



## Bir Dizel Motorda Mısır Yağı Biyodizeli Kullanımının Termodinamik Analizi

Abdülvahap ÇAKMAK<sup>1,\*</sup>, Atilla BİLGİN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Kavak Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Kavak/Samsun

<sup>2</sup> Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Trabzon

### Öz

Termodinamik analiz (enerji ve ekserji analizi) ile içten yanmalı motorların performans değerlendirmesi daha etkili şekilde yapılabilir. Sunulan bu çalışmada, tek silindri bir dizel motorunda yakıt olarak mısır yağı metil esteri kullanımı, termodinamik açıdan incelenmiştir. Tam yük (%100) ve 2000 d/dk çalışma şartında motorda saf mısır yağı biyodizeli ve saf dizel yakıtı kullanılarak gerçekleştirilen motor deneylerinden termodinamik analiz için gerekli veriler sağlanmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre motorda yakıt olarak mısır yağı biyodizeli kullanıldığında motorun özgül yakıt tüketimi, %11,89 oranında artarken, motorun özgül enerji tüketimi %2,25 oranında azalmıştır. Her iki yakıt kullanımında motorun ikinci yasa verimi aynı olmasına rağmen biyodizel kullanımında motorun birinci yasa verimi %0,76 oranında artmıştır. Toplam ekserji yıkımı dizel yakıtı ve biyodizel için sırasıyla 6,77 kW ve 6,67 kW olarak hesaplanmıştır. Termodinamik açıdan bir değerlendirme yapıldığında mısır yağı biyodizelinin dizel motorları için uygun bir alternatif yakıt olduğu söylenebilir.

### Makale Bilgisi

Başvuru: 09/01/2017

Düzeltilme: 10/02/2017

Kabul: 03/05/2017

### Anahtar Kelimeler

Mısır yağı biyodizeli

Dizel motoru

Termodinamik analiz

### Keywords

Corn oil biodiesel

Diesel engine

Thermodynamic analysis

### Thermodynamic analysis of Corn Oil Biodiesel Usage as Fuel in a Diesel Engine

#### Abstract

An effective performance assessment of the internal combustion engine can be achieved by thermodynamic analysis (energy and exergy analysis). To that end, in this present study, a thermodynamic analysis of the corn oil biodiesel usage as fuel in single cylinder diesel engine was performed by evaluating experimental data. Experiments were carried out at full load and 2000 rpm by fueling the engine with diesel fuel and corn oil biodiesel. It was found that corn oil biodiesel gives 11.89% higher brake specific fuel consumption, while it results in 2.25% less brake specific energy consumption than diesel fuel. The same second law efficiency is obtained for tested fuels, although the use of corn oil biodiesel increases the first law efficiency by 0.76%. Additionally, total exergy destruction rate for diesel and biodiesel are calculated as 6.77 kW and 6.67 kW, respectively. Based on the comparative assessment of the thermodynamic analysis results, it can be said that corn oil biodiesel is a suitable alternative fuel for diesel engines.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sahip oldukları avantajlar nedeniyle içten yanmalı motorlar, günlük hayatta birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Dünya nüfusu ile birlikte yaşam konforunun her geçen gün artması bu makinelerin çok daha hızlı yaygınlaşmasına yol açmaktadır. İçten yanmalı motorların yerine geçecek yeni güç sistemleri geliştirme çalışmaları olmasına rağmen günümüzde bu makinelerin yerini tamamen alabilecek yeni bir güç kaynağı tam olarak geliştirilememiştir. Bu nedenle, yıllardır içten yanmalı motorlar için yapılan yatırımlar, gerçekleştirilen araştırma ve geliştirme çalışmaları gelecek birkaç on yıl içinde de devam edeceği öngörülmektedir [1]. Ancak hayatımızın vazgeçilmez bir parçası olan içten yanmalı motorlarda petrol kökenli yakıtların kullanımı sonucu birçok sorunla karşılaşılmaktadır. Bununla birlikte yakın gelecekte petrol kökenli yakıtların artan yakıt talebinin karşılanmasında tek başına yetersiz kalacağı bilinmektedir.

\*İletişim yazarı, e-mail: [abdulvahap.cakmak@omu.edu.tr](mailto:abdulvahap.cakmak@omu.edu.tr)

Bu sebeplerden dolayı petrol kökenli yakıtlara alternatif olabilecek yenilenebilir, çevre dostu ve teknik olarak kullanılabilir yeni yakıt arayışları, bilim insanları için önemli bir çalışma konusu olmuştur. Dizel yakıtına yakın fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olan biyodizelin, dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılabilmesi ve bu nedenle geleceğin alternatif yakıtı olarak görüldüğü bildirilmektedir [2-4]. Biyodizel-dizel yakıt karışımları ve/veya saf biyodizelin motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkileri biyodizelin hammaddesine, deney motorunun ve test cihazlarının teknik özelliklerine, motorun çalışma koşullarına, referans dizel yakıtına ve tercih edilen ölçüm tekniklerine göre farklılıklar göstermektedir [5]. Ancak genel olarak biyodizel ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının motorun özgül yakıt tüketimini arttırdığı, efektif motor gücünde düşüşe neden olduğu ve NO<sub>x</sub> emisyonları dışındaki egzoz emisyonlarını azalttığı bilinmektedir [6-9]. Daha ayrıntılı çalışmalar için biyodizelin yakıt olarak dizel motorda kullanımı, termodinamik açıdan da incelenmesi gerekmektedir. Termodinamiğin birinci yasasına (enerjinin korunumu) göre motora yakıtla giren enerjinin ne kadarının efektif güce dönüştürüldüğü, ne kadarının egzoz gazları ve motor soğutma sistemiyle atmosfere atıldığı ve ne kadarının diğer kayıplara harcandığı belirlenebilir. Fakat termodinamiğin birinci yasası bu enerjilerin nitelikleri hakkında herhangi bir fikir vermez. Bu enerjilerin kullanılabilirliği (yararlı iş potansiyeli) ancak termodinamiğin ikinci yasası ile belirlenebilir. Ayrıca termodinamiğin ikinci yasasına göre motorun termodinamik veriminin azalmasına neden olan ve tersinmezliklerin yol açtığı ekserji yıkımı da belirlenebilir. Bütün bu ayrıntılı bilgilere ancak ekserji analizi ile ulaşılabilir. Ekserji analizi, kütle ve enerjinin korunumu ilkeleri ile birlikte termodinamiğin ikinci yasasını da içeren ve termal sistemlerin tasarımında, analizinde, verimlerinin artırılmasında kullanılan etkili bir analiz yöntemidir [10].

Bu çalışmada, yakıt olarak saf mısır yağı biyodizeli ve dizel yakıtı kullanılan tek silindirli bir dizel motorunda yakıt enerjisinin diğer enerji bileşenlerine dönüşüm süreçleri termodinamik açıdan incelenmiştir. Elde edilen bulgular her bir yakıt kullanımı için karşılaştırılmıştır.

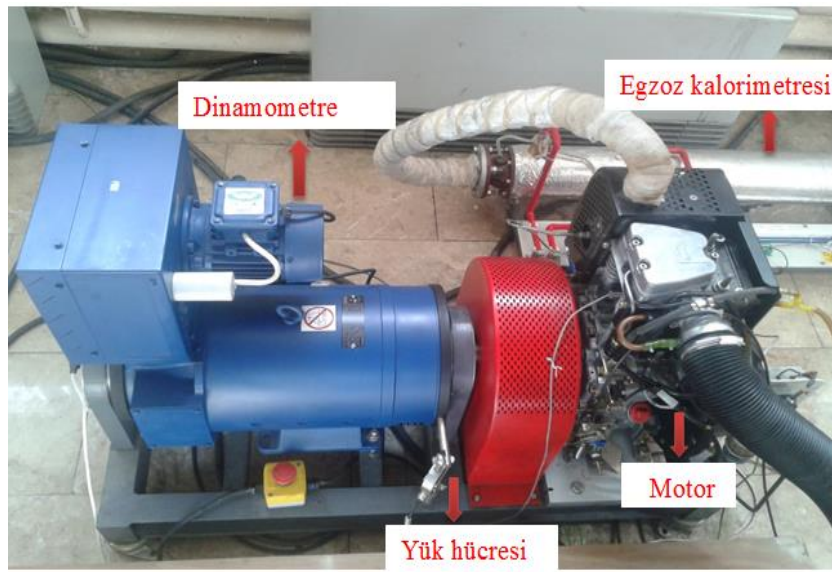
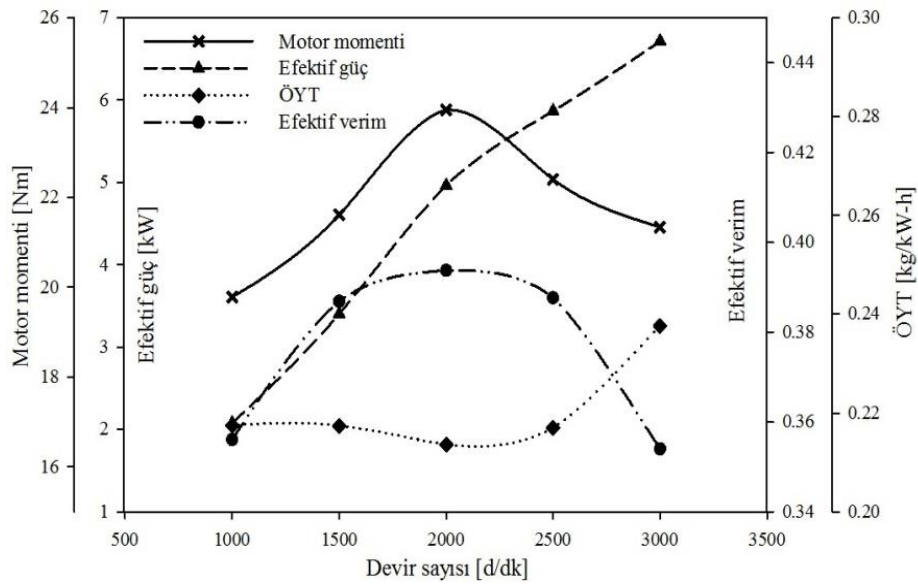
## 2. DENEYSSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL PROCESS)

Termodinamik analiz için gerekli veriler motor testlerinden elde edilmiştir. Deneysel çalışmalar, Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Motorlar Laboratuvarı'nda iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın birinci aşamasında, motor deneylerinde kullanılmak üzere mısır yağından mısır yağı biyodizeli üretimi gerçekleştirilmiş ve ardından dizel yakıtının ve üretilen biyodizelin yoğunluk (ISO 4787), dinamik viskozite (DIN 53015) ve kinematik viskozite gibi bazı önemli yakıt özellikleri belirlenmiştir. Diğer bazı yakıt özellikleri ise Karadeniz Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Sadettin GÜNER Yakıt Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde ölçülmüştür. Tablo 1'de dizel yakıtının ve mısır yağı biyodizelinin bazı yakıt özellikleri verilmiştir. Tablo 1'de görüldüğü gibi mısır yağı biyodizelinin viskozite ve yoğunluk değerleri EN14142 standartlarına uygundur. Rafine mısır yağından biyodizel üretimi, mısır yağı biyodizeli için minimum kinematik viskozite değerini veren üretim parametreleri [11] (Katalizör miktarı: yağın kütlece %1,1'i kadar, alkol/yağ molar oranı: 9/1, reaksiyon sıcaklığı 60 °C ve reaksiyon süresi 60 dk.) dikkate alınarak transesterifikasyon yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Transesterifikasyon reaksiyonu için katalizör olarak potasyum hidroksit (KOH) ve alkol olarak %99,90 saflıkta metil alkol (CH<sub>3</sub>OH) kullanılmıştır. Bu reaksiyon koşulları altında biyodizel üretim makinesi yardımıyla motor deneyleri için yeterli miktarda biyodizel üretilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise saf biyodizel ve dizel yakıtı ile motor testleri yapılarak termodinamik analiz için gerekli ölçümler alınmıştır. Motor deneyleri, TecEquipment firması tarafından imal edilen TD 300 motor test düzeneğinde yapılmıştır. Test düzeneği tek silindirli bir dizel motoru, motorun yüklenmesinde kullanılan elektrikli dinamometre, egzoz gaz kalorimetresi, motor çevrim analizörü, basınç sensörü, krank mili konum algılayıcısı, motor devir sensörü, hava tankı, yakıt tankı, yakıt ölçüm büreti, termokupllar (ısı çifti), verilerin okunduğu ekranlardan ve tüm verilerin kaydedildiği bir bilgisayardan oluşmaktadır. Deney sistemi Şekil 1'de görülmektedir. Deneylerde kullanılan motor HATZ marka ve TD 302 model, dört zamanlı, tek silindirli, hava soğutmalı, maksimum gücü 7,3 kW (3600 d/dk'da; ISO 3046-1) ve sıkıştırma oranı 20,5 olan bir dizel motordur. Deney motorun hız karakteristikleri saf dizel yakıtı kullanılarak deneysel olarak belirlenmiştir. Belirlenen hız karakteristikleri ile üretici firmanın belirttiği hız karakteristiklerinin son derece uyumlu olduğu görülmüştür. Motorun hız karakteristikleri Şekil 2'de verilmiştir.

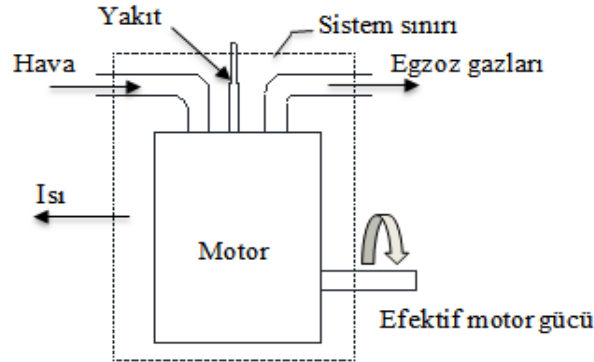
**Tablo 1.** Dizel yakıtı ve mısır yağı biyodizelinin bazı yakıt özellikleri (Some fuel properties of the diesel fuel and corn oil biodiesel)

Özellikler/Birimler	Dizel Yakıtı	Biyodizel	EN 14214
Yoğunluk, kg/m <sup>3</sup> (15°C'de)	827,600	881,360	860-900
Kinematik viskozite, mm <sup>2</sup> /s (40 °C'de)	2,8475	3,8679	3,50-5,00
Dinamik viskozite, kg/m-s (40 °C'de)	2,3392x10 <sup>-3</sup>	3,3839x10 <sup>-3</sup>	-
Mol kütlesi, kg/kmol	194,213	291,536	-
Kapalı formül	<sup>a</sup> C <sub>14,09</sub> H <sub>24,78</sub>	C <sub>18,66</sub> H <sub>35,13</sub> O <sub>2</sub>	-
Alt ısı değer, kJ/kg <sup>b</sup>	42797	37386	-
Alt ısı değer, kJ/L	35367	32902	-

<sup>a</sup>Kaynak: [12]<sup>b</sup>Mendeleyev formülünden hesaplanmıştır.**Şekil 1.** Deney sisteminin görünümü (A view of the experimental setup)**Şekil 2.** Deney motorunun hız karakteristikleri (Speed characteristics of the test engine)

### 3. TERMODİNAMİK ANALİZ (THERMODYNAMIC ANALYSIS)

Belirtilen çalışma koşullarında, motorun termodinamik ayrıntılarının daha iyi belirlenmesi amacıyla motora enerji ve ekserji analizi birlikte uygulanmıştır. Bunun için Şekil 3’de görüldüğü gibi motor, kararlı durumda sürekli akışlı bir kontrol hacmi olarak ele alınmıştır.



**Şekil 3.** Motorun kontrol hacmi olarak seçilmesi (Selection of the engine as a steady state control volume)

Ayrıca bu çalışmada, sonuçları önemli derecede etkilemeyecek bazı kabuller yapılmıştır. Silindire emilen havanın ve silindirden çıkan egzoz gazlarının ideal gaz karışımı olduğu, kinetik ve potansiyel enerjilerindeki değişimin ihmal edildiği, ayrıca motorda tam yanmanın gerçekleştiği varsayılmıştır. Referans çevrenin basıncı ( $P_0$ ) 1 atm ve sıcaklığı ( $T_0$ ) 25 °C olarak alınmıştır. Kontrol hacmine giren enerji ve ekserji sadece yakıtın enerjisi ve kimyasal ekserjisidir. Çünkü silindire emilen hava ve püskürtülen yakıt, referans çevre şartlarında motora girdiğinden emilen havanın termomekaniksel ve kimyasal ekserjisi ile yakıtın termomekaniksel ekserjisi sıfır olarak değerlendirilmiştir. Birim zamanda silindire giren yakıt enerjisi ve yakıt ekserjisi aşağıdaki bağıntılardan hesaplanmıştır [13].

$$\dot{E}_{yakıt} = \dot{m}_{yakıt} H_u \quad [kW] \quad (1)$$

$$\dot{E}x_{yakıt} = \dot{m}_{yakıt} ex_{Kim,yakıt}^0 \quad [kW] \quad (2)$$

Burada;  $\dot{m}_{yakıt}$  [kg/s] yakıtın kütleli debisini,  $H_u$  [kJ/kg] yakıtın alt ısıl değerini ve  $ex_{Kim,yakıt}^0$  yakıtın özgül kimyasal ekserjisini ifade etmektedir. Yakıtın özgül kimyasal ekserjisi yakıtın ekserji katsayısı ve alt ısıl değerinin çarpımıyla belirlenir [14].

$$ex_{Kim,yakıt}^0 = \varphi H_u \quad [kJ/kg] \quad (3)$$

Yakıtın ekserji katsayısının belirlenmesinde ilk olarak Szargurt ve Styrylska tarafından geliştirilen ve %0,38 hata oranına sahip aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır [14]:

$$\varphi = 1,0401 + 0,1728 \frac{h'}{c'} + 0,0432 \frac{o'_y}{c'} + 0,2169 \frac{s'}{c'} \left(1 - 2,0628 \frac{h'}{c'}\right) \quad (4)$$

Burada;  $c'$  [kg C/kg yakıt],  $h'$  [kg H/kg yakıt],  $s'$  [kg S/kg yakıt] ve  $o'_y$  [kg O/kg yakıt] sırasıyla karbonun, hidrojenin, kükürdün ve oksijenin yakıt içindeki kütleli oranını ifade etmektedir.

Efektif güç aynı zamanda efektif güç ekserjisi olarak alınmıştır.

$$\dot{E}x_{N_e} = N_e \quad [kW] \quad (5)$$

Egzoz gazlarıyla atmosfere atılan ısı enerjisi aşağıdaki bağıntıdan hesaplanmıştır [15]:

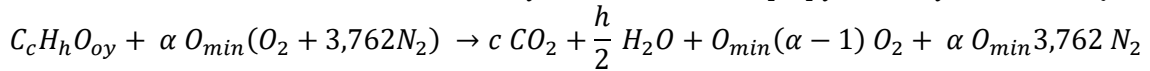
$$\dot{Q}_{egzoz} = \dot{m}_{su} c_{p,su} \frac{(T_{s2} - T_{s1})}{(T_{e2} - T_{e3})} (T_{e2} - T_0) \quad [kW] \quad (6)$$

Burada;  $\dot{m}_{su}$  [kg/s] egzoz kalorimetresi soğutma suyu debisini,  $c_{p,su}$  [kJ/kg/K] egzoz kalorimetresi soğutma suyu özgül ısısını,  $T_{s2}$  [°C] ve  $T_{s1}$  [°C] egzoz gazı kalorimetresi soğutma suyu çıkış ve giriş sıcaklığını,  $T_{e2}$  [°C] ve  $T_{e3}$  [°C] egzoz gazlarının kalorimetreye giriş ve çıkış sıcaklığını ve  $T_0$  [°C] ortam

sıcaklığını belirtmektedir. Egzoz gazlarıyla birim zamanda kontrol hacminden dışarıya atılan ekserji (egzoz ekserjisi) her bir yanma ürününün termomekaniksel ve kimyasal ekserjisinin toplamıdır [14] ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$\dot{E}x_{egzoz} = \sum_{i=1}^n \frac{\dot{m}_i}{\mu_i} \{ [\bar{h}_i(T) - \bar{h}_i(T_0)] - T_0 [\bar{s}_i(T) - \bar{s}_i(T_0)] + [x_i \bar{e}x_{kim,i}^0 + \bar{R}T_0 x_i \ln x_i] \} [kW] \quad (7)$$

Yukarıdaki bağıntıda  $\dot{m}_i$  i. yanma ürününün kütleli debisi,  $\bar{h}_i(T)$  [kJ/kmol] ve  $\bar{s}_i(T)$  [kJ/kmol/K] i. yanma ürününün T [K] egzoz sıcaklığındaki özgül entalpisi ve özgül entropisi,  $\bar{h}_i(T_0)$  [kJ/kmol] ve  $\bar{s}_i(T_0)$  [kJ/kmol/K] i. yanma ürününün  $T_0$  [K] çevre sıcaklığındaki özgül entalpisi ve özgül entropisi,  $\bar{e}x_{kim,i}^0$  [kJ/kmol] ve  $\mu_i$  [kg/kmol] i. yanma ürününün standart kimyasal ekserjisi ve mol kütlesi,  $\bar{R}$  (=8,314 kJ/kmol/K) üniversal gaz sabiti olup,  $x_i$  egzoz gazları içindeki i. yanma ürününün molar oranıdır. Yanma ürünlerinin kütleli debisi ve molar oranları tam yanma denkleminin [16] yazılmasıyla belirlenmiştir.



Burada  $\alpha$  hava fazlalık katsayısı ve  $O_{min}$  [kmol $O_2$ /kmol yakıt] stokiyometrik oksijen miktarıdır.

Egzoz gazları dışında motorda (kontrol hacminde) meydana gelen toplam ısı kayıpları kontrol hacmi için enerji dengesinin [17] yazılmasıyla bulunur.

$$\sum_g \dot{E} - \sum_c \dot{E} = dE_{sistem} / dt = \underset{\text{kararlı durumda sürekli akışlı açık sistem}}{0} \quad (8)$$

Motora giren enerji sadece yakıtın yanması sonucu açığa çıkan ısı enerjisidir. Motordan çıkan enerjiler ise efektif motor gücü, egzoz ısı ve toplam ısı kayıplarıdır. Bu durumda birim zamandaki toplam ısı kayıpları aşağıdaki eşitlik ile belirlenebilir:

$$\dot{Q}_{toplam} = \dot{E}_{yakıt} - N_e - \dot{Q}_{egzoz} [kW] \quad (9)$$

Burada, toplam ısı kaybı motor bloğundan ortam havasına transfer edilen ısı enerjisi ile sürtünmeler ve radyasyon gibi diğer belirlenemeyen enerjilerin toplamıdır. Toplam ısı kayıpları ekserjisinin hesaplanmasında aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır [14]:

$$\dot{E}x_{Q_{toplam}} = \left(1 - \frac{T_o}{T_m}\right) \dot{Q}_{toplam} [kW] \quad (10)$$

Burada,  $\dot{Q}_{toplam}$  birim zamandaki toplam ısı kaybı,  $T_o$  [K] ortam sıcaklığı ve  $T_m$  [K] deneysel çalışma sırasında ölçülen motor bloğu ortalama yüzey sıcaklığıdır.

Motora giren yakıt ekserjisinin bir kısmı efektif motor gücüne dönüşmekte, bir kısmı egzoz gazları ve ısı transferiyle kaybedilmekte ve geri kalan kısmı da sistemdeki tersinmezlikler nedeniyle yıkıma uğramakta yani yok olmaktadır. Birim zamanda motorda gerçekleşen toplam ekserji yıkımı (yok olan ekserji) motor için ekserji dengesinin yazılması ile belirlenmiştir. Sistemdeki tersinmezlikler ekserji yıkımına neden olmakta ve yok olan ekserji, yararlı işe dönüştürülemeyen iş potansiyelini temsil etmektedir. Motor için ekserji dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir [15]:

$$\underbrace{\dot{E}x_{yakıt}}_{\text{Motora giren ekserji}} - \underbrace{\dot{E}x_{N_e} - \dot{E}x_{egzoz} - \dot{E}x_{Q_{toplam}}}_{\text{Motordan çıkan ekserji}} - \underbrace{\dot{E}x_{yıkım}}_{\text{Yok olan ekserji}} = 0 \quad (11)$$

Bu eşitlikten  $\dot{E}x_{yıkım}$  çekilerek birim zamanda motorda gerçekleşen toplam ekserji yıkımı belirlenmiştir.

$$\dot{E}x_{yıkım} = \dot{E}x_{yakıt} - \dot{E}x_{N_e} - \dot{E}x_{egzoz} - \dot{E}x_{Q_{toplam}} [kW] \quad (12)$$

Motorlarda ekserji yıkımı yanma, ısı transferi, sürtünme ve karışım oluşumu sırasında meydana gelen tersinmezliklerden kaynaklanır. Motorda meydana gelen ekserji yıkımının önemli bir bölümü yakıtın yanması sırasında oluşan tersinmezlikler nedeniyle gerçekleşmektedir [18] ve bu tersinmezlikler yanma

sırasındaki kimyasal reaksiyonlar, yanma ürünleri ve reaktanların karışması ve soğuk reaktanlarla sıcak ürünler arasında gerçekleşen ısı transferinden kaynaklanmaktadır [14].

Birinci yasa verimi, efektif motor gücünün, birim zamanda motora giren yakıt enerjisine oranıdır ve motora giren yakıt enerjisinin ne kadarının net işe dönüştürüldüğünü belirtir [17]. Motorlar için ikinci yasa verimi, motora giren ekserjinin ne kadarının efektif güce dönüştürüldüğünün bir ölçüsüdür [19]. Motorun birinci ve ikinci yasa verimi aşağıdaki bağıntılardan belirlenmiştir:

$$\eta_U = \frac{N_e}{\dot{E}_{yakıt}} \quad ve \quad \eta_{II} = \frac{N_e}{\dot{E}x_{yakıt}} \quad (13)$$

Daha ayrıntılı bir termodinamik analiz için her bir yakıt kullanımında motorun birim ekserji maliyeti belirlenmiştir. Birim ekserji maliyeti, birim zamanda motora giren yakıt ekserjinin efektif güç ekserjisine oranıdır. Diğer bir ifade ile ekserji veriminin tersidir [20]:

$$C = \frac{\dot{E}x_{yakıt}}{\dot{E}x_{N_e}} \quad (14)$$

Birim ekserji maliyeti ile bir birim efektif güç üretmek için gerekli yakıt ekserjisi belirlenebilir ve yakıtların karşılaştırılmasında önemli bilgiler sağlar [20].

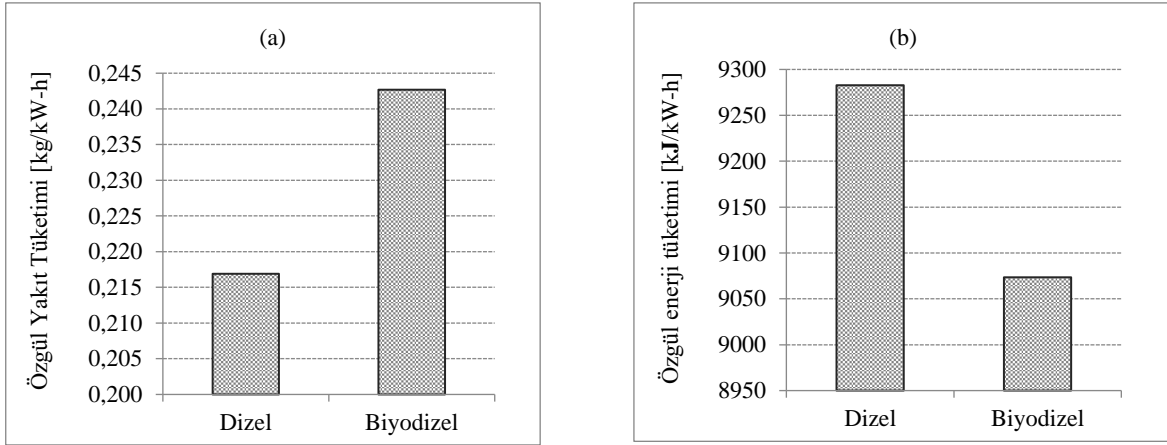
Bu çalışmada, sonuçların anlamlılığını ve güvenilirliğini belirlemek amacıyla ölçülen ve hesaplanan büyüklüklerin belirsizlik analizi kaynak [21]'de önerilen yöntemle yapılmıştır.

$$w_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} w_3\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n\right)^2} \quad (15)$$

Bu bağıntıda,  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  bağımsız değişkenler  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  bağımsız değişkenlerin belirsizliği ve  $w_R$  bağımlı büyüklüğün belirsizliğidir. Özgül yakıt tüketimi, efektif motor gücü, birinci yasa verimi, ikinci yasa verimi ve ekserji yıkımı için maksimum oransal belirsizlikler sırasıyla, %0,6929, %0,6906, %0,6929, %0,6959 ve %1,7792 olarak belirlenmiştir. Bu değerler söz konusu büyüklüklerin ölçümlerinin yeterli duyarlılıkta yapıldığını ve hesaplanan büyüklüklerin güvenilirliğinin iyi olduğunu göstermektedir.

#### 4. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Tam yükte, motorun maksimum efektif verimi ve minimum özgül yakıt tüketimi 2000 d/dk'da elde edildiğinden, termodinamik analiz için bu devir sayısı seçilmiştir. Bu devir sayısında saf dizel yakıtı ve saf mısır yağı biyodizeli kullanılarak motorun performans parametreleri ve termodinamik detayları belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar her bir yakıt kullanımı için karşılaştırılmıştır. Şekil 4a'da dizel yakıtı ve biyodizel için motorun özgül yakıt tüketimi verilmiştir. Motorda sırasıyla dizel yakıtı ve mısır yağı biyodizeli kullanıldığında motorun özgül yakıt tüketimi 0,2169 kg/kW-h ve 0,2427 kg/kW-h olarak belirlenmiştir. Dizel yakıtına göre %6,34 oranında daha yüksek yoğunluğa ve %6,97 oranında (hacimsel bazda) daha düşük ısı değere sahip olan mısır yağı biyodizeli, motorun özgül yakıt tüketimini dizel yakıtına göre %11,89 oranında artırmıştır. Ancak yakıtların enerji içeriği (ısı değeri) farklı olduğundan daha etkili bir değerlendirme yapmak amacıyla her bir yakıt kullanımında motorun özgül enerji tüketiminin karşılaştırılması gerekmektedir. Bu karşılaştırma grafiksel olarak Şekil 4b'de verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi deney motorunda yakıt olarak biyodizel kullanıldığında birim efektif güç için daha az yakıt enerjisi tüketilmektedir. Dizel yakıtı kullanımına göre aynı efektif motor gücünü elde etmek için motor biyodizel ile çalıştırıldığında dizel yakıtına göre %2,25 oranında daha az yakıt enerjisi gerekmektedir. Şekil 6a'da da görüleceği gibi biyodizel kullanımında motorun birinci yasa veriminin (efektif verimin) artması bu durumu destekler niteliktedir. Biyodizel kullanımında böyle bir durumunu ortaya çıkması, mısır yağı biyodizelinin oksijen içeriği sayesinde yanma veriminin artmasından kaynaklandığı söylenebilir. Ayrıca biyodizelin kükürt içeriği olmamasına rağmen yağlayıcılık özelliğinin dizel yakıtına göre daha iyi olması, mekanik sürtünmeleri azaltarak, mekanik sürtünmelere harcanacak olan gücün efektif güç olarak kazanılmasını sağladığı düşünülmektedir. Bu durum motorun mekanik verimiyle de açıklanabilir. Deney motorunda dizel yakıtı ve mısır yağı biyodizeli kullanıldığında motorun mekanik verimi sırasıyla %82,57 ve %83,61 olarak belirlenmiştir.

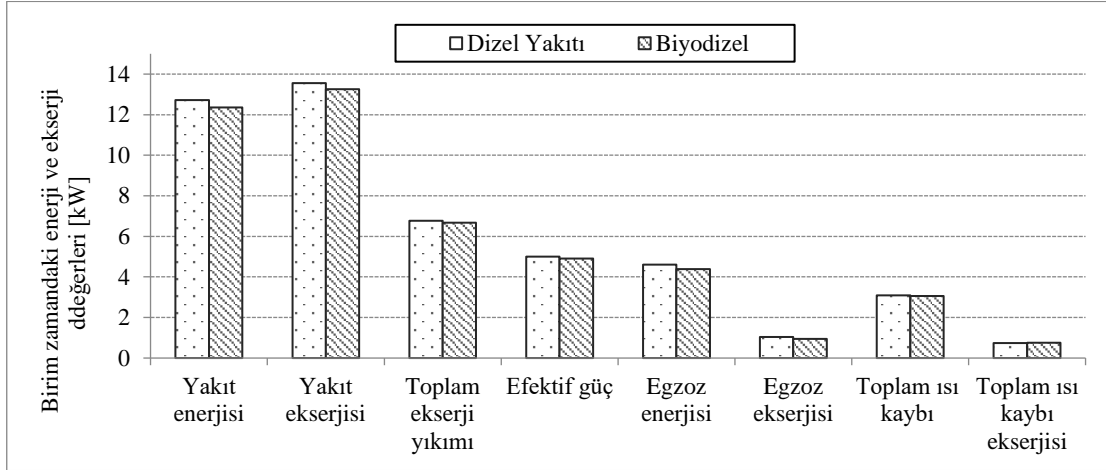


**Şekil 4.** Test yakıtları için motorun özgül yakıt tüketimi (a) ve özgül enerji tüketimi (b) (Specific fuel consumption (a) and specific energy consumption (b) for test fuels)

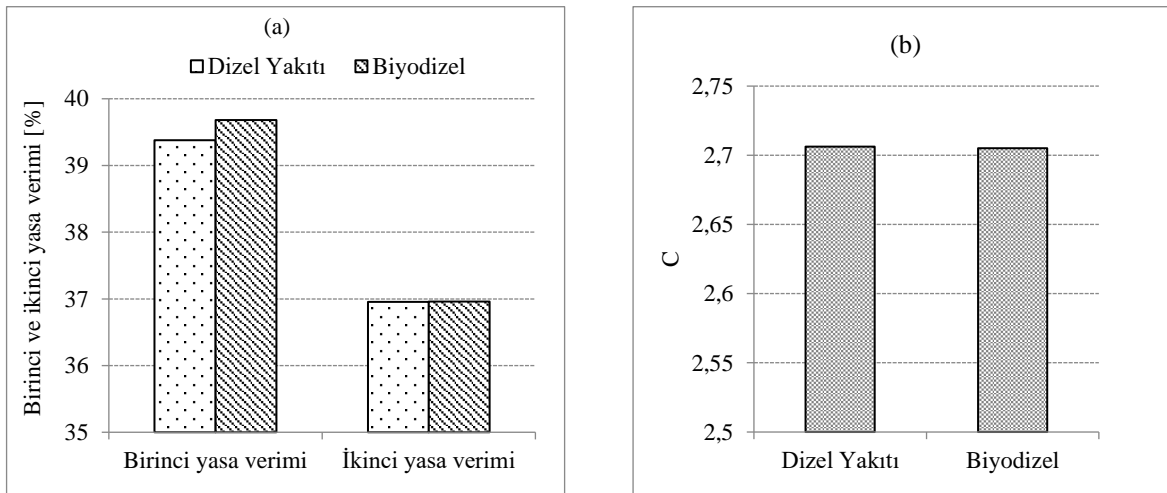
Şekil 5'te dizel yakıtı ve biyodizel için birim zamandaki enerji ve ekserji bileşenlerinin değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yüksek ısıl değerinden dolayı dizel yakıtı kullanımında silindire daha fazla yakıt enerjisi ve yakıt ekserjisi girmiştir. Ancak biyodizelin yüksek yoğunluğa sahip olması nedeniyle biyodizelin hacimsel ısıl değeri artmıştır. Dolayısıyla mekanik püskürtme sistemine sahip test motorunda mısır yağı biyodizeli kullanıldığında dizel yakıtına göre silindire birim zamanda sırasıyla %2,87 ve %2,14 oranında daha az yakıt enerjisi ve yakıt ekserjisi girmiştir. Ayrıca biyodizelin kimyasal ekserji katsayısının dizel yakıtına göre daha yüksek olması yakıt ekserjileri arasındaki farkı daha da azaltmıştır. Dizel yakıtı ve mısır yağı biyodizeli için motorda gerçekleşen toplam ekserji yıkımı ve elde edilen efektif güç değeri karşılaştırıldığında, dizel yakıtına göre ısıl değerinin düşük (%6,97) ve kinematik viskozitesinin yüksek (%35,84) olması nedeniyle biyodizel kullanımında %2,13 oranında daha az efektif motor gücü elde edilmiştir. Ancak biyodizel kullanımında tersinmezlikler nedeniyle motorda gerçekleşen toplam ekserji yıkımının sayısal değeri, dizel yakıtına göre % 1,48 oranında daha azdır. Mısır yağı biyodizelinin kütlece %10,98 oranında oksijen içermesi ve setan sayısının yüksek olması daha verimli bir yanmanın gerçekleşmesinde etkili olduğu [18] ve bu nedenle ekserji yıkımının azaldığı söylenebilir. Ayrıca biyodizelin yağlama özelliğinin iyi olması mekanik yakıt pompası ve yakıt sisteminin geri kalan kısmındaki sürtünmeleri azaltarak ekserji yıkımının daha düşük değerler almasını sağladığı düşünülmektedir. Dizel ve biyodizel yakıtı için motorda gerçekleşen toplam ekserji yıkımı, efektif motor gücü değerinden sırasıyla %35,19 ve %36,14 oranında daha yüksektir. Bu nedenle motorun efektif gücünü arttırmak için motordaki ekserji yıkımının azaltılması gerekmektedir. Yine Şekil 5'te motorda kullanılan her iki yakıt için egzoz enerjisi, toplam ısı kaybı ve bu enerjilerin kullanılabilirlikleri verilmiştir. Dizel yakıtı kullanımında egzoz gazları sıcaklığı daha yüksek (%5,25) olduğundan biyodizele göre %5,02 oranında daha fazla enerji egzoz yoluyla atmosfere atılmıştır. Toplam ısı kayıpları bakımından yakıtlar arasında kayda değer bir farkın olmadığı görülmüştür. Ancak birim zamandaki toplam ısı kayıpları ve egzoz enerjisinin yararlı iş potansiyeli şekilden de görüleceği gibi oldukça düşüktür. Bu enerjilerin birim zamandaki faydalı iş potansiyeli her iki yakıt için de 1 kW'tan azdır.

Şekil 6a'da motorun birinci ve ikinci yasa veriminin kullanılan yakıtlara göre değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi biyodizel kullanımında motorun birinci yasa verimi dizel yakıtı kullanımına göre %0,76 oranında artmakta ancak motorun ikinci yasa verimi her iki yakıt içinde aynı olmaktadır. Tam yükte ve 2000 d/dk'da dizel ve biyodizel kullanımıyla motorun birinci ve ikinci yasa verimi sırasıyla %39,38, %39,68 ve %36,95, %36,96 olarak belirlenmiştir. Yüksek viskozitesine rağmen biyodizel kullanımında ekserji yıkımının azalması motorun ikinci yasa verimini iyileştirmiştir. Ancak her bir yakıt için aynı efektif güce karşılık harcanan yakıt ekserjisinin harcanan yakıt enerjisinden fazla olması, ikinci yasa veriminin birinci yasa verimine göre daha düşük olmasına neden olmuştur. İkinci yasa verimini hesaplamak için literatürde egzoz ekserjisi ve diğer ekserji kayıplarını dikkate alan bağıntılar mevcuttur [15]. Fakat bu çalışmada kayıp ekserjilerden (egzoz gazları ve toplam ısı kayıplarıyla gerçekleşen ekserji kaybı) faydalanılmadığı için motorun ikinci yasa verimi fayda sağlanan tek ekserji bileşeni olan efektif motor gücünün yakıt ekserjisine oranı şeklinde tanımlanmıştır.

Motorun birim ekserji maliyetinin kullanılan yakıtlara göre değişimi Şekil 6b’de verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi her iki yakıt için birim ekserji maliyeti aynı olmaktadır. Yani bu yakıtların kullanımıyla motordan elde edilen 1 birim efektif güç için 2,71 birim yakıt ekserjisi harcanmıştır. Bu oranın artırılması için ekserji yıkımının azaltılması, egzoz gazları ve toplam ısı kayıplarıyla kaybedilen bir miktar enerjinin geri kazanılması gerekir.



Şekil 5. Test yakıtları için birim zamandaki enerji ve ekserji değerleri (Energy and exergy rates for test fuels)



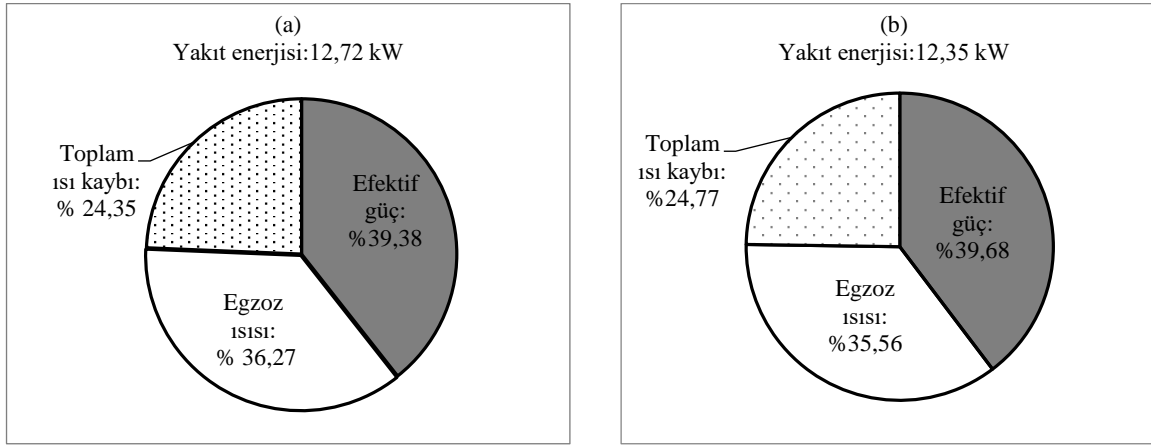
Şekil 6. Motorun birinci ve ikinci yasa verimi (a) ile birim ekserji maliyeti (b) (First and second law efficiencies (a), and unitary exergetic cost (b) of the engine for test fuels)

Şekil 7a ve 7b’de dizel yakıtı ve biyodizel kullanımında enerji bileşenlerinin yakıt enerjisine göre yüzdelik dağılımı verilmiştir. Dizel yakıtı ve biyodizel kullanımında birim zamanda silindire giren yakıt enerjisinin sırasıyla %60,62’si ve %60,33’ü egzoz gazları ve diğer kayıplarla motordan çıkmakta, geriye kalan yakıt enerjisinin %39,38’si ve %39,68’i efektif motor gücüne dönüşmektedir. Deney sisteminde motordan kayıp olarak çıkan bu enerjilerden hiçbir şekilde faydalanılmamaktadır. Oysa motorun verimi kayıp bu enerjiler turboşarj, egzoz gazı ile çalışan absorpsiyonlu soğutma sistemi, ön ısıtma, termoelektrik jeneratör gibi sistemlerde kullanılarak artırılabilir.

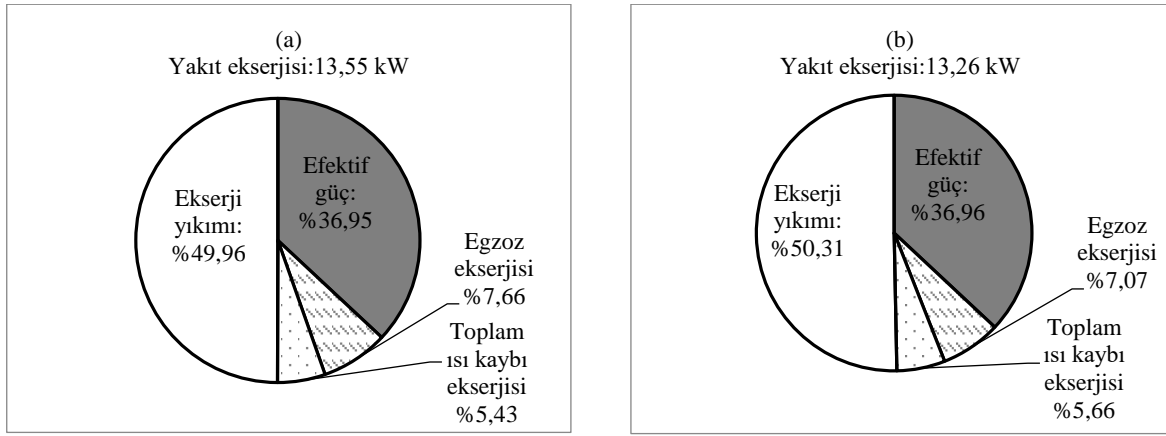
Şekil 8a ve 8b’de dizel yakıtı ve biyodizel kullanımında ekserji bileşenlerinin yakıt ekserjisine göre yüzdelik dağılımı verilmiştir. Egzoz gazları ve toplam ısı kayıplarıyla motordan çıkan toplam ekserji kaybı dizel yakıtı ve biyodizel için sırasıyla yakıt ekserjilerinin %13,09’u ve %12,73’ü olmaktadır. Dizel yakıtı ve biyodizel kullanımında motorda gerçekleşen toplam ekserji yıkımı yakıt ekserjilerinin sırasıyla



%49,96'sı ve %50,31'i olarak gerçekleşmiştir. Motordaki mevcut tersinmezliklerin yol açtığı ekserji yıkımı, yakıt ekserjisinin yaklaşık olarak yarısı kadar bir iş potansiyelinin kaybedilmesine neden olmuştur. Gerçekten, motordaki tersinmezliklerin tamamı yok edilemez. Ancak bazı önlemleri almak suretiyle ekserji yıkımı azaltılarak motor performansı artırılabilir. Fakat ekserji yıkımını azaltmak için alınan önlemler diğer ekserji kayıplarını (ısı ve egzoz gazlarıyla transfer edilen ekserjiyi) arttırabileceğinden efektif güçte, azaltılan ekserji yıkımı kadar artış elde edilemez. Dolayısıyla motorun termodinamik verimini daha da arttırmak için ekserji yıkımını azaltacak önlemleri almakla birlikte kayıp ekserjilerin de geri kazanılması gerekmektedir [22].



Şekil 7. Dizel yakıtı (a) ve biyodizel (b) kullanımında enerji bileşenlerinin yakıt enerjisine göre dağılımı (Energy distribution for diesel (a) and biodiesel (b))



Şekil 8. Dizel yakıtı (a) ve biyodizel (b) kullanımında ekserji bileşenlerinin yakıt ekserjisine göre dağılımı (Exergy distribution for diesel (a) and biodiesel (b))

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Sunulan bu çalışmada mısır yağı biyodizelinin tam yük (%100) ve 2000 d/dk çalışma şartında, tek silindirli bir dizel motorunun performansına etkisi termodinamik açıdan incelenmiştir. Elde edilen bulguları karşılaştırmak için petrol kökenli dizel yakıtı referans yakıt olarak seçilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre motorda yakıt olarak mısır yağı biyodizeli kullanıldığında motorun özgül yakıt tüketiminin arttığı ancak özgül enerji tüketiminin azaldığı, birim zamanda daha az ekserji yıkımına yol açtığı ve motorun birinci yasa veriminin arttığı görülmüştür. Her iki yakıt kullanımında motorun ikinci yasa veriminde ve birim ekserji maliyetinde önemli bir farklılık belirlenmemiştir. Motora giren yakıt enerjisinin yaklaşık olarak %60'ı egzoz gazları ve diğer kayıplarla motordan atıldığı, ancak kayıp bu enerjilerin birim zamandaki toplam yararlı iş potansiyelinin 1,7 kW'tan daha az olduğu hesaplanmıştır. Biyodizel kullanımında motorun efektif verimi %0,76 oranında artmıştır. Verimdeki bu artış oranı küçük olmasına rağmen küresel çapta yakıt tüketiminin ve zararlı egzoz emisyonlarının azaltılmasında büyük bir etkiye sahip olacağı açıktır.

**SEMBOLLER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)**

$C$	: Birim ekserji maliyeti
$\dot{E}$	: Birim zamandaki enerji [kW]
$\dot{E}_x$	: Birim zamandaki ekserji [kW]
$\bar{h}$	: Özgül entalpi [kJ/kmol]
$\dot{m}$	: Kütleli debi [kg/s]
$N_e$	: Efektif motor gücü [kW]
$\bar{s}$	: Özgül entropi [kJ/kmol/K]
$\dot{OYT}$	: Özgül yakıt tüketimi [kg/kW-h]
$\dot{Q}$	: Birim zamandaki ısı [kW]
$T$	: Sıcaklık [°C veya K]
$x$	: Molar oran
$y$	: Kütleli oran
$\eta$	: Verim

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Reitz, R.D., "Directions in Internal Combustion Engine Research", *Combustion and Flame*, 160, 1-8, 2013.
- [2] Ghaudhari, S.G., Modi, M.A., Patel, T.M. and Rathod, G.P., "Exergy Analysis of Compression Ignition Engine Using Biodiesel Blend: Effect of Compression Ratio and Injection Pressure, *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, 6, 13-19, 2016.
- [3] Shukla, P.C., Gupta, T., Labhsetwar, N.K. and Agarwal, A.K., "Trace metals and ions in particulates emitted by biodiesel fuelled engine", *Fuel*, 188, 603-609, 2017.
- [4] Sharma, Y.C. and Singh, V., "Microalgal Biodiesel: A possible solution for India's energy security", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 72-88, 2017.
- [5] Mojifur, M., Rasul, M.G. and Hyde, J., "Recent Developments on Internal Combustion Engine Performance and Emissions Fuelled with Biodiesel-Diesel-Ethanol Blends", *Procedia Engineering*, 105, 568-664, 2015.
- [6] Ghazali, W.N.M.W., Mamat, R., Masjuki, H.H. and Najafi G., "Effects of biodiesel from different feedstock on engine performance and emissions: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 585-602, 2015.
- [7] Kumar, N., Varun, Chauhan, S.R., "Performance and emissions characteristics of biodiesel from different origins: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 633-658, 2013.
- [8] Lin, B. F., Huang, J.H. and Huang, D.Y., "Experimental study of the effects of vegetable oil methyl ester on DI diesel engine performance Characteristics and pollutant emissions, *Fuel*, 88, 1779-1785, 2009.
- [9] Fazal, M.A., Haseeb, A.S.M.A. and Masjuki, H.H., "Biodiesel Feasibility Study: An Evaluation of Material Compatibility; Performance; Emission and Engine Durability", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1314-1324, 2011.

- [10] Rosen, M. A. and Dincer, I., "Exergy as the Confluence of Energy, Environment and Sustainable Development", *International Journal of Exergy*, 1, 3-13, 2001.
- [11] Gülüm, M., Bilgin, A. ve Çakmak, A., "Sodyum hidroksit (NaOH) ve Potasyum hidroksit (KOH) Kullanılarak Üretilen Mısır Yağı Biyodizellerinin Optimum Reaksiyon Koşullarının Karşılaştırılması", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30 (3), 503-511, 2015.
- [12] Canakcı, M., "Combustion Characteristics of a Turbocharged DI Compression Ignition Engine Fuelled With Petroleum Diesel Fuels and Biodiesel", *Biosource Technology*, 98, 1167-1175, 2007.
- [13] Kopac, M. and Kokturk, L., "Determination of Optimum Speed of an Internal Combustion Engine by Exergy Analysis", *International Journal of Exergy*, 2(1) 40-52, 2005.
- [14] Kotas, T. J., "The Exergy Method of Termal Plant Analysis", Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1995.
- [15] Çakmak, A., "Yakıt Olarak Biyodizel-Dizel Yakıtı Karışımlarının Kullanıldığı Tek Silindirli bir Dizel Motoruna Ekserji Analizinin Uygulanması", Yüksek lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.
- [16] Durgun, O., "Motor Termodinamiği Ders Notları", Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, (Basılmamış), 2010.
- [17] Çengel, Y., A. ve Boles, M., A., "Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik", Editör Pınarbaşı, A., Yedinci Baskı, Palme Yayıncılık, Ankara, 2013.
- [18] Jena, J. and Misra, R. D., "Effect of Fuel Oxygen on the Energetic and Exergetic Efficiency of a Compression Ignition Engine Fuelled Separately with Palm and Karanja Biodiesels", *Energy*, 68, 411-419, 2014.
- [19] Rakopoulos, C.D. and Giakoumis E.G. "Second Law Analysis Applied to Internal Combustion Engines Operation", *Progress in Energy Combustion Science*, 32, 2-47. 2006.
- [20] López, I., Quintana, C. E., Ruiz, J.J., Cruz-Peragón, F. and Dorado, M.P., "Effect of the Use of Olive-Pomace Oil Biodiesel/Diesel Fuel Blends in a Compression Ignition Engine: Preliminary Exergy Analysis", *Energy and Conversion Management*, 85, 227-233, 2014.
- [21] Holman, P., "Experimental Methods for Engineers", 8th Edition, McGraw-Hill, New York, USA, 2012.
- [22] Fu, J., Liu, J., Feng, R., Yang, Y., Wang, L. and Wang, Y., "Energy and Exergy Analysis on Gasoline Engine Based on Mapping Characteristics Experiment", *Applied Energy*, 102, 622-630, 2013.