



## GLİSERİN ETERLERİNİN İKİNCİ NESİL BİYİYAKIT OLARAK DİZEL MOTORDA KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

Abdülvahap ÇAKMAK\* ve Hakan ÖZCAN\*\*

\*Sorumlu yazar, Samsun Üniversitesi Kavak Meslek Yüksekokulu Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü 55850 Kavak, Samsun, [abdulvahap.cakmak@samsun.edu.tr](mailto:abdulvahap.cakmak@samsun.edu.tr), ORCID: 0000-0003-1434-6697

\*\* Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü 55200 Atakum, Samsun, [ozcanh@omu.edu.tr](mailto:ozcanh@omu.edu.tr), ORCID: 0000-0002-7848-3650

(Geliş Tarihi: 14.05.2020, Kabul Tarihi: 25.05.2021)

**Özet:** Son yıllarda, büyük oranda petrol esaslı yakıtlar ile çalışan içten yanmalı motorlarda ikinci nesil biyoyakıtların kullanımına duyulan ilgi artmıştır. Bu çalışmada, biyodizel yan ürünü olan gliserinin katalitik dönüşümü ile üretilen gliserin eterlerinin dizel motorda ikinci nesil biyoyakıt olarak kullanımı deneysel olarak incelenmiştir. Gliserinin *tert*-bütanol ile eterifikasyonu sonucunda sentezlenen gliserin eterleri karışımı, %2 ve %5 hacimsel oranda dizel-biyodizel yakıt karışımı ile harmanlanmıştır. Dizel yakıtı ve %20 oranında biyodizel içeren dizel-biyodizel yakıt karışımı referans yakıt olarak kullanılmıştır. Test yakıtlarının önemli fiziksel yakıt özellikleri belirlenmiştir. Yakıtta gliserin eterleri ilavesinin yakıtın viskozite, yoğunluk, ısıl değer, setan indisi ve destilasyon sıcaklıklarını düşürdüğü belirlenmiştir. Gliserin eterlerinin ilavesi ile dizel-biyodizel yakıt karışımının kinematik viskozitesinin %10-14 oranında azaldığı ve yakıtın destilasyon karakteristiğinin iyileştiği görülmüştür. Gerçekleştirilen motor deneyleri ile test yakıtlarının motorun performans, yanma karakteristikleri ve egzoz emisyonuna etkileri araştırılmıştır. Gliserin eterlerinin motorun özgül yakıt tüketimini ve HC emisyonlarını artırdığı; motorun termal verimini, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> ve is (duman koyuluğu) emisyonlarını azalttığı belirlenmiştir. Gliserin eterlerin en dikkat çekici etkisi NO<sub>x</sub> ve HC emisyonlarında görülmüştür. Gliserin eterleri NO<sub>x</sub> emisyonlarında yaklaşık %35-77 oranında önemli düşüşler sağlamış fakat aynı çalışma koşulları altında HC emisyonlarında yaklaşık %37-142 oranında bir artışa neden olmuştur. Yanma karakteristikleri açısından %2 oranında gliserin eterleri içeren yakıt karışımı, diğer test yakıtlarına göre daha iyi performans sergilemiştir. Tüm bulgular değerlendirildiğinde gliserin eterlerinin hacimsel %2 oranında dizel-biyodizel yakıt karışımı ile harmanlanması durumunda ikinci nesil biyoyakıt olarak dizel motorlarda kullanımının uygun olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** İkinci nesil biyoyakıt, Gliserin eterleri, Biyodizel, Dizel motor, Emisyon, Yanma

## INVESTIGATION OF THE USABILITY OF GLYCEROL ETHERS AS SECOND-GENERATION BIOFUEL IN DIESEL ENGINE

**Abstract:** The interest in the use of second-generation biofuels in internal combustion engines which are still largely running with petroleum fuels has been increasing in recent years. In this study, the utilization of glycerol ethers produced by the catalytic conversion of biodiesel-originated glycerol as a second-generation biofuel in a diesel engine was experimentally investigated. The glycerol ethers mixture which was synthesized by the etherification of glycerol with *tert*-butyl alcohol was blended with the blend of diesel-biodiesel by 2% (v/v) and 5% (v/v). Neat diesel and a diesel-biodiesel fuel blend that contains 80% (v/v) diesel fuel and 20% (v/v) canola oil biodiesel were chosen as reference fuels. The important physical fuel properties of test fuels were determined. It was ascertained that the addition of glycerol ethers to the diesel-biodiesel mixture reduces fuel's viscosity, density, lower heating value, cetane index, and distillation temperatures. It was determined that glycerol ethers decreased the diesel-biodiesel fuel blend's kinematic viscosity by 10-14% and improved the distillation characteristics. The impacts of test fuels on the engine's performance, combustion characteristics, and exhaust emission were scrutinized by carried out the engine tests. It was seen that glycerol ethers increase the specific fuel consumption and HC emission while reducing thermal efficiency, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, and soot (smoke opacity) emission. The most appealing impact of glycerol ethers was witnessed to NO<sub>x</sub> and HC emissions. Glycerol ethers promoted significant reductions in NO<sub>x</sub> emissions by approximately 35-77%, however, under the same operating conditions, an increase in HC emissions by approximately 37-142% was observed. In terms of combustion characteristics, the fuel mixture containing 2% (v/v) glycerol ethers performed better than other test fuels. Based on experimental results it was concluded that the glycerol ethers mixture is suitable for use as a second-generation biofuel by 2% (v/v) blending ratio with diesel-biodiesel blend in diesel engines.

**Keywords:** Second-generation biofuels, Glycerol ethers, Biodiesel, Diesel engine, Emissions, Combustion

## GİRİŞ

Biyoyakıtlar biyokütleden fiziksel, kimyasal, termokimyasal ve biyokimyasal yöntemlerle elde edilen yenilenebilir, çevre dostu ve sürdürülebilir yakıtlardır (Ruan *vd*, 2019). Fosil enerji kaynaklarının kullanımı ile ilgili karşılaşılan sorunlar ve enerji talebinin sürekli artması, biyoyakıtların önem kazanmasına yol açmıştır (Gaurav *vd*, 2017; Chaudhary ve Gakkhar, 2019; Gülüm *vd*, 2018). Biyoyakıtlar elde edildikleri kaynaklara göre birinci nesil, ikinci nesil ve üçüncü nesil biyoyakıtlar olarak sınıflandırılmaktadır (Lee ve Lavoie, 2013). Birinci nesil biyoyakıtlar gıda üretiminde kullanılan kaynaklardan elde edilirler. Birinci nesil biyoyakıtlar, tarım alanlarının gıda üretimi yerine biyoyakıt üretimine ayrılmasını gerektirmesi, gıda fiyatlarının artmasına neden olması ve gıda arzı güvenliğini tehlikeye sokması nedeni ile bu gruptaki yakıtların üretimi ve kullanımı sınırlandırılmaktadır (Ghosh *vd*, 2019). İkinci nesil biyoyakıtlar gelişmiş biyoyakıtlar olarak da adlandırılır ve gıda amaçlı tüketilmeyen kaynaklardan veya atık kaynaklardan üretilirler. İkinci nesil biyoyakıtlar, ucuz hammaddelerden üretiliyor olması nedeni ile ekonomiktir (Lee ve Lavoie, 2013). Bu nedenle ticari biyoyakıt üretiminin büyük bir kısmı ikinci nesil biyoyakıtlardan karşılanmaktadır ve yeni direktiflerle bu gruptaki yakıtların toplam tüketimdeki payları daha fazla arttırılmaktadır (Nguyen *vd*, 2017). Üçüncü nesil biyoyakıtlar ise yosun kaynaklı yakıtlardır. Ancak üretim maliyetlerinin yükselmesi nedeni ile günümüzde ticari olarak kullanımı yaygın değildir (Milano *vd*, 2016).

Dizel motorlarda kullanılacak biyoyakıtlar arasında biyodizel ilk sırada gelmektedir. Biyodizel, dizel yakıtı ile benzer fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olması ve mevcut dizel motor teknolojisine uygun olması nedeni ile teknik açıdan kullanımı hızlı kabul görmüştür. Ayrıca yerel enerji kaynaklarından üretilebilir olması, sera gazı salınımını arttırmaması ve petrol esaslı dizel yakıtına göre egzoz gazı emisyonunu düşürmesi, biyodizele olan ilgiyi daha da arttırmıştır (Behçet *vd*, 2015; Gülüm *vd*, 2015). Bu avantajları sayesinde biyodizel, dünya genelinde sürekli olarak artan oranlarda dizel yakıtı ile harmanlanarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte ülkeler, enerjide dışa olan bağımlılığı azaltmak, sera gazı salınımını düşürmek ve yerel enerji kaynaklarını daha etkili kullanmak amacıyla biyodizel üretimini ve tüketimini arttırmaya yönelik politikalar geliştirip uygulamaktadır. Bunun sonucunda ise küresel çapta biyodizel üretimi ve tüketimi sürekli olarak artmaktadır. Örneğin, 2000 yılında 534 milyon litre olan dünya genelindeki biyodizel üretimi, 2017 yılında 36 milyar litreye ulaşmıştır (OECD/FAO, 2018). Ancak bu miktarın, biyodizel harmanlama oranının artması sonucu 2028 yılına kadar 44 milyar litreye ulaşacağı tahmin edilmektedir (OECD, 2019). Biyodizel üretiminin sürekli olarak artması, üretim prosesinde kütlece %10 oranında yan ürün olarak elde edilen gliserin miktarının da artmasına yol açmaktadır. Gliserin çok sayıda endüstride hammadde olarak kullanılmasına rağmen gelecek yıllarda biyodizel üretiminde ortaya çıkacak olan gliserin miktarı, ilgili endüstrilerin gliserin talebini aşacaktır

(Çakmak ve Özcan, 2020). Böylesi bir durumda biyodizel endüstrisi olumsuz etkilenecek ve fazla gliserinin değerlendirilememesi halinde atık haline dönüşerek çevre sağlığı açısından riskler oluşturacaktır (Cornejo *vd*, 2017; Monteiro *vd*, 2018). Bu yüzden ihtiyaç fazlası gliserinin çevresel sorunlara yol açmadan farklı ürünlere dönüştürülerek değerlendirilmesi, hem çevresel risklerin önüne geçilmesi hem de biyodizel üretiminin ekonomikliği ve sürdürülebilirliği açısından gereklidir (Monteiro *vd*, 2018; Yang *vd*, 2012).

Gliserin uygun olmayan yakıt özellikleri (yüksek viskozite ve yoğunluk, yüksek kaynama noktası sıcaklığı, mevcut yakıtlar ile homojen karışmaması, düşük ısı değeri), yüksek sıcaklıklarda polimerleşerek yakıt hattını tıkama riski, kısmi oksidasyon sonucu zehirli akrolein emisyonu oluşumu ve düşük oksitlenme direnci gibi nedenlerle (Bohon *vd*, 2011; Queirós *vd*, 2013) içten yanmalı motorlarda doğrudan yakıt olarak kullanımı teknik açıdan çok mümkün değildir. Ancak gliserin, çeşitli kimyasal ve biyolojik yöntemlerle farklı değerli kimyasal ürünlere dönüştürülebilir (Tan *vd*, 2013). Bu kimyasal ürünler arasında benzin, dizel ve biyodizel yakıtları ile harmanlanarak kullanılacak biyoyakıtlar da bulunmaktadır (Çakmak ve Özcan, 2018). Gliserinin *tert*-bütanol veya izobüten gibi kimyasallarla eterleşme reaksiyonu ile elde edilen gliserin eterleri oksijenli biyoyakıt olarak dizel, biyodizel ve benzin yakıtları ile birlikte kullanılabilir (Bozkurt *vd*, 2019; Fatimah *vd*, 2019; Ozbay *vd*, 2010; Rahmat *vd*, 2010). Gliserin eterleri biyodizel yakıtının soğukta akış özelliklerini geliştirmekte ve viskozitesini düşürmektedir (Noureddini *vd*, 1998; Pinto *vd*, 2016). Aynı zamanda gliserin eterlerinin bileşiminde bulunan oksijen yanmayı iyileştirerek CO, HC ve PM emisyonlarını azaltmaktadır (Beatrice *vd*, 2014; Spooner-Wyman *vd*, 2003; Spooner-Wyman *vd*, 2010). Biyodizel yan ürünü gliserinin, ikinci nesil bir yakıt olan gliserin eterlerine dönüştürülerek kullanılması, yukarıda ifade edilen avantajların yanında biyodizel üretiminin sürdürülebilirliği ve harmanlanan ikinci nesil biyoyakıt miktarının artmasında doğrudan olumlu bir etkisi de bulunmaktadır. Atık haline dönüşen gliserinin, yakıt olarak değerlendirilmesi ile hem atığın kontrollü bertarafı hem de gliserinin yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanımı mümkündür.

Gliserinin eterifikasyonu sonucunda biyoyakıt olarak kullanılacak gliserin eterleri karışımı elde edilir. Bu karışım, birbirinin izomeri olan iki *mono*- eter ve birbirinin izomeri olan iki *di*- eter ile bir *tri*- eterden oluşur (Behr ve Obendorf, 2002). Eterlerin birbirine çok yakın kaynama noktası sıcaklığı nedeniyle karışımdan ayrılmaları zor ve ek işlemler gerektirdiğinden üretim maliyetini artırır (Vlad ve Bildea, 2012). Bu nedenle sentezlenen gliserin eterleri karışımı doğrudan yakıt olarak kullanılır (Pinto *vd*, 2016).

Literatürde gliserin eterlerinin sentezine yönelik çok sayıda bilimsel çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda (Aguado-Deblas *vd*, 2020; Cannilla *vd*, 2020; Cannilla *vd*, 2015; Goncalves *vd*, 2015; Klepáčová *vd*, 2006; Nandiwale *vd*, 2014; Ozbay *vd*, 2011; Ozbay *vd*, 2013;

Veiga *vd*, 2017; Viswanadham ve Saxena, 2013) gliserinin eterifikasyon reaksiyonu parametrelerinin (gliserin/alkol molar oranı, katalizör miktarı, karıştırma hızı, reaksiyon sıcaklığı ve süresi vb.) optimizasyonu, farklı katalizör ve alkollerin ürün dönüşümü ve eter seçiciliğine etkisi gibi kinetik parametreler araştırılmıştır. Bu çalışmalarda, gliserin eterlerinin yakıt/yakıt katkısı olarak kullanılabilmesi ifade edilmesine rağmen literatürde gliserin eterlerinin içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanımını araştıran çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bozkurt *vd* (2019) sentezledikleri gliserin eterlerini hacimsel %3,45 oranında benzinle harmanlayarak yakıt özellikleri, motor performansı ve egzoz emisyonlarında meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. Gliserin eterlerinin benzene ilave edilmesi ile yakıtın oktan sayısının arttığı ve buhar basıncının düştüğü görülmüştür. Gliserin eterleri-benzin karışımının, MTBE (metil tersiyer bütül eter)-benzin karışımı ile benzer performans ve emisyon değerlerine sahip olduğu belirlenmiş ve bu nedenle gliserin eterlerinin MTBE'ye alternatif olabileceği ifade edilmiştir. Gliserin eterlerinin dizel motorlarda yakıt olarak kullanımına ilişkin ilk kapsamlı sonuçlar Beatrice *vd* (2013) yaptıkları çalışmadan elde edilmiştir. Bu çalışmada gliserinin katalitik dönüşümü ile üretilen gliserin eterleri dizel yakıtı ile hacimsel %10 oranında harmanlanarak PM ve NO<sub>x</sub> emisyonlarının kritik olduğu motor yük ve hız noktalarında testler yapılmıştır. Sonuçlar gliserin eterlerinin yanma prosesini, HC ve CO gibi egzoz emisyonlarını fazla etkilemeden, PM ve NO<sub>x</sub> emisyonlarını eş zamanlı olarak düşürdüğünü göstermiştir. Ayrıca yakıtların yaşam döngüsü analizinden gliserin eterlerinin dizel yakıtına göre daha az çevresel etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Frusteri *vd* (2013) yaptıkları deneysel çalışmada gliserin eterlerinin %10 oranında dizel yakıtı ile harmanlanarak kullanılması halinde PM ve HC emisyonlarının azaldığı ve yanma veriminin arttığı belirlenmiştir. Beatrice *vd* (2014) sentezledikleri gliserin eterlerini %10 ve %20 oranında dizel yakıtı ile harmanlayarak hazırladıkları dizel-gliserin eterleri yakıt karışımlarını bir dizel otomobil motorunda test etmişlerdir. Test sonuçlarından, gliserin eterlerinin motorun yanma karakteristikleri ve termal verimi üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı, bununla birlikte yüksek oksijen içeriği sayesinde gliserin eterlerinin PM emisyonlarını azaltmada etkili olduğu belirlenmiştir. Fakat gliserin eterleri düşük motor yüklerinde aseton, formaldehit, asetaldehit gibi düzensiz emisyonları arttırdığı görülmüştür. Beatrice *vd* (2015) %20 oranında gliserin eterleri içeren dizel-gliserin eterleri yakıt karışımını optik bir dizel motorda test etmişlerdir. Elde edilen bulgulardan, gliserin eterlerinin düşük kaynama noktası sıcaklığı nedeni ile yakıt jetinin daha hızlı buharlaştığı ve yanma durumunda alev parlaklığının azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca gliserin eterlerinin dizel yakıtına göre yüksek yoğunluk ve viskozitesi nedeniyle yakıt ortalama damlacık çapının arttığı belirlenmiştir. Bu durumda ana püskürtme fazında yakıt spreyinin koni açısı küçülerek yakıt jetinin yanma odasındaki nüfuz derinliğinin arttığı görülmüştür. Aynı çalışmada, gliserin eterlerinin is oluşumunu azalttığı optik motor testleri ile de kanıtlanmıştır. Gliserin

eterlerinin gerek yakıt özellikleri gerekse egzoz emisyonları açısından iyi bir biyoyakıt olduğu belirtilmiştir.

Gliserin eterlerinin içten yanmalı motorlarda kullanımına ilişkin literatürdeki mevcut çalışmalarda gliserin eterleri saf dizel yakıtı veya benzin ile harmanlanarak motor testleri yapılmıştır. Fakat gliserin eterlerinin biyodizelin yakıt özelliklerini geliştirmesi, günümüzde dizel yakıtının biyodizel ile harmanlanarak kullanılması ve uygulamada kolaylık sağlanması açısından, gliserin eterlerinin, dizel-biyodizel yakıt karışımı ile harmanlanarak kullanılması daha avantajlıdır. Ancak literatürde gliserin eterlerinin dizel-biyodizel yakıt karışımı ile harmanlanarak motor testlerinin yapıldığı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Buradan hareketle bu çalışmada, gliserin eterlerinin dizel-biyodizel yakıt karışımı ile harmanlanması durumunda yakıt özellikleri, motor performansı, yanma karakteristikleri ve egzoz emisyonlarında meydana gelen değişimlerin araştırılması hedeflenmiştir. Elde edilecek bulguların, gliserin eterlerinin sunduğu avantajların daha etkili şekilde kullanılmasına imkân vereceği ve konu hakkında literatürdeki sınırlı bilgilere katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

## MATERYAL ve METOD

Gliserin eterleri ticari olarak satılmamaktadır. Bu nedenle gliserin eterleri laboratuvar ortamında sentezlenmiştir. Gliserin eterlerinin sentezi ve karakterizasyonu ile ilgili çalışmalar Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü Yenilenebilir Enerji Laboratuvarları'nda gerçekleştirilmiştir. Gliserin eterleri, gliserinin *tert*-bütanol ile katı formda kuvvetli asidik bir katalizör olan Amberlit-15 varlığında eterifikasyon reaksiyonu ile sentezlenmiştir. Gliserinin eterifikasyonunda hedef ürünler *di*-eterler ve *tri*-eter olduğundan gliserin eterlerinin sentezi için reaksiyon şartları yüksek eter seçiciliği ve yüksek gliserin dönüşümünün sağlandığı reaksiyon koşullarında gerçekleştirilmiştir. Bu reaksiyon şartları literatürdeki çalışmalardan (Frusteri *vd*, 2009; Klepáčová *vd*, 2006; Özbay, 2013; Viswanadham ve Saxena, 2013) belirlenmiştir. Eterifikasyon reaksiyonu için seçilen reaksiyon parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Gliserin eterlerinin sentezi ve karakterizasyonu ile ilgili ayrıntılı bilgiler yazarların farklı bir çalışmasında (Çakmak ve Özcan, 2020) sunulmuştur.

**Tablo 1.** Gliserinin eterifikasyon reaksiyonu şartları

Gliserin- <i>tert</i> -bütanol molar oranı	1:4
Katalizör miktarı (kütlece )	% 7,5
Reaksiyon sıcaklığı	90 °C
Reaksiyon süresi	180 dk.
Karıştırma hızı	1200 d/dk.

Tablo 1'de belirtilen reaksiyon şartlarına göre gerekli miktardaki gliserin eterleri tekrarlı sentezle elde edilmiştir. Gliserin eterleri ilk olarak hacimsel %10 ve %25 oranında kanola yağı biyodizeli ile karıştırılmıştır.

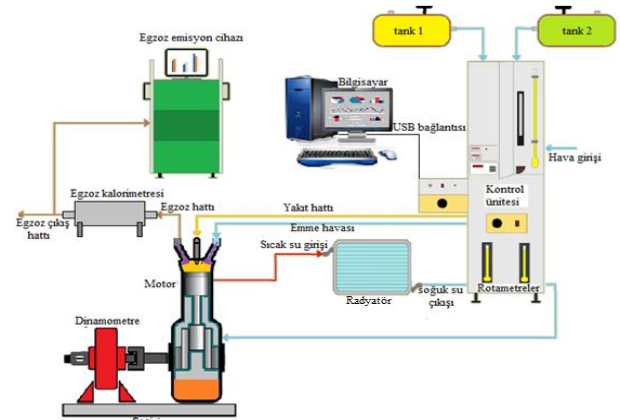
**Tablo 2.** Test yakıtlarının belirlenen bazı yakıt özellikleri

Özellikler	Test Metodu	D	B20	B18G2	B15G5
Yoğunluk, 15 °C'de (kg/m <sup>3</sup> )	TS EN ISO 12185	835,0	844,5	844,1	843,3
Kinematik Viskozite, 40 °C'de (mm <sup>2</sup> /s)	DIN 53015	2,79	3,31	2,95	2,84
Alt Isıl Değer (kJ/kg)	ASTM D 240	42484	41325	41078	40590
Enerji Yoğunluğu (kJ/L)	-	35474	34899	34674	34230
Soğukta Filtre Tık. Nok. Sıc. (°C)	TS EN ISO 116	-5	-5	-5	-5
Setan İndisi	TS EN ISO 4264	55,6	55,1	54,7	52,8
Destilasyon Sıcaklıkları (°C)	TS EN ISO 3405				
	İlk Kaynama Sıcaklığı	161,1	164,9	97,0	94,1
	10 hac.%	212,6	221,8	210,3	202,2
	50 hac.%	280,4	299,4	281,8	279,6
	90 hac.%	339,9	341,9	340,0	341,0
	95 hac.%	353,9	351,3	352,7	350,8
	Son Kaynama Sıcaklığı	364,9	359,5	362,4	361,3

Ardından bu biyodizel-gliserin eterleri karışımları hacimsel %20 oranında dizel yakıtı (D) ile karıştırılmış ve sonuçta B18G2 ve B15G5 olarak etiketlenen ve sırasıyla %2 ve %5 oranında gliserin eterleri içeren dizel-biyodizel-gliserin eterleri karışımları elde edilmiştir. B18G2 yakıt karışımı; %80 oranında dizel yakıtı, %18 oranında kanola yağı biyodizeli ve %2 oranında gliserin eterleri içermektedir. B15G5 yakıt karışımı ise; %80 oranında dizel yakıtı, %15 oranında kanola yağı biyodizeli ve %5 oranında gliserin eterleri içermektedir. Gliserin eterleri biyodizel yakıtı ile daha homojen karıştığı için, gliserin eterleri ilk olarak biyodizel ile harmanlanmıştır. Daha homojen bir yakıt karışımı elde etmek için karışımlar önce 15 dakika manyetik karıştırıcıda karıştırılmış ve ardından ultrasonik banyoda 40 kHz frekansta yarım saat boyunca bekletilmiştir. Çalışmada referans yakıt olarak dizel yakıtı ve %20 oranında kanola yağı biyodizeli içeren dizel-biyodizel yakıt karışımı (B20) kullanılmıştır. Tüm yakıt karışımları hacimsel %20 oranında biyoyakıtlardan oluşacak şekilde hazırlanmıştır. Bu oranın seçilmesinin nedeni %20 biyoyakıt oranının, gelecek yıllarda kullanılması hedeflenen biyoyakıt oranı olması ve motor üreticilerinin %20 biyoyakıt oranına kadar motor garantisi vermeleridir. Motor testlerinden önce hazırlanan tüm test yakıtlarının bazı önemli yakıt özellikleri belirlenmiştir. Bu özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

Motor performans ve emisyon testleri, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Motor Laboratuvarı'nda kurulu olan APEX Innovations Pvt. Ltd. ticari etiketli motor deney ünitesinde gerçekleştirilmiştir. Test ünitesi dört zamanlı, tek silindirli ve su soğutmalı bir dizel motoru, Eddy akımlı su soğutmalı dinamometre, egzoz kalorimetresi, hava ve yakıt debisi ölçüm üniteleri, rotametreler, egzoz emisyon cihazları, yakıt tankları, silindir basınç sensörü, shaft enkoderi, termokuplar, veri toplama kartı ve bilgisayardan oluşmaktadır. Test düzeneğinin şematik resmi Şekil 1'de verilmiştir. Test motorun teknik ayrıntıları ise Tablo 3'te sunulmuştur. Motor test

ünitesinde motor devir sayısı ve yükü, emme havası basıncı, hacimsel yakıt debisi, egzoz gaz sıcaklığı, motor soğutma suyu ve egzoz kalorimetresi soğutma suyu debisi ile giriş-çıkış sıcaklıkları, ortam havası sıcaklığı ve bağıl nemi gibi veriler ölçülmektedir. CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> emisyonlarının ölçümü için TESTO-350 XL egzoz gaz analiz cihazı kullanılmıştır. Bu cihazın teknik özellikleri Tablo 4'te verilmiştir. HC emisyonlarının ölçümü için ±8 ppm ölçüm doğruluğuna ve 0-4000 ppm ölçüm aralığına sahip KTEST marka YS 5003 model egzoz emisyon cihazı kullanılmıştır. Dizel duman koyuluğu (is emisyonu), egzoz gazlarının ışık absorpsiyon katsayısını (k) 0,01 m<sup>-1</sup> çözünürlükte ölçen BOSCH BEA 070 dizel egzoz cihazı ile belirlenmiştir. Silindir basıncının ölçümü için ölçüm aralığı 0-345 bar ve duyarlılığı 1mV/psi olan bir piezoelektrik basınç transdüseri ve çözünürlüğü 1° KMA (krank mili açısı) olan bir shaft enkoderi kullanılmıştır. Shaft enkoderi aynı zamanda üst ölü nokta (ÜÖN) konumunun belirlenmesi ve motor devir sayısının ölçülmesinde kullanılmıştır. Silindir basıncı, shaft enkoderi ve diğer tüm sensörlerden gelen veriler yüksek hızlı dijital veri toplama sistemi (National Instruments USB-6210) üzerinden USB bağlantısı ile bilgisayara aktarılmıştır. Silindir basıncı 1° KMA çözünürlükte 100 çevrim boyunca kaydedilmiş ve çevrimsel farklılıkları en aza indirmek için yanma

**Şekil 1.** Test düzeneğinin şematik resmi

karakteristiklerinin belirlenmesinde 100 çevrimin ortalaması dikkate alınmıştır. Ölçülen silindir basıncı-krank açısı verileri *LabVIEW* tabanlı "*ICEngineSoft 9.0 V*" yazılımında işlenerek yanma karakteristikleri belirlenmiştir.

**Tablo 3.** Test motorun teknik özellikleri

Özellikler	
Marka/Model	Kirloskar/TV1
Silindir çapı /strok (mm)	87,5 /110
Standart sıkıştırma oranı	17,5:1
Devir sayısı (d/dk)	1500, sabit
Maksimum tork (Nm)	21,8 @ 1500 d/dk
Maksimum efektif güç (kW)	3,5 @ 1500 d/dk
Standart püskürtme avansı	23° KMA ÜÖN'dan önce
Püskürtme basıncı (bar)	200
Emme supabı açılma avansı	4,5° KMA ÜÖN'dan önce
Emme supabı kapanma gecikmesi	35,5° KMA AÖN'dan sonra
Egzoz supabı açılma avansı	35,5° KMA AÖN'dan sonra
Egzoz supabı kapanma gecikmesi	4,5° KMA ÜÖN'dan sonra

Net ısı yayılımı oranı, ölçülen silindir basıncı verilerinden yararlanılarak termodinamiğin birinci kanununa göre Eş. (1) ile hesaplanmıştır. Isı yayılım analizinde silindir içerisindeki gaz karışımının homojen olduğu ve ideal gaz davranışına uyduğu, yanma odasında basınç ve sıcaklığın üniform olduğu kabul edilmekte ve gaz kaçaqları ile sürtünmeler ihmal edilmektedir (Heywood, 1988; Maurya vd, 2019).

$$\frac{dQ_n}{d\theta} = \frac{k}{k-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k-1} V \frac{dP}{d\theta} \quad (1)$$

Burada,  $Q_n$  (J) net ısı yayılımını,  $\theta$  (°) krank mili açısını,  $k$  ( $= c_p/c_v$ ) özgül ısılar oranını,  $P$  (Pa) silindir basıncını ve  $V$  (m<sup>3</sup>) silindir hacmini ifade etmektedir. Basınç artış oranı (BAO) silindir basıncının krank açısına göre birinci türevi alınarak belirlenmektedir (Uyumaz vd, 2019). Bunun için Eş. (2) kullanılmıştır.

$$BAO = \frac{dP}{d\theta} \quad (2)$$

Tutuşma gecikmesi, püskürtmenin başladığı krank açısı ile yanmanın başladığı krank açısı arasındaki farktır. Yanma başlangıcı kümülatif ısı yayılımının %10'nunu gerçekleştirdiği krank açısı (KMA10) olarak alınmıştır. Yanma süresi ise kümülatif ısı yayılımının %90'nun ve %10'nun gerçekleştiği krank açıları arasındaki fark (KMA90-KMA10) olarak alınmıştır.

Motor performans ve emisyon testlerinden önce motorun yağlama yağı, soğutma suyu ve yakıt filtreleri değiştirilmiş ve tüm ölçüm cihazlarının kalibrasyonları yapılmıştır. Motor testleri 1500 d/dk sabit devirde ve 3 kg, 6 kg, 9 kg ve 12 kg dinamometre yüklerinde yapılmıştır. Seçilen bu dinamometre yükleri motorun sırasıyla 5,5 Nm, 10,9 Nm, 16,3 Nm ve 21,8 Nm tork

çıkışına, yani motorun %25, %50, %75 ve %100 yük durumuna karşılık gelmektedir. Motor her yükte sabit devir sayısında çalıştığından dolayı tüm yakıtlar için aynı yük noktalarındaki efektif güç çıkışı değerleri aynı olmaktadır. Deneysel ölçüm parametreleri motor kararlı çalışma şartlarına ulaştıktan sonra 60 saniye aralıklarla dört kez ölçülmüş ve rastlantısal hatayı azaltmak için hesaplamalarda bu dört ölçümün ortalaması dikkate alınmıştır. Egzoz emisyon değerleri ise 40 saniye aralıklarla altı kez kaydedilmiş ve altı ölçümün ortalaması nihai değer olarak alınmıştır. Ölçülen tüm veriler bilgisayara kaydedilmiş ve bu verilerden motor performans parametreleri, yanma karakteristikleri ve emisyon değerleri belirlenmiştir.

**Tablo 4.** TESTO-350 XL egzoz gaz analiz cihazının teknik özellikleri

Özellik/Gaz	CO [ppm]	NO [ppm]	NO <sub>2</sub> [ppm]	CO <sub>2</sub> [%]	O <sub>2</sub> [%]
Ölçüm aralığı	0-10000	0-3000	0-500	0-50	0-25
Duyarlılık	1	1	0,1	0,01	0,01
Doğruluk	±10	±5	±5	±0,5	±0,8

Bu çalışmada, belirsizlik analizi için Kline ve McClintock tarafından önerilen yöntem (Holman, 2001) seçilmiştir. Deneysel sistemde ölçülen (veya hesaplanan) büyüklük (R), ve bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişken ( $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ) bulunur. Bu durumda aşağıdaki ilişki yazılabilir.

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3)$$

Her bir bağımsız değişkene ait boyutlu belirsizlik;  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  ise R büyüklüğünün boyutlu belirsizliği  $w_R$  aşağıdaki (4) eşitliğinden hesaplanır. Yüzde cinsinden boyutsuz (orsansal) belirsizlik ise (5) eşitliğinden hesaplanır.

$$w_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} \cdot w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} \cdot w_2 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_3} \cdot w_3 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} \cdot w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$\tilde{w}_R (\%) = \frac{w_R}{R} \cdot 100 \quad (5)$$

Çalışmada performans parametrelerinin belirsizlikleri Eş. (3), Eş. (4) ve Eş. (5) ile hesaplanmıştır. Tablo 5'te, tam yükte hesaplanan maksimum boyutlu ve oransal belirsizlikler verilmiştir.

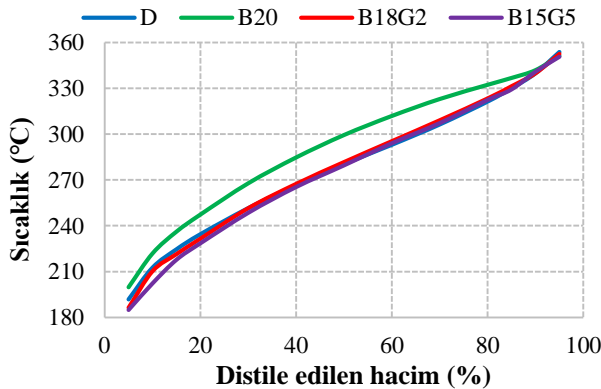
**Tablo 5.** Tam yükte hesaplanan maksimum belirsizlikler

Performans Parametreleri	Boyutlu belirsizlik	Oransal belirsizlik
Efektif motor gücü	±0,015995 kW	±% 0,4663
Yakıt debisi	±0,0050186 kg/h	±% 0,6678
Hava debisi	±0,213839 kg/h	±% 0,8355
Özgül yak. tük.	±0,00178 kg/kWh	±% 0,8145
Efektif verim	±0,003142331	±% 0,8224
H/Y oranı	±0,359698	±% 1,0649

## SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

Dizel-biyodizel-gliserin eterleri üçlü yakıt karışımlarında gliserin eterlerinin hacimsel oranları %2 ve %5'tir. Bu oranlar, yakıt özelliklerinde meydana gelecek değişimleri sınırlı tutarak yakıt özelliklerinin, yakıt standartlarına uymasını sağlamak, motorda herhangi bir modifikasyona gerek kalmadan gliserin eterlerini kullanabilmek ve biyodizel kaynaklı gliserinin üretim-tüketim dengesini korumak amacı ile seçilmiştir.

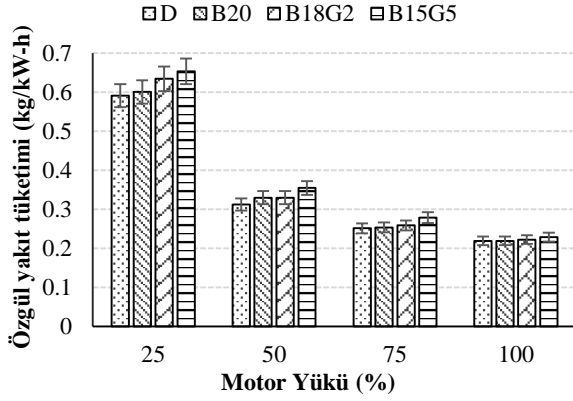
Gliserin eterlerinin %2 ve %5 oranında dizel-biyodizel yakıt karışımı ile harmanlanması halinde yakıt özelliklerinde meydana gelen değişimler belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 2'de sunulmuştur. Belirlenen tüm yakıt özellikleri, dizel-biyoyakıt karışımları için geliştirilen ASTM D 7467 yakıt standardına (ASTM, 2020) uyduğu belirlenmiştir. Gliserin eterlerinin biyodizele göre düşük yoğunluk, düşük viskozite ve düşük ısı değeri nedeni ile dizel-biyodizel-gliserin eterleri yakıt karışımlarının yoğunluğu, viskozitesi ve ısı değeri azalmıştır. Bu azalmalar karışımdaki gliserin eterleri miktarı ile orantılı olarak gerçekleşmiştir. Gliserin eterleri dallanmış zincirli yapıları nedeni ile biyodizel ve dizel yakıtına göre daha düşük setan sayısına sahiptir (Jaeger-Voirol vd, 2008). Bu nedenle dizel-biyodizel yakıt karışımına, gliserin eterlerinin ilave edilmesi ile yakıt karışımlarının setan indisi düşmüştür. Gliserin eterlerinin, dizel-biyodizel yakıt karışımının soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığına bir etkisi olmamıştır. Bunun nedeni karışımdaki biyodizel ve gliserin eterleri oranının düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Gliserin eterleri, düşük kaynama noktası sıcaklığı nedeni ile yakıtın destilasyon sıcaklıklarını düşürmüştür. Şekil 2'de görüldüğü gibi gliserin eterlerinin hızlı buharlaşma özellikleri sayesinde, dizel-biyodizel yakıt karışımının destilasyon karakteristiği iyileşmiştir. Özellikle dizel-biyodizel yakıt karışımının %2 gliserin eterleri ile harmanlanması sonucunda dizel yakıtına çok benzer bir destilasyon karakteristiği elde edilmiştir. Fakat B15G5 yakıtı daha fazla gliserin eterleri içermesi nedeniyle T5-T40 aralığındaki destilasyon sıcaklıkları daha hızlı düşmüştür. T40 destilasyon sıcaklığından sonra B15G5 yakıtı dizel yakıtı ile neredeyse aynı destilasyon eğrisine sahiptir.



Şekil 2. Destilasyon eğrileri

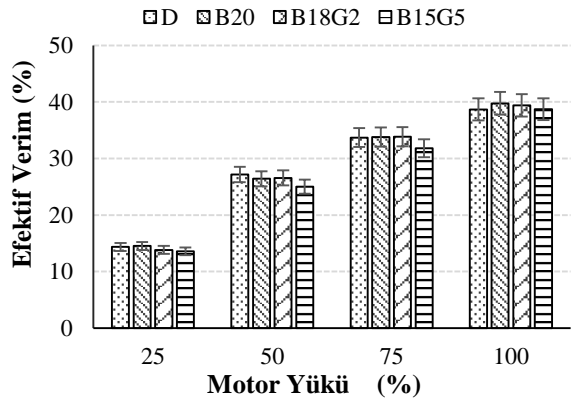
Şekil 3'te özgül yakıt tüketiminin test yakıtları ve motor yüküne göre değişimi verilmiştir. Özgül yakıt tüketimi grafiği incelendiğinde motor yükü arttıkça özgül yakıt tüketiminin azaldığı ve tüm yakıtlar için minimum özgül yakıt tüketiminin tam yükte gerçekleştiği görülür. Bu beklenen bir değişimdir. Çünkü motor yükü arttıkça ısı transferinin oransal olarak azalması, efektif gücün artmasını ve sonuçta özgül yakıt tüketiminin düşmesini sağlar (Şimşek vd, 2019). Yüksek motor yüklerinde test yakıtlarının özgül yakıt tüketimi değerleri arasındaki farklılıkların azaldığı görülmüştür. Bu durum, yüksek yüklerde silindir gaz sıcaklığının artması, karışım yakıtlarının yüksek viskozite ve yoğunluğunun daha homojen karışım oluşumu üzerindeki olumsuz etkilerinin kısmen azalmasına ve yakıt bileşimindeki oksijenin yanmayı geliştirmesine bağlanabilir. Yakıt karışımları, biyodizelin ve gliserin eterlerinin düşük ısı değeri ve yüksek yoğunluğundan dolayı tüm motor yüklerinde dizel yakıtına göre motorun özgül yakıt tüketimini arttırmıştır. Yakıtlar arasında en düşük ısı değere gliserin eterleri sahip olduğu için karışım bileşimindeki gliserin eterleri oranı arttıkça özgül yakıt tüketimi artmıştır. Yüksek uçuculuğa sahip yakıtlar düşük yüklerde motorun özgül yakıt tüketimini arttırdığı bilinmektedir (Ushakov ve Lefebvre, 2019). Gliserin eterlerinin yakıtın destilasyon sıcaklıklarını düşürmesi, özellikle düşük motor yüklerinde özgül yakıt tüketiminin daha hızlı artmasına neden olmuş olabilir. Motorun özgül yakıt tüketimi ile HC emisyonları arasında doğrusal bir ilişkinin olması özgül yakıt tüketimindeki değişimlerin yorumlanmasını kolaylaştırmaktadır. Test yakıtları için HC emisyonu değişiminin verildiği grafiğe (Şekil 10) bakıldığında gliserin eterleri HC emisyonunu arttırdığı görülmektedir. Dolayısı ile gliserin eterlerinin motorun özgül yakıt tüketimini arttırmasının nedenleri arasında, gliserin eterlerinin yüksek HC emisyonun da olduğu anlaşılmaktadır. %25 motor yükünde D, B20, B18G2 ve B18G5 yakıtları için belirlenen özgül yakıt tüketimi değerleri sırasıyla 0,5905 kg/kW-h, 0,6002 kg/kW-h, 0,6339 kg/kWh ve 0,6529 kg/kW-h olarak hesaplanmıştır. Tam yüke bu yakıtlar için özgül yakıt tüketimi sırasıyla 0,2191 kg/kW-h, 0,2191 kg/kW-h, 0,2224 kg/kW-h ve 0,2291 kg/kW-h olarak hesaplanmıştır. Tüm yük noktalarındaki özgül yakıt tüketimi değerlerinin ortalaması alındığında B18G2 ve B15G5 yakıtları D yakıtına göre ortalama özgül yakıt tüketimini %5,22 ve %10,34 oranında arttırmıştır. Bu yakıtlar B20 yakıtı ile kıyaslandığında ortalama özgül yakıt tüketimindeki artış sırasıyla %3,00 ve %8,01 olduğu belirlenmiştir.

Test yakıtlarının motorun efektif (termal) verimine etkisi Şekil 4'te verilmiştir. Motor yükü arttıkça tüm yakıtlar için efektif verim artmış ve maksimum efektif verim değerleri tam yükte hesaplanmıştır. Motor yükü ile birlikte efektif verimin artması, çevrim başına gerçekleşen ısı transferinin oransal olarak azalarak yanmanın daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmesine bağlanabilir (Heywood, 1988; Pulkrabek, 1997). D, B20, B18G2 ve B15G5 yakıtları için en yüksek efektif verim değerleri sırasıyla %38,68, %39,76, %39,41 ve %38,71



Şekil 3. Özgül yakıt tüketimi

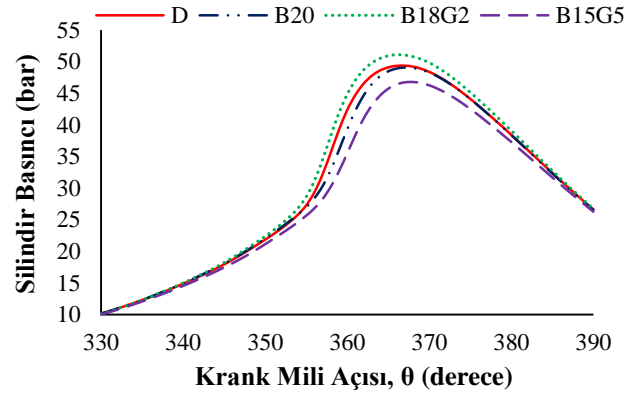
olarak tam yükte hesaplanmıştır. Tam yükte, B20 ve B18G2 yakıtları motorun efektif verimini dizel yakıtına göre fark edilir düzeyde arttırması dikkat çekicidir. Yüksek motor yüklerinde hava-yakıt karışımı daha yüksek sıcaklıklardaki ortam koşullarında oluştuğundan, yakıt karışımlarının yüksek viskozite ve yoğunlukları karışımın oluşumunda önemli bir sorun teşkil etmediği düşünülmektedir. Bununla birlikte biyodizel ve gliserin eterlerinin bileşiminde bulunan oksijen, zengin karışım bölgelerinde yakıtın daha hızlı oksitlenmesini sağlayarak efektif verimin artmasına yol açmış olabilir. Ancak kısmi motor yüklerinde yakıt karışımlarının düşük ısı değeri daha baskın hale gelerek efektif verim düşmektedir. Buna rağmen efektif verimdeki düşüş sınırlı olmaktadır. Bunun sonucunda B18G2 yakıtı ortalama efektif verimi, D ve B20 yakıtına göre çok az düşürmüştür (ortalama efektif verim değerleri arasındaki farklar ( $\cong$ 0,70) efektif verim için hesaplanan belirsizlikten küçüktür). Fakat bu durum, literatürde de belirtildiği gibi düşük karışım oranlarında görülebilir (Yeşilyurt vd, 2018). Karışımındaki gliserin eterleri oranının artması halinde ortalama efektif verim anlamlı düzeyde azalmıştır. B15G5 yakıtının düşük ısı değeri, yakıt bileşimindeki oksijenin olumlu etkisi karşısında daha baskın hale gelerek ortalama efektif verimin D ve B20 yakıtına göre sırası ile %4,16 ve %4,66 oranında azalmasına neden olmuştur.



Şekil 4. Efektif verim

Şekil 5'te tam yükte test yakıtları için silindir basıncının krank mili açısına göre değişimi verilmiştir. Tüm test yakıtları, krank mili açısına göre benzer silindir basıncı

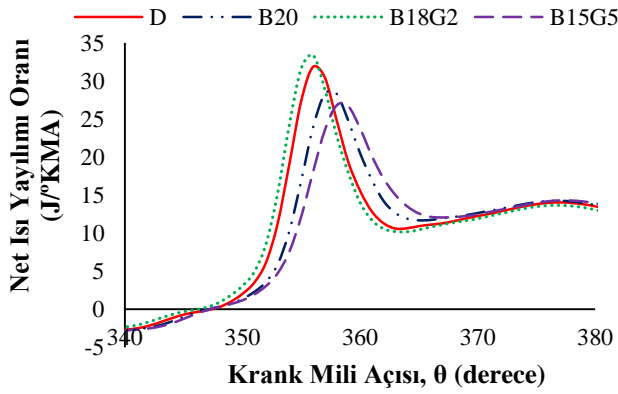
değişimi sergilemiştir. Fakat B18G2 yakıtı diğer yakıtlara göre silindir basıncını biraz arttırmıştır. Gliserin eterlerinin düşük ısı değerine rağmen, düşük destilasyon sıcaklıkları ve oksijen içeriği nedeniyle B18G2 yakıtı daha hızlı yanma sergileyerek silindir basıncını yükselttiği düşünülmektedir. Bu durum Şekil 6'da verilen net ısı yayılım grafiği ile Şekil 7'de verilen basınç artış oranı grafiğinden de görülebilir. Bu grafiklerde de B18G2 yakıtı diğer yakıtlara göre daha iyi performans sergilemiştir. Hızlı buharlaşma karakteristiğine sahip yakıtların kullanılması halinde silindir içeresinde buharlaşan yakıt miktarı artar ve buna bağlı olarak kontrolsüz yanma safhasında yanmaya katılan yakıt miktarı daha fazla olur (Datta ve Mandal, 2017; Frusteri vd, 2013; Sivalakshmi vd, 2012). Bu durumda silindir basıncı ve net ısı yayılımındaki artış daha hızlı olur (Emiroğlu ve Şen, 2018). Hızlı yanma sabit hacimde gerçekleşen yanma oranını arttırdığı için efektif verim artar (Zheng vd, 2016). B18G2 yakıtının hızlı yanma sergilemesi efektif verimdeki değişimle desteklenmektedir. Ancak gliserin eterlerinin dizel ve biyodizele göre ısı değerinin düşük olması nedeni ile en düşük silindir basıncı B15G5 yakıtının kullanımında ölçülmüştür. Ayrıca B15G5 kullanımında aynı efektif güç çıkışı için püskürtülen yakıt miktarının maksimum olması yanma süresinin uzamasına ve maksimum silindir basıncının gerçekleştiği krank mili açısının üst ölü noktadan (ÜÖN) uzaklaşmasına yol açmıştır. Maksimum silindir basıncı D, B20, B18G2 ve B15G5 yakıtları için sırasıyla 367° KMA, 367° KMA, 366° KMA ve 368° KMA'da; 49,35 bar, 49,04 bar, 51,05 bar ve 46,78 bar olarak ölçülmüştür.



Şekil 5. Tam yükte silindir basıncı

Dizel motorlarda tutuşma ve yanma, yanma odasının farklı noktalarında aynı anda başladığı için ısı yayılım oranı yanma hızı ile ilişkilendirilebilir (Safgönül vd, 2013). Püskürtülen yakıtın silindir içindeki gazlardan ısı olarak buharlaşması ve silindir içindeki sıcak gaz karışımından silindir duvarına olan ısı transferi nedeni ile net ısı yayılım oranı yanma başlamadan önce negatiftir (Maurya vd, 2019). Yanma başladıktan sonra net ısı yayılım oranı artarak maksimum değere ulaşır ve tepe noktasından sonra genelde ikinci ama daha düşük bir maksimum değere ulaşır ve sonrasında giderek azalır (Heywood, 1988). Dizel motorlardaki bu ısı yayılım oranı karakteristiği, Şekil 6'da görüldüğü gibi test

yakıtları için de ortaya çıkmıştır. Bu grafikte B18G2 yakıtı, net ısı yayılım oranını nispeten daha erken krank mili açısında başlatmış ve hızlı bir yanma sergileyerek maksimum net ısı yayılım oranını arttırmış olduğu görülmektedir. Tutuşma gecikmesi süresince yanma odasında biriken yakıtın aniden yanması sonucu en yüksek net ısı yayılım oranı, B18G2 yakıtı kullanımında görülmüştür. Dizel yakıtının yüksek setan sayısı ve ısıl değerinden dolayı maksimum net ısı yayılım oranı B20 ve B15G5 yakıtına göre artmıştır. D, B20G0, B18G2 ve B15G5 yakıtları için maksimum net ısı yayılım oranı sırasıyla 356° KMA, 358° KMA, 356° KMA ve 359° KMA'da; 31,86 J°KMA, 28,36 J°KMA, 33,40 J°KMA ve 26,79 J°KMA olarak belirlenmiştir. B20 yakıtı yüksek destilasyon sıcaklıkları, B18G2 yakıtı ise düşük setan sayısı ve düşük enerji içeriği nedeni ile maksimum net ısı yayılım oranının düşmesine ve daha geç krank mili açılarında gerçekleşmesine neden olmuştur.

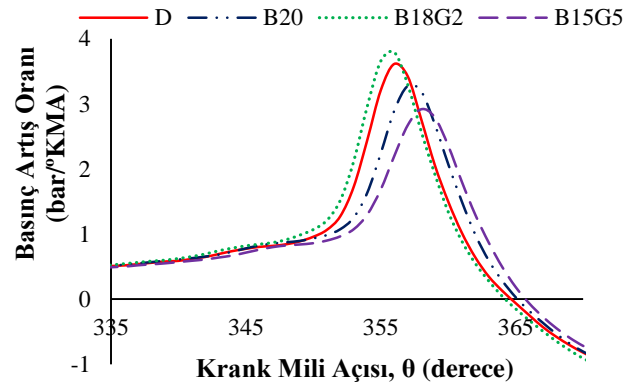


Şekil 6. Tam yükte net ısı yayılım oranı

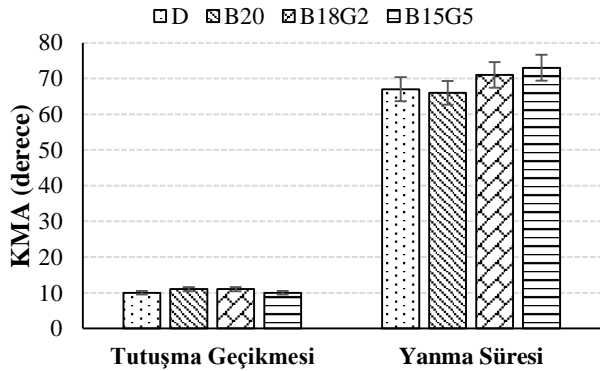
Şekil 7'de tam yükte test yakıtları için basınç artış oranının krank mili açısına göre değişimi verilmiştir. B18G2 yakıtı diğer yakıtlara göre daha fazla ısı yayılımına neden olduğu için basınç artış oranını arttırmıştır. Ancak tüm yakıtlar için belirlenen basınç artış oranı değeri, kabul edilebilir en yüksek basınç artış oranı değeri (vuruntu sınırı) olan 10 bar°KMA'dan (Mousavi vd, 2019; Uyumaz vd, 2019) çok daha düşük olduğu belirlenmiştir. Basınç artış oranı 10 bar°KMA'dan fazla olması durumunda dizel vuruntusu meydana gelir. Test yakıtları vuruntu sınırını aşmadığı için dizel vuruntusu meydana gelmemiştir. B20 ve B15G5 yakıtlarının düşük net ısı salınımı nedeniyle basınç artış oranları düşüktür. Maksimum basınç artış oranının düşmesi piston-biyel-krank mekanizması üzerindeki mekanik yükleri azaltarak motorun yapısal dayanıklılığına katkıda bulunur (Kuszewski, 2018). Fakat aynı zamanda motor performansının da düşmesine neden olur. D, B20, B18G2 ve B15G5 yakıtları için maksimum basınç artış oranı sırasıyla 356° KMA, 357° KMA, 356° KMA ve 358° KMA'da; 3,62 bar°KMA, 3,28 bar°KMA, 3,80 bar°KMA ve 2,92 bar°KMA olarak belirlenmiştir.

Şekil 8'de tam yükte tutuşma gecikmesi ve yanma süresinin test yakıtlarına göre değişimi verilmiştir. Tam yükte D, B20, B18G2 ve B15G5 yakıtları için tutuşma gecikmesi sırasıyla 10° KMA, 11° KMA, 11° KMA ve

10° KMA olarak belirlenmiştir. Görüldüğü gibi dizel-biyodizel karışımına %2 ve %5 oranında gliserin eterlerinin eklenmesi tutuşma gecikmesinde önemli bir değişikliğe yol açmamıştır. Gliserin eterlerinin setan sayısı düşüktür (Jaeger-Voirol vd, 2008). Fakat tutuşma gecikmesini etkileyen viskozite, yoğunluk, kaynama noktası sıcaklığı ve oksijen içeriği gibi yakıt özellikleri gliserin eterleri kullanımında gelişmiştir. Bu etkiler test yakıtları için benzer tutuşma gecikmesi süresine yol açmıştır. Gliserin eterlerinin düşük ısıl değerinden dolayı aynı efektif gücü elde edebilmek için harcanan yakıt miktarı B18G2 ve B15G5 yakıtı kullanımında artmış ve bunun neticesinde yanma süresi uzamıştır. Tam yükte D, B20, B18G2 ve B15G5 yakıtları için yanma süresi sırasıyla 67° KMA, 66° KMA, 71° KMA ve 73° KMA olarak belirlenmiştir.



Şekil 7. Tam yükte basınç artış oranı

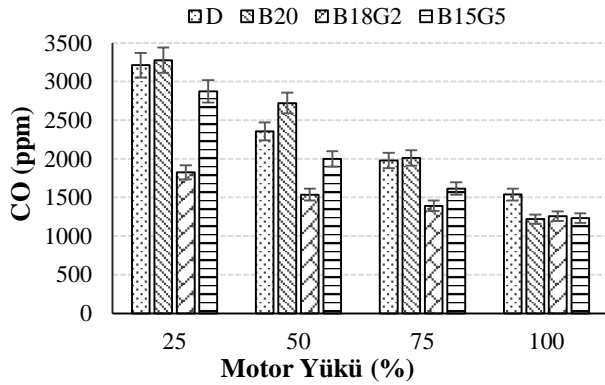


Şekil 8. Tam yükte tutuşma gecikmesi ve yanma süresi

İçten yanmalı motorlarda CO emisyonu oluşumu büyük oranda oksijen konsantrasyonu ve yanma odası sıcaklıklarına bağlıdır (Solmaz vd, 2016; Wu vd, 2019). CO emisyonunun test yakıtları ve motor yüküne göre değişimi Şekil 9'da verilmiştir. Tüm yakıtlar için en yüksek CO emisyonu en düşük motor yükünde ölçülmüş ancak motor yükünün artması ile birlikte CO emisyonu azalmış ve minimum CO emisyonu tam yükte elde edilmiştir. Düşük ve kısmi motor yüklerinde silindir basınç ve sıcaklığın düşük olması püskürtülen yakıtın kolayca buharlaşarak daha homojen bir hava yakıt karışımı oluşumunu engellemiş ve sonuçta CO emisyonu artmıştır. Tüm motor yüklerinde gliserin eterleri içeren yakıtlar referans yakıtlara göre CO emisyonunu



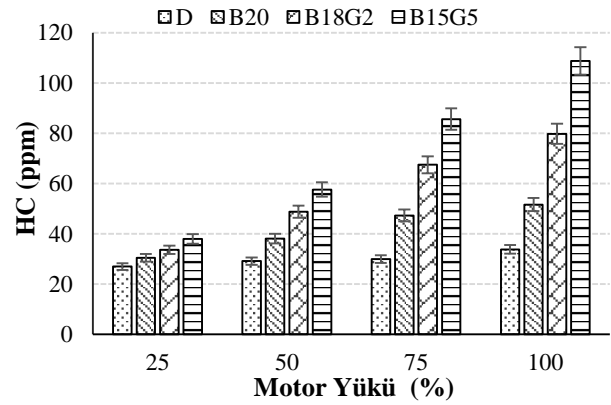
düşürmüştür. Gliserin eterleri molekül yapılarında yaklaşık olarak kütlece %30 oranında oksijen içermektedir. Yakıtın bileşiminde bulunan oksijen yakıtça zengin karışım bölgelerinde oksitlenmeyi artırarak CO emisyonu oluşumunu azaltmıştır. Ayrıca gliserin eterleri, dizel-biyodizel yakıt karışımının viskozitesini düşürerek yakıt atomizasyonunu iyileştirmesi daha homojen hava-yakıt karışımı oluşumunu desteklemiş olabilir. Fakat karışımdaki gliserin eterleri oranı artıktıkça CO emisyonunun artma eğilimine girdiği gözlemlenmiştir. Bunun nedeni gliserin eterlerinin düşük ısı değeri yüzünden yanmanın daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesi olabilir. Çünkü düşük yanma sıcaklıklarında karbon monoksit, karbon dioksit dönüşme hızı yavaşlar (Turns, 1996). Tüm yük noktalarındaki CO emisyonu değerlerinin ortalaması alındığında B18G2 ve B15G5 yakıtları CO emisyonunu D yakıtına göre %33,81 ve %15,02 oranında azaltmıştır. Bu yakıtların kullanımında B20 yakıtıyla kıyasla ortalama CO emisyonundaki azalma sırasıyla %34,85 ve %16,35 oranında gerçekleşmiştir.



Şekil 9. CO emisyonu

Şekil 10'da HC emisyonunun test yakıtları ve motor yüküne göre değişimi verilmiştir. Motor yükü artıktıkça hava fazlalık katsayısının (HFK) azalması sonucu tüm yakıtlar için HC emisyonu artmıştır. Tüm yakıt karışımları dizel yakıtına göre daha fazla HC emisyonu oluşumuna neden olmuştur. Ayrıca B15G5 yakıtı kullanımında HC emisyonunun çok hızlı şekilde arttığı belirlenmiştir. Bunun nedenlerinden biri olarak gliserin eterlerinin düşük kaynama noktası sıcaklığı olduğu düşünülmektedir. Dizel yakıt demetinin en dış bölgesinde tutuşmanın gerçekleşmeyeceği ya da alevin ilerleyemeyeceği kadar yakıtça fakir karışım bölgeleri bulunur ve bu aşırı fakir karışım bölgeleri dizel motorlarda en önemli HC emisyonu kaynaklarından biridir (Heywood, 1988). Gliserin eterlerinin hızlı buharlaşma karakteristiği aşırı fakir karışım bölgelerinin daha fazla genişlemesine yol açarak HC emisyonunu arttırdığı düşünülmektedir. Yakıt karışımlarının düşük enerji içeriği nedeni ile yakıt tüketimlerinin yüksek olması, fakir karışım bölgelerinin daha fazla genişlemesine yol açmış olabilir. Bu aşırı fakir karışım bölgelerinde alev hızının düşük olması veya alevin sönmesi egzoz gazları içindeki HC konsantrasyonunu artırır (Königsson vd, 2013; Mahla vd, 2010). Literatürde

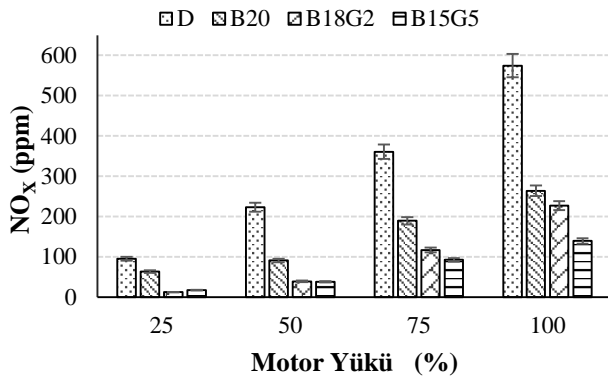
benzer etkilerle yüksek uçuculuğa sahip alkol yakıtlarının HC emisyonunu artırdığını gösteren çalışmalar mevcuttur (Atmanlı ve Yılmaz, 2020; Nanthagopal vd, 2018). B20 yakıtı, dizel yakıtına göre HC emisyonunu artırmasının nedeni biyodizelin yüksek viskozitesi ve yoğunluğudur. Tüm yük noktalarındaki HC emisyonu değerlerinin ortalaması alındığında B18G2 ve B15G5 yakıtları HC emisyonunu D yakıtına kıyasla ortalama olarak %91,53 ve %141,81 oranında arttırmıştır. Bu yakıtlar B20 yakıtıyla kıyaslandığında HC emisyonundaki artış sırasıyla %37,08 ve %73,06 oranında olduğu belirlenmiştir.



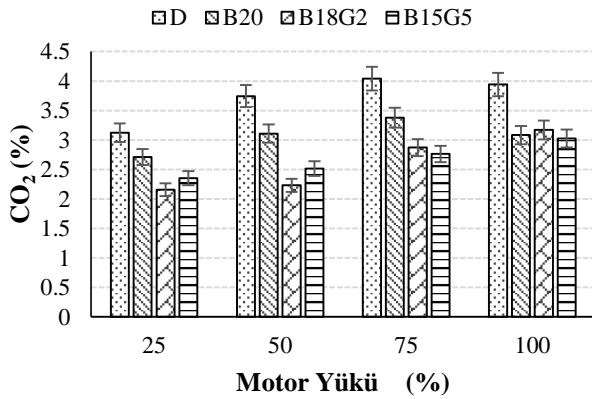
Şekil 10. HC emisyonu

NO<sub>x</sub> emisyonu dizel motorlarda en önemli kirlenici emisyonudur ve toplam kirlenici emisyonun yarısından fazlasını oluşturmaktadır (Reşitoğlu vd, 2015). NO<sub>x</sub> emisyonunu düşürmek için alınan önlemler (EGR ve geç püskürtme) diğer emisyonlarda ve yakıt tüketiminde artışa neden olduğundan kontrolü zor olan bir emisyonudur. Şekil 11'de NO<sub>x</sub> emisyonunun test yakıtları ve motor yüküne göre değişimi verilmiştir. Motor yükü artıktıkça silindir basınç ve sıcaklığı yükseldiği için NO<sub>x</sub> emisyonu artmaktadır. Grafikte en dikkat çekici durumun gliserin eterleri içeren yakıt karışımlarının dizel ve B20 yakıtına göre tüm motor yüklerinde çok daha az NO<sub>x</sub> emisyonu oluşturmasıdır. Ayrıca karışımdaki gliserin eterleri oranı artıktıkça NO<sub>x</sub> emisyonu orantılı olarak azalmıştır. Bu durum termal NO<sub>x</sub> oluşum mekanizmasına etki eden yanma sıcaklıkları ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Düşük ısı değere sahip yakıtlar yanma sıcaklıklarını düşürerek NO<sub>x</sub> oluşumunu azaltabilir (Altun vd, 2008). Yanma sıcaklıkları ile egzoz gaz sıcaklıkları arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır (Sayın vd, 2009). Yakıt karışımlarının egzoz sıcaklıkları dizel yakıtına göre düşük olması, bu yakıtların düşük NO<sub>x</sub> emisyonlarını desteklemektedir. Ayrıca oksijenli yakıtlar, düşük adyabatik alev sıcaklıkları nedeniyle termal NO<sub>x</sub> oluşumunu yavaşlatma potansiyeline sahiptir (Lapuerta vd, 2019). Yukarıda ifade edilen durumlardan dolayı yakıt karışımları NO<sub>x</sub> emisyonunu düşürmüştür. Tüm motor yükü noktalarındaki NO<sub>x</sub> emisyonu değerlerinin ortalaması alındığında B15G5 ve B18G2 yakıtları NO<sub>x</sub> emisyonunu D yakıtına göre %77,12 ve %68,48 oranında azaltmıştır. Bu yakıtlar B20 yakıtıyla kıyaslandığında NO<sub>x</sub> emisyonundaki azalma sırasıyla %52,80 ve %34,96 oranında gerçekleşmiştir.

Şekil 12’de CO<sub>2</sub> emisyonunun test yakıtları ve motor yüküne göre değişimi verilmiştir. CO<sub>2</sub> emisyonu oluşumu yakıt tüketimi, yanma verimi ve yakıtın C/H oranı ile ilişkilidir (Akbarian ve Najafi, 2019; Çakmak ve Bilgin, 2017). Yüksek motor yüklerinde, yakıt tüketimi ve yanma veriminin artmasının etkisi ile tüm test yakıtları için CO<sub>2</sub> emisyonunda hafif bir artışın olduğu görülmüştür. Yakıt karışımlarının yakıt tüketimi dizel yakıtına göre yüksek olmasına rağmen bu yakıtlar CO<sub>2</sub> emisyonu dizel yakıtına göre düşürmüşlerdir. Bunun nedeni biyodizel ve gliserin eterlerinin düşük C/H oranına sahip olmasıdır. B18G2 ve B15G5 yakıtları ortalama CO<sub>2</sub> emisyonunu D yakıtına kıyasla %29,79 ve %28,24 oranında azaltmıştır. Bu yakıtlar B20 yakıtıyla karşılaştırıldığında CO<sub>2</sub> emisyonundaki azalma sırasıyla %15,09 ve %13,22 oranında gerçekleşmiştir.



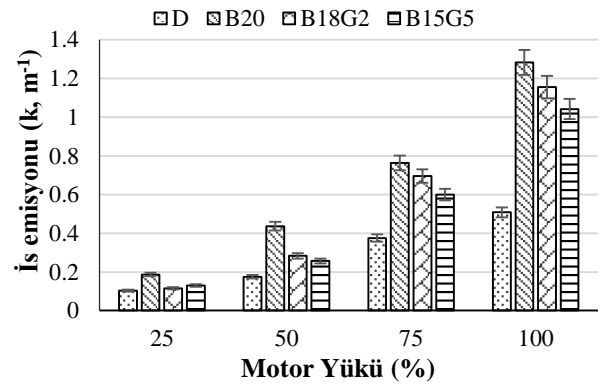
Şekil 11. NO<sub>x</sub> emisyonu



Şekil 12. CO<sub>2</sub> emisyonu

Şekil 13’te is emisyonunun (duman koyuluğu) test yakıtları ve motor yüküne göre değişimi verilmiştir. Sabit devir sayısında motor yükünün artması hava fazlalık katsayısının düşmesine neden olur. Bu nedenle is emisyonları, yüksek motor yüklerinde artmıştır. Test yakıtları arasında en yüksek is emisyonu salımına neden olan yakıtın B20 olduğu belirlenmiştir. B20 yakıtı ortalama duman koyuluğu değerini D yakıtına göre %129,84 oranında arttırmıştır. Bu sonuç, oksijen içeriğine rağmen biyodizelin yüksek viskozitesi ve yoğunluğu ile ilişkilidir. Biyodizelin kimyasal bileşiminde doymamış yağ asidi esterlerinin varlığı is emisyonunu artırır (Altun, 2014; Wang vd, 2018). Ayrıca biyodizelin yüksek kaynama noktasına sahip yağ

asidi metil esterleri içeriği is oluşumunu hızlandırdığı söylenebilir. Dizel-biyodizel yakıt karışımına gliserin eterlerinin eklenmesi durumunda duman koyuluğunun azaldığı belirlenmiştir. Gliserin eterleri, yakıt karışımının viskozite ve yoğunluğunu düşürmesi ve destilasyon sıcaklıklarını iyileştirmesi nedeni ile is emisyonunu azaltmıştır. Ayrıca gliserin eterlerinin oksijen içeriği daha fazla partikül maddenin oksitlenmesini sağlayarak is emisyonunu azalttığı düşünülmektedir. B18G2 ve B15G5 yakıtları B20 yakıtına göre duman koyuluğunu ortalama olarak sırası ile %15,79 ve %24,03 oranında azaltmıştır. Literatürdeki bazı çalışmalarda (Beatrice vd, 2014; Frusteri vd, 2013) gliserin eterlerinin is/partikül madde emisyonunu azalttığı ifade edilmiştir.



Şekil 13. Is emisyonu

## SONUÇLAR

Bu çalışmada laboratuvar ortamında sentezlenen gliserin eterlerinin dizel motorda ikinci nesil biyoyakıt olarak kullanımı deneysel olarak araştırılmıştır. Gliserin eterleri hacimsel %2 ve %5 oranında dizel-biyodizel yakıt karışımı ile harmanlanarak dizel-biyodizel-gliserin eterleri içeren üçlü yakıt karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan bu yakıtlar ile referans yakıt olarak seçilen dizel ve B20 yakıtının önemli fiziksel yakıt özellikleri ölçülmüş ve ardından motor performans ve egzoz emisyon testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen önemli sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Biyodizel üretiminden kaynaklanan gliserinin kimyasal yöntemle dizel motorlarda kullanılabilir biyoyakıt dönüştürülebilmektedir. Gliserin eterleri dizel-biyodizel yakıt karışımı ile harmanlanması durumunda yakıtın yoğunluk, viskozite, ısıl değer, setan indisi ve destilasyon sıcaklıklarında düşüş meydana gelmiştir.
- Dizel-biyodizel yakıt karışımına hacimsel %2 ve %5 oranında gliserin eterlerinin ilave edilmesi ile yakıtın viskozitesi yaklaşık %10-14 oranında azalmıştır. Dolayısı ile gliserin eterlerinin biyodizel ile harmanlanması halinde biyodizelin yüksek viskozite sorunu hafifletilebilir.
- Gliserin eterlerinin düşük kaynama noktası sıcaklıkları nedeniyle destilasyon sıcaklıklarını düşürmüştür. Biyodizel-dizel yakıt karışımına %2 oranında gliserin eterlerinin ilave edilmesi ile dizel yakıtının destilasyon eğrisine çok benzer bir destilasyon eğrisi elde

edilmiştir. Bu durum yakıtın performans ve yanma karakteristiklerini iyileştirmiştir.

- Gliserin eterleri motorun özgül yakıt tüketiminin artmasına ve efektif verimin azalmasına neden olmuştur. Ancak motor performansındaki bu düşüşler B18G2 yakıtı için daha az olduğu belirlenmiştir.
- B18G2 yanmada sinerjik bir etki oluşturarak maksimum silindir basıncını, net ısı yayılım oranını ve basınç artış oranını diğer yakıtlara göre yükseltmiş ve maksimum noktaların daha erken krank mili açılarında gerçekleşmesini sağlamıştır.
- Gliserin eterlerinin egzoz emisyonları üzerindeki en önemli etkisi NO<sub>x</sub> ve HC emisyonlarında görülmüştür. Gliserin eterleri referans yakıtlara göre NO<sub>x</sub> emisyonlarını azaltmış ancak HC emisyonlarını artırmıştır. Bu değişimler karışımdaki eter miktarı ile orantılı olduğu görülmüştür.
- Gliserin eterleri CO, CO<sub>2</sub> ve is emisyonlarını düşürmüştür.
- B18G2 yakıtı B15G5 yakıtına göre daha iyi motor performansı, yanma karakteristikleri ve egzoz emisyonlarına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle gliserin eterlerinin dizel-biyodizel yakıt karışımı için en uygun harmanlama oranının %2 olduğu belirlenmiştir.
- Pratikte, karışımdaki %20 biyoyakıt miktarı, %18 biyodizel ve %2 gliserin eterleri harmanlanarak elde edilebilir. Bu durumda hedeflenen biyoyakıt karışım oranına ulaşılması kolaylaşmaktadır. Ancak biyodizel üretim prosesinde %10 oranında gliserin olduğundan dolayı sürdürülebilir biyodizel üretimi için gliserin eterleri %10 oranında biyodizel ile harmanlanmalıdır. Bu çalışmada üçlü karışımdaki %2 gliserin eterleri oranı, gliserin eterlerinin biyodizel ile %10 oranında karıştırılmasıyla sağlanmıştır.
- Gliserin eterleri karışımı, her biri farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip beş adet eterden oluşmaktadır. Dolayısı ile bundan sonra yapılacak çalışmalarda gliserin eterleri karışımının bileşimi, yakıt özellikleri, motor performansı ve egzoz emisyonları açısından optimize edilebilir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma Ondokuz Mayıs Üniversitesi Proje Yönetim Ofisi tarafından PYO. MUH.1904.19.016 proje kodu ile mali olarak desteklenmiştir. Abdülvahap ÇAKMAK, 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurtiçi Doktora Burs Programı kapsamındaki destekten dolayı TÜBİTAK BİDEB'e teşekkür eder.

## KAYNAKLAR

Aguado-Deblas L., Estevez R., Russo M., La Parola V., Bautista F. M. and Testa M. L., 2020, Microwave-Assisted Glycerol Etherification Over Sulfonic Acid Catalysts, *Materials*, 13, 7, 1584.

Akbarian E. and Najafi B, 2019, A novel fuel containing

glycerol triacetate additive, biodiesel and diesel blends to improve dual-fuelled diesel engines performance and exhaust emissions, *Fuel*, 236, 666–676.

Altun Ş., 2014, Effect of the degree of unsaturation of biodiesel fuels on the exhaust emissions of a diesel power generator, *Fuel*, 117, PART A, 450–457.

Altun Ş., Bulut H. and Öner C., 2008, The comparison of engine performance and exhaust emission characteristics of sesame oil-diesel fuel mixture with diesel fuel in a direct injection diesel engine, *Renewable Energy*, 33, 8, 1791–1795.

ASTM., 2020, *ASTM D7467-20a, Standard Specification for Diesel Fuel Oil, Biodiesel Blend (B6 to B20)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.

Atmanli A. and Yilmaz N., 2020, An experimental assessment on semi-low temperature combustion using waste oil biodiesel/C3-C5 alcohol blends in a diesel engine, *Fuel*, 260, 116357.

Beatrice C., Di Blasio G., Guido C., Cannilla C., Bonura G. and Frusteri, F., 2014, Mixture of glycerol ethers as diesel bio-derivable oxy-fuel: Impact on combustion and emissions of an automotive engine combustion system, *Applied Energy*, 132, 236–247.

Beatrice C., Di Blasio G., Lazzaro M., Cannilla C., Bonura, G., Frusteri F. and Bartocci P., 2013, Technologies for energetic exploitation of biodiesel chain derived glycerol: Oxy-fuels production by catalytic conversion, *Applied Energy*, 102, 63–71.

Beatrice C., Di Blasio G., Lazzaro M., Mancaruso E., Marialto R., Sequino L. and Vaglieco B. M., 2015, Investigation of the combustion in both metal and optical diesel engines using high-glycerol ethers/diesel blends, *International Journal of Engine Research*, 16, 1, 38–51.

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*, Vol. 46, pp. 157–165.

Behr A. and Obendorf L., 2002, Development of a Process for the Acid-Catalyzed Etherification of Glycerine and Isobutene Forming Glycerine Tertiary Butyl Ethers, *Engineering in Life Sciences*, 2(7), 185.

Bohon M. D., Metzger B. A., Linak W. P., King C. J. and Roberts W. L., 2011, Glycerol combustion and emissions, *Proceedings of the Combustion Institute*, 33, 2, 2717–2724.

Bozkurt Ö. D., Yılmaz F., Bağlar N., Çelebi S. and Uzun, A., 2019, Compatibility of di- and tri-tert-butyl glycerol ethers with gasoline, *Fuel*, 255, 115767.

Çakmak A. and Bilgin, A., 2017, Performance and

- Emissions of a Single Cylinder CI Engine Running on Corn Oil Methyl Ester-Diesel Blends, *Journal of Clean Energy Technologies*, 5, 4, 280–284.
- Çakmak A. and Özcan H., 2020, Biofuel additive production from glycerol and determination of its effect on some fuel properties, *SN Applied Sciences*, 2, 10, 1637.
- Çakmak A. and Özcan H., 2018, Benzin İçin Oksijenli Yakıt Katkıları, *Journal of Polytechnic*, 21, 4, 831–840.
- Cannilla C., Bonura G., Maisano S., Frusteri L., Migliori M., Giordano G. and Frusteri F., 2020, Zeolite-assisted etherification of glycerol with butanol for biodiesel oxygenated additives production, *Journal of Energy Chemistry*, 48, 136–144.
- Cannilla Catia, Bonura G., Frusteri L., and Frusteri F., 2015, Batch reactor coupled with water permselective membrane: Study of glycerol etherification reaction with butanol, *Chemical Engineering Journal*, 282, 187–193.
- Chaudhary V. and Gakkhar R. P., 2021, Exergy analysis of small DI diesel engine fueled with waste cooking oil biodiesel, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 43, 2, 201–215.
- Cornejo A., Barrio I., Campoy M., Lázaro J. and Navarrete, B., 2017, Oxygenated fuel additives from glycerol valorization. Main production pathways and effects on fuel properties and engine performance: A critical review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1400–
- Datta A. and Mandal B. K., 2017, Engine performance, combustion and emission characteristics of a compression ignition engine operating on different biodiesel-alcohol blends. *Energy*, 125, 470–483.
- Emiroğlu A. O. and Şen M., 2018, Combustion, performance and exhaust emission characterizations of a diesel engine operating with a ternary blend (alcohol-biodiesel-diesel fuel). *Applied Thermal Engineering*, 133, 371–380.
- Fatimah I., Sahroni I., Fadillah G., Musawwa M. M., Mahlia T. M. I. and Muraza O., 2019, Glycerol to Solketal for Fuel Additive: Recent Progress in Heterogeneous Catalysts, *Energies*, 12, 15, 2872.
- Frusteri F., Arena F., Bonura G., Cannilla, C., Spadaro L. and Di Blasi O., 2009, Catalytic etherification of glycerol by tert-butyl alcohol to produce oxygenated additives for diesel fuel, *Applied Catalysis A: General*, 367, 1–2, 77–83.
- Frusteri F., Cannilla C., Bonura G., Spadaro L., Mezzapica A., Beatrice C. and Guido, C., 2013, Glycerol ethers production and engine performance with diesel/ethers blend, *Topics in Catalysis*, 56, 1–8, 378–383.
- Gaurav N., Sivasankari S., Kiran G. S., Ninawe A. and Selvin J., 2017, Utilization of bioresources for sustainable biofuels: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 205–214.
- Ghosh P., Westhoff P. and Debnath D., 2019, Biofuels, food security, and sustainability, In *Biofuels, Bioenergy and Food Security*, 211–229.
- Goncalves M., Castro C. S., Oliveira L. C. A. and Carvalho, W. A., 2015, Green acid catalyst obtained from industrial wastes for glycerol etherification, *Fuel Processing Technology*, 138, 695–703.
- Gülüm M., Onay F. K., Bilgin A., 2018, Comparison of viscosity prediction capabilities of regression models and artificial neural networks, *Energy*, 161, 361–369.
- Gülüm M., Bilgin A. and Çakmak A., 2015, Comparison of optimum reaction parameters of corn oil biodiesels produced by using sodium hydroxide (NaOH) and potassium hydroxide (KOH), *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30, 3.
- Heywood J. B., 1988, *Internal combustion engine fundamentals*, New York: McGraw-Hill.
- Holman J. P., 2001, *Experimental methods for engineers*. In McGraw-Hill series in mechanical engineering (7th ed.), Boston.
- Jaeger-Voirol A., Durand I., Hillion G., Delfort B. and Montagne X., 2008, Glycerin for New Biodiesel Formulation. *Oil and Gas Science and Technology - Revue de l'IFP*, 63, 4, 395–404.
- Klepáčová K., Mravec D., and Bajus M., 2006, Etherification of glycerol with tert-butyl alcohol catalysed by ion-exchange resins, *Chemical Papers*, 60(3), 224–230.
- Königsson F., Kuyper J., Stalhammar P. and Angstrom H.-E., 2013, The influence of crevices on hydrocarbon emissions from a diesel-methane dual fuel engine. *SAE International Journal of Engines*, 6, 2, 751–765.
- Kuszewski H., 2018, Effect of adding 2-ethylhexyl nitrate cetane improver on the autoignition properties of ethanol–diesel fuel blend – Investigation at various ambient gas temperatures, *Fuel*, 224, 57–67.
- Lapuerta M., Ramos Á., Rubio S. and Estévez C., 2019, Optimization of a diesel engine calibration for operating with a residual glycerol-derived biofuel, *International Journal of Engine Research*, 146808741989153.
- Lee R. A. and Lavoie J.-M., 2013, From first- to third-generation biofuels: Challenges of producing a commodity from a biomass of increasing complexity. *Animal Frontiers*, 3, 2, 6–11.
- Mahla S. K., Das L. M. and Babu M. K. G., 2010, Effect

- of EGR on performance and emission characteristics of natural gas fueled diesel engine, *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 4, 4, 523–530.
- Maurya R. K., Maurya and Luby., 2019, *Reciprocating Engine Combustion Diagnostics*, Springer.
- Milano J., Ong H. C., Masjuki H. H., Chong W. T., Lam M. K., Loh P. K. and Vellayan V., 2016, Microalgae biofuels as an alternative to fossil fuel for power generation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 180–197.
- Monteiro M. R., Kugelmeier C. L., Pinheiro R. S., Batalha M. O. and da Silva César A., 2018, Glycerol from biodiesel production: Technological paths for sustainability, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 88, 109–122.
- Mousavi S. M., Saray R. K., Bahlouli K., Poorghasemi K., Maghbouli A. and Sadeghlu A., 2019, Effects of pilot diesel injection strategies on combustion and emission characteristics of dual-fuel engines at part load conditions, *Fuel*, 258, 116153.
- Nandiwale K. Y., Patil S. E. and Bokade V. V., 2014, Glycerol Etherification using *n*-Butanol to Produce Oxygenated Additives for Biodiesel Fuel over H-Beta Zeolite Catalysts, *Energy Technology*, 2, 5, 446–452.
- Nanthagopal K., Ashok B., Saravanan B., Patel D., Sudarshan B. and Aaditya Ramasamy R., 2018, An assessment on the effects of 1-pentanol and 1-butanol as additives with Calophyllum Inophyllum biodiesel, *Energy Conversion and Management*, 158, 70–80.
- Nguyen Q., Bowyer J., Howe J., Bratkovich S., Groot H., Pepke E. and Fernholz K., 2017, Global production of second generation biofuels: *Trends and influences*, *Dovetail Partners Inc*.
- Noureddini H., Dailey W. R. and Hunt B. A., 1998, Production of ethers of glycerol from crude glycerol-the by-product of biodiesel production, *Papers in Biomaterials*, 18.
- OECD, 2019, *OECD-FAO AGRICULTURAL OUTLOOK 2019-2028*, *OECD*.
- OECD/FAO, 2018, *OECD Agriculture statistics (database)*. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1787/agr-outl-data-en>.
- Özbay N., 2013, *Gliserin Eterlerinin Sentezi ve Reaksiyon Kinetiğinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 54, Ankara.
- Ozbay N., Oktar N., Dogu G. and Dogu T., 2010, Conversion of Biodiesel By-Product Glycerol to Fuel Ethers over Different Solid Acid Catalysts, *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 8, 1,
- Ozbay N., Oktar N., Dogu G. and Dogu T., 2011, Effects of sorption enhancement and isobutene formation on etherification of glycerol with tert-butyl alcohol in a flow reactor, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 51(26), 8788–8795.
- Ozbay N., Oktar N., Dogu G. and Dogu T., 2013, Activity Comparison of Different Solid Acid Catalysts in Etherification of Glycerol with tert-Butyl Alcohol in Flow and Batch Reactors, *Topics in Catalysis*, 56(18–20), 1790–1803.
- Pinto B. P., de Lyra J. T., Nascimento J. A. C. and Mota C. J. A., 2016, Ethers of glycerol and ethanol as bioadditives for biodiesel, *Fuel*, 168, 76–80.
- Pulkrabek W. W., 1997, *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*, New Jersey: Prentice Hall, Inc.
- Queirós P., Costa M. and Carvalho R. H., 2013, Co-combustion of crude glycerin with natural gas and hydrogen, *Proceedings of the Combustion Institute*, 34, 2, 2759–2767.
- Rahmat N., Abdullah A. Z. and Mohamed A. R., 2010, Recent progress on innovative and potential technologies for glycerol transformation into fuel additives: A critical review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 3, 987–1000.
- Reşitoğlu İ. A., Altinişik K. and Keskin A., 2015, The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17, 1, 15–27.
- Ruan R., Zhang Y., Chen P., Liu S., Fan L., Zhou N. and Li B., 2019, Biofuels: Introduction. In *Biomass, Biofuels, Biochemicals: Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels*, 3–43.
- Safgönül B., Ergeneman M., Arslan H. E and Soruşbay, C., 2013, *İçten Yanmalı Motorlar*, İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Sayin C., İlhan M., Canakci M. and Gumus M., 2009, Effect of injection timing on the exhaust emissions of a diesel engine using diesel-methanol blends, *Renewable Energy*, 34, 5, 1261–1269.
- Şimşek D., Oral F. and Çolak N. Y., 2019, Tek Silindirli Buji Ateşlemeli Motorlarda Benzin-Propanol-Hekzan Yakıt Karışımlarının Motor Performans ve Emisyonlarına Etkisi, *J. of Thermal Science and Technology*, 39, 81–89.
- Sivalakshmi S., Balusamy T., Datta A. and Mandal B. K., 2012, Influence of Ethanol Addition on a Diesel Engine Fuelled with Neem Oil Methyl Ester, *International Journal of Green Energy*, 9, 3, 470–483.
- Solmaz H., Yamik H., Uyumaz A., Polat S. and Yilmaz

E., 2016, An Experimental Study on the Effects of Diesel and Jet-A1 Fuel Blends on Combustion, Engine Performance, and Exhaust Emissions in a Direct Injection Diesel Engine, *J. of Thermal Science and Technology*, 36, 2, 51–60.

Spooner-Wyman J. K., Appleby D. B. and Yost D. M., 2003, Evaluation of Di-Butoxy Glycerol (DBG) for Use As a Diesel Fuel Blend Component, *SAE Technical Paper*, No. 2003-0.

Tan H. W., Abdul Aziz A. R., and Aroua M. K., 2013, Glycerol production and its applications as a raw material: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 118–127.

Turns S. R., 1996, *Introduction to combustion*, McGraw-Hill Companies.

Ushakov S., and Lefebvre N., 2019, Assessment of Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) Applicability as an Alternative Marine Fuel Based on Its Performance and Emissions Characteristics, *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 12, 2, 109–121.

Uyumaz A., Aksoy F., Akay F., Baydir Sükrü Ayhan, Solmaz H., Yılmaz E. and Calam A., 2019, An Experimental Investigation on The Effects of Waste Olive Oil Biodiesel on Combustion, Engine Performance and Exhaust Emissions. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 8, 3, 103–116.

Veiga P. M., Gomes A. C. L., Veloso C. O. and Henriques C. A., 2017, Acid zeolites for glycerol etherification with ethyl alcohol: Catalytic activity and catalyst properties, *Applied Catalysis A: General*, 548, 2–15.

Viswanadham N. and Saxena S. K., 2013, Etherification of glycerol for improved production of oxygenates. *Fuel*, 103, 980–986. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2012.06.057>

Vlad E. and Bildea C. S., 2012, Reactive distillation-A viable solution for etherification of glycerol with tert-butyl alcohol, *Chemical Engineering Transactions*, 29.

Wang Z., Li L., Wang J., Reitz R. D., Soto F., Alves M. and Yao M., 2018, Effect of biodiesel saturation on soot formation in diesel engines, *Fuel Processing Technology*,

Wu Y., Wang P., Muhammad Farhan S., Yi J. and Lei L., 2019, Effect of post-injection on combustion and exhaust emissions in DI diesel engine. *Fuel*, 258, 116131.

Yang F., Hanna M. A. and Sun R., 2012, Value-added uses for crude glycerol—a byproduct of biodiesel production, *Biotechnology for Biofuels*, 5, 1, 13.

Yeşilyurt M. K., Arslan M. and 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.

Zheng Z., Wang X. F., Zhong X., Hu B., Liu H. and Yao M., 2016, Experimental study on the combustion and emissions fueling biodiesel/n-butanol, biodiesel/ethanol and biodiesel/2,5-dimethylfuran on a diesel engine. *Energy*, 115, 539–549.



**Abdülvahap ÇAKMAK** 2010 yılında Dicle Üniversitesi Batman Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Öğretmenliği programından fakülte birincisi olarak mezun olmuştur. 2015 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun olarak Makine Mühendisi unvanı almıştır. Yüksek lisansını 2014 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana bilim dalı Otomotiv bilim dalında tamamlamıştır. 2015 yılında aynı üniversitede başladığı doktora eğitimine 2016 yılında yatay geçiş yaparak Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği ana bilim dalında sürdürmüş ve 2021 yılında tamamlamıştır. 2015 yılından itibaren Samsun Üniversitesi Kavak Meslek Yüksekokulu'nda Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Uluslararası ve ulusal dergilerde/kongrelerde yayımlanmış/sunulmuş otuzdan fazla makalenin/bildirinin yazarı veya ortak yazarıdır. Araştırma alanı içten yanmalı motorlar, yakıtlar ve yanma, alternatif yakıtlar ve ekserji analizidir.



**Hakan ÖZCAN** Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde profesördür. 1995 yılında Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun olmuştur. Yüksek Lisans ve Doktora derecelerini aynı üniversiteden sırasıyla 1997 ve 2005 yılında almıştır. Araştırma alanları içten yanmalı motor, termodinamik, alternatif yakıt, yakıtlar ve yanmadır. Birçok bilimsel araştırma projesinde araştırmacı ve yönetici olarak görev yapmıştır. Bugüne kadar atmıştan fazla bilimsel makale ve konferans bildirisi yayımlamıştır.