



## Biyogaz-dizel çift yakıtlı dizel motor üzerine bir araştırma

İlker Turgut Yılmaz\* , Metin Gümüş 

Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Göztepe Kampüsü, 34722, Kadıköy, İstanbul, Türkiye

### Ö N E Ç I K A N L A R

- Biyogazın çift yakıtlı motor üzerine etkileri araştırılmıştır
- Ana yakıt olarak biyogaz (60% CH<sub>4</sub> ve 40% CO<sub>2</sub>) kullanılmıştır
- Silindir basınçları, özgül yakıt tüketimleri ve egzoz emisyonları incelenmiştir

#### Makale Bilgileri

Geliş: 10.06.2016

Kabul: 13.06.2017

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.337645

#### Anahtar Kelimeler:

Biyogaz,  
çift yakıtlı dizel motor,  
yakıt tüketimi,  
egzoz emisyonları

#### ÖZET

Bu çalışmada biyogazın çift yakıtlı bir dizel motorda ana yakıt olarak kullanılmasıyla elde edilen silindir basınçları, özgül yakıt tüketimleri ve egzoz emisyonları deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde motor devri 1750 d/d'da sabit tutulurken, motor yükü 50 Nm, 75 Nm ve 100 Nm olarak değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar biyogazın dizel motorlarda is emisyonunun azaltılmasında kullanılabileceğini göstermiştir. Dizel motorda biyogaz kullanılması ile HC emisyonları ve maksimum silindir basınçları tüm yüklerde artmıştır. NOx emisyonları ise düşük yükte azalırken yük artışına bağlı olarak yükselmiştir. Püskürtme zamanlamasının ayarlanması, sıkıştırma oranının azaltılması, farklı yağlama yağlarının kullanılması gibi değişiklikler, biyogaz-dizel çift yakıtlı motorda hem performansın artırılması hem de egzoz emisyonlarının düşürülmesini sağlayabilir.

## A research on biogas-diesel dual fuel diesel engine

### H I G H L I G H T S

- The effect of biogas on the dual-fuel engine was investigated
- Biogas (60% CH<sub>4</sub> and 40% CO<sub>2</sub>) was used as main fuel
- Cylinder pressures, brake specific fuel consumptions and exhaust emissions was examined

#### Article Info

Received: 10.06.2016

Accepted: 13.06.2017

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.337645

#### Keywords:

Biogas,  
dual fuel diesel engine,  
fuel consumption,  
exhaust emissions

#### ABSTRACT

In the present study, cylinder pressures, brake specific fuel consumptions and exhaust emissions of a dual fuel diesel engine used biogas (%60 CH<sub>4</sub>-%40 CO<sub>2</sub>) as main fuel was examined experimentally. Experiments were conducted at 1750 rpm under 50 Nm, 75 Nm and 100 Nm loads. Results showed that biogas could be used in diesel engines for reducing soot emissions. HC emissions and maximum cylinder pressures increased for all engine loads with using biogas in diesel engine. NOx emission decreased at low engine load but increased depending on the rise of engine load. The modifications such as adjusting injection timing, decreasing compression ratio and using different lubrication oils can be used for not only increasing performance but also lowering exhaust emissions of a biogas-diesel dual fuel engine.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İçten yanmalı motorlar (İYM) için enerji kaynağı olan fosil yakıt kaynaklarının hızla tükenmesi, araştırmacıların dikkatlerini alternatif enerji kaynaklarına çekmektedir [1]. Alternatif enerji kaynaklarının İYM’de kullanımı günden güne artmaktadır [2]. Bu alternatif enerji kaynaklarının arasında gaz yakıtlar önemli yer tutmaktadır. En önemli alternatif gaz yakıtlar arasında sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) [3], sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) [4], hidrojen (H<sub>2</sub>) [5] ve biyogaz [6] sayılabilir. LPG’nin İYM’de yakıt olarak kullanılması sadece yakıt ekonomisi sağlamakla kalmayıp, zararlı emisyonlar açısından da kayda değer iyileştirmeler göstermektedir. Ancak, LPG fosil kökenli bir yakıt olup, fosil kökenli yakıtlardan duyulan etkiler LPG içinde geçerlidir. H<sub>2</sub> İYM’de yakıt olarak kullanıldığında azot oksit (NO<sub>x</sub>) dışında zararlı emisyon üretmemektedir. Fakat üretim yöntemlerini pahalı olması nedeniyle H<sub>2</sub>’nin yakıt olarak kullanılması ekonomik değildir [7]. CNG ise İYM’de yaygın olarak kullanılan ancak rezervleri sınırlı olan bir yakıttır [8]. Tablo 1’de bazı yakıtlara ait fiziksel ve kimyasal özellikler görülmektedir [9]. Biyogaz, CNG ile benzer özelliklere sahip, evsel, hayvansal, tarımsal vb. organik atıkların anaerobik fermantasyonu sonucunda üretilen bir gazdır [10]. Biyogaz renksiz kokusuz ve havadan hafif bir gaz olup genellikle metan (CH<sub>4</sub>) ve karbondioksit (CO<sub>2</sub>) gazlarından oluşmaktadır. Bununla birlikte içerisinde az miktarlarda hidrojen sülfür (H<sub>2</sub>S), karbon monoksit (CO), azot (N<sub>2</sub>), H<sub>2</sub> ve oksijen (O<sub>2</sub>) bulunabilmektedir. Biyogazın içeriği anaerobik fermantasyon işleminde kullanılan maddelere göre değişmektedir [11]. Biyogazın enerji kaynağı CH<sub>4</sub> gazıdır. Uygun yanma koşullarının sağlanabilmesi için biyogazın içeriğinde en az %50 oranında CH<sub>4</sub> gazı

bulunmalıdır [12]. Tablo 2’de biyogazın içerdiği gazlar verilmiştir. Biyogaz, yüksek vuruntu dayanımı sayesinde çift yakıtlı dizel motorlar için uygun bir yakıttır [13]. Biyogaz içerisinde bulunan CO<sub>2</sub> miktarı arttıkça silindir içi sıcaklıklar düşeceğinden termal verim düşmektedir [14]. Termal verimi arttırmak için, emme dolgusuna H<sub>2</sub> eklenmesi [8], pilot yakıt olarak biyodizel kullanılması [15], sıkıştırma oranının (SO) artırılması, süper şarj ve emme kanalında karıştırıcı kullanılması [16] gibi yöntemler kullanılmaktadır. Biyogaz içeriğinde bulunan CO<sub>2</sub> miktarının artması, silindir içi sıcaklıkları düşürdüğünden HC emisyonlarında artış görülebilmektedir [17]. Bununla birlikte çift yakıtlı çalışmada, fakir karışımlarda yanmanın gerçekleşebilmesi ve homojen gaz yakıt/hava karışımlarının düşük yanma sıcaklıkları oluşturması NO<sub>x</sub> ve is emisyonlarını düşürmektedir [13]. Biyogazın büyük bir kısmını oluşturan CH<sub>4</sub>’ün is emisyonu oluşturma meyli düşüktür [18]. Pilot yakıt olarak kullanılan dizel yakıtın yanmasıyla is emisyonu meydana gelirken, gaz yakıtların yanmasıyla motor yağında nitrasyon ve oksidasyon meydana gelebilir. Özel geliştirilmiş yağlar ile motorun daha temiz çalışması sağlanabilir [19]. Biyogaz çift yakıtlı dizel motorlar için biyokütel kökenli alternatif bir yakıttır. Bu çalışmada ana yakıt olarak biyogaz kullanılan dört silindirli, turbo şarjlı, Common Rail yakıt püskürtme sistemine sahip çift yakıtlı bir dizel motorda egzoz emisyonları ve motor performansları incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Deneyler dört silindirli, dört zamanlı, su soğutmalı, turbo şarjlı Common-Rail yakıt püskürtme sistemine sahip bir

**Tablo 1.** Yakıtların bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri (Some physical and chemical features of fuels)

	Biyogaz	Dizel	Benzin	Metan	LPG
Kimyasal formül	% 60 CH <sub>4</sub> +% 40 CO <sub>2</sub>	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	CH <sub>4</sub>	% 30 C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> + % 70 C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	1,2	850	750	0,72	540
Isıl değer (kJ/kg)	18000	42500	43000	50000	46000
Tutuşabilirlik	% 5-% 15	% 0,6-% 0,85	% 0,6-% 8	% 5-% 15	% 2-% 9
Tutuşma sıcaklığı (°C)	650	210	246	650	400
Hava/yakıt oranı	10,2	14,5	14,8	17	15,5
Oktan sayısı	130	-	92	120	100
Setan sayısı	-	55	-	-	-

**Tablo 2.** Biyogazı oluşturan gazlar (The gases which are in biogas)

	Kaynak	CH <sub>4</sub> (%)	CO (%)	CO <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)
Biyogaz	[17]	50–70	---	25–50	0,3–3	1–5	---	---
	[20]	6 0-80	---	20-40	---	---	---	---
	[21]	73	---	19	---	6,5	1,5	20 ppm
	[22]	64	---	35	---	---	---	---
	[23]	68,3	---	31,3	---	---	---	---
	[24]	57	0,18	41	---	0,18	---	---
	[25]	60	0,18	30	---	0,18	---	---

dizel motorda gerçekleştirilmiştir. Deney motoruna ait özellikler Tablo 3'te görülmektedir. Dizel motora silindir basınç sensörü, yakıt hattı basınç sensörü ve krank enkoder yerleştirilmiştir. Motorun hava tüketimi kütesel hava akış ölçer yardımı ile belirlenmiştir. Emme havası, motor yağı, yakıt, egzoz, soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları K tipi sıcaklık sensörleri kullanılarak ölçülmüştür. %0.1'lik hassasiyete sahip yakıt ölçüğü ve %0.5'lik hassasiyetli kronometre ile dizel yakıt tüketimi belirlenmiştir. Turbo şarj giriş kanalı ve hava filtresi arasında, biyogazın motora gönderilebilmesi için bir karışım odası eklenmiştir. CH<sub>4</sub> ve CO<sub>2</sub> gazlarının miktarları ayar vanaları yardımıyla kütesel akış ölçerle ile belirlenmiştir. Biyogaz bileşimi %60 CH<sub>4</sub> ve %40 CO<sub>2</sub> gazlarından oluşmaktadır. Motorun enerji ihtiyacının %20'si pilot yakıttan sağlanmıştır. Motorun yükü biyogaz ile kontrol edilmiştir.

**Tablo 3.** Deney motorunun özellikleri  
(The specifications of test engine)

Silindir hacmi	1461 cm <sup>3</sup>
Çap	76 mm
Strok	80,5 mm
Silindir sayısı	4
Valf sayısı	8
Sıkıştırma oranı	18,25:1
Maksimum güç (4000 d/d)	48 kW (65 hp)
Maksimum tork (1750 d/d)	160 Nm
Püskürtme tipi	Common-Rail
Turboşarj	Var

Silindir basıncı, birinci silindirin kızdırma bujisi yuvasına yerleştirilmiş Oprant OPTD 32288 GPA model hava soğutmalı basınç sensörü ile ölçülmüştür. Yakıt hattı basıncını ölçmek için birinci silindire ait enjektöre giden yakıt hattı üzerine Kistler 4067 C2000AO model basınç sensörü takılmıştır. Motorun krank pozisyonunu belirlemek için dakikada 360 puls üreten bir krank enkoder kullanılmıştır. National Instrumments 6343 model veri toplama kartı kullanılarak deney verileri kaydedilmiştir. Deneylerde kullanılan egzoz ölçüm sistemi bir bilgisayar, bir BEA 460 emisyon cihazı ve bir adet Bosch is ölçüm cihazından oluşmaktadır. Egzoz emisyon cihazının teknik özellikleri Tablo 4'te görülmektedir. Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 1'de verilmiştir. Deney motoru, Cusson-P8602 tipi deney düzeneği üzerine yerleştirilmiş maksimum gücü 150 kW ve maksimum devri 8000 d/d olan su soğutmalı elektrikli dinamometre ile yüklenmiştir. Deneylere başlamadan önce, soğutma suyu sıcaklığının 85-90 °C'ye kadar ulaşması beklenmiş, motor kararlı çalışır hale getirilmiş ve veri toplama işlemine daha sonra geçilmiştir. Deneyler üç kez tekrarlanmış ve ortalamaları alınarak değerlendirilmiştir. Bütün testler 1750 d/d sabit devirde, 50 Nm, 75 Nm ve 100 Nm motor yüklerinde gerçekleştirilmiştir.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada biyogaz-dizel çift yakıtlı motorun performans ve egzoz emisyonları incelenmiştir. Karşılaştırmalar aynı

yüklerde dizel yakıtla yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlarla yapılmıştır. Deneyler 1750 d/d sabit devirde ve 50 Nm, 75 Nm ve 100 Nm motor yüklerinde yapılmıştır.

#### 3.1. İndikatör Diyagramları (Indicator Diagrams)

Farklı yüklerde dizel ve biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmada elde edilen silindir basınçlarına bağlı olarak oluşturulan indikatör diyagramları Şekil 2'de görülmektedir. Maksimum silindir basınçları çift yakıtlı çalışmada 50 Nm, 75 Nm ve 100 Nm için sırasıyla 8,28 MPa, 10,34 MPa ve 13,53 MPa olmuştur. Dizel yakıtlı çalışmada ise maksimum basınçlar sırasıyla 6,56 MPa, 7,76 MPa ve 9,24 MPa çıkmıştır.

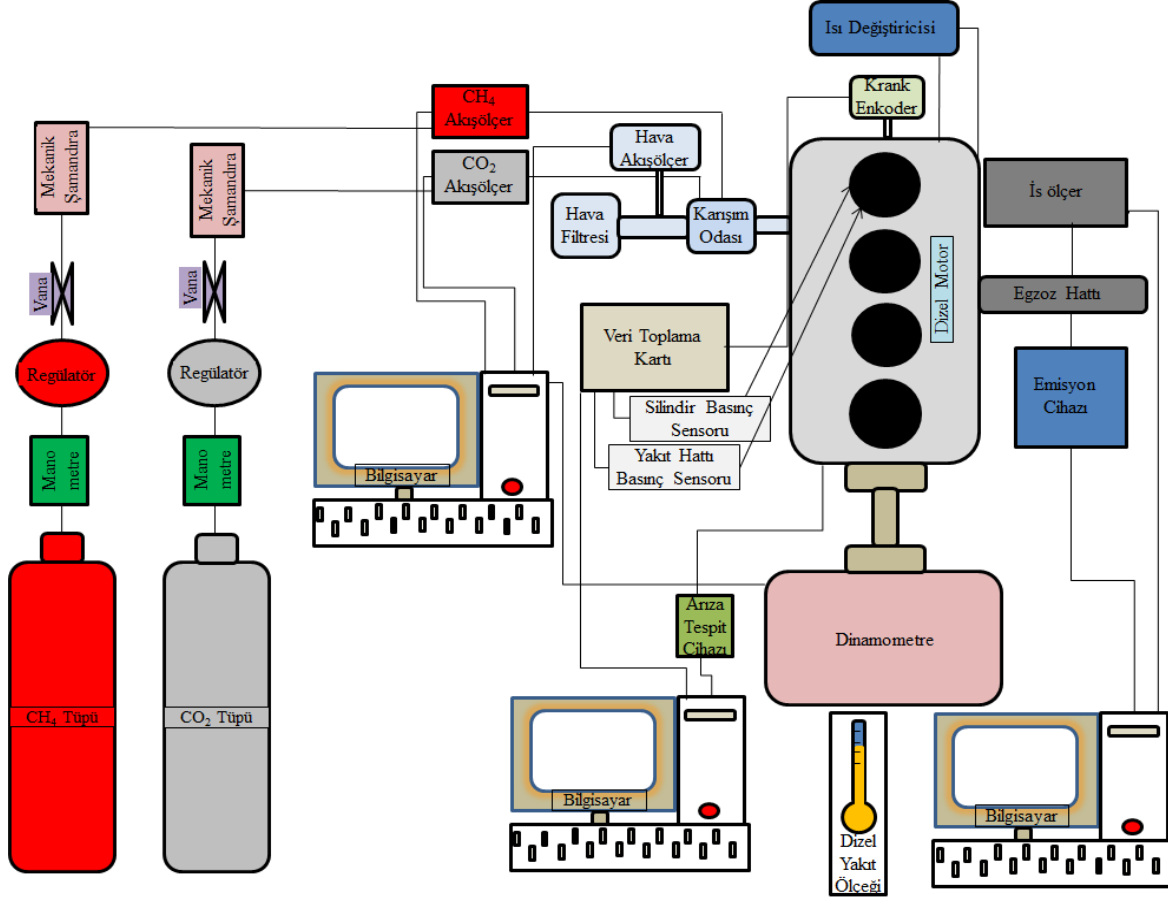
Çift yakıtlı çalışmada maksimum silindir basınçları elde edilmektedir [26]. Biyogaz hava karışımı emme zamanı süresince silindir içerisine dolmaktadır. Geçen süre zarfında silindir içerisinde homojen bir karışım oluşur. Sıkıştırma zamanının sonlarına doğru homojen biyogaz hava karışımının üzerine püskürtülen pilot dizel yakıt vasıtası ile yanma başlatılır. Çift yakıtlı çalışmada yanma erken ve hızlı başlamaktadır. Çift yakıtlı çalışmada ön karışimli yanmanın etkisiyle, yanma karakteristiği sabit basınç fazından sabit hacim fazına doğru kaydığından maksimum basınçlar yükselmektedir. Çift yakıtlı çalışmada ön karışimli yanmanın etkisiyle yanma hızları artmakta ve maksimum silindir basınçları üst ölü noktaya (ÜÖN) yaklaşmaktadır [22]. Yakıtın büyük miktarı ÜÖN'dan önce yanmaktadır [21]. Artan motor yüküne bağlı olarak silindir içerisine alınan yakıt miktarı arttığından silindir basınçlarında artış görülmektedir. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmada meydana gelen yüksek silindir içi basınçlar yanmanın sabit basınç fazından sabit hacim fazına kayması nedeniyle işe dönüştürülemez. Yanma sonucu oluşan maksimum basıncın ÜÖN'dan 10-15 KMA sonra oluşması beklenilmektedir [27]. Çift yakıtlı çalışmada maksimum basınçlar motor yükündeki artışa bağlı olarak ÜÖN'ya yaklaşır. Sıkıştırma oranının düşürülmesi ve püskürtme zamanlarının ayarlanması gibi yöntemler kullanılarak maksimum basınçların istenilen noktalarda oluşmaları sağlanabilir.

#### 3.2. Özgül Yakıt Tüketimi (Brake Specific Fuel Consumption)

Şekil 3'te dizel ve biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda yüke bağlı olarak elde edilen özgül yakıt tüketimi değişimleri görülmektedir. Çift yakıtlı çalışmada özgül yakıt tüketimleri 50 Nm, 75 Nm ve 100 Nm yüklerde sırasıyla 292,4 g/kWh, 256,87 g/kWh ve 258,94 g/kWh olmuştur. Dizel yakıtlı çalışmada ise özgül yakıt tüketimleri sırasıyla 252,31 g/kWh, 226,01 g/kWh ve 239,54 g/kWh bulunmuştur. Tüm yüklerde çift yakıtlı çalışmada meydana gelen özgül yakıt tüketimleri dizel yakıtlı çalışmalara göre daha yüksek çıkmaktadır. Çift yakıtlı çalışmada özgül yakıt tüketimlerinin artması nedenleri arasında biyogazın düşük dönüşüm verimliliğine, düşük silindir içi sıcaklıklara ve yanmanın yavaşlamasına bağlanabilir [28]. Yüksek yükte biyogazın dönüşüm verimliliği artış gösterse de dizel yakıtlı çalışma ile kıyaslandığında özgül yakıt tüketimi çift yakıtlı çalışmada yüksek çıkmaktadır.

**Tablo 1.** Egzoz emisyon cihazının özellikleri (The specifications of exhaust emission analyzer)

	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
Karbondioksit (CO <sub>2</sub> )	%0 – 18 vol.	%0,01 vol.
Hidrokarbon (HC)	0 – 9999 ppm	1 ppm
Oksijen (O <sub>2</sub> )	%0 – 22 vol.	%0,01 vol.
Azot oksit (NO <sub>x</sub> )	0 – 5000 ppm	1 ppm
Hava Fazlalık Katsayısı (HFK)	0,5 – 1,8	0,001
İs	0-10 m <sup>-1</sup>	0,01 m <sup>-1</sup>

**Şekil 1.** Deney düzeneğinin şematik görünümü (Schematic view of the engine test bed)

Biyogazın alt ısı değerinin düşük olması ve içeriğinde bulunan CO<sub>2</sub>'nin silindir dolgusunu seyrelterek yanmayı yavaşlatması çift yakıtlı çalışmada özgül yakıt tüketimini arttırmaktadır [11].

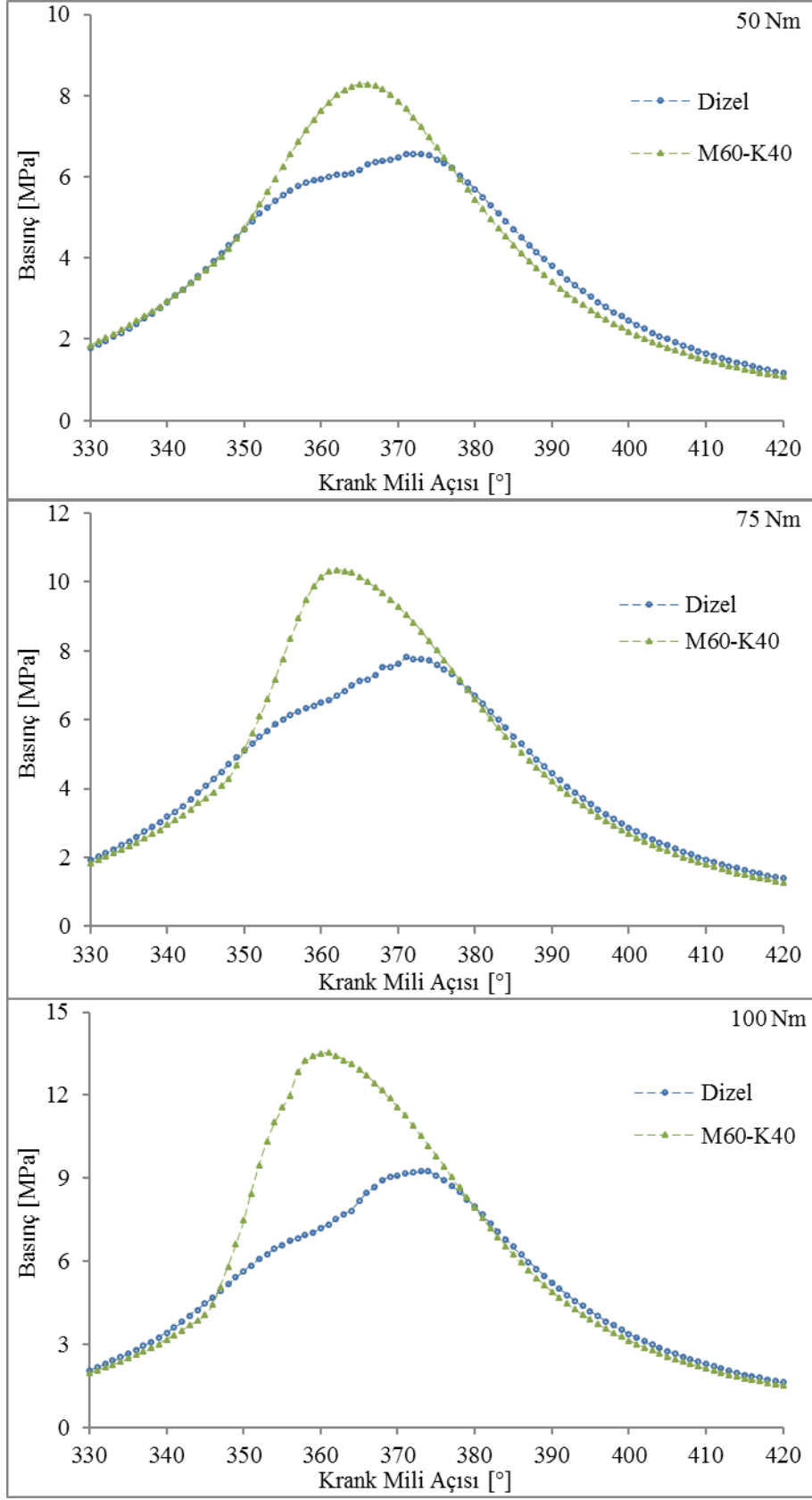
### 3.3. HC Emisyonları (HC Emissions)

HC emisyonlarının oluşumunda, fakir ya da zengin hava/yakıt karışımları, silindir cidarlarındaki alev sönmeye bölgeleri ve düşük yanma sıcaklıkları önemli rol oynamaktadırlar. Şekil 4'de HC emisyonlarının motor yüklerine bağlı olarak değişimleri görülmektedir. HC emisyonları dizel yakıtlı çalışmada 50 Nm, 75 Nm ve 100 Nm yükler için sırasıyla 0,25 g/kWh, 0,16 g/kWh ve 0,12 g/kWh olmuştur. Çift yakıtlı çalışmada ise HC emisyonları sırasıyla 1,53 g/kWh, 0,9 g/kWh ve 0,43 g/kWh olmaktadır.

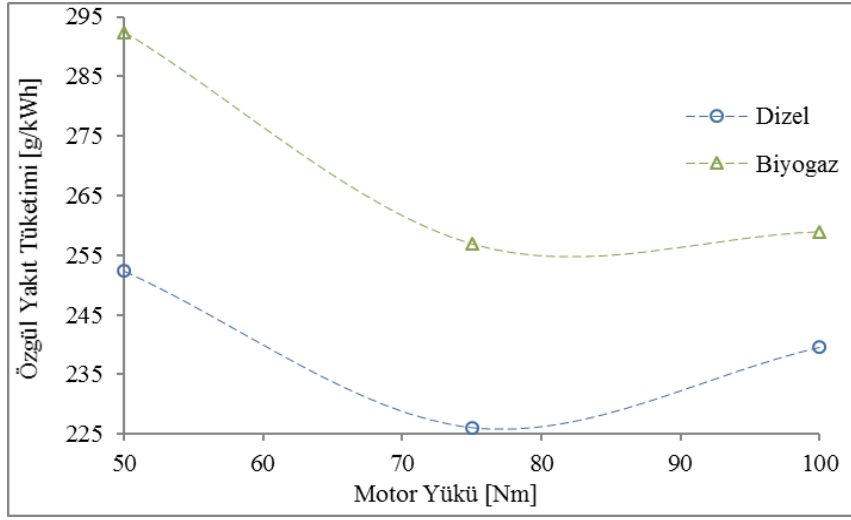
Düşük yüklerde silindir içi sıcaklıkların azalması ve biyogazın içerdiği CO<sub>2</sub> yanmayı kötüleştirip yavaşlatır [29]. Bu nedenle büyük miktarlarda CH<sub>4</sub> yanma olayına dahil olamaz ve egzozdan dışarı atılır. Yüksek yüklerde, dolgu sıcaklığının artması ve zengin biyogaz/hava karışımlarının oluşturulması yanmayı iyileştirir. Buna bağlı olarak HC emisyonlarında azalma meydana gelir [30].

### 3.4. NO<sub>x</sub> Emisyonları (NO<sub>x</sub> Emissions)

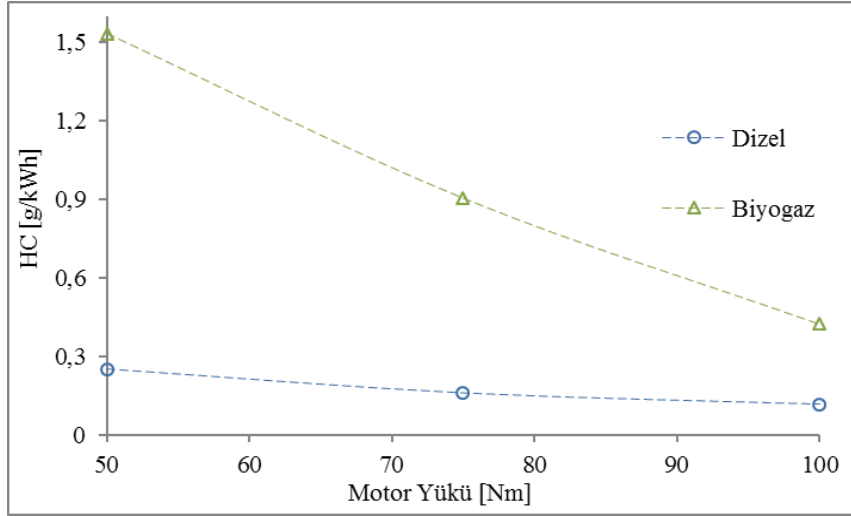
NO<sub>x</sub> emisyonları, yüksek silindir sıcaklıkları, oksijen miktarı ve oluşum reaksiyon için gerekli süre olmak üzere üç temel parametreye bağlıdır. Şekil 5'de motor yüküne bağlı olarak oluşan NO<sub>x</sub> emisyonları görülmektedir. Dizel yakıtlı çalışmada NO<sub>x</sub> emisyonları 50 Nm, 75 Nm ve 100 Nm motor yükleri için sırasıyla 3,4 g/kWh, 4,56 g/kWh ve 6,87 g/kWh olmuştur.



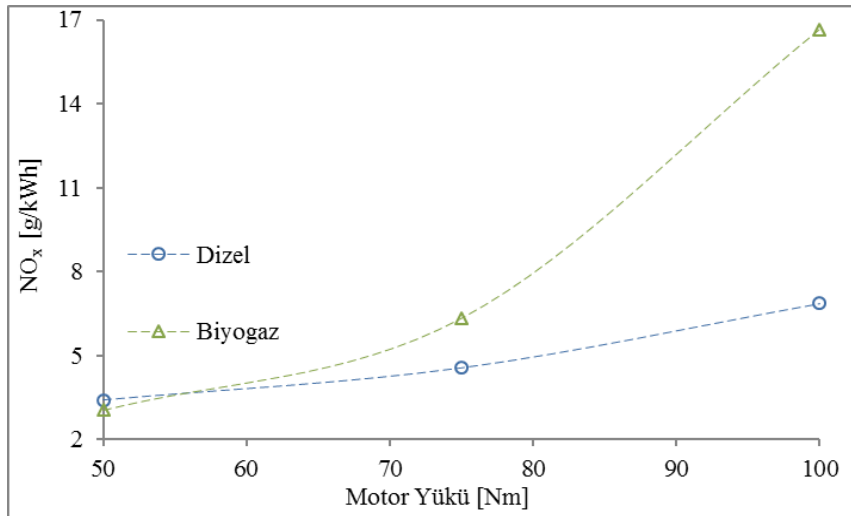
Şekil 2. Farklı yüklerde oluşan indikatör diyagramları (Indicator diagrams at different loads)



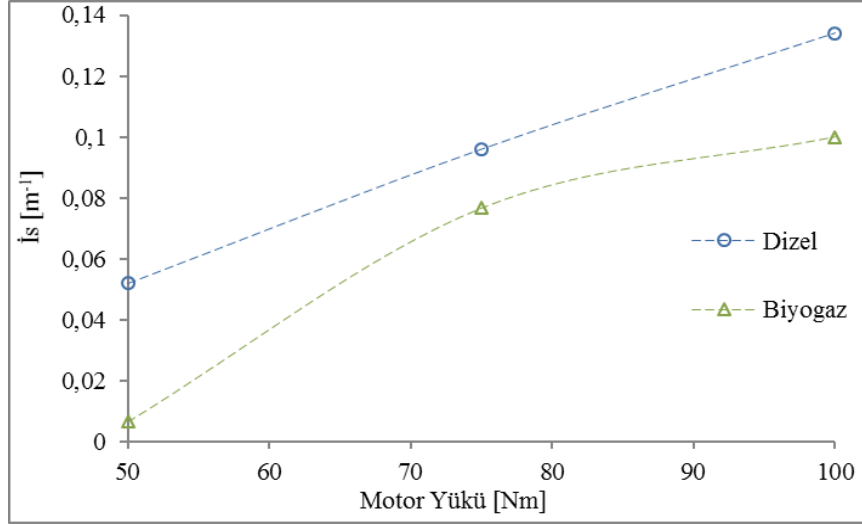
Şekil 3. Farklı yüklerde oluşan özgül yakıt tüketimleri (Brake specific fuel consumptions at different loads)



Şekil 4. Farklı yüklerde oluşan HC emisyonları (HC emissions at different loads)



Şekil 5. Farklı yüklerde oluşan NO<sub>x</sub> emisyonları (NO<sub>x</sub> emissions at different loads)



Şekil 6. Farklı yüklerde oluşan is emisyonları (Soot emissions at different loads)

Çift yakıtlı çalışmada ise NO<sub>x</sub> emisyonları 3,04 g/kWh, 6,33 g/kWh ve 16,65 g/kWh değerlerinde ölçülmüştür. Düşük yüklerde çift yakıtlı çalışmada elde edilen NO<sub>x</sub> emisyonları dizel yakıtlı çalışmaya göre düşük çıkmıştır.

Düşük yüklerde çift yakıtlı çalışmada, ön karışımli yanma periyodunda yanan gaz yakıt miktarı az olduğundan silindir içi sıcaklıklar düşük olmaktadır. Bu durum NO<sub>x</sub> emisyonlarını düşürmektedir [28]. Bununla birlikte artan yüke bağlı olarak çift yakıtlı çalışmada meydana gelen NO<sub>x</sub> emisyonları dizel yakıtlı çalışmaya göre meydana gelen NO<sub>x</sub> emisyonlarının üzerine çıkmaktadır. Çünkü çift yakıtlı çalışmada ön karışımli yanma fazında daha fazla gaz yakıt aniden yanmaktadır. Bu durumda emme zamanında silindir içerisine alınan dolgunun sıcaklığı artmakta ve silindir içerisinde meydana gelen yüksek yanma sıcaklıkları NO<sub>x</sub> emisyonlarının artmasına neden olmaktadır [18].

### 3.5. İs Emisyonları (Soot Emissions)

Daha çok dizel motorlarda görülen is emisyonunun temel sebebi, hidrojenin karbona göre daha aktif olmasından ötürü, karbonun yanması için oksijen ve yeterli süre bulunmamasıdır. Şekil 6'da motor yüküne bağlı olarak oluşan is emisyonlarının değişimi görülmektedir. İs emisyonları çift yakıtlı çalışmada 50 Nm, 75 Nm ve 100 Nm yükler için sırasıyla 0,006 m<sup>-1</sup>, 0,076 m<sup>-1</sup> ve 0,1 m<sup>-1</sup> çıkmıştır. Dizel yakıtlı çalışmada ise is emisyonları sırasıyla 0,052 m<sup>-1</sup>, 0,096 m<sup>-1</sup> ve 0,134 m<sup>-1</sup> olmuştur. Çift yakıtlı çalışma is emisyonlarının azaltılmasında kullanılabilir önemli bir tekniktir [16]. Biyogazın temel enerji kaynağı olan metanın is emisyonu üretme meylli çok azdır [18]. Motor yükünün artırılmasına bağlı olarak her iki çalışma şartında da silindir içerisine gönderilen dizel yakıt miktarı fazlalaşır. Yakıtın hidrojen karbon oranının 2'nin altında kalması durumunda is emisyonu üretme meylli artar. Bununla birlikte dizel yakıtı aromatik bileşenler ihtiva etmektedir. Motor yükünün artırılması ile tüketilen dizel yakıt miktarına bağlı olarak üretilen is emisyonları artmaktadır [31].

## 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada biyogaz-dizel çift yakıtlı motorun silindir basınçları, özgül yakıt tüketimleri ve egzoz emisyonları incelenmiştir. Ana yakıt olarak hacimsel olarak %60 CH<sub>4</sub> ve %40 CO<sub>2</sub>'den oluşan biyogaz kullanılırken pilot yakıt olarak dizel yakıtı kullanılmıştır. Elde edilen deney sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuş ve yorumlanmıştır.

Çift yakıtlı çalışmada yanma olayının sabit basınç fazından sabit hacim fazına geçmesiyle silindir basınçları yüksek çıkmaktadır. Bununla birlikte çift yakıtlı çalışmada elde edilen yüksek silindir basınçlarının ÜÖN'ya yakın elde edilmesinden ötürü dönüşüm verimliliği düşük olmaktadır. Dizel yakıtlı çalışmaya kıyasla çift yakıtlı çalışmada özgül yakıt tüketimleri biyogazın düşük enerji ihtiva etmesinden ötürü yüksek olmaktadır. Düşük yüklerde NO<sub>x</sub> emisyonları çift yakıtlı çalışmada azalmaktadır. Bununla birlikte artan yüke bağlı olarak yükselen silindir basınçları, silindir içi sıcaklıkları etkilemekte ve NO<sub>x</sub> emisyonlarını artırmaktadır. Çift yakıtlı çalışmada tüm yüklerde dizel yakıtlı çalışmaya göre is emisyonunda önemli azalma görülmektedir. İs emisyonunun azaltılmasında çift yakıt kullanılması önemli bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Çalışma sonuçları göstermiştir ki, çift yakıtlı bir dizel motor, ana yakıt olarak biyogaz kullanılarak çalıştırılabilmektedir. Bununla birlikte biyogazın daha verimli ve çevreci olarak kullanılabilmesi için sıkıştırma oranının düşürülmesi, püskürtme zamanlarının ayarlanması ve farklı yağlama yağlarının kullanılması gibi değişikliklere gidilmelidir.

## 5. SİMGELER (SYMBOLS)

CH <sub>4</sub>	: Metan
CNG	: Sıkıştırılmış doğal gaz
CO	: Karbon monoksit
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
H <sub>2</sub>	: Hidrojen
H <sub>2</sub> S	: Hidrojen sülfür
İYM	: İçten yanmalı motor

LPG : Sıvılaştırılmış petrol gazı  
 NO<sub>x</sub> : azot oksit  
 N<sub>2</sub> : Azot  
 O<sub>2</sub> : Oksijen  
 SO : Sıkıştırma oranı  
 Ü.Ö.N : Üst ölü nokta

### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma FEN-C-DRP-071211-0314 numaralı proje ile Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Bora B.J., Saha U.K., Chatterjee S., Veer, V., Effect of compression ratio on performance, combustion and emission characteristics of a dual fuel diesel engine run on raw biogas, *Energy Conversion and Management*, 87, 1000-1009, 2014.
- Sezer I., Therotical investigation of the effects of diesel fuel, biodiesel fuel and their blends on internal combustion engines, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (4), 799-812, 2016.
- Goto S., Furutani H., Komori M., Yagi M., Lpg-Diesel engine, *International Journal of Vehicle Design*, 15 (3-5), 279-290, 1994.
- Weide J.V.D., Seppen, J.J., Experiences with CNG and LPG operated heavy duty vehicles with emphasis on US HD diesel emission standarts, S.A.E. Technical Paper Series, No 881657, 1988.
- Yılmaz I.T., Demir A., Gumus, M., Effects of hydrogen enrichment on combustion characteristics of a CI engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (15), 10536-10546, 2017.
- Yılmaz, I.T., Gumus, M., Investigation of the effect of biogas on combustion and emissions of TBC diesel engine, *Fuel*, 188, 69-78, 2017.
- Verhelst S., Recent progress in the use of hydrogen as a fuel for internal combustion engines, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39 (2), 1071-1085, 2014.
- Aslam M.U., Masjuki H.H., Kalam M.A., Abdesselam, H., Mahlia, T.M.I., Amalina, M.A., An experimental investigation of CNG as an alternative fuel for a retrofitted gasoline vehicle, *Fuel*, 85, 5-6, 717-724, 2006.
- Yılmaz I.T., Effect of using dual fuel (biogas-diesel) on the performance and emissions of a low heat rejection diesel engine, PhD, Marmara University, Institute of Pure and Applied Sciences, Istanbul, 2015.
- Ramadhass A.S., Jayaraj S., Muraleedharan, C., Dual fuel mode operation in diesel engines using renewable fuels: Rubber seed oil and coir-pith producer gas, *Renewable Energy*, 33 (9), 2077-2083 2008.
- Barik D., Murugan S., Investigation on combustion performance and emission characteristics of a DI (direct injection) diesel engine fueled with biogas-diesel in dual fuel mode, *Energy*, 72, 760-771, 2014.
- Jung C., Park J., Song S., Performance and NO<sub>x</sub> emissions of a biogas-fueled turbocharged internal combustion engine, *Energy*, 86, 186-195, 2015.
- Yoon S.H., Lee C.S., Effect of biofuels combustion on the nanoparticle and emission characteristics of a common-rail DI diesel engine, *Fuel*, 90 (10), 3071-3077 2011.
- Park C., Park S., Lee Y., Kim C., Lee S., Moriyoshi, Y., Performance and emission characteristics of a SI engine fueled by low calorific biogas blended with hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36 (16), 10080-10088, 2011.
- Erşan K., Biogazın içten yanmalı motorlarda kullanımı ve motor performansına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 1987.
- Barik D., Murugan S., Effects of diethyl ether (DEE) injection on combustion performance and emission characteristics of Karanja methyl ester (KME)-biogas fueled dual fuel diesel engine, *Fuel*, 164, 286-296, 2016.
- Huang J.D., Crookes R.J., Assessment of simulated biogas as a fuel for the spark ignition engine, *Fuel*, 77 (15), 1793-1801, 1998.
- Lounici M.S., Loubar K., Tarabet L., Balistrrou M., Niculescu D.C., Tazerout, M., Towards improvement of natural gas-diesel dual fuel mode: An experimental investigation on performance and exhaust emissions, *Energy*, 64, 200-211, 2014.
- Pirro D.M., Lubrication fundamentals: Exxonmobil, CRC Press, 9781498752909, Boca Raton, 2016.
- Crookes, R.J., Comparative bio-fuel performance in internal combustion engines, *Biomass & Bioenergy*, 30 (5), 461-468 2006.
- Duc P.M., Wattanavichien K., Study on biogas premixed charge diesel dual fuelled engine, *Energy Conversion and Management*, 48 (8), 2286-2308, 2007.
- Henham A., Makkar M.K., Combustion of simulated biogas in a dual-fuel diesel engine, *Energy Conversion and Management*, 39 (16-18), 2001-2009 1998.
- Jiang C.Q., Liu T.W., Zhong J.L., A Study on Compressed Biogas and Its Application to the Compression Ignition Dual-Fuel Engine, *Biomass*, 20 (1-2), 53-59 1989.
- Porpatham E., Ramesh A., Nagalingam B., Investigation on the effect of concentration of methane in biogas when used as a fuel for a spark ignition engine, *Fuel*, 87 (8-9), 1651-1659 2008.
- Porpatham E., Ramesh A., Nagalingam B., Effect of hydrogen addition on the performance of a biogas fuelled spark ignition engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32 (12), 2057-2065 2007.
- Singh S., Krishnan S.R., Srinivasan K.K., Midkiff K.C., Bell S.R., Effect of pilot injection timing, pilot quantity and intake charge conditions on performance and emissions for an advanced low-pilot-ignited natural gas engine, *International Journal of Engine Research*, 5 (4), 329-348, 2004.

27. Safgönül B., Ergeneman M., Arslan H.E., Soruşbay C., İçten yanmalı motorlar, Birsen Yayınevi, 9789755111193, İstanbul, 2013.
28. Rao B.N., Prem Kumar B.S., Kumar Reddy, K.V., "Effect of CNG flow rate on the performance and emissions of a Mullite-coated diesel engine under dual-fuel mode", International Journal of Ambient Energy, 37 (6), 589-596, 2016.
29. Kusaka J., Okamoto T., Daisho Y., Kihara R., Saito T., Combustion and exhaust gas emission characteristics of a diesel engine dual-fueled with natural gas, Jsaе Review, 21 (4), 489-496 2000.
30. Barik D., Murugan S., Experimental investigation on the behavior of a DI diesel engine fueled with raw biogas–diesel dual fuel at different injection timing, Journal of the Energy Institute, 89 (3), 373-388, 2016.
31. Aydın H., Combined effects of thermal barrier coating and blending with diesel fuel on usability of vegetable oils in diesel engines, Applied Thermal Engineering, 51 (1-2), 623-629, 2013.