



## MOTOR YÜKÜNE BAĞLI OLARAK BİYODİZEL YAKITLI BİR DİZEL MOTORUN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

İbrahim YILDIZ<sup>1</sup>, Hakan ÇALIŞKAN<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Uşak Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Uşak, Türkiye

<sup>2</sup> Uşak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Uşak, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Biyodizel, Dizel Motor, Motor Egzoz Emisyonu, Enerji Analizi, Ekserji Analizi.</i>	Bu çalışmada, %100 biyodizel yakıtlı dört silindirli bir dizel motor 100 Nm ve tam yükte (294 Nm) deneysel olarak incelenmiştir. Sisteme enerji ve ekserji analizleri uygulanarak sonuçlar termodinamik açıdan detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Havanın, yakıtın, egzoz gazlarının ve net gücün enerji ve ekserji değerlerinin motor tork artışı ile birlikte arttığı görülmüştür. Tork artışı ile motorun enerji ve ekserji kayıplarının da artarak sistemi olumsuz etkilediği değerlendirilmiştir. 294 Nm'de çalışan motorda biyodizel yakıtının enerji değeri 124,723 kW, ekserji değeri ise 134,09 kW olarak hesaplanmıştır. Dizel motorun 294 Nm yükte enerji kaybı 94,247 kW olarak bulunurken, ekserji kaybı 15,750 kW olarak belirlenmiştir. Motor torkunun artmasıyla sistemin verimi artmıştır ve 294 Nm yükte motorun enerji verimi %33,397 iken, ekserji verimi ise %37,39 olarak hesaplanmıştır.

## ASSESSMENT OF THE ENERGY AND EXERGY ANALYSES RESULTS OF A BIODIESEL FUELED ENGINE DEPENDING ON THE ENGINE LOAD

Keywords	Abstract
<i>Biodiesel, Diesel Engine, Engine Exhaust Emission, Energy Analysis, Exergy Analysis.</i>	In this study, a four-cylinder diesel engine with %100 biodiesel fuel is investigated at 100Nm and full load. The results are assessed in detail with thermodynamic aspect by applying energy and exergy analyses to the system. It is seen that the energy and exergy rates of air, fuel, exhaust gases and net power increases with engine torque. It is also assessed that the increase in the energy and exergy losses of the engine with increase in torque affects the system negatively. At full load, the biodiesel fuel energy rate is calculated as 124,723, while its exergy rate is 134,09 kW. The energy loss rate of the diesel engine at full load is found as 94,247 kW, its exergy loss is determined as 15,750 kW. The system efficiency is increased with the engine torque, and energy efficiency of the engine at full load is 33,397% while exergy efficiency is calculated as 37,39%.

### Alıntı / Cite

Yıldız, İ., Çalışkan, H., (2020). Motor Yüküne Bağlı Olarak Biyodizel Yakıtlı Bir Dizel Motorun Enerji ve Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(3), 833-843.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

İ. Yıldız, 0000-0002-1103-2951

H. Çalışkan, 0000-0002-6571-0965

### Makale Süreci / Article Process

**Başvuru Tarihi / Submission Date** 30.07.2020

**Revizyon Tarihi / Revision Date** 25.08.2020

**Kabul Tarihi / Accepted Date** 10.09.2020

**Yayın Tarihi / Published Date** 24.09.2020

### 1. Giriş (Introduction)

Küresel çevresel durumu irdelendiğinde, trafikte bulunan araçların sebep olduğu emisyonların %30'unu azot oksitler (NO<sub>x</sub>), %10'unu partikül maddeler (PM), %54'ünü karbon monoksit (CO), %14'ünü karbon dioksit (CO<sub>2</sub>) ve %47'sini metan olmayan hidrokarbonlar (NMHC) oluşturmaktadır. Emisyonların insan sağlığına doğrudan ve dolaylı olarak etkileri vardır. Doğrudan etkileri arasında astım, yüksek tansiyon, diyabet gibi birçok sağlık

\* İlgili yazar / Corresponding author: hakan.caliskan@usak.edu.tr, +90-276-221-2121

sorunları bulunmaktadır. Dolaylı olarak da sera gazlarının ve küresel ısınmanın artmasıyla insan yaşamı ve sağlığını olumsuz etkilemektedir (Requia vd., 2018; Sokhi, 2011).

Ulaşım sektöründe tüketilen enerji kaynaklarının en başında günümüzde de hala kullanılmakta olan fosil yakıtlar gelmektedir. Fosil yakıtlar yenilenemez enerji kaynaklarıdır ve içten yanmalı motorların emisyonlarının kontrol edilmesindeki zorluklardan dolayı da, alternatif yakıtların kullanımı önem kazanmaktadır. Bu bağlamda alternatif yakıtlardan olan biyoyakıtların (biyodizel) kullanımı motor egzoz emisyon değerlerinin kontrolü ve daha yaşanabilir bir çevre adına önemli bir seçenektir (Mirbagheri vd., 2020; Zhou vd., 2019; Reitz vd., 2015).

İçten yanmalı dizel motorlar, otomotiv sektörü içinde önemli bir yere sahiptir. Çevre açısından incelendiğinde dizel motorlar, partikül madde, azot oksitler, karbon dioksitler, hidrokarbonlar, kükürt oksitler vb. gibi zararlı egzoz emisyonlarına sebep olan fosil yakıtları yakarak çevreyi kirletir. Fosil yakıtlara alternatif olarak kullanılmakta olan biyodizel yakıtının oksijen oranı bazı fosil yakıtlardan (örneğin; dizel yakıtı) daha yüksek olabilmektedir. Bu durum dizel motorundaki yakıtın yanma sürecini de olumlu etkilemektedir (Çalışkan ve Mori, 2017; Aliyy vd., 2011). Ayrıca, yanmamış hidrokarbon (HC) ve CO gibi egzoz gazları açısından daha düşük egzoz emisyonlarına sahiptirler. Dizel motorların duman yoğunluğu, PM ve NO<sub>x</sub> emisyonları yüksektir. Bu durum teknik açıdan yakıt tercihi konusunda da araştırmacıları yeni çalışmalara yönlendirmektedir (Çalışkan ve Mori, 2017b; Chandrasekaran vd., 2016; Venkanna ve Venkataramana Reddy, 2012).

Araç teknolojisinin geleceği her geçen gün ortaya çıkan yeni gelişmelerle değişmekle birlikte, dizel motorların yakın gelecekte de kullanımda olmaya devam edeceği ön görülebilir bir durumdur. Biyodizel yakıtların kullanılması durumu, egzoz emisyonlarının azaltılması ve daha iyi yakıt ekonomisi açısından bir avantaj olabileceğinden, detaylı olarak analiz edilmesi gerekmektedir. Motorların özelliklerini birçok yönden analiz edebilmek için termodinamik analiz yöntemi kullanılmaktadır. Termodinamiğin birinci yasasını içeren enerji analizinin yanı sıra, ikinci yasayı içeren ekserji analizi de içten yanmalı motorların daha detaylı incelenmesi için uygulanır (Çalışkan ve Mori, 2017b; Çalışkan vd., 2010a; Çalışkan vd., 2010b).

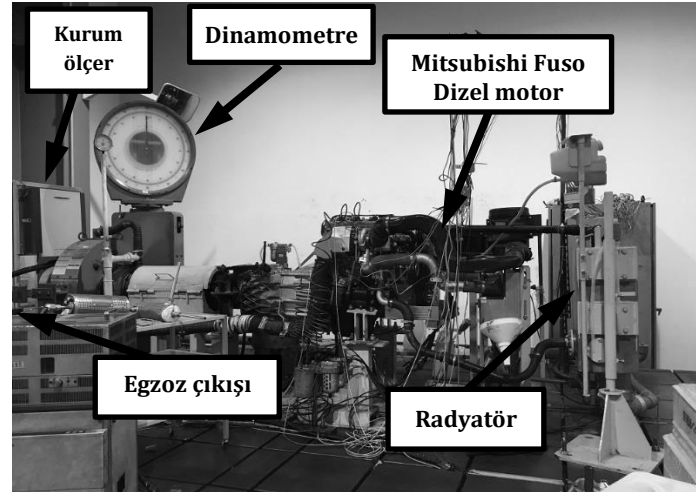
Jannatkah vd. (2020), yakıt olarak farklı biyodizel yakıtının kullanıldığı bir dizel motoruna ORC-ERC sistemi dâhilinde enerji ve ekserji analizleri uygulamıştır. Biyodizel yakıtın kullanıldığı bu çalışmada, motorun sistem performansını enerjetik ve ekserjetik açıdan değerlendirmek için farklı motor yüklerinde ve devir sayılarında testler yapılmıştır. Motor maksimum yükte yüklendiğinde ve 2400 dev/dak'da iken B30 kanola yağı içerikli biyodizel için maksimum enerji verimi elde edilmiştir. Maksimum ekserji verimi ise %53,95 içerikli kanola dizel yakıtı için %100 motor yükünde ve 1700 dev/dak'da bulunmuştur. Başka bir çalışmada (Das vd., 2020), tek silindirli bir dizel motorunun enerji, ekserji ve emisyon analizi pirolitik atık plastik yağ dizel karışımı kullanılarak değerlendirilmiştir. CO emisyonu oranı, farklı bir yakıt kullanıldığında %25 yükte %0,08 olarak hesaplanırken, dizel yakıtı kullanıldığında ve motor %100 motor yükü yüklendiğinde %0,058'e düşmüştür. HC emisyonları incelendiğinde, yüksek torkta daha yüksek miktarda yakıt girişi olacağından yanmamış hidrokarbon oranında artış görülmüştür. Motor %100 yük ile çalıştırıldığında NO<sub>x</sub> emisyonlarında yaklaşık %400 gibi ciddi bir artış elde edilmiştir. Ekici ve Şöhret (2020), uçaklardan kaynaklı egzoz emisyonlarının çevresel ve ekonomik açıdan incelenmesi hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, çevresel etkiler değerlendirilirken karbon ayak izi metodu uygulanmıştır. Karbon ayak izi sonuçlarına göre, emisyonların çevreye olan etkisi uçak kalkış sayısının maksimum olduğu ayda zirve değere ulaşmıştır. Toplam karbon ayak izi içeriğinde, NO<sub>x</sub> oranı %61,82, CO oranı %0,07, CO<sub>2</sub> oranı %37,89 ve HC oranı %0,20 olarak hesaplanmıştır. Liu vd. (2020), bir turboşarjlı dizel motorda enerji ve ekserji değerlendirmeleri yapmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, düşük motor yükünde daha düşük verimlilik hesaplanırken motor torkunun artmasıyla birlikte verimlilikte de artış görülmüştür. Egzoz enerji ve ekserji değerleri dikkate alındığında, motor devri ve yükü ile doğru orantılı olarak değişim elde edilmiştir. Egzoz enerjisinde yüzdesel olarak yaklaşık %28-%42 gibi bir değişim bulunurken, egzoz ekserjisindeki değişim yaklaşık olarak %6-%17 arasındadır. Enerji ve ekserji kayıplarındaki değişim, motor devri ve yüküyle ters orantılı olarak değişmiştir.

Bu çalışmada, %100 biyodizel yakıtlı 4 silindirli bir dizel motoru test edilmiş, egzoz emisyon değerleri incelenmiş, 100 Nm ve tam yükte (294 Nm) egzoz gazlarının (NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, HC) emisyon değerlerini karşılaştırılmış, ve motora enerji ve ekserji analizleri uygulanarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Mevcut çalışmanın enerji ve ekserji esaslı analizler sonucunda biyodizel yakıtı kullanılan dizel motorunun motor yüküne bağlı olarak egzoz emisyonlarındaki değişiminin değerlendirilmesiyle gelecek çalışmalar adına literatüre katkı sağlayacağı yazarlar tarafından öngörülmektedir.

## 2. Sistem Açıklaması (System Description)

Sistemin temelinde %100 biyodizel yakıtıyla çalışan bir dizel motordur. Bu çalışmada kullanılan Common Rail Enjeksiyon Sistemi (CRS) içeren 4 silindirli, 3L, turbo şarjlı, ek soğutuculu (radyatörlü) Mitsubishi Fuso dizel

motorunun maksimum gücü 96 kW (130PS)/3200 dev/dak (devir/dakika) maksimum torku ise 294 Nm/ 1800 dev/dak'dır. Egzoz gazları ile ilgili veriler egzoz ölçüm cihazları kullanılarak toplanmıştır. Mevcut çalışmada yakıt olarak, atık yemek yağlarından elde edilmiş %100 biyodizel yakıtı kullanılmıştır. Sistemin genel görünüşü Şekil 1'de gösterilmiştir. Biyodizel yakıtının özellikleri ise Tablo 1'de verilmiştir (Yıldız, 2018).



Şekil 1. Dizel motor test sisteminin genel görünüşü (General view of diesel engine test system)

Tablo 1. Biyodizel yakıtının özellikleri (Specification of the biodiesel fuel) (Yıldız, 2018)

Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	882
Kinematik viskozite (mm <sup>2</sup> /s)	6,270
Parlama noktası (°C)	180
Asit değeri (mgKOH/g)	0,1495
Bulutlanma noktası (°C)	6
Akma derecesi (°C)	-7

Motorun egzoz gazı ölçümünde; HC, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> gazlarını ölçen Horiba Mexa-9100F egzoz emisyon analizörü, egzozdaki kurum içeriğini değerlendirmek için AVL 415S model filtre tipi kurum ölçer (smoke meter), partikül madde (PM) ve HC emisyonlarını ölçmek için Horiba alev iyonizasyon analizörü, egzoz emisyonundaki nano-partiküllerin boyutunu ve sayısını ölçmek için TSI Model 3938 Tarama Hareketliliği Parçacık Boyutlandırıcı (SMPS) ekipmanları kullanılmıştır.

Motorun soğutma suyu sıcaklığı 80°C'de sabitlenerek ve motorun devir sayısı 1800 dev/dak'ya ayarlanarak test başlatılmıştır. Dizel motor, 100 Nm ve 294 Nm motor torkuyla yüklenerek beş defa deneysel olarak test edilmiştir. Ardından sisteme enerji ve ekserji analizleri uygulanmıştır (Çalışkan ve Mori, 2017b). Sistemden elde edilen veriler Tablo 2'de verilmiştir. Ayrıca, deneysel test sonuçları Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 2. Sistem verileri (Data of the system) (Yıldız, 2018)

Tork	$\dot{m}_{fuel}$ (kg/s)	$\dot{m}_{air}$ (kg/s)	$\dot{m}_{CO}$ (kg/s)	$\dot{m}_{CO_2}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NO_x}$ (kg/s)	$\dot{m}_{HC}$ (kg/s)	$P_{exh}$ (bar)	$T_{air,in}$ (°C)	$T_{exh}$ (°C)
100 Nm	1,415·10 <sup>-3</sup>	32,793·10 <sup>-3</sup>	3,5285·10 <sup>-6</sup>	4452,0832·10 <sup>-6</sup>	16,3697·10 <sup>-6</sup>	0,3268·10 <sup>-6</sup>	27,993·10 <sup>-3</sup>	24,90	294,20
294 Nm	3,312·10 <sup>-3</sup>	63,981·10 <sup>-3</sup>	2,2695·10 <sup>-6</sup>	10432,3911·10 <sup>-6</sup>	86,4713·10 <sup>-6</sup>	0,2281·10 <sup>-6</sup>	66,650·10 <sup>-3</sup>	25,60	364,80

Tablo 3. Deneysel test sonuçları (The experimental test results) (Yıldız, 2018)

Tork	Alt Isıl Değer (kJ/kg)	Egzoz emisyonu (g/kWh)				Kurum miktarı (mg/m <sup>3</sup> )
		CO	HC	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	
100 Nm	37655,88	0,6862	0,0635	3,1833	865,7768	0,880
294 Nm	37655,88	0,1629	0,0164	6,2058	748,7056	0,270

### 3. Analiz (Analysis)

#### 3.1. Enerji Analizi (Energy Analysis)

Sistemin enerji denge denklemi aşağıdaki gibidir (Caliskan ve Mori, 2017a);

$$\sum \dot{E}n_{in} = \sum \dot{E}n_{out} \quad (1)$$

Bu formülde  $\sum \dot{E}n_{in}$  sistemin toplam enerji girdisini ve  $\sum \dot{E}n_{out}$  sistemin toplam enerji çıktısını ifade etmektedir. Enerji denge denklemi sisteme giren ve çıkan parametreler ele alındığında (Caliskan ve Mori, 2017a),

$$\dot{E}n_{air} + \dot{E}n_{fuel} = \dot{E}n_W + \dot{E}n_{exh} + \dot{E}n_{loss} \quad (2)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denge denkleminde,  $\dot{E}n_{air}$  havanın enerjisini,  $\dot{E}n_{fuel}$  yakıtın enerjisini,  $\dot{E}n_W$  üretilen net güç,  $\dot{E}n_{exh}$  egzoz enerjisini ve  $\dot{E}n_{loss}$  sistemin enerji kaybını ifade etmektedir.

Havanın enerjisi ( $\dot{E}n_{air}$ ) aşağıdaki gibi hesaplanır (Caliskan ve Mori, 2017b).

$$\dot{E}n_{air} = \dot{m}_{air} h_{air} = \rho_{air} \dot{V}_{air} h_{air} \quad (3)$$

Bu denklemde; kütle akışı  $\dot{m}$  ile (kg/s), entalpi  $h$  ile (kJ/kg), yoğunluk  $\rho$  ile (g/L), hacimsel debi  $\dot{V}$  ile (m<sup>3</sup>/s) gösterilmiştir. *air* alt indisi, bu değerlerin hava için olduğunu belirtmektedir. Havanın yoğunluğu yaklaşık olarak 1,17 g/L'dir (Çalışkan ve Mori, 2017b).

Yakıtın enerji değeri ( $\dot{E}n_{fuel}$ ), yakıtın kütleli debisi ( $\dot{m}_{fuel}$ ) ile alt ısıl değerinin ( $H_u$ ) çarpımına eşittir (Caliskan ve Mori, 2017b).

$$\dot{E}n_{fuel} = \dot{m}_{fuel} H_u \quad (4)$$

Yakıtın alt ısıl değeri ( $H_u$ ) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$H_u = \frac{H_{u,density} + H_{u,viscosity}}{2} \quad (5)$$

$H_{u,density}$  ve  $H_{u,viscosity}$  değerleri (kJ/kg) yakıtın yoğunluğu ( $\rho_{fuel}$ ) ve kinematik viskozitesi ( $\mu_{fuel}$ ) kullanılarak aşağıdaki denklemlerden bulunur (Tesfa vd., 2013).

$$H_{u,density} = [(-0.167)\rho_{fuel} + 184.95]10^3 \quad (6)$$

$$H_{u,viscosity} = [(-12.88)\ln(\mu_{fuel}) + 61.3]10^3 \quad (7)$$

Sistemin ürettiği net güç ( $\dot{E}n_W$ ) aşağıdaki gibi hesaplanabilir. Burada,  $\omega$  açısal hızı ve  $T$  motor torkunu ifade etmektedir. Motorun devir sayısı "1800 dev/dak" olarak alınmıştır (Caliskan ve Mori, 2017a).

$$\dot{E}n_W = \omega T \quad (8)$$

Egzoz enerjisi ( $\dot{E}n_{exh}$ ) aşağıdaki gibi, her bir egzoz gazı bileşeninin kütleli debisi ( $\dot{m}$ ) ve entalpisi ( $h$ ) yardımıyla hesaplanır (Caliskan ve Mori, 2017a).

$$\dot{E}n_{exh} = \dot{m}_{CO}h_{CO} + \dot{m}_{NO_x}h_{NO_x} + \dot{m}_{CO_2}h_{CO_2} + \dot{m}_{HC}h_{HC} \quad (9)$$

Sistemin enerji kayıpları, enerji dengesi dikkate alınarak şu şekilde hesaplanır (Caliskan ve Mori, 2017b):

$$\dot{E}n_{loss} = \dot{E}n_{air} + \dot{E}n_{fuel} - \dot{E}n_W - \dot{E}n_{exh} \quad (10)$$

Sistemin enerji verimliliği ( $\eta$ ) ise sistemin net güç çıktısının yakıt enerjisine oranı ile elde edilir (Caliskan ve Mori, 2017a).

$$\eta = \left( \frac{\dot{E}n_W}{\dot{E}n_{fuel}} \right) 100 \quad (11)$$

### 3.2. Ekserji Analizi (Exergy Analysis)

Ekserji denge denklemi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\sum \dot{E}x_{in} = \sum \dot{E}x_{out} + \dot{E}x_{dest} \quad (12)$$

Denge denklemi sistem girdi ve çıktıları esas alınarak açık şekilde yazılırsa aşağıdaki ifade elde edilir (Caliskan ve Mori, 2017a).

$$\dot{E}x_{air} + \dot{E}x_{fuel} = \dot{E}x_W + \dot{E}x_{exh} + \dot{E}x_{loss} + \dot{E}x_{dest} \quad (13)$$

Havanın ekserjisi aşağıdaki gibi hesaplanır (Çalışkan ve Mori, 2017a).

$$\dot{E}x_{air} = \dot{m}_{air} c_{p,air,in} \left[ (T_{air,in} - T_0) - T_0 \ln \left( \frac{T_{air,in}}{T_0} \right) \right] \quad (12)$$

Burada,  $C_{p,air,in}$  sisteme giren havanın özgül ısı kapasitesini,  $T_{air,in}$  giren havanın sıcaklığını,  $T_0$  ortam sıcaklığını (referans-ölü durum sıcaklığını) belirtmektedir (21°C).

Yakıtın ekserjisi ( $\dot{E}x_{fuel}$ ) aşağıdaki eşitlikle bulunur (Caliskan ve Mori, 2017a);

$$\dot{E}x_{fuel} = \dot{m}_{fuel} H_u \varepsilon_{fuel} \quad (13)$$

Yakıtın hidrojen, oksijen, karbon ve kükürt kütle oranlarının sırasıyla  $H$ ,  $C$ ,  $O$ ,  $\alpha$  olarak ifade edildiği yakıtın kimyasal ekserji faktörü ( $\varepsilon_{fuel}$ ) formülü şu şekildedir (Caliskan ve Mori, 2017a);

$$\varepsilon_{fuel} = (1.0401) + (0.1728) \frac{H}{C} + (0.0432) \frac{O}{C} + (0.2169) \frac{\alpha}{C} \left[ 1 - (2.0628) \frac{H}{C} \right] \quad (14)$$

Kotas (1985)'e göre, biyodizel yakıtlar için  $\varepsilon_{fuel}$  değeri 1.04 ile 1.08 arasında alınabilmektedir. Bu bağlamda biyodizelin  $\varepsilon_{fuel}$  değeri 1.0751 olarak kabul edilmiştir (Çalışkan ve Mori, 2017a).

Ekserjetik net güç ( $\dot{E}x_W$ ), enerjetik net güce eşittir.

$$\dot{E}x_W = \dot{E}n_W \quad (15)$$

Sistemin egzoz ekserjisi ( $\dot{E}x_{exh}$ ) aşağıdaki şekilde bulunur:

$$\dot{E}x_{exh} = \sum_{i=1}^n \dot{m}_i (ex_{tm,i} + ex_{ch,i}) \quad (16)$$

$i$ . egzoz gazı bileşeninin özgül fiziksel ( $ex_{tm,i}$ ) ve özgül kimyasal ( $ex_{ch,i}$ ) ekserjisi (kJ/kg) aşağıdaki gibi hesaplanabilir.  $s$  değeri entropiyi,  $T_{exh}$  değeri ise motorun egzoz sıcaklığını ifade etmektedir.

$$ex_{tm,i} = [(h_i - h_0) - T_0 (s_i - s_0)] = c_{p,i} \left[ (T_{exh} - T_0) - T_0 \ln \left( \frac{T_{exh}}{T_0} \right) \right] \quad (17)$$

$$ex_{ch,i} = \bar{R} T_0 \ln \left( \frac{y_i}{y_{env,i}} \right) \quad (18)$$

Burada  $\bar{R}$  genel gaz sabitini,  $y_{env,i}$  çevre ortamındaki  $i$ . egzoz gazı bileşeninin ve  $y_i$  egzoz gazlarındaki  $i$ . egzoz gazı bileşeninin mol kesrini belirtmektedir (Çalışkan ve Mori, 2017b).

**Tablo 4.** Egzoz gazında ve çevrede yer alan egzoz gazı bileşenlerinin molar değerleri (Molar values of exhaust gas components in exhaust gas and environment) (\*Ntziachristosa vd., 2005)

Egzoz gazları	$y_i$ değerleri (%)	
	100 Nm	294 Nm
CO	0,0116	0,0039
NO <sub>x</sub>	0,0328	0,0895
HC	0,0022	0,0008
CO <sub>2</sub>	9,3580	11,3440
Referans gazlar	$y_{env,i}$ değerleri (%)*	
N <sub>2</sub>	75,6700	
O <sub>2</sub>	20,3500	
CO <sub>2</sub>	0,03450	
H <sub>2</sub> O	3,03000	
CO	0,00070	
SO <sub>2</sub>	0,00020	
H <sub>2</sub>	0,00005	
Diğer gazlar	0,91455	

Sistemin ekserji kayıpları; enerji kayıpları, referans sıcaklık ( $T_0$ ) ve motor soğutma suyu ( $T_{cw}$ ) sıcaklığıyla ilişkilidir (Çalışkan ve Mori, 2017b).

$$\dot{E}x_{loss} = \dot{E}n_{loss} \left( 1 - \frac{T_0}{T_{cw}} \right) \quad (19)$$

Ekserji denge denkleminde sistemin ekserji yıkımı ( $\dot{E}x_{dest}$ ) çekilebilir.

$$\dot{E}x_{dest} = \dot{E}x_{air} + \dot{E}x_{fuel} - \dot{E}x_W - \dot{E}x_{exh} - \dot{E}x_{loss} \quad (20)$$

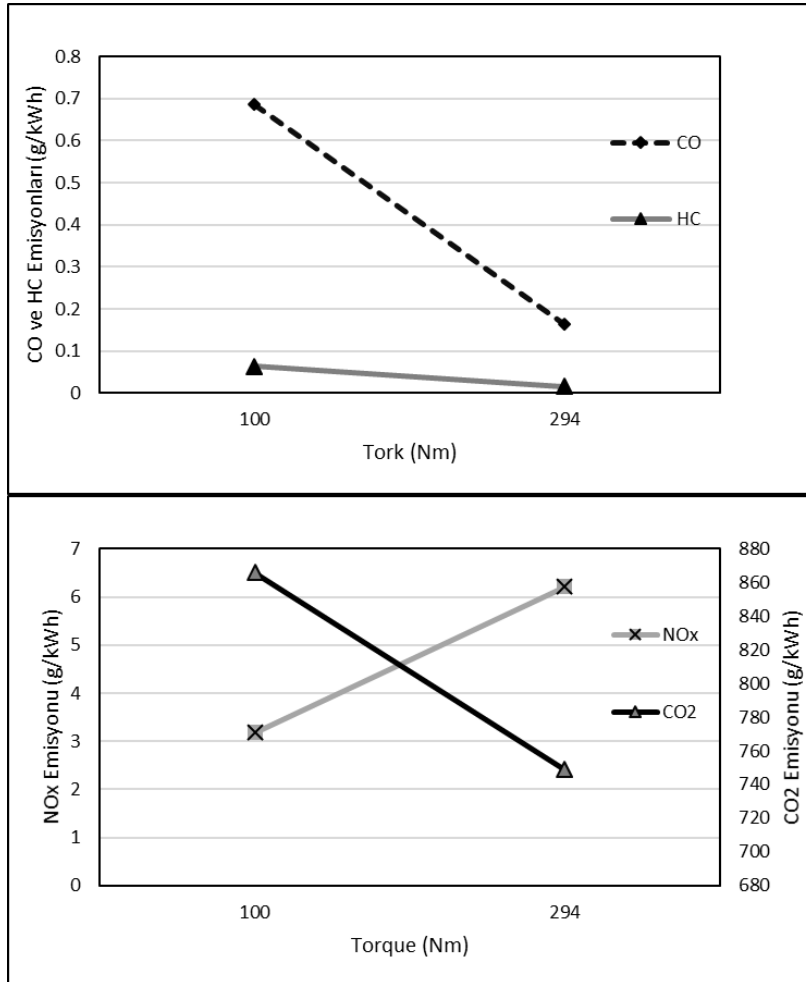
Ayrıca, sistemin ekserji verimliliği ( $\psi$ ) aşağıdaki gibi bulunur (Çalışkan ve Mori, 2017b).

$$\psi = \left( \frac{\dot{E}x_w}{\dot{E}x_{fuel}} \right) 100 \quad (21)$$

#### 4. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Dizel motor, biyodizel yakıt kullanılarak 100 Nm ve 294 Nm motor yükü altında beş defa test edilmiş ve değerlendirme için ortalama değerler esas alınmıştır. Daha sonra bu deneysel analiz verilerine enerji ve ekserji analizleri uygulanmak suretiyle motor sistemi ve emisyon değerleri detaylı olarak incelenmiştir.

Biyodizel yakıtın dize motorda kullanımı sonucu egzoz emisyonları irdelendiğinde, 294 Nm yükteki CO emisyonu değeri 100 Nm motor yükündeki CO emisyonu değerinden daha düşüktür. Dolayısıyla torkun artması CO emisyonunu olumlu yönde etkilemiştir. Benzer şekilde HC emisyonu oranı dikkate alındığında, motor 294 Nm tork ile çalıştırıldığında elde edilen HC emisyonu, 100 Nm torktaki değerinden daha düşük bulunmuştur. Ancak, dizel motorunu 100 Nm motor yükünde çalıştırmak daha düşük NO<sub>x</sub> emisyonu sağlamıştır. Bu bağlamda motor yükündeki artış, egzoz emisyonunda yer alan NO<sub>x</sub> gazlarının değerinin yaklaşık 2 katı değerine ulaşmasına sebep olmuştur. Diğer egzoz gazlarına kıyasla, CO<sub>2</sub> emisyon değerinin tüm yüklerde yüksek değerde olduğu görülmüştür. CO<sub>2</sub> emisyonu değerleri ele alındığında, motor yükünün artması CO<sub>2</sub> emisyonunun azalmasını sağlamıştır. Egzoz emisyon gazlarının kıyaslanması Şekil 2.'de gösterilmiştir.



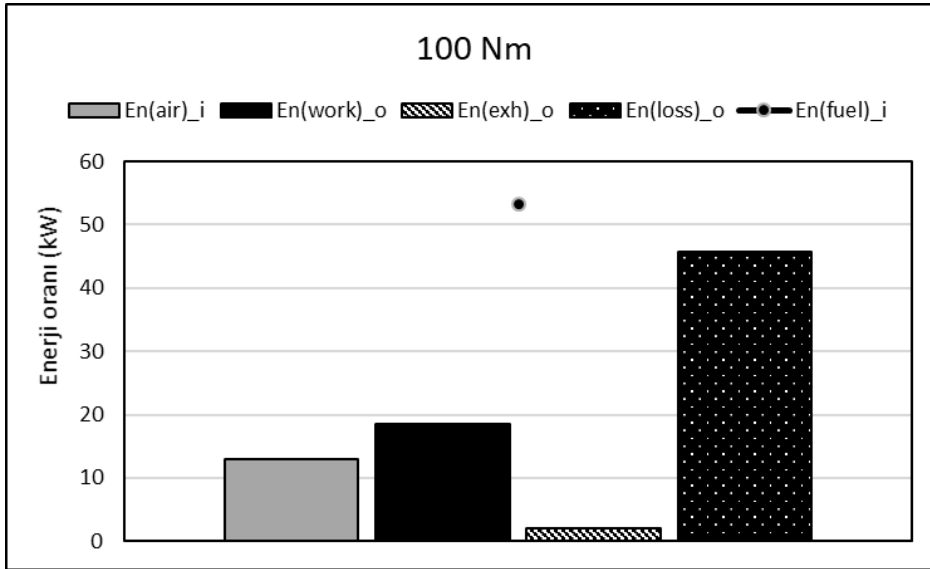
Şekil 2. Egzoz gazlarının kıyaslanması (Comparison of exhaust gases) (Yıldız, 2018)

Enerji analizi sonuçları incelendiğinde, motor yükü arttığında havanın enerjisinde de artış görülmüştür. Biyodizel yakıtının enerjisi 100 Nm'de 53,268 kW olarak bulunurken, 294 Nm'de 124,723 kW olarak hesaplanmıştır. Çünkü, yakıt enerjisi motor torku ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Sistemin net gücü motor torkunun artmasıyla birlikte 18,504 kW değerinden 50,137 kW değerine yükselmiştir. Bu sonuca göre motor torkunun artması, sistemden elde edilen net gücün artmasını sağlamıştır. Sistemin egzoz enerjisi 100 Nm'de 2,104 kW iken, 294 Nm'de 5,739 kW olarak bulunmuştur. Enerji analizinde üzerinde durulması gereken kısımlar; verimlilikler ve ısı

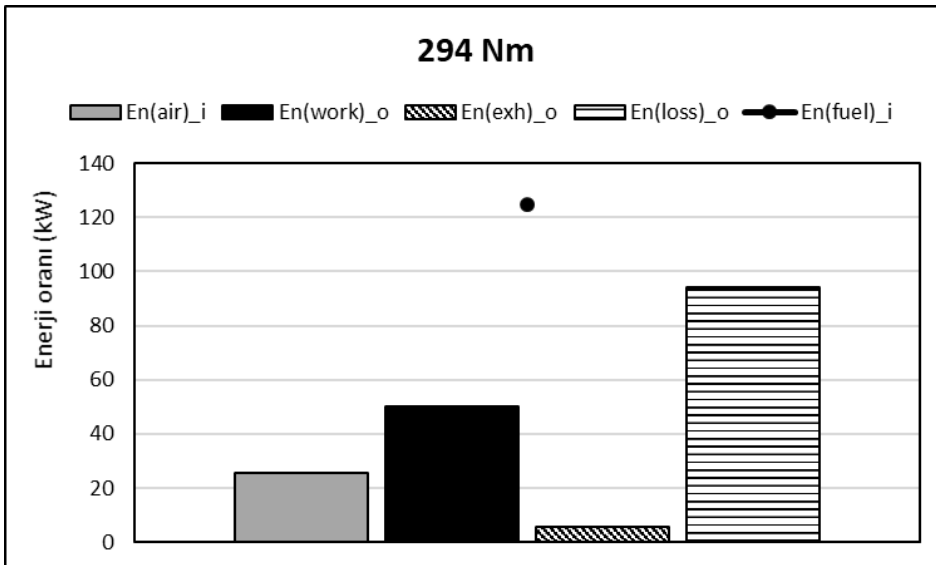
kayıbı & egzoz çıkışı gibi kayıplardır (Çalışkan ve Mori, 2017a). Motor torkunun artması enerji analizi sonuçlarını genel olarak olumlu etkilemiş olsa da, sistemdeki enerji kayıplarının artmasına sebep olmuştur. Dizel motor 100 Nm ile yüklendiğinde sistemin enerji kaybı 45,655 kW olarak hesaplanırken, 294 Nm ile yüklendiğinde 94,247 kW değerine yükselerek yaklaşık olarak 2 katına çıkmıştır. Motor torkunun artmasıyla enerji verimliliği yükselmiştir. 100 Nm’de % 27,925 olan enerji verimi, 294 Nm’de % 33,397’e ulaşmıştır. Daha fazla torkla daha fazla enerji verimliliği elde edilirken tork artışı sistem kayıplarında da artışa neden olmuştur. Gelecekteki çalışmalar için bu durum göz önünde bulundurulmalıdır. Sistemin enerji analizi sonuçları Tablo 5’te sunulmuştur. 100 Nm ve 294 Nm için enerji analizi sonuçlarının karşılaştırılması ise sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4’te verilmiştir.

**Tablo 5.** Sistemin enerji analizi sonuçları (Energy analysis results of system) (Yıldız, 2018)

Enerji analizi sonuçları	100 Nm	294 Nm
Havanın enerjisi ( $\dot{E}_{n_{air}}$ ) (kW)	12,996	25,401
Yakıtın enerjisi ( $\dot{E}_{n_{fuel}}$ ) (kW)	53,268	124,723
Net güç ( $\dot{E}_{n_w}$ ) (kW)	18,504	50,137
Sistemin egzoz enerjisi ( $\dot{E}_{n_{exh}}$ ) (kW)	2,104	5,739
Enerji kayıpları ( $\dot{E}_{n_{loss}}$ ) (kW)	45,655	94,247
Enerji verimi ( $\eta$ ) (%)	27,925	33,397



**Şekil 3.** 100 Nm motor yükü için enerji analizi sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of energy analysis results for 100 Nm) (Yıldız, 2018)



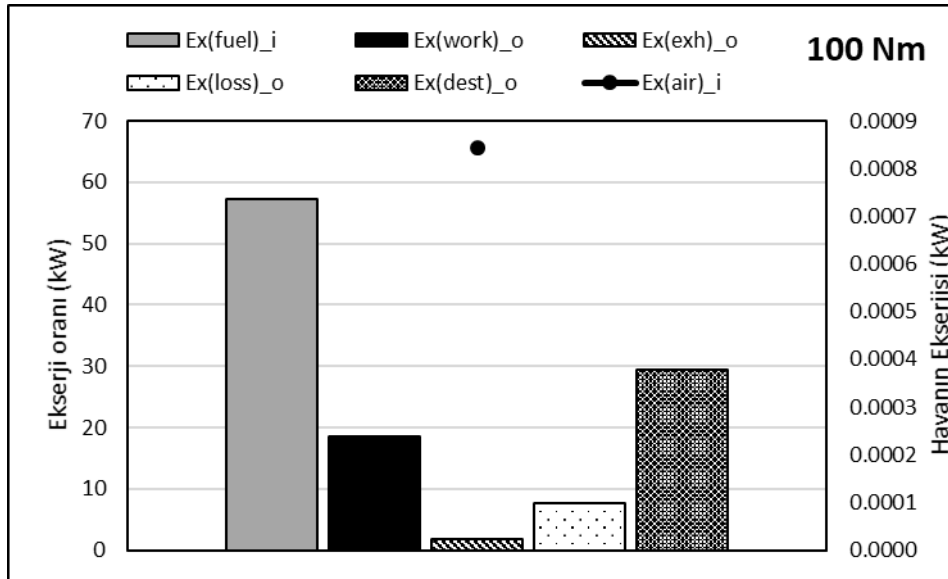
**Şekil 4.** 294 Nm için enerji analizi sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of energy analysis results for full load) (Yıldız, 2018)



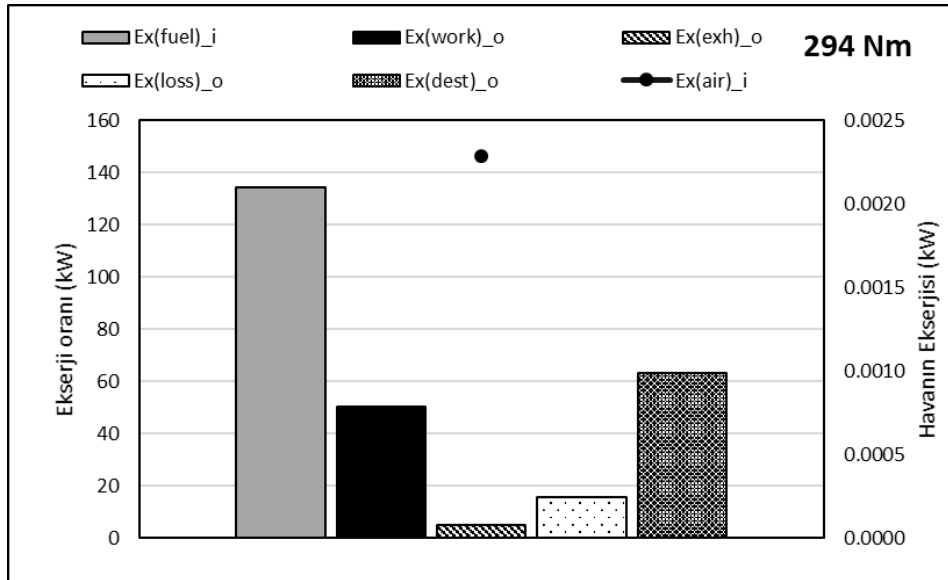
Sistem ekserji analizi değerlerine göre de incelenmiştir. 294 Nm’de havanın ekserjisi  $2,288 \times 10^{-3}$  kW iken, 100 Nm’de  $0,844 \times 10^{-3}$  kW olarak bulunmuştur. Yakıtın ekserjisi 100 Nm torkta 57,268 kW olarak hesaplanırken, 294 Nm’de 134,090 kW olarak elde edilmiştir ve yakıtın ekserji değerinde ciddi bir artış gözlemlenmiştir. Sistemin ekserjetik net gücü enerjetik net gücüne eşittir. Sistemin egzoz ekserjisi motor yükünün artması ile birlikte 1,764 kW’dan 4,875 kW’a artmıştır. Yukarıda bahsedilen ekserji analizi sonuçlarında, motor yükünün artmasıyla doğru orantılı olarak ekserji değerlerinde de artış görülmüştür. Ancak kayıplar incelendiğinde, 100 Nm’de 7,628 kW olan ekserji kayıpları, 294 Nm’de 15,750 kW olarak hesaplanmış ve motor yükündeki artışın kayıpları da artırdığı görülmüştür. Ekserji yıkımı değeri ise, 100 Nm’de 29,374 kW iken, 294 Nm’de 63,329 kW olarak hesaplanmıştır. Motor torkunun artmasıyla birlikte sistemin ekserji verimi %29,374’den %37,390’a yükselmiştir. Enerji analizindeki sonuçlarla ilintili olarak, daha fazla verim için sisteme katkı sağlayan tork artışı, kayıpların ve ekserji analizinde farklı bir terim olarak karşımıza çıkan “ekserji yıkımı”nın artmasına neden olmuştur. Araştırmacılar için gelecekteki çalışmalarda yanıtlanması gereken sorulardan birisinin “daha fazla verimlilik mi yoksa daha az kayıp mı” olacağı düşünülebilir. Sistemin ekserji analizi sonuçları Tablo 6’da gösterilmiştir. 100 Nm ve 294 Nm motor torku için ekserji analizi sonuçlarının karşılaştırılması sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6’da verilmiştir.

**Tablo 6.** Sistemin ekserji analizi sonuçları (Exergy analysis results of system) (Yıldız, 2018)

Ekserji analizi sonuçları	100 Nm	294 Nm
Havanın ekserjisi ( $\dot{E}x_{air}$ ) (kW)	$0,844 \times 10^{-3}$	$2,288 \times 10^{-3}$
Yakıtın ekserjisi ( $\dot{E}x_{fuel}$ ) (kW)	57,268	134,090
Net güç ( $\dot{E}x_w$ ) (kW)	18,504	50,137
Sistemin egzoz ekserjisi ( $\dot{E}x_{exh}$ ) (kW)	1,764	4,875
Ekserji kayıpları ( $\dot{E}x_{loss}$ ) (kW)	7,628	15,750
Ekserji yıkımı ( $\dot{E}x_{dest}$ ) (kW)	29,374	63,329
Ekserji verimliliği ( $\psi$ ) (%)	32,311	37,390



**Şekil 5.** 100 Nm motor yükü için ekserji analizi sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of exergy analysis results for 100 Nm) (Yıldız, 2018)



Şekil 6. 294 Nm için ekserji analizi sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of exergy analysis results for full load) (Yıldız, 2018)

Mevcut çalışma ile literatürde yer almakta olan bazı benzer çalışmaların sonuçları karşılaştırılmıştır. Ghadikolaei vd. (2019) motor yükünün dizel motorun performansına ve emisyonlarına etkisini incelemiştir. Maksimum torku 285 Nm/1800 rpm olan bir dizel motoru, %50 motor yüküyle çalıştırıldığında yaklaşık olarak 1,190 g/kWh CO emisyonu elde edilirken, %100 motor yükünde çalıştırıldığında ise yaklaşık 1,541 g/kWh CO emisyonu meydana gelmiştir. CO<sub>2</sub> emisyonu olarak motor yükünün artmasıyla 871,564 g/kWh olan CO<sub>2</sub> emisyonu değeri 879,339 g/kWh'ya yükselmiştir. Bu durumun aksine, dizel motorunun yüksek torkta çalıştırılması, HC emisyonu değerlerini düşürmüştür. Çalışkan ve Mori (2017a)'nin çalışmasında, farklı içeriklerle hazırlanan biyodizel yakıtları kullanılarak bir dizel motoru 100 Nm, 200 Nm ve 294 Nm motor yükleri altında deneysel olarak test edilip deneysel sonuçlara enerji ve ekserji analizleri uygulanmıştır. %100 içerikli biyodizel yakıtı için 100 Nm'de 27,42 kW enerji verimliliği elde edilirken, 294 Nm'de 33,39 kW enerji verimi hesaplanmıştır. Enerji veriminin yanı sıra, ekserji verimi için de 294 Nm'de daha yüksek verimlilik elde edilmiştir. Mevcut çalışmada, yukarıda sonuçlarından bahsedilmiş olan benzer literatür çalışmalarında olduğu gibi 294 Nm'de yani maksimum torkta CO ve CO<sub>2</sub> emisyonu değeri yükselirken, HC emisyonunun azaldığı tespit edilmiştir. Enerji ve ekserji verimliliği sonuçları incelendiğinde de maksimum torkta daha yüksek verimlilik elde edilmiştir.

## 5. Değerlendirme (Conclusion)

Bu çalışmada, %100 biyodizel yakıtlı dört silindri bir dizel motor 100 Nm ve 294 Nm motor torkunda deneysel olarak incelenmiştir. Sisteme enerji ve ekserji analizleri uygulanarak sonuçlar termodinamik açıdan detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Havanın, yakıtın, egzoz gazlarının ve net gücün enerji ve ekserji değerlerinin motor tork artışı ile birlikte arttığı görülmüştür. Tork artışı ile motorun enerji ve ekserji kayıplarının da artarak sistemi olumsuz etkilediği değerlendirilmiştir. 294 Nm'de çalışan motorda biyodizel yakıtının enerji değeri 124,723 kW, ekserji değeri ise 134,09 kW olarak hesaplanmıştır. Dizel motorun 294 Nm'de enerji kaybı 94,247 kW olarak bulunurken, ekserji kaybı 15,750 kW olarak belirlenmiştir. Motor torkunun artmasıyla sistemin verimi artmıştır ve 294 Nm'de motorun enerji verimi %33,397 iken, ekserji verimi ise %37,39 olarak hesaplanmıştır. Dizel motoru daha yüksek torkla çalıştırıldığında daha fazla enerji verimliliği elde edilirken tork artışı sistem kayıplarının da artmasına neden olmuştur. Enerji analizi ile elde edilen sonuçlar ekserji analizi sonuçlarıyla da ilişkilidir. Sistemin veriminin artırılmasına katkı sağlayan tork artışı, sistem kayıplarının ve ekserji yıkımının artmasına sebep olarak motor kullanımında "kazanç elde edilirken kayba sebep" durumunu ortaya çıkarmıştır. Gelecekteki çalışmalar adına mevcut çalışmanın deneysel, enerji ve ekserji analiz sonuçlarının göz önünde bulundurulması yarar sağlayacaktır. Farklı yakıtların kullanılmasıyla da analiz sonuçlarının karşılaştırılmasının desteklenmesi sağlanabilir.

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

## Kaynaklar (References)

- Aliyy A, Shitanda D, Walker S, Agnew B, Masheiti S, Atan R, 2011. Performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with croton megalocarpus (musine). *Appl Therm Eng.* 31:36-41.
- Chandrasekaran, V., Arthanarisamy, M., Nachiappan, P., Dhanakotti, S., Moorthy, B., 2016. The role of nano additives for biodiesel and diesel blended transportation fuels. *Transport. Res. Part D: Transport Environ.* 46, 145-156.
- Çalışkan, H., Tat, M.E., Hepbasli, A., 2010a. A review on exergetic analysis and assessment of various types of engines. *Int. J. Exergy* 7 (3), 287-310.
- Çalışkan, H., Tat, M.E., Hepbasli, A., Van Gerpen, J.H., 2010b. Exergy analyses of engines fueled with biodiesel from high-oleic soybeans based on experimental values. *Int. J. Exergy* 7 (1), 20-36.
- Çalışkan, H., Mori, K., 2017a. "Environmental, enviroeconomic and enhanced thermodynamic analyses of a diesel engine with diesel oxidation catalyst (DOC) and diesel particulate filter (DPF) after treatment systems", *Energy*, 128 (2017): 128-144.
- Çalışkan, H., Mori, K., 2017b. "Thermodynamic, environmental and economic effects of diesel and biodiesel fuels on exhaust emissions and nano-particles of a diesel engine", *Transportation Research Part D*, 56 (2017): 203-221.
- Das, A. K., Hansdah, D., Mohapatra, A. K., & Panda, A. K. (2020). Energy, exergy and emission analysis on a DI single cylinder diesel engine using pyrolytic waste plastic oil diesel blend. *Journal of the Energy Institute*, 93(4), 1624-1633.
- Ekici, S., Şöhret, Y., 2020. Isparta Süleyman Demirel Havalimanında Ticari Uçuşlar Kaynaklı Egzoz Emisyonlarının Çevresel Etkileri ve Maliyet Değerlendirmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(2), 597-604.
- Ghadikolaei M. A., Wie, L., Cheung C.S., Yung, K-F. (2019). "Effects of engine load and biodiesel content on performance and regulated and unregulated emissions of a diesel engine using contour-plot map", *Science of the Total Environment*, 658 (2019), 1117-1130.
- Jannatkah, J., Najafi, B., & Ghaebi, H., 2020. Energy and exergy analysis of combined ORC – ERC system for biodiesel-fed diesel engine waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 209, 112658.
- Kotas, T.J., 1985. *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. Butterworths, UK, London.
- Liu, C., Liu, Z., Tian, J., Xu, Y., Yang, Z., & Wang, P., 2020. Investigations of energy, exergy distribution characteristics of overall working conditions and effect of key boundary parameters on residual energy availability in an automotive turbocharged diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 174, 115352.
- Mirbagheri, S. A., Safieddin Ardebili, S. M., & Kiani Deh Kiani, M., 2020. Modeling of the engine performance and exhaust emissions characteristics of a single-cylinder diesel using nano-biochar added into ethanol-biodiesel-diesel blends. *Fuel*, 278, 118238.
- Requia, W. J., Mohamed, M., Higgins, C. D., Arain, A., & Ferguson, M., 2018. How clean are electric vehicles? Evidence-based review of the effects of electric mobility on air pollutants, greenhouse gas emissions and human health. *Atmospheric Environment*, 185, 64-77.
- Reitz R. D., Duraisamy G., 2015. Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in internal combustion engines. *Prog Energy Combust Sci.* 46:12-71.
- Sokhi, R.S., 2011. In: *World Atlas of Atmospheric Pollution*, first ed. Anthen press, Nova York.
- Tesfa, B., Gu, F., Mishra, R., Ball, A.D., 2013. LHV predication models and LHV effect on the performance of CI engine running with biodiesel blends. *Energy Convers. Manage.* 71, 217-226.
- Venkanna, B.K., Venkataramana Reddy, C., 2012. Direct injection diesel engine performance, emission, and combustion characteristics using diesel fuel, nonedible honne oil methyl ester, and blends with diesel fuel. *Int. J. Energy Res.* 36, 1247-1261.
- Yıldız, İ., 2018. Thermodynamic analysis and emission assessment of a diesel engine fueled with various fuels, Yüksek Lisans Tezi, Uşak Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uşak, 39-71.
- Zhou N., Price L, Yande D, Creyts J, Khanna N, Fridley D., 2019. A roadmap for China to peak carbon dioxide emissions and achieve a 20% share of non-fossil fuels in primary energy by 2030. *Appl Energy.* 239:793-819.