daha yüksek elde edilmiştir. Bu duruma, biyodizel ilaveli yakıtların özgül yakıt tüketimlerinin dizel yakıtından daha yüksek olması neden olmuştur. Motor devrinin artmasına bağlı olarak dizel-biyodizel yakıt karışımlarının maksimum silindir içi basınçlarının ve NISH değerlerinin oluştuğu KMA'nın üst ölü noktadan uzaklaştığı, etanol ilavesi ile bu uzaklaşmanın daha da arttığı görülmektedir. Dizel, B2 ve B20 yakıtları için motor devrinin artmasına bağlı olarak maksimum NISH'lerinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, yüksek motor devirlerinde silindir duvarlarına ve yanma odasına geçen ısı transfer hızının ve miktarının azalmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, karışım yakıtlardaki biyodizel oranının artması maksimum NISH'leri artırmaktadır. Biyodizelin viskozite ve yoğunluk değerlerinin dizel yakıtından yüksek olması, yakıtın püskürtme karakteristiklerini kötüleştirmektedir. Yanma başlangıcına kadar geçen zamanda ise silindir içerisinde daha fazla yakıt birikmekte ve biyodizelin

dizel yakıtına göre daha fazla oksijen içermesinden dolayı da bir anda yüksek hızda yanmaya başlamaktadır. Bu nedenlerden dolayı karışım yakıtların NISH'leri ED yakıtından yüksek çıkmıştır. Etanol ilavesi yapılan yakıtların maksimum NISH değerleri incelendiğinde yükselmelerin meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 7. Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin (A)1400 d/d ve (B)2600 d/d motor devirlerindeki NISH üzerine etkisi

Bu durum, etanolün yanma hızını artırmada ki etkisinin ve ısı transferi hızının da azalması olarak açıklanabilir. Ayrıca, etanolün setan sayısının düşük olması ve tutuşma gecikmesini uzatması ile silindir içerisindeki yakıt miktarının artmasına neden olur. Böylece birikmiş yakıt bir anda yanmaya başlar, oksijeninde etkisi ile yanma hızı artar ve yanma verimi iyileşmektedir. Etanolün gizli buharlaşma ısısının yüksek olması, tutuşma gecikmesi periyodunda silindir içindeki sıcaklığın düşmesine ve tutuşma gecikmesinin uzamasına neden olur. Bu da yanma için daha fazla yakıt-hava karışımının oluşmasını sağlar. Bir başka neden ise, etanol püskürtme açısı artarken yakıt damlacık boyutu azalır ve böylece daha iyi hava-yakıt karışımı elde edilmiş olur. Püskürtme karakteristiklerinin iyileşmesinden dolayı NISH değerlerinin arttığı söylenebilir. Etanolün sahip olduğu yüksek uçuculuk, düşük viskozite ve yüzey gerilimi daha

iyi hava-yakıt karışımının oluşumunu sağlayan yakıt damlacıklarının buharlaşmasını teşvik etmektedir (Chen vd, 2007; Anbarasu vd, 2013; Fang vd, 2013; Su vd, 2013; Tse vd, 2015; Örs vd, 2017; Wei vd, 2018).

Tutuşma gecikmesi

Tutuşma gecikmesi süresince yakıt yanma odasına püskürtülmekte ve hava ile karışarak buharlaşmaktadır. Tutuşma gecikmesi süresi püskürtme başlangıcından, ilk alev çekirdeğinin meydana geldiği, bir başka ifadeyle ani basınç artışının görüldüğü ana kadardır. Bu sürede yakıtın yanmaya hazırlanması için gerekli olan fiziksel ve kimyasal işlemler meydana gelmektedir. Yanma odasına püskürtülen yakıtın basıncı ve sıcaklığı ile sıcaklığı sıkıştırma zamanında yükseltilmiş hava arasında bir sıcaklık farkı bulunmaktadır. Yakıtın buharlaşması sırasında ısının kendi üzerine akışımı bu sıcaklık farkı sağlamaktadır. Bu transfer sırasında çekilen ısı, silindir içerisindeki sıcaklık ve basınç artışını bir miktar yavaşlatır (Yardım, 2008). Dizel motorlarda yanma olayının analiz edilmesinde en önemli parametreler püskürtme başlangıcı (PB), yanma başlangıcı (YB), yanma sonu (YS), tutuşma gecikmesi (TG) ve yanma periyodu (süresi) (YP)'dur. Test yakıtlarının maksimum motor torkunun elde edildiği 1400 d/d ve maksimum motor gücünün elde edildiği 2600 d/d motor devirlerindeki PB, YB, YS, TG ve YP değerleri Tablo 7'de verilmiştir. Motor devrinin artmasına bağlı olarak PB, YB ve YS değerlerinin arttığı, TG ve YP değerlerinin ise azaldığı görülmektedir. Biyodizel kullanımı ile TG değerlerinin genelde kısaldığı, etanol ilavesi ile ise TG değerlerinin arttığı görülmektedir. TG'yi etkileyen en önemli yakıt özelliklerinden bir tanesi setan sayısıdır. Biyodizelin setan sayısının dizel yakıtından bir miktar yüksek olması, buna karşın alkollerin setan sayısının ise düşük olması sonucunda elde edilen değerler beklenen sonuçlara büyük ölçüde yakındır (Qi vd, 2010; Alptekin vd, 2015; Tse vd, 2015; Zhu vd, 2016; Örs vd, 2017).

Yakıt karışımlarının çevrimsel farklılıklarının değişimi

Bir motorun düzenli olarak çalışıp çalışmadığı belirli sayıda ardışık çevrimin arasındaki farklılıkların incelenmesi yoluyla belirlenebilmektedir. Test edilen tüm yakıtlar için motor stabilitesi, indike efektif basıncın çevrimsel farklılıklara göre değişiminin incelenmesi ile tespit edilmiştir. Çevrimsel farklılıkların analiz edilmesinde en çok kullanılan ifade varyasyon katsayısı (COV)'dır. Silindir iç basıncı birden fazla termodinamik çevrim için ölçüldüğünde çevrimsel farklılıklar gözlemlenebilir. Bu durum, yani çevrimsel basınç değişimi, yanma sürecinin çevrimsel olarak değişmesinden kaynaklanmaktadır.

Tablo 7. Test yakıtlarının PB, YB, YS, TG ve YP sonuçları

Yakıt	1400 d/d							2600 d/d						
	PB	YB	YS	TG	YP		PB	YB	YS	TG	YS			
	°KMA	°KMA	°KMA	°KMA	ms	°KMA	ms	°KMA	°KMA	°KMA	°KMA	ms	°KMA	ms
ED	332	351	398	19	2,36	47	5,88	333	354	399	21	1,29	45	2,96
B2	333	352	398	19	2,10	46	5,40	336	355	400	19	1,10	45	2,98
B20	333	352	398	19	2,09	46	5,50	335	354	400	19	0,84	46	2,91
B20E5	334	353	399	19	2,32	46	5,79	337	356	400	19	1,21	44	2,83
B20E10	334	354	399	20	2,31	45	5,27	337	358	400	21	1,32	42	2,70
B2E5	334	354	399	20	2,52	45	5,50	337	356	401	19	1,22	45	2,90
B2E10	334	355	399	21	2,42	44	5,16	337	358	401	21	1,27	43	2,75

İndike ortalama efektif basınç için varyasyon katsayısı Eşitlik 3 ile hesaplanabilir (Heywood, 1988).

$$COV = \frac{\sigma_{imep}}{\overline{imep}} \times 100 \quad (3)$$

burada; COV (%) varyasyon katsayısını, \overline{imep} her bir çevrimde meydana gelen indike ortalama efektif basınçların ortalamasını, σ_{imep} ise standart sapmayı ifade etmektedir. Her iki parametre Eşitlik 4 ve 5 ile hesaplanabilir (İbrahim, 2016).

$$\overline{imep} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} imep(i)}{n} \quad (4)$$

$$\sigma_{imep} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{i=n} (imep(i) - \overline{imep})^2} \quad (5)$$

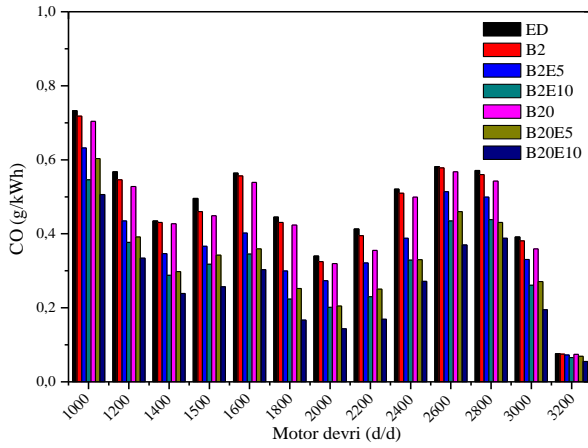
Heywood (1988) motor stabilitesinin varyasyon katsayısının %10'u geçmesi durumunda genellikle etkilendiğini, İbrahim ve Bari (2010) ise varyasyon katsayısının %5'in üzerine çıktığında motor stabilitesinin bozulmaya başladığını göstermişlerdir. Buna karşın, Gharehghani vd (2015) indike ortalama efektif basınç için varyasyon katsayısının sınır değerinin %2,5 olduğunu söylemektedir. İbrahim (2016), bütanol-atık kızartma yağı biyodizeli-dizel yakıt karışımlarının bir dizel motorda test edilmesi sonucunda varyasyon katsayısını %5'in altında olduğunu ve motor stabilitesinin etkilenmediğini belirtmiştir. Can vd (2017), kanola biyodizeli-dizel yakıt karışımları ile yaptığı testlerde COV_{imep} değerini 2,15-3,06 aralığında bulmuştur. Uyumaz (2018), COV_{imep} için kritik eşğin %10 olduğunu ve biyodizel karışimli yakıtların daha kararlı bir yanma süreci geçirdiklerini göstermiştir. Bu çalışmada, test yakıtlarının bir dizel motorda denenmesi ile 1400 d/d ve 2600 d/d motor devirlerinde varyasyon katsayılarının %5'in altında olduğu belirlenmiş ve test edilmiş alternatif yakıtların kullanılmasının motor stabilitesini bozmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca, 100 ardışık döngü için sonuçların tekrarlanabilirliği açısından yeterli bulunmuştur. Biyodizel kullanımı ile çevrimsel farklılıkların azaldığı, bunun nedeninin ise biyodizelin yüksek setan sayısı ve yüksek oksijen

içeriğinden dolayı yanmayı iyileştirmesi olarak açıklanabilir (Gharehghani vd, 2017).

Egzoz emisyon sonuçları

CO emisyonu

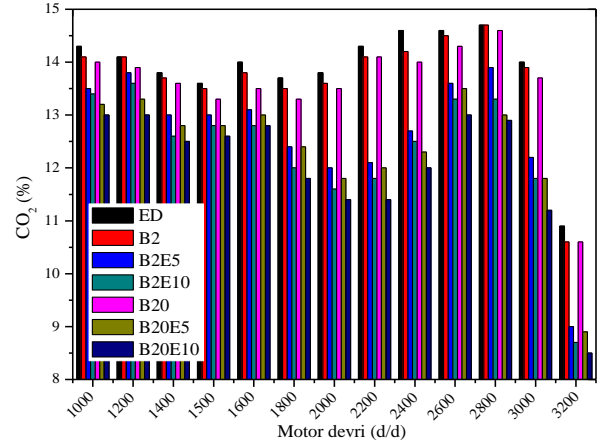
Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin CO emisyonu üzerine etkisi Şekil 8'de görülmektedir. Eksik yanma sonucu oluşan CO gazı, çok kuvvetli bir zehirdir. Bitki yapraklarına, insan ve hayvanların akciğerlerine zarar veren yüksek reaktiviteye sahip bir moleküldür. Oksijen taşıma kapasitesini azaltması sonucunda kandaki oksijen yetersizliği nedeniyle organ ve dokularda fonksiyon bozuklukları meydana getirir. Hamile kadınların fetal büyümesini ve küçük çocukların doku gelişimini etkiler. Diğer kirleticiler ile birlikte insanların solunum ve dolaşım yolları hastalıklarının oranını yükseltir. Az miktarda solunduğunda bile baş dönmesi, görmeye bulanıklık ve bulantıya neden olur (Chauhan ve Shukla, 2011; Mofijur vd, 2013). Bundan dolayı, NRE-v/c-2 kategorisinde CO emisyonunun maksimum 6,60 g/kWh olması istenmektedir. Elde edilen sonuçlar güncel emisyon standardı ile karşılaştırıldığında kabul edilebilir bulguların elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, B2E5 ve B2E10 yakıtlarının CO emisyonları dizel yakıtına göre ortalama sırasıyla %19,75 ve %33,49, B2 yakıtına göre ortalama sırasıyla %17,50 ve %31,66; B20E5 ve B20E10 yakıtlarının CO emisyonları dizel yakıtına göre ortalama sırasıyla %30,14 ve %45,01, B20 yakıtına göre ortalama sırasıyla %26,02 ve %41,85 oranlarında düşük çıkmıştır. Etanol ilavesinin yakıtların CO emisyonlarını düşürdüğü ve etanol oranının artışına bağlı olarak bu düşüşün daha da fazlaştığı görülmektedir. Etanol dizel yakıtına göre daha küçük moleküler yapıya sahip olması, yapısında oksijen bulundurması ve dizel yakıtında bulunan kükürt, kanserojen maddeler ve ağır metalleri içermemesinden dolayı egzoz emisyonlarında olumlu etkiye sebep olmaktadır. CO emisyonlarındaki iyileşmenin nedeni etanolün yapısında dizel yakıtına göre daha az karbon ve daha çok oksijen bulundurmasıdır. Motor çalıştırıldığında silindir içerisindeki yakıtın zengin olduğu bölgelerde alkollerin yapısındaki oksijen ile oksijen/yakıt oranını artırarak yanmanın tam olarak gerçekleşmesini sağlamaktadır (Ajav vd, 1999; Choi ve Reitz, 1999; Can vd, 2005; Aksoy ve Bayrakçeken, 2010).



Şekil 8. Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin CO emisyonu üzerine etkisi

CO₂ emisyonu

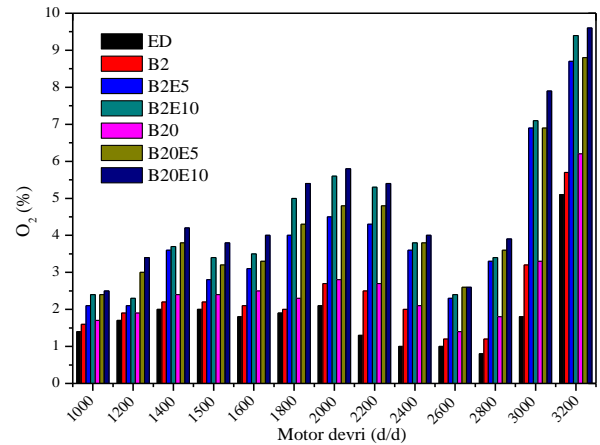
Hidrokarbon içeren yakıtların yanmasıyla doğal olarak açığa çıkan bir gaz olan CO₂ genel olarak yakıt içerisinde bulunan C atomu miktarına ve yakıtın yanma verimine bağlıdır. Bugünlerde dünyanın önemli çevre sorunlarından biri olan küresel ısınmada temel etkenlerden biride artan CO₂ emisyonunun atmosferde sera etkisi oluşturmaktadır. Biyodizel kullanımı ile ortaya çıkan ve atmosfere salınan CO₂ emisyonunun biyodizel üretiminde kullanılan yağ bitkileri tarafından fotosentez çevrimine katıldığı belirtilmektedir (Özsezen ve Çanakçı, 2009; İnternet, 2016). Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin CO₂ emisyonu üzerine etkisi Şekil 9'da verilmiştir. Egzoz ürünleri arasında bulunan CO₂ tam yanmayı ifade ettiği için önemli bir parametredir. Biyodizel yakıtı dizel yakıtına göre daha düşük karbon/hidrojen oranına sahip olmasından dolayı daha düşük CO₂ emisyonu oluşturmuştur. B2E5 ve B2E10 yakıtlarının CO₂ emisyonları dizel yakıtına göre ortalama sırasıyla %9,07 ve %11,35, B2 yakıtına göre ortalama sırasıyla %7,99 ve %10,30 oranlarında; B20E5 ve B20E10 yakıtlarının CO₂ emisyonları dizel yakıtına göre ortalama sırasıyla %10,97 ve %13,60, B20 yakıtına göre ortalama sırasıyla %8,94 ve %1,63 oranlarında düşük çıkmıştır. Karışım yakıtlara etanol ilavesi ise CO₂ emisyonlarının düştüğü ve etanol oranının artması ile CO₂ emisyonlarının daha da düştüğü görülmektedir. Bunun temel nedeni etanolün dizel ve B100 yakıtlarına göre daha az oranda karbon atomu içermesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, etanolün silindir içerisinde yakıtın homojen karışımına engel olması ve yanma hızının artması ile karbon ve oksijen atomlarının reaksiyon sürelerini kısaltması da CO₂ emisyonlarını azalttığı söylenebilir (Shi vd, 2005; Shi vd, 2006; Bhale vd, 2009, Guarieiro vd, 2009; Barabás ve Todorut, 2011; Randazzo ve Sodr , 2011; Aydın ve Ögüt, 2017;  rs vd, 2017).



Şekil 9. Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin CO₂ emisyonu üzerine etkisi

O₂ emisyonu

Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin O₂ emisyonu üzerine etkisi Şekil 10'da görülmektedir. Maksimum O₂ emisyonları tüm test yakıtları için 3200 d/d motor devrinde elde edilmiştir. B2 ve B20 yakıtlarının test edilmesi sonucunda oluşan O₂ emisyonları dizel yakıtından ortalama sırasıyla %34,49 ve %50,31 oranlarında yüksek çıkmıştır. Maksimum O₂ emisyonları B2E5, B2E10, B20E5 ve B20E10 için sırasıyla %8,7, %9,4, %8,8 ve %9,6 olarak ölçülmüştür. Etanol ilavesi ile karışım yakıtların O₂ emisyonlarının arttığı görülmektedir. Bu durum etanolün bünyesinde bulunan oksijen ile açıklanabilir (Aydın ve Ögüt, 2017).

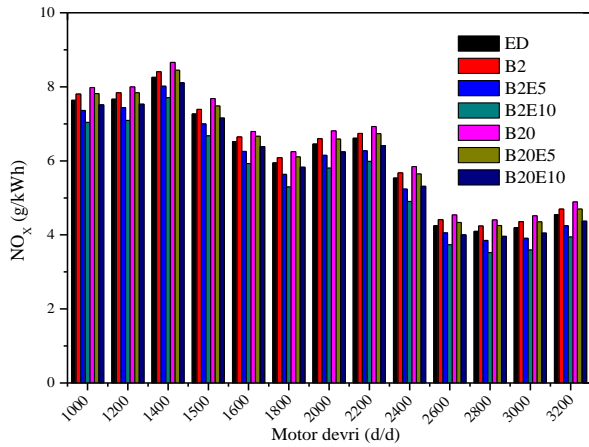


Şekil 10. Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin O₂ emisyonu üzerine etkisi

NO_x emisyonu

Havanın yaklaşık %78'ini oluşturan azot (N₂) normal şartlar altında yanma sonucu reaksiyona girmemektedir. Ancak, silindir içerisindeki yanmadan dolayı ulaşılan yüksek sıcaklık nedeniyle silindire emilen havanın içerisindeki azot ile oksijen reaksiyona girerek azot oksitler meydana gelmektedir. Azot oksiti oluşturan ana yapı NO'dur. Egzoz gazlarının atmosfere atılması ile NO'nun bir bölümü NO₂ ve diğer NO_x'lere dönüşmektedir (Dorado vd, 2003; Özsezen vd, 2006).

Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin NO_x emisyonu üzerine etkisi Şekil 11’de görülmektedir. Maksimum NO_x emisyonları tüm test yakıtları için maksimum efektif motor torkunun elde edildiği 1400 d/d motor devrinde tespit edilmiştir. Maksimum NO_x emisyonları dizel, B2, B20, B2E5, B2E10, B20E5 ve B20E10 için sırasıyla 8,26 g/kWh, 8,41 g/kWh, 8,66 g/kWh, 8,02 g/kWh, 7,70 g/kWh, 8,45 g/kWh ve 8,11 g/kWh olarak tespit edilmiştir. NO_x atmosferde bulunan su ile reaksiyona girerek asit yağmurlarına neden olur. Bu yağmurlara maruz kalan insanlarda akciğer fonksiyonlarında olumsuz etkilere neden olur. Akciğerleri tahriş eder ve ödem, bronşit ve zatürreye neden olur. Toz ve polene karşı duyarlılığı artırır ve astıma neden olabilir. Göz ve kulak rahatsızlıkları meydana getirir. Sinir sistemini olumsuz yönde etkiler (Chauhan ve Shukla, 2011; Mofijur vd, 2013). Bundan dolayı motorlardan kaynaklı NO_x emisyonlarının sınırlandırılması gerekmektedir. NRE-v/c-2 kategorisi emisyon standardında NO_x+HC emisyonları toplamı maksimum 7,50 g/kWh olabilmektedir. Denemelerin yapıldığı test motorunda HC emisyonlarının çok düşük seviyelerde çıktığı bilinmektedir. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar NO_x emisyon standardı ile karşılaştırıldığında genel olarak kabul edilebilir sonuçların ortaya çıktığı görülmektedir. NO_x emisyonlarının NO_x emisyonlarının oluşmasındaki en önemli parametreler silindir içi sıcaklığı ve basıncı, tutuşma gecikmesi ve yanma süresidir. Biyodizelin efektif özgül yakıt tüketiminin dizel yakıtına göre yüksek olması ve bünyesinde %10-12 oranında oksijen içermesinden dolayı yakıtça zengin bölgelerde gerekli oksijeni sağlaması, tam yanma bölgelerinin sayısını artırmıştır ve böylece yüksek ortam sıcaklığının oluştuğu bölge sayısı artarak daha yüksek miktarda NO_x emisyonları meydana gelmiştir.



Şekil 11. Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin NO_x emisyonu üzerine etkisi

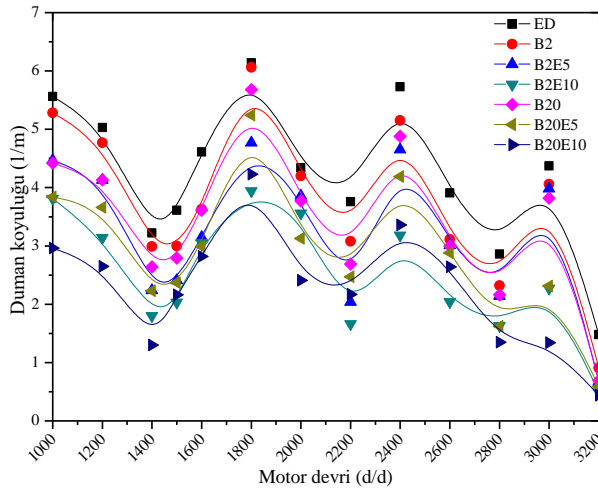
Biyodizel kullanımı ile artış gösteren NO_x emisyonlarının azaltılmasında kullanılan değişik yöntemler bulunmaktadır. Bunlar yakıtta (alternatif yakıt, düşük azotlu yakıt, yakıt katkıları), motorda (yanma, süpürme havası, su püskürtülmesi, EGR) ve egzoz gazlarında (katalitik konvertör kullanımı) alınacak

önlemler olarak sıralanabilir (Haşimoğlu vd, 2002). Etanol ilavesinin yakıtların NO_x emisyonlarını düşürdüğü ve etanol oranının artışına bağlı olarak bu düşüşün daha da fazlaştığı görülmektedir. Etanolün gizli buharlaşma ısısının yüksek olması, oksijence zengin ve düşük enerji içeriğine sahip olmasından dolayı silindir içi artık gazların sıcaklığının düşmesi ile N ve O atomları tepkimeye girememekte ve NO_x emisyonlarını azaltmaktadır. Ayrıca, etanolün yoğunluk ve viskozite değerlerinin biyodizel ve dizel yakıtından düşük olması sebebiyle silindir içerisindeki yanma sonu sıcaklığına doğrudan etki etmektedir (Aktaş ve Sekmen, 2008; Fang vd, 2013; Mofijur vd, 2014; Yılmaz vd, 2014; Tse vd, 2015; Aydın ve Ögüt, 2017; Örs vd, 2017; Çelik vd, 2017).

Duman koyuluğu

Duman koyuluğu TSE 11365 standardına göre, egzoz gazı içerisinde bulunan şeffaf olmayan parçacıkların, gazdan geçen ışığın aydınlatma şiddetini (aydınlanan birim yüzey için ışık akısı) azaltma yüzdesidir. Tam şeffaf gaz için duman koyuluğu %0, ışığı tamamen absorbe eden, yani geçirgen olmayan gaz için duman koyuluğu ise %100'dür. Işık absorblama katsayısı egzoz gazı içerisinde bulunan, şeffaf olmayan parçacıkların, gazdan geçen ışın aydınlatma şiddetinin (aydınlanan birim yüzey için ışık akısı) azalmasıyla ilgili bir katsayıdır. Dizel motorunda silindir içerisinde yanma esnasında oksijenin yetersiz olması sıvı formda bulunan hidrokarbon bileşikli yakıt damlacıklarının çok bulunduğu yerde katı halde karbon parçacıklarının oluşmasına ve yanmayarak is partikülleri şeklinde dışarı atılmasına neden olur. Işık absorblama katsayısını etkileyen en önemli parametreler silindire alınan hava miktarı, yakıtın bünyesinde bulunan oksijen miktarı ve yakıtın silindir içerisinde hızla hava ile karışmayıp buharlaşmamasıdır.

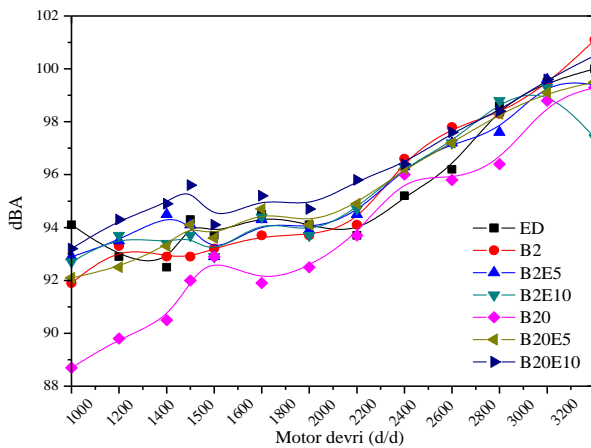
Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin duman koyuluğu üzerine etkisi Şekil 12’de görülmektedir. Maksimum duman koyuluğu değerleri tüm test yakıtları için 1800 d/d’de elde edilmiştir. Maksimum duman koyuluğu değerleri dizel, B2, B20, B2E5, B2E10, B20E5 ve B20E10 için sırasıyla 6,141/m, 6,061/m, 5,681/m, 4,771/m, 3,941/m, 5,241/m ve 4,23 1/m olarak tespit edilmiştir. Etanol ilavesi ile yakıtların duman koyuluğu değerlerinin düştüğü, etanol oranının artması ile duman koyuluğu değerlerinin daha da düştüğü görülmektedir. Dizel difüzyon alevi ilerlerken yakıtın yoğun olduğu bölgelerdeki duman oluşum eğiliminin kimyasal olarak kontrolünde, alkollerin içerisinde atomik bağla bağlı olan oksijenin pozitif bir etkisi olmaktadır Bu sebeple, etanolün bünyesinde bulunan oksijenden dolayı duman koyuluğunun azaldığı söylenebilir (Can vd, 2005; An vd, 2012; Fang vd, 2013; Çelik vd, 2017).



Şekil 12. Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin duman koyuluğu üzerine etkisi

Gürültü emisyonu

Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin gürültü emisyonu üzerine etkisi Şekil 13'te görülmektedir. Maksimum gürültü değerleri 3000-3200 d/d'de, minimum gürültü değerleri ise 1000-1200 d/d'de ölçülmüştür. Ortalama olarak gürültü değerlerine bakıldığında zaman dizel yakıtına göre B2 ve B20 yakıtlarının gürültü değerleri sırasıyla %0,03 ve %1,70 oranlarında düşük çıkmıştır. Ancak alkol ilavesi gürültü değerlerini kademeli olarak artırmıştır. Sanjid vd (2014) dizel yakıtına %5 ve %10 biyodizel ilavesi ile ortalama olarak motor gürültü değerlerinin dizel yakıtına göre sırasıyla %2,5 ve %5 oranlarında azaldığını, Liaquat vd (2013) ise B5 ve B10 yakıtları kullanımı ile gürültü değerlerinin farklı oranlarda azaldığını tespit etmişler ve bunun biyodizelin sahip olduğu yüksek viskozite (yağlamayı iyileştirmektedir), yüksek setan sayısı (tutuşma gecikmesini azaltmakta ve bunun sonucunda silindir içerisinde maksimum basınç artışı azalmaktadır) ve yüksek oksijen içeriğinden (yanma verimini artırmaktadır) kaynaklandığını belirtmişlerdir.



Şekil 13. Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına etanol ilavesinin gürültü emisyonu üzerine etkisi

Tablo 8'de literatürde bulunan bazı çalışmalarda kullanılan test motoru, test koşulları, test yakıtları,

biyodizelin üretildiği hammadde, referans yakıt ile egzoz emisyon, performans ve yanma analizi sonuçları bu deneysel çalışmanın sonuçları ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tablo 8 incelendiğinde elde edilen deneysel sonuçların literatür ile genel olarak uyumlu olduğu söylenebilir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada sarı hardal (*Sinapis alba* L.) tohumlarından vidalı pres yardımıyla elde edilen sarı hardal ham yağından transesterifikasyon yöntemi ile biyodizel üretilmiştir. Üretilen biyodizel standart dizel yakıtı ve etanol ile belirli oranlarda harmanlanmış ve B2, B20, B2E5, B2E10, B20E5 ve B20E10 yakıtları elde edilmiştir. Elde edilen bu test yakıtları tek silindri, su soğutmalı, direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda test edilerek performans, yanma ve emisyon karakteristikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki sonuçlar özetlenebilir.

- Sarı hardal yağının düşük serbest yağ asidi (%0,914) içeriğine sahip olmasından dolayı tek kademeli transesterifikasyon yöntemi ile biyodizel üretimi gerçekleştirilmiştir.
- Dizel yakıtına biyodizel ilavesi ile ısıl değer, kinematik viskozite, su içeriği, yoğunluk, asit sayısı, bulutlanma noktası, akma noktası, soğuk filtre tıkanma noktası ve donma noktası özellikleri olumsuz yönde etkilenirken; parlama noktası değerinin iyileştiği belirlenmiştir.
- Karışım yakıtlara etanol ilavesi ile kinematik viskozite, yoğunluk, bulutlanma noktası, akma noktası, soğuk filtre tıkanma noktası ve donma noktası özelliklerinin iyileştiği; su içeriği, parlama noktası, ısıl değer gibi özelliklerinin kötüleştiği belirlenmiştir.
- Motor performansı sonuçlarına göre dizel yakıtına %2 oranında biyodizel katılması ile viskozite ve yoğunluğun bir miktar artması ile pompalama kaçaklarının azalması ve oksijen içeriğinin artması ile performans değerlerinin iyileştiği, biyodizel oranının daha da artması ve alkol katılması ile dizel yakıtından daha az ısıl değere sahip olmasından dolayı motor performans değerlerinin olumsuz yönde etkilendiği belirlenmiştir.
- Motor devrinin artması ile maksimum silindir basıncının elde edildiği krank mili açısı değerlerinin artan piston hızına göre yanma hızının aynı oranda artmaması ile genelde üst ölü noktadan uzaklaştığı, ayrıca alkol ilavesi ile karışım yakıtlarının setan sayılarının azalması ile tutuşma gecikmelerinin artmasından dolayı da yakıtların maksimum silindir basıncı değerlerini üst ölü noktadan uzaklaştığı tespit edilmiştir.

Tablo 8. Deneysel sonuçların literatürdeki diğer çalışmalar ile karşılaştırılması

Test motoru	Test koşulları	Test yakıtı (Biyodizel/Dizel/Etanol)	Biyodizel hammaddesi	Referans yakıt	Emisyon	Performans	Yanma	Kaynak
Isuzu 4HF1, 4 silindirli, DI, 4 zamanlı, su soğutmalı, 88 kW	Motor devri: 1800 d/d, ortalama efektif basınç: 0,08-0,70 MPa	5/-/95, 10/-/90, 15/-/85	Atık kızartma yağı	Dizel	NO _x ↓, CO↑, PM↓	Özgül yakıt tüketimi↑, termik verim↑	Silindir basıncı↑, ısı salınımı hızı↑,	Zhu vd, 2011
Kirloskar TV-1, 1 silindirli, 4 zamanlı, DI, su soğutmalı, 5,2 kW	Motor devri: 1500 rpm, yük: 1-5 kW	95/-/5, 90/-/10, 85/-/15	Pamuk yağı	Dizel	HC↓, NO _x ↓, is↑, CO↓	Özgül enerji tüketimi↑, termik verim↓	Silindir basıncı↑, ısı salınımı hızı↑, TG↑	Anbarasu vd, 2013
Kubota GL7000, 2 silindirli, 4 zamanlı, IDI, su soğutmalı, 6 kW	Yük: %0-90	48,5/48,5/3, 47,5/47,5/5, 42,5/42,5/15, 37,5/37,5/25	Atık kızartma yağı	Dizel	CO↑, NO↓	EGS↑	-	Yılmaz vd, 2014
Ford Cargo, turboşarjlı, 6 silindirli, 4 zamanlı, IDI, su soğutmalı, 136 kW	Motor devri: 1400 rpm, yük: 150-600 Nm	20/80/-, 20/75/5, 20/70/10/20/60/20	Et yağı, tavuk yağı	Dizel	CO↓, CO ₂ ↓, HC↓, NO _x ↓,	Özgül yakıt tüketimi↑	Silindir basıncı↓, ısı salınımı hızı↑, TG↑	Alptekin vd, 2015
Antor 3 LD 510, 1 silindirli, 4 zamanlı, DI, su soğutmalı, 9 kW	Motor devri: 1000-3200 d/d	80/-/20, 84/-/16, 88/-/12, 92/-/8, 96/-/4,	Pamuk yağı, kanola yağı	Biyodizel	CO↑, HC↑, NO _x ↓, is↓	Tork↓, güç↓, özgül yakıt tüketimi↑	Silindir basıncı↑, ısı salınımı hızı↑, TG↑, YP↓,	Çelik vd, 2017
Super Star, 1 silindirli, 4 zamanlı, DI, su soğutmalı, 15 BG	Motor devri: 1000-2400 d/d	2,5/95/2,5, 5/90/5, 2,5/92,5/5, 5/92,5/2,5	Aspir yağı	Dizel	CO↑ (düşük devirlerde), CO↓ (yüksek devirlerde), CO ₂ ↑, HC↑, O ₂ ↑, NO _x ↑, SO ₂ ↓	Tork↔, güç↔, özgül yakıt tüketimi↑	-	Aydın ve Ögüt, 2017
Antor 3 LD 510, 1 silindirli, 4 zamanlı, DI, su soğutmalı, 9 kW	Motor devri: 1000-3000 d/d	3/97/-, 3/92/5, 3/87/10, 20/80/-, 20/75/5, 20/70/10	Aspir yağı	Dizel	CO↑, NO↓, is↓, HC↑	Özgül yakıt tüketimi↑, termik verim↓, volümetrik verim↑, EGS↑	Silindir basıncı↑, TG↓, ısı salınımı hızı↑	Örs vd, 2017
Antor 3 LD 510, 1 silindirli, 4 zamanlı, DI, su soğutmalı, 9 kW	Motor devri: 1000-3200 d/d	2/98/-, 2/93/5, 2/88/10, 20/80/-, 20/75/5, 20/70/10	Sarı hardal yağı	Dizel	CO↓, CO ₂ ↓, O ₂ ↑, NO _x ↓, is↓, gürültü↑	Tork↓, güç↓, özgül yakıt tüketimi↑, termik verim↓, EGS↓	Silindir basıncı↑, ısı salınımı hızı↑, TG↑	Bu çalışma

- Motor devrinin artmasına bağlı olarak biyodizelin kötü püskürtme karakteristiklerinin biraz daha düzelmesi ve ısı transfer hızının da azalmasından dolayı maksimum NISH'lerin azaldığı, karışım yakıtlardaki biyodizel oranının artması ile viskozite ve yoğunluk değerlerinin dizel yakıtından yüksek olması, yakıtın püskürtme karakteristiklerini kötüleştirdiğinde maksimum NISH'lerin arttığı, alkol ilavesi yapılan yakıtların maksimum NISH değerlerinin genelde yükseldiği görülmüştür.
- Biyodizel kullanımı ile TG değerlerinin genelde kısaldığı, alkol ilavesi ile TG değerlerinin arttığı, TG'yi etkileyen en önemli yakıt özelliklerinden bir tanesi olan setan sayısının biyodizelde daha yüksek olması, buna karşın alkollerin setan sayısının ise düşük olması sonucunda elde edilen değerler beklenen sonuçlara büyük ölçüde yakın olduğu tespit edilmiştir.
- Karışım yakıtlarda biyodizel oranının artışına bağlı olarak EGS, NO_x ve O₂ emisyonlarının arttığı, buna karşın duman koyuluğu, CO ve CO₂ emisyonlarının azaldığı tespit edilmiştir. Karışım yakıtlara etanol ilavesi ile EGS, duman koyuluğu, CO, CO₂ ve NO_x emisyonlarının azaldığı, O₂ emisyonunun ise arttığı tespit edilmiştir.
- Motor gürültü değerlerinin belirli devirlerde yükselme ve azalmalar gösterdiği, maksimum gürültü değerlerinin 3000-3200 d/d'de, minimum gürültü değerlerinin ise 1000-1200 d/d'de olduğu tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bozok Üniversitesi Proje Koordinasyon Araştırma ve Uygulama Merkezi Müdürlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi tarafından 2015FBE/T158 kodu ile desteklenmiştir. BAP Birimine desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- Ajav, E.A., Singh, B., Bhattacharya, T.K., 1999, Experimental study of some performance parameters of a constant speed stationary diesel engine using ethanol-diesel blends as fuel, *Biomass and Bioenergy*, 17(4):357-365.
- Akar, M.A., 2016, Performance and emission characteristics of compression ignition engine operating with false flax biodiesel and butanol blends, *Advances in Mechanical Engineering*, 8(2):1-7.
- Aksoy, F., 2011, Analyzing the effects of methyl esters produced from raw soybean and waste frying oil on engine performance and NO_x emission, *Energy Sources, Part A*, 34(2):143-151.
- Aksoy, F., Bayrakçeken, H., 2010, Dizel yakıtına %5 ve %10 izopropil alkol (IPA) ilavesinin motor performans ve emisyonlarına etkisi, *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2(3):37-43.

Aktaş, A., Sekmen, Y., 2008, Biyodizel ile çalışan bir dizel motorda yakıt püskürtme avansının performans ve egzoz emisyonlarına etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(1):199-206.

Alptekin, E., Canakci, M., Ozsezen, A.N., Turkcan, A., Sanli, H., 2015, Using waste animal fat based biodiesels-bioethanol-diesel fuel blends in a DI diesel engine, *Fuel*, 157:245-254.

Aydın, F., Öğüt, H., 2017, Effects of using ethanol-biodiesel-diesel fuel in single cylinder diesel engine to engine performance and emissions, *Renewable Energy*, 103:688-694.

An, H., Yang, W.M., Chou, S.K., Chua, K.J., 2012, Combustion and emissions characteristics of diesel engine fueled by biodiesel at partial load conditions, *Applied Energy*, 99:363-371.

Anbarasu, A., Saravanan, M., Loganathan, M., 2013, The effect of ethanol addition in a biodiesel operated DI diesel engine on combustion, performance, and emission characteristics, *International Journal of Green Energy*, 10(1):90-102.

Barabás, I., Todoruț, I.A., 2011, Utilization of biodiesel-diesel-ethanol blends in CI engine, Biodiesel-Quality, Emissions and By-products, *InTech*.

Bhale, P.V., Deshpande, N.V., Thombre, S.B., 2009, Improving the low temperature properties of biodiesel fuel, *Renewable Energy*, 34(3):794-800.

Can, Ö., Celikten, I., Usta, N., 2004, Effects of ethanol addition on performance and emissions of a turbocharged indirect injection diesel engine running at different injection pressures, *Energy conversion and Management*, 45(15):2429-2440.

Can, Ö., Öztürk, E., Yücesu, H.S., 2017, Combustion and exhaust emissions of canola biodiesel blends in a single cylinder DI diesel engine, *Renewable Energy*, 109:73-82.

Can, Ö., Çelikten, İ., Usta, N., 2005, Etanol karışımı motorin yakıtın dizel motoru egzoz emisyonlarına etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(2):219-224.

Chauhan, S.K., Shukla, A., 2011, Environmental impacts of production of biodiesel and its use in transportation sector, environmental impact of biofuels, Dr. Marco Aurelio Dos Santos Bernardes (Ed.), *InTech*.

Cheenkachorn, K., Fungtammasan, B., 2009, Biodiesel as an additive for diesel, *International Journal of Green Energy*, 6(1), 57-72.

- Chen, H., Shi-Jin, S., Jian-Xin, W., 2007, Study on combustion characteristics and PM emission of diesel engines using ester-ethanol-diesel blended fuels, *Proceedings of the Combustion Institute*, 31(2):2981-2989.
- Choi, C.Y., Reitz, R.D., 1999, An experimental study on the effects of oxygenated fuel blends and multiple injection strategies on DI diesel engine emissions, *Fuel*, 78(11):1303-1317.
- Çelik, M., Örs, İ., Bayindirli, C., Demiralp, M., 2017, Experimental investigation of impact of addition of bioethanol in different biodiesels, on performance, combustion and emission characteristics, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(11):5581-5592.
- Çelik, M., Özgören, Y.Ö., 2017, The determination of effects of soybean and hazelnut methyl ester addition to the diesel fuel on the engine performance and exhaust emissions, *Applied Thermal Engineering*, 124:124-135.
- Çengelci, E., Bayrakçeken, H., Aksoy, F., 2011, Hayvansal ve bitkisel yağlardan elde edilen biyodizelin dizel yakıtı ile karşılaştırılması, *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 3(1):41-53.
- Çildir, O., Çanakçı, M., 2006, Çeşitli bitkisel yağlardan biyodizel üretiminde katalizör ve alkol miktarının yakıt özellikleri üzerine etkisinin incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(2):367-372.
- Dorado, M.P., Ballesteros, E., Arnal, J.M., Gomez, J., Lopez, F.J., 2003, Exhaust emissions from a diesel engine fueled with transesterified waste olive oil, *Fuel*, 82:1311-1315.
- Efe, Ş., Ceviz, M.A., Temur, H., 2018, Comparative engine characteristics of biodiesels from hazelnut, corn, soybean, canola and sunflower oils on DI diesel engine, *Renewable Energy*, 119:142-151.
- Fang, Q., Fang, J., Zhuang, J., Huang, Z., 2013, Effects of ethanol–diesel–biodiesel blends on combustion and emissions in premixed low temperature combustion, *Applied Thermal Engineering*, 54(2):541-548.
- Gharehghani, A., Hosseini, R., Mirsalim, M., Yusaf, T.F., 2015, A computational study of operating range extension in a natural gas SI engine with the use of hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(17): 5966-5975.
- Gharehghani, A., Mirsalim, M., Hosseini, R., 2017, Effects of waste fish oil biodiesel on diesel engine combustion characteristics and emission, *Renewable Energy*, 101:930-936.
- Goyal, P., Sharma, M.P., Jain, S., 2013, Optimization of transesterification of *Jatropha curcas* oil to biodiesel using response surface methodology and its adulteration with kerosene, *Journal of Materials and Environmental Science*, 4(2):277-284.
- Guarieiro, L.L.N., de Souza, A.F., Torres, E.A., de Andrade, J.B., 2009, Emission profile of 18 carbonyl compounds, CO, CO₂, and NO_x emitted by a diesel engine fuelled with diesel and ternary blends containing diesel, ethanol and biodiesel or vegetable oils, *Atmospheric Environment*, 43(17):2754-2761.
- Gülüm, M., Bilgin, A., 2016, Two-term power models for estimating kinematic viscosities of different biodiesel-diesel fuel blends, *Fuel Processing Technology*, 149:121-130.
- Hasan, M.M., Rahman, M.M., 2017, Performance and emission characteristics of biodiesel–diesel blend and environmental and economic impacts of biodiesel production: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74:938-948.
- Haşimoğlu, C., İçingür, Y., Ögüt, H., 2002, Dizel motorlarında egzoz gazları resirkülasyonunun (EGR) motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisinin deneysel analizi, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 26(2):127-135.
- Heywood, J.B., 1988, *Internal combustion engine fundamentals*, USA, McGraw-Hill, ISBN:0-07-028637-X.
- Holman, P., 2012, *Experimental methods for engineers*, 8th Edition, McGraw-Hill, New York, USA.
- How, H.G., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Teoh, Y.H., 2014, Engine performance, emission and combustion characteristics of a common-rail diesel engine fuelled with bioethanol as a fuel additive in coconut oil biodiesel blends, *Energy Procedia*, 61:1655-1659.
- Ibrahim, A., 2016, Performance and combustion characteristics of a diesel engine fuelled by butanol–biodiesel–diesel blends, *Applied Thermal Engineering*, 103:651-659.
- Ibrahim, A., Bari, S., 2010, An experimental investigation on the use of EGR in a supercharged natural gas SI engine, *Fuel*, 89(7):1721-1730.
- 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.
- Kegl, B., Kegl, M., Pehan, S., 2013, *Green diesel engines. Biodiesel usage in diesel engines*, Springer-Verlag, London.

- İnternet, 2016, *Biodiesel handling and use guide (Fifth Edition)*, US Department of Energy, DOE/GO-102016-4875, November.
(https://www.afdc.energy.gov/uploads/publication/biodiesel_handling_use_guide.pdf)
- Keskin, A., Sağıroğlu, S., 2010, Dizel motorlarından kaynaklanan egzoz emisyonları ve kontrol yöntemleri, *Mühendis ve Makine*, 51(606):2-9.
- Liaquat, A.M., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Fattah, I.R., Hazrat, M.A., Varman, M., Mofijur, M., Shahabuddin, M., 2013, Effect of coconut biodiesel blended fuels on engine performance and emission characteristics, *Procedia Engineering*, 56:583-590.
- Mofijur, M., Atabani, A.E., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Masum, B.M., 2013, A study on the effects of promising edible and non-edible biodiesel feedstocks on engine performance and emissions production: A comparative evaluation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23:391-404.
- Mofijur, M., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Atabani, A.E., Arbab, M.I., Cheng, S.F., Gouk, S.W., 2014, Properties and use of Moringa oleifera biodiesel and diesel fuel blends in a multi-cylinder diesel engine, *Energy Conversion and Management*, 82:169-176.
- Murugesan, A., Umarani, C., Subramanian, R., Nedunchezian, N., 2009, Bio-diesel as an alternative fuel for diesel engines-A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(3):653-662.
- 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.
- Ong, H.C., Masjuki, H.H., Mahlia, T.M.I., Silitonga, A.S., Chong, W.T., Leong, K.Y., 2014, Optimization of biodiesel production and engine performance from high free fatty acid Calophyllum Inophyllum oil in CI diesel engine, *Energy Conversion and Management*, 81:30-40.
- Onurbaş Avcıoğlu, A., 2011, *Tarımsal kökenli yenilenebilir enerjiler biyoyakıtlar*, Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti., Kızılay, Ankara.
- Örs, İ., Kahraman, A., Ciniviz, M., 2017, Performance, emission, and combustion analysis of a compression ignition engine using biofuel blends, *Thermal Science*, 21(1b):511-522.
- Özsezen, A.N., Çanakçı, M., 2009, Biyodizel ve karışımlarının kullanıldığı bir dizel motorda performans ve emisyon analizi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(2):173-180.
- Özsezen, A.N., Çanakçı, M., Sayın, C., 2006, Atık kızartma yağı kökenli biyodizelin ön yanma odalı bir dizel motorun emisyonları üzerine etkisi, *Biyoyakıt (Biyodizel-Biyoetanol) Sempozyumu*, Bursa, 41-51, 29-30 Haziran.
- Park, S.H., Cha, J., Lee, C.S., 2012, Impact of biodiesel in bioethanol blended diesel on the engine performance and emissions characteristics in compression ignition engine, *Applied Energy*, 99:334-343.
- Prabakaran, B., Udhoji, A., 2016, Experimental investigation into effects of addition of zinc oxide on performance, combustion and emission characteristics of diesel-biodiesel-ethanol blends in CI engine, *Alexandria Engineering Journal*, 55(4):3355-3362.
- Qi, D.H., Chen, H., Geng, L.M., Bian, Y.Z.H., 2010, Experimental studies on the combustion characteristics and performance of a direct injection engine fueled with biodiesel/diesel blends, *Energy Conversion and Management*, 51:2985-2992.
- Rahimi, H., Ghobadian, B., Yusaf, T., Najafi, G., Khatamifar, M., 2009, Diesterol: An environment-friendly IC engine fuel, *Renewable Energy*, 34(1):335-342.
- Rakopoulos, C.D., Antonopoulos, K.A., Rakopoulos, D.C., 2007, Experimental heat release analysis and emissions of a HSDI diesel engine fueled with ethanol-diesel fuel blends, *Energy*, 32:1791-1808.
- Randazzo, M.L., Sodr , J.R., 2011, Exhaust emissions from a diesel powered vehicle fuelled by soybean biodiesel blends (B3-B20) with ethanol as an additive (B20E2-B20E5), *Fuel*, 90:98-103.
- Sanjid, A., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Rahman, S.A., Abedin, M.J., Palash, S.M., 2014, Production of palm and jatropha based biodiesel and investigation of palm-jatropha combined blend properties, performance, exhaust emission and noise in an unmodified diesel engine, *Journal of Cleaner Production*, 65:295-303.
- Sekmen Y., 2007, Karpuz çekirdeği ve keten tohumu yağı metil esterinin dizel motorda yakıt olarak kullanılması, *Teknoloji Dergisi*, 10 (4):295-302.
- Sharma, Y.C., Singh, B., Upadhyay, S.N., 2008, Advancements in development and characterization of biodiesel: A review, *Fuel*, 87:2355-2373.
- Shi, X., Pang, X., Mu, Y., He, H., Shuai, S., Wang, J., Chen, H., Li, R., 2006, Emission reduction potential of using ethanol-biodiesel-diesel fuel blend on a heavy-duty diesel engine, *Atmospheric Environment*, 40(14):2567-2574.

- Shi, X., Yu, Y., He, H., Shuai, S., Wang, J., Li, R., 2005, Emission characteristics using methyl soyate-ethanol-diesel fuel blends on a diesel engine, *Fuel*, 84:1543-1549.
- Sidibé, S.S., Blin, J., Vaitilingom, G., Azoumah, Y., 2010, Use of crude filtered vegetable oil as a fuel in diesel engines state of the art: Literature review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9):2748-2759.
- Su, J., Zhu, H., Bohac, S.V., 2013, Particulate matter emission comparison from conventional and premixed low temperature combustion with diesel, biodiesel and biodiesel-ethanol fuels, *Fuel*, 113:221-227.
- Subbaiah, G.V., Gopal, K.R., 2011, An experimental investigation on the performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with rice bran biodiesel and ethanol blends, *International Journal of Sustainable Energy*, 8:197-208.
- Tse, H., Leung, C.W., Cheung, C.S., 2015, Investigation on the combustion characteristics and particulate emissions from a diesel engine fueled with diesel-biodiesel-ethanol blends, *Energy*, 83:343-350.
- Ulusoy, Y., Alibaş, K., 2002, Diesel motorlarda biodiesel kullanımının teknik ve ekonomik olarak incelenmesi, *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 16:37-50.
- Usta, N., Can, Ö., Öztürk, E., 2005, Alternatif dizel motor yakıtı olarak biyodizel ve etanolün karşılaştırılması, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3:325-334.
- Uyumaz, A., 2018, Combustion, performance and emission characteristics of a DI diesel engine fueled with mustard oil biodiesel fuel blends at different engine loads, *Fuel*, 212:256-267.
- Wei, L., Cheung, C.S., Ning, Z., 2018, Effects of biodiesel-ethanol and biodiesel-butanol blends on the combustion, performance and emissions of a diesel engine, *Energy*, 155:957-970.
- Yardım, M.H., 2008, *Motor teknolojisi*, Nobel Yayın Dağıtım Tic. Ltd. Şti., Yayın No: 1298, Teknik Bilimler: 101, Ostim, Ankara.
- 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.
- Zhu, L., Xiao, Y., Cheung, C.S., Guan, C., Huang, Z., 2016, Combustion, gaseous and particulate emission of a diesel engine fueled with n-pentanol (C5 alcohol) blended with waste cooking oil biodiesel, *Applied Thermal Engineering*, 102:73-79.
- Zhu, L., Cheung, C.S., Zhang, W.G., Huang, Z., 2011, Combustion, performance and emission characteristics of a DI diesel engine fueled with ethanol-biodiesel blends, *Fuel*, 90(5):1743-1750.