



İnsansız Hava Araçlarında Kullanılan Turbo Dizel Bir Havacılık Motorunun Enerji, Ekserji ve Ekserjiekonomik Performansının Değerlendirilmesi

Özgür Ballı¹

ÖZ

Bu çalışmada; enerji, ekserji ve eksergo-ekonomik analiz yöntemleri kullanılarak insansız hava araçları için kullanılan turbodizel bir havacılık motorunun performans doğrulaması yapılmıştır. Motorun enerji verimi %43.158, ekserji verimi ise %40.655 olarak bulunmuştur. Motorun yakıt enerjisi kayıp oranı %56.842 iken yakıt ekserji kayıp oranı %59.345 olarak hesaplanmıştır. Turbodizel motorun çevresel etki faktörü 1.460, ekolojik etki faktörü 2.460, ekolojik objektif fonksiyon değeri -227.173 MJ/h, ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 0.685 ve sürdürülebilir verimlilik faktörü ise 1.685 olarak elde edilmiştir. Turbodizel motorun ekonomik ve eksergo-ekonomik analiz sonuçlarına göre; güç üretimi için toplam maliyet akışı 47.035 \$/h ve üretilen gücün özgül ekserji maliyeti 0.095 \$/MJ olarak hesaplanmıştır. Diğer yandan motorun yakıt maliyeti ile üretim maliyeti arasındaki bağıl maliyet artışı %248.655, sistemin eksergo-ekonomik faktörü %16.346 olarak bulunmuştur. Ayrıca bu çalışmada, turbodizel havacılık motoru ile piston-prop havacılık motorunun performans kriterleri de karşılaştırılmıştır. Turbodizel motorun tüm performans parametrelerinin, piston-prop motorun parametrelerinden çok daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: IHA, turbodizel motoru, enerji, ekserji, eksergo-ekonomik

Energy, Exergy and Exergoeconomic Performance Assessments Of A Turbo Diesel Aviation Engine Used On Unmanned Air Vehicles

ABSTRACT

In this study, the performance of a turbodiesel aviation engine used in unmanned aerial vehicles was evaluated using energy, exergy, and exergoeconomic analyses methods. The engine's energy efficiency was 43.158%, while its exergy efficiency was 40.655%. When the engine's fuel energy loss rate was 56.842%, the fuel exergy loss rate was calculated to be 59.345%. The environmental impact factor, ecological impact factor, ecological objective function, exergetic sustainability index, and sustainable efficiency factor of a turbodiesel engine were calculated to be 1.460, 2.460, -227.173 MJ/h, 0.685, and 1.685, respectively. According to the results of the turbodiesel engine's economic and exergo-economic analyses, the total cost flow for power generation was calculated to be 47.035 \$/h, and the specific exergy cost of the generated power was calculated to be 0.095 \$/MJ. The relative cost increasing (relative cost difference) between the engine's fuel cost and the production cost was found to be 248.655% and the system's exergoeconomic factor was found to be 16.346%. Furthermore, the performance criteria of the turbodiesel aviation engine and the piston-prop aviation engine were compared in this study. The turbodiesel engine's performance parameters were determined to be significantly better than those of the piston-prop engine.

Keywords: UAV, turbodiesel engine, energy, exergy, exergoeconomic

Geliş/Received : 01.05.2022
Kabul/Accepted : 17.05.2022

¹ 1'inci Hava Bakım Fabrika Müdürlüğü, Eskişehir
balli07balli@yahoo.com, ORCID: 0000-0001-6465-8387



EXTENDED ABSTRACT

Introduction and Objectives

UAVs (unmanned aerial vehicles) are widely employed in both military and civilian applications. However, because of the rapid increase in environmental impacts and fuel prices as a result of increased fossil fuel usage, UAV manufacturers have begun to adopt hybrid and electric motors as propulsion systems. Fuel consumption in UAVs can be lowered by using these propulsion technologies. On the other side, engine efficiency should be enhanced while cost generation and environmental impacts of engines are minimized for a cost-effective and ecologically friendly UAV propulsion system. To achieve these objectives, it is necessary to run the engine in the most efficient mode, pick high-quality fuel, reduce fuel consumption and loss and destruction rates, and minimize metrics such as the capital cost ratio. In this situation, energy, exergy, and exergoeconomic evaluations, as well as sustainability and environmental assessments, are critical for evaluating the performance of UAV engines and developing optimization models.

Methodology and Analysis

The turbodiesel aviation engine is first analyzed as a thermodynamic system in this study, and the control volume, inlet and outlet flows, balance equations, and dead state conditions of the system are determined as a result. Then, using thermodynamic principles, the thermodynamic system is represented. According to the study's scope, the energy and exergy equations are supplied. Following that, certain useful performance indicators about energy, exergy, environmental, sustainability, and exergoeconomic assessments are accounted for utilizing data from turbodiesel aviation engines. The performance parameters of a turbodiesel aircraft engine are compared to those of a piston-prop aviation engine, which was previously researched.

Results and Discussions

In this work, energy, exergy, and exergoeconomic analysis methodologies were utilized to evaluate the performance of a turbodiesel aviation engine used for unmanned aerial vehicles. The engine had 43.158% energy efficiency and 40.655% exergy efficiency. The fuel exergy waste flow was computed as 59.345% when the engine's fuel energy loss flow was 56.842%. The environmental impact factor, ecological impact factor, ecological objective function, exergetic sustainability index, and sustainable efficiency factor of turbodiesel engines are found to be 1.460, 2.460, -227.173 MJ/h, 0.685, and 1.685. According to the results of the turbodiesel engine's economic and exergoeconomic assessments, the overall cost flow for power generation is 47.035 \$/h, and the specific exergy cost of the generated power is 0.095 \$/MJ. The relative cost rise between the engine's fuel cost and the production cost, on the other hand, was found to be 248.655%, and the system's exergoeconomic factor was discovered to be 16.346%. Furthermore, the performance criteria of the turbodiesel aviation engine and the piston-prop aviation engine were examined in this study. The turbodiesel engine's performance metrics were all significantly superior than the piston-prop engine's.



1. GİRİŞ

İnsansız hava araçları (İHA) gözetim, uzaktan ölçümlendirme, arama-kurtarma işlemlerini de kapsayacak şekilde hem askeri hem de sivil amaçlar için kullanılmaktadır [1-3]. Düşük idame-işletme-bakım maliyetinden ve kullanıcı personel için minimum risk oluşturduğundan dolayı İHA'ların askeri amaçlı kullanımı son yıllarda artmıştır [4]. Daha düşük maliyetli ve daha verimli İHA tasarımı; performansın, uçuş karakteristiklerinin ve taşıdığı yükün artırılmasıyla daha da önemli bir hale gelmiştir. Bu tip İHA'lar için son zamanlarda artan talep; çok farklı tiplerdeki İHA'ların geliştirilmesine neden olmuştur [5-8].

İHA'ların itki sistemleri teknolojisi, havacılığın en önemli gelişimlerinden biridir. İHA'ların itki sistemleri uçuş performansını ve süresini yüksek oranda etkilemektedir. Yapay zekâ ve mikroişlemci teknolojilerindeki hızlı gelişmeler İHA'ların karmaşık görevlerin yerine getirmesini kolaylaştırmış ve İHA'ların büyük ilgi görmesine neden olmuştur [9]. Kullanım kolaylığı, güvenliği, düşük maliyeti ve çevre dostu özelliklerine ilaveten tehlikeli, uzun menzilli ve uzun süreli askeri ve sivil görevleri başarı ile yerine getirdiğinden dolayı, İHA'ların son yıllarda pazar payı çok artmıştır [10-11]. Dünyanın her yerinde farklı görev gereksinimlerini karşılamak amacıyla farklı İHA teknolojilerinin geliştirilmesi de bu sektörün için büyük önem arz etmektedir [12].

İHA'ların itki sistemleri enerji kaynakları, motorlar ve güç ünitelerinden oluşur [13]. İtki sistemleri; elektrik, hibrit ve içten yanmalı motorlar (pistonlu, gaz türbinli ve ramjet) olmak üzere üç sınıfa ayrılır. Konvansiyonel yakıt kullanan itki sistemleri kullanılan İHA'lar yüksek yük taşıma kapasitesi, uzun süreli dayanıklılık, uzun menzil ve hızlı yakıt ikmali avantajlarına sahiptir [14].

Küresel ölçekte fosil yakıt fiyatlarının artması ve fosil yakıt kullanımı konusunda çevresel farkındalık seviyesinin yükselmesi; genel olarak havacılık sektörünün, özel olarak ise motor üreticilerinin yakıt sarfiyatını azaltmaları ve karbon ayak izini düşürmeleri konusunda çalışmalar yapmalarını zorunlu kılmaktadır [15]. Bu kapsamda; İHA üreticilerini hibrit ve elektrik motorlarından oluşan itki sistemleri geliştirmeye ve kullanmaya yönlendirmiştir. Bu itki sistemlerin kullanılmasıyla birlikte İHA'larda %30 oranında yakıt tüketimi düşürülmüştür [16]. İHA'larda kullanılan itki sistemleriyle ilgili yapılan tüm çalışmalar Zhang ve diğerleri [17] tarafından yapılan çalışmada özetlenmiştir.

Bu çalışmada, enerji, ekserji, ve ekserjiekonomik analiz yöntemleriyle İHA'larda kullanılan bir turbodizel havacılık motorunun performans doğrulanması yapılmıştır.

2. MATERYAL

Bu çalışmada insansız hava araçlarında kullanılan 170 beygir shaft gücü (HP) ile 2x4.5 kilovat (kW) elektriksel güç üreten bir turbodizel havacılık motoru incelenecek olup,

Tablo 1. Turbodizel Havacılık Motoru Bilgileri [18]

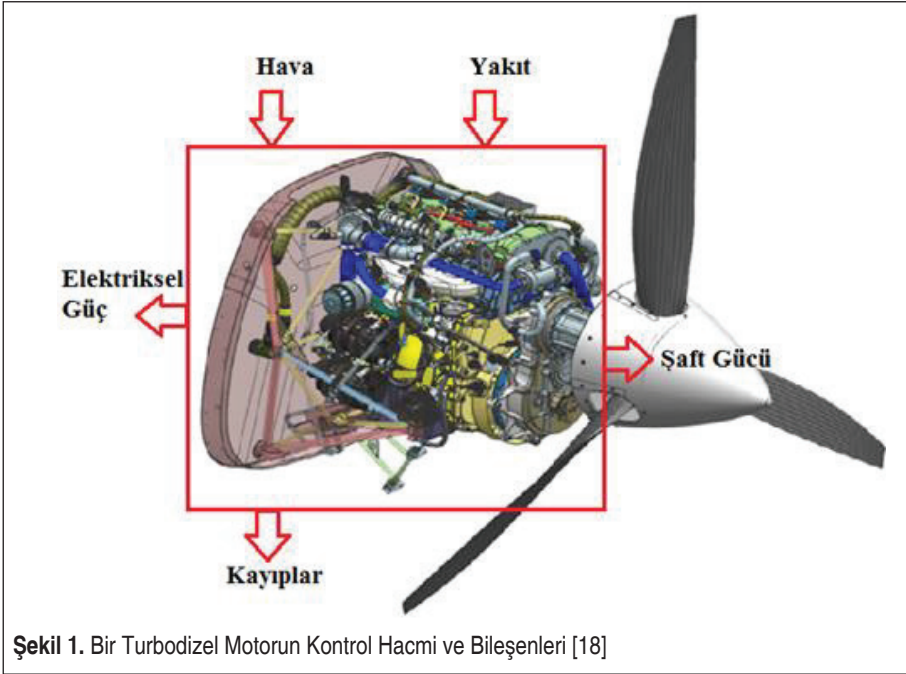
Açıklama	Bilgi/Değer
Motor konfigürasyonu	Sıralı 4 silindir
Silindir hacmi	2.1 litre
Hava besleme	İki kademe seri turboşarj
Kalkış gücü	172 (+2) HP veya 128.26 kW (1.49+- kW)
Sürekli güç @2300 propeller RPM	172 (+2) HP
İrtifa gücü @ 20000 ft (6096 metre)	170 HP veya 128.26 kW
İrtifa gücü @ 30000 ft (9144 metre)	130 HP veya 96.94 kW
Özgül yakıt tüketimi (BSFC@MSL-deniz seviyesi)	207 g/kWh (+3)
Yakıt	JP-8 veya Jet-A1 jet yakıtı
Motor kuru ağırlığı	162 kg
Motor kontrolü	Yedekli motor kontrol sistemi (MKS)
Takıldığı uçak konfigürasyonu	İtici ve çekici
Pervane kontrolü	MKS kontrollü hidromekanik governor
Elektriksel güç üretimi	2x4.5 kW
MKS yazılımı ve alternatör kontrolü	DO-178C DAL-C sertifikaya edilebilir

turbodizel motora ait teknik bilgiler Tablo 1’de sunulmuştur [18]. Motorun satış fiyatı 50000 \$ olup motorun revizyon bakım aralığı 3600 saat (h)’tir [19].

3. YÖNTEM VE ANALİZ

Bu çalışmada, insansız hava araçlarında kullanılan turbodizel motor termodinamik bir sistem olarak ele alınmış olup, kontrol hacmi Şekil 1’de gösterilmiştir. Kontrol hacminde de gösterildiği üzere; motora hava ve yakıt girerken, motor pervaneyi döndürmek için shaft gücü ve elektriksel ihtiyaçları karşılamak için elektriksel güç üretmektedir. Motordan atılan egzoz gazları ve yüzeyden çevreye olan ısı transferi ile enerji kayıpları meydana gelmektedir.

Termodinamik bilimi çerçevesinde motor sürekli akışlı-sürekli açık (SASA) bir sistem olarak ele alınmıştır. Kontrol hacmine (motora) giren toplam kütle akışı, kontrol hacminden çıkan toplam kütle akışına eşit olup, kontrol hacmindeki toplam kütle sabit olup zamanla değişmemektedir. Bu çalışma için aşağıdaki kabuller yapılmıştır:



- Çevre sıcaklığı 298.15 Kelvin (K) ve çevre basıncı 101.325 kPa'dır.
- Jet yakıtının alt ısıl değeri 43124 kJ/kg olup, basit kimyasal formülü $C_{12}H_{23}$ 'dür.
- Tüm incelemeler motorun maksimum kalkış çalışma koşulları değerlerine göre yapılmıştır.
- Motor yıllık uçuş saati 900 saattir.
- Motorun servis ömrü 20 yıldır.
- Motorun yıllık idame-işletme-bakım maliyeti, motor satış fiyatının %10'u kadar olup, motor hurdaya ayrılacağındaki hurda değeri motor satış fiyatının %15'i kadardır.
- Yıllık faiz %14 alınmıştır.
- Jet A-1 yakıtının satış fiyatı 1.245 \$/kg (1245 \$/metrik ton)'dır [20].

3.1 Enerji analizi

Termodinamiğin enerji korunumu kanuna göre; motora giren yakıt enerjisi motordan çıkan toplam enerji miktarına eşittir. Motordan çıkan toplam enerji; yararlı motor işinden (şaft gücü ve elektriksel güç) ve enerji kayıplarından (egzoz gazları ile atılan enerji ve yüzeyden ısı ile atılan enerji) oluşur. Bu tanıma uygun bir şekilde;

Yakıt (F)-Ürün(Pr) yaklaşımına göre enerji korunumu denklemi [21-24]:



$$\dot{E}_F = \dot{E}_{Pr} + \dot{E}_{WE} \quad (1)$$

$$\dot{E}_F = \dot{m}_F LHV \quad (2)$$

$$\dot{E}_{Pr} = \dot{W}_{saft} + \dot{W}_{el} \quad (3)$$

Bu denklemlerdeki \dot{E}_F , \dot{m}_F , LHV , \dot{E}_{Pr} , \dot{E}_{WE} , \dot{W}_{saft} ve \dot{W}_{el} ; yakıt enerji akışı, yakıt tüketimi, yakıtın alt ısıl değeri, ürün enerji akışı, enerji kaybı, şaft gücü ve elektriksel gücü ifade etmektedir.

Motorun enerji performansı aşağıdaki verilen performans parametrelerinden tespit edilmektedir [21-24].

Motorun enerji verimi;

$$\eta_{en} = \frac{\dot{E}_{Pr}}{\dot{E}_F} \quad (4)$$

Yakıt enerjisi kayıp oranı:

$$FELR = \frac{\dot{E}_{WE}}{\dot{E}_F} \quad (5)$$

Üretim enerjisi kayıp oranı:

$$PELR = \frac{\dot{E}_{WE}}{\dot{E}_{Pr}} \quad (6)$$

Bu denklemlerdeki η_{en} , $FELR$, ve $PELR$; enerji verimi, yakıt enerjisi kayıp oranı ve üretim enerjisi kayıp oranıdır.

3.2 Ekserji Analizi

Belirli çevre koşulları altında bir sistemin yapabileceği maksimum yararlı işe, o sistemin ekserji denir. Bir sistem için enerji korunurken, ekserji sistem içerisindeki entropi üretiminden ve çevreye olan kayıplardan dolayı korunamaz. Yakıt (F)-ürün(Pr) yaklaşımına göre bir sistem için ekserji denge denklemi [21-24]:

$$\dot{E}x_F = \dot{E}x_{Pr} + \dot{E}x_{WE} \quad (7)$$

$$\dot{E}x_F = \dot{m}_F \varepsilon_F = \dot{m}_F LHV \phi \quad (8)$$

$$\dot{E}x_{Pr} = \dot{W}_{saft} + \dot{W}_{el} \quad (9)$$

Bu denklemlerdeki $\dot{E}x_F$, \dot{m}_F , ε_F , LHV , ϕ , $\dot{E}x_{Pr}$, $\dot{E}x_{WE}$, \dot{W}_{saft} ve \dot{W}_{el} ; yakıt ekserji



akışı, yakıt tüketimi, özgül yakıt ekserjisi, yakıtın alt ısıl değeri, yakıt ekserjisi kalite indeksi, ürün ekserji akışı, toplam ekserji kaybı (yıkımlar ve kayıplar) akışı, shaft gücü ve elektriksel gücü ifade etmektedir. Yakıtın ekserji kalite indeksi (ϕ) aşağıdaki ifadeden hesaplanabilir [21, 22, 25]:

$$\phi = 1.4224 + 0.011925 \frac{b}{a} - \frac{0.042}{a} \quad (10)$$

Jet yakıtı ($C_{12}H_{23}$) için ϕ ; denklem (10)'dan 1.0616 olarak hesaplanmıştır.

Motorun ekserji performansı, aşağıdaki verilen performans parametreleriyle belirlenmektedir [21-24].

Motorun ekserji verimi;

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{xPr}}{\dot{E}_{x_F}} \quad (11)$$

Yakıt ekserjisi kayıp oranı:

$$FExLR = \frac{\dot{E}_{x_{WE}}}{\dot{E}_{x_F}} \quad (12)$$

Üretim ekserjisi kayıp oranı:

$$PExLR = \frac{\dot{E}_{x_{WE}}}{\dot{E}_{x_{Pr}}} \quad (13)$$

Bu denklemlerdeki η_{ex} , $FExLR$, ve $PExLR$; ekserji verimi, yakıt ekserjisi kayıp oranı, üretim ekserjisi kayıp oranını ifade etmektedir. Motorun verimini arttırmak için her aşamada (tasarım ve üretim aşaması, kullanım aşaması vb.) yakıt tüketimini düşürmek, motor gücünü arttırmak veya verimi arttırmak için iyileştirmeler yapılabilir. Motor için teorik olarak ekserjetik iyileştirme potansiyeli:

$$ExIP = (1 - \eta_{ex})\dot{E}_{x_{WE}} \quad (14)$$

Teorik ekserji iyileştirme potansiyelinden sonra motorun iyileştirilmiş ekserji verimi ise:

$$\eta_{eximp} = \frac{\dot{E}_{x_{Pr}}}{\dot{E}_{x_F} - ExIP} \quad (15)$$

denklemlerinden bulunabilir. Bu denklemlerde verilen $ExIP$ ve η_{eximp} ; ekserjetik iyileştirme potansiyelini ve iyileştirilmiş ekserji verimini ifade etmektedir.

Ekserji analizi kapsamında motorun çevresel etki analizi ve sürdürülebilirlik değerlendirilmesi de yapılabilir. Bu kapsamda [26-32];

Çevresel etki faktörü (*EEF*):

$$EEF = \frac{FExLR}{\eta_{ex}} \quad (16)$$

Ekolojik etki faktörü (*EcoEF*):

$$EcoEF = \frac{\dot{E}x_F}{\dot{E}x_{Pr}} = \frac{1}{\eta_{ex}} \quad (17)$$

Ekolojik objektif fonksiyonu (*EOF*):

$$EOF = \dot{E}x_{Pr} - \dot{E}x_{WE} \quad (18)$$

Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi (*ExSI*):

$$ExSI = \frac{1}{EEF} \quad (19)$$

Sürdürülebilir verimlilik faktörü (*SEF*):

$$SEF_k = \frac{1}{1 - \eta_{ex}} \quad (20)$$

denklemlerinden hesaplanır.

3.3 Ekserjiekonomik Analiz

Eksergo-ekonomik analiz ekonomik ve ekserji analizinin birleşiminden oluşmakta olup; motorun ürettiği yararlı ürünün (şaft gücü ve elektriksel güç), motorun tükettiği yakıtın ve yararlı ürüne dönüştürülemeyen yakıt ekserjisi maliyet akışlarının hesaplanmasına katkı sağlamaktadır. Bir sistem için eksergo-ekonomik analiz yapılmadan önce; incelenen sistemin ekonomik değerlerinin (sistem yatırım maliyeti, hurda değeri, sistemin şimdiki değeri, yıllık maliyet akışı, saatlik maliyet akışı, sistemin idame-işletme-bakım maliyeti, yatak tüketim maliyeti vb.) hesaplanmasına ihtiyaç vardır. Ekonomik veriler aşağıdaki bağlantılardan hesaplanmaktadır [21, 26, 33-34].

Motorun satın alma maliyeti (*PEC*), hurda değeri (*SV*) ve şimdiki değer faktörü (*PVF*) biliniyor ise motorun şimdiki değeri (*PW*):

$$PW = PEC - SV * PVF(i, n) \quad (21)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Bu denklemdaki şimdiki değer faktörü (*PVF*); yıllık faizin (*i*) ve sistem ömür süresinin (*n*) fonksiyonudur ve:



$$PVF = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (22)$$

denkleminde bulunur.

Motorun hurda değeri (SV); motorun alım fiyatı (PEC) ve hurda değer yüzdesinin (π) fonksiyonu olup;

$$SV = PEC * \pi \quad (23)$$

bağıntısından tespit edilir.

Sermayenin geri kazanım faktörü (CRF) yıllık faizin (i) ve sistem ömür süresinin (n) fonksiyonu olup;

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (24)$$

bağıntısıyla hesaplanır.

Yıllık sermaye maliyet akışı ($A\dot{C}C$), sistemin şimdiki değerine ve sermayenin geri kazanım faktörüne (CRF) bağlıdır. Yıllık sermaye maliyet akışı ($A\dot{C}C$):

$$A\dot{C}C = PW * CRF(i, n) \quad (25)$$

denkleminde elde edilir. Bu durumda motorun yıllık çalışma süresi (τ) belli ise:

Saatlik ana para yatırım maliyeti (\dot{Z}^{CI}):

$$\dot{Z}^{CI} = \frac{A\dot{C}C}{\tau} \quad (26)$$

Saatlik idame-işletme-bakım maliyeti (\dot{Z}^{OM}):

$$\dot{Z}^{OM} = \frac{OMC}{\tau} \quad (27)$$

Sistemin saatlik toplam maliyeti (\dot{Z}^{TC})

$$\dot{Z}^{TC} = \dot{Z}^{CI} + \dot{Z}^{OM} \quad (28)$$

denklemlerinden hesaplanmaktadır. Motorun saatlik yakıt tüketimi (\dot{m}_F) ve yakıt satış fiyatı (FSP) belliyse saatlik yakıt maliyeti (\dot{C}_F):

$$\dot{C}_F = \dot{m}_F FSP \quad (29)$$

bağıntısından bulunur.

Bu çalışma için özgül ekserji maliyeti (specific exergy costing-SPECO) olarak tanımlanan eksergo-ekonomik analiz yöntemi seçilmiştir. Motor için eksergo-ekonomik denge denklemi;



$$\dot{C}_F + \dot{Z}^{TC} = \dot{C}_{Pr} \quad (30)$$

şeklinde yazılabilir ve denklemdeki \dot{C}_F saatlik yakıt maliyetini, \dot{C}_{Pr} saatlik üretim maliyetini, \dot{Z}^{TC} ise sistemin toplam saatlik yatırım ve idame-işletme-bakım maliyetini ifade etmektedir. Yakıt ve üretilen ürünün özgül ekserji maliyetleri sırasıyla:

$$\frac{\dot{C}_F}{Ex_F} = c_F \quad (31)$$

$$\frac{\dot{C}_{Pr}}{Ex_{Pr}} = c_{Pr} \quad (32)$$

bağıntılarından hesaplanmaktadır.

Bir sistemin eksergo-ekonomik değerlendirmesi için izafi maliyet farkı, ekserjiekonomik faktör ve ekserji kaybının maliyet akışı gibi performans parametreleri kullanılmaktadır. Bu kapsamda;

Bağıl maliyet farkı (r):

$$r = \frac{c_{Pr} - c_F}{c_F} \quad (33)$$

Eksergo-ekonomik faktör (f):

$$f = \frac{\dot{Z}^{TC}}{\dot{Z}^{TC} + \dot{C}_{WE}} \quad (34)$$

Ekserji kaybının maliyet akışı (\dot{C}_{WE}):

$$\dot{C}_{WE} = c_F \dot{Ex}_{WE} = c_F (\dot{Ex}_D + \dot{Ex}_L) \quad (35)$$

denklemlerinden hesaplanır.

4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

4.1 Enerji Analizi Sonuçları

Turbodizel havacılık motoru deniz seviyesinde maksimum çalışma şartlarında 26.550 kg/h'lik JP-8 jet yakıtı tüketirken 461.745 MJ/h'lik motor shaft gücü ve 32.400 MJ/h'lik elektriksel güç üretmektedir. Motorun ürettiği toplam güç 494.145 MJ/h'tir. Motorun bu gücü üretebilmesi için toplamda 1144.957 MJ/h'lik yakıt enerjisi kullanılmaktadır. Bu şartlar altında motorun enerji verimi %43.158, yakıt enerjisi kayıp oranı %56.842 ve üretim enerjisi kayıp oranı %131.705 olarak hesaplanmıştır.

4.2 Ekserji Analizi Sonuçları

Yakıt ekserjisi kalite indeksi 1.0616 olduğundan dolayı JP-8 yakıtının alt ısı değeri

Tablo 2. Turbodizel Havacılık Motorunun Ekserjetik Performans Parametreleri

Parametre	Birimi	Değeri
Ekserji verimi (η_{ex})	(%)	40.655
Yakıt ekserjisi kayıp oranı ($FExLR$)	(%)	59.345
Üretim ekserjisi kayıp oranı ($PExLR$)	(%)	145.973
Ekserjetik iyileştirme potansiyeli ($ExIP$)	(MJ/h)	428.067
İyileştirilmiş ekserji verimi ($\eta_{ex,imp}$)	(%)	62.757
Çevresel etki faktörü (EEF)	(-)	1.460
Ekolojik etki faktörü ($EcoEF$)	(-)	2.460
Ekolojik objektif fonksiyonu (EOF)	(MJ/h)	-227.173
Ekolojik objektif fonksiyon indeksi ($EOFI$)	(-)	-0.460
Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi ($ExSI$)	(-)	0.685
Sürdürülebilir verimlilik faktörü (SEF)	(-)	1.685

43124 kJ/kg olmasına rağmen JP-8 yakıtının özgül ekserjisi 45779.587 kJ/kg olarak hesaplanmıştır. Bu durumda motor tarafından tüketilen 26.550 kg/h'lik jet yakıtının ekserji değeri 1215.463 MJ/h olarak hesaplanmıştır Mekanik, kinetik ve elektrik enerjisinin tamamı işe dönüştürülebildiğinden dolayı, bu enerji türlerinin enerji ve ekserji değerleri birbirine eşittir. Bu durumda motorun üretmiş olduğu toplam gücün ekserjisi 494.145 MJ/h'dir. Motorda meydana gelen toplam ekserji kaybı ise 721.318 MJ/h olarak bulunmuştur. Bu değerler kullanılarak hesaplanan ekserji performans parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2'de verilen değerler göz önüne alındığında;

- Motorun ekserji verimi %40.655 ve yakıt ekserjisi kayıp oranı %59.345 olarak hesaplanmıştır. Başka bir anlatım ile motora giren toplam yakıt ekserjisinin %59.345'i yararlı işe dönüştürülememektedir.
- Motorun üretim ekserjisi kayıp oranı %145.973 bulunmuştur. Bu değer; motorun ürettiği yararlı işin yaklaşık 1.5 katı kadar yakıt ekserjisi kaybı meydana geldiğini göstermektedir.
- Motor üzerinde gerekli iyileştirmeler ve tadilatlar yapılırsa; 721.318 MJ/h'lik ekserji kaybının 428.067 MJ/h'lik kısmı teorik olarak geri kazanılabilecektir. Bu durumda iyileştirilmiş motorun ekserji verimi %62.757'ye kadar çıkabilecektir.

Bir sistemin enerji ve/veya ekserji verimi ne kadar düşük ise; birim iş üretimi için



harcanan yakıt tüketimi o miktarda yüksek olur. Bu durum istenen işi üretmek için daha fazla yakıt tüketimine neden olur. Artan yakıt tüketimine bağlı olarak daha fazla yanma emisyonu üretilecek olup, daha fazla çevresel etki ve kirlenme meydana gelecektir. Bu bakış açısıyla ekserji terimleriyle motorun çevresel ve ekolojik etki değerlendirmeleri ve sürdürülebilirlik seviyesi belirlenmesi yapılabilmektedir. Bu değerler genellikle boyutsuz olup, benzer sistemlerin kıyaslanmasında kullanılmaktadır. Tablo 2’de verilen değerler göz önüne alındığında; turbodizel havacılık motorunun çevresel etki faktörü 1.460 iken ekolojik etki faktörü 2.460 olarak hesaplanmıştır. Motorun ekolojik objektif fonksiyon değeri -227.173 MJ/h olarak bulunmuştur. Bulunan değerlerin negatif olması; motorda meydana gelen ekserji kaybının motorun üretim ekserjisinden daha fazla olduğunu göstermektedir. Motorun ekolojik objektif fonksiyon indeksi ise -0.460 olarak hesaplanmıştır.

Motorun sürdürülebilirlik seviyesinin belirlenmesinde ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi ve sürdürülebilir verimlilik faktörü değerlerine bakılır. İncelenen motor için sürdürülebilirlik indeksi 0.685 ve sürdürülebilir verimlilik faktörü ise 1.685 olarak bulunmuştur.

4.3 Ekserjiekonomik Analiz Sonuçları

Ekserjiekonomik analizden önce motorun ekonomik verileri ve saatlik maliyet oluşumları hesaplanmıştır. Motorun satış fiyatı 50000 \$’dır. Motorun yıllık idame-işletme-bakım maliyeti; motorun satış fiyatının %10’u olarak kabul edilmiş olup, yıllık 5000 \$’dır. Motor 3600 saatte (h) bir revizyona (ağır bakım ve yenileme) alınmakta-

Tablo 3. Turbodizel Havacılık Motoruna Ait Hesaplanan Ekonomik Veriler

Parametre	Birimi	Değer
Motor satış fiyatı (PEC)	(\$)	50000
Motorun yıllık idame-işletme-bakım maliyeti (OMC)	(\$/yıl)	5000
Motorun yıllık çalışma saati (τ)	(h)	900
Yıllık faiz oranı (i)	(%)	14
Motor servis ömrü (n)	(yıl)	20
Hurda değer oranı (π)	(%)	15
Şimdiki değer faktörü (PVF)	(-)	0.073
Sermaye geri-dönüş faktörü (CRF)	(-)	0.151
Motorun şimdiki değeri (PW)	(\$)	49454.287
Yıllık sermaye akış maliyeti (ACC)	(\$/yıl)	7466.905
Saatlik idame-işletme-bakım maliyeti (\dot{Z}^{OM})	(\$/h)	5.556
Saatlik sermaye akış maliyeti (\dot{Z}^{CI})	(\$/h)	8.297
Saatlik toplam sistem kaynaklı maliyet akışı (\dot{Z}^{TC})	(\$/h)	13.852



dır. Motorun yıllık 900 saat uçtuğundan dolayı her 4 yılda bir revizyon edilmektedir. Bu durumda 4 yıllık revizyon maliyeti $4 \times 5000 \$ = 20000 \$$ 'dir. Motorun hurdaya ayrılmasına kadar geçen süreye servis ömrü denir ve incelenen motor için 20 yıl kabul edilmiştir. Motorun hurdaya ayrıldığındaki "motor hurda değeri" motor satış fiyatının %15'i kadardır. Bu çalışmada yıllık faiz %14 olarak ele alınmıştır. Bu veriler ışığında motora ait ekonomik veriler hesaplanmış ve Tablo 3'de verilmiştir.

JP-8 yakıtının 1 metrik tonu 1249.8 \$ olduğundan yakıtın birim satış fiyatı 1.249 \$/kg olmaktadır. Bu durumda 26.550 kg/h'lik yakıt tüketimi için toplam yakıt maliyeti 33.183 \$/h olarak hesaplanmıştır. Motorun tükettiği yakıtın ekserji değeri 1215.463 MJ/h'dir. Yakıt maliyet ve ekserji akışı bilindiğinden motorun tükettiği yakıtın özgül ekserji maliyeti 0.027 \$/MJ olarak hesaplanmıştır.

Sermayeden ve idame-işletme-bakımdan kaynaklanan (sistem kaynaklı) saatlik maliyet akışı 13.852 \$/h olarak bulunmuştur. Motorun güç üretimi için toplam maliyet akışı; yakıt maliyet ve sistem kaynaklı maliyetlerin toplamından oluşur. 33.183 \$/h'lik kısmı yakıt maliyeti ve 13.852 h'lik kısmı sistem kaynaklı maliyet akışı olmak üzere motorun şaft ve elektrik üretimini gerçekleştirebilmesi için harcanan toplam maliyet akışı 47.035 \$/h'dir. Motorun ürettiği 494.145 MJ/h'lik toplam motor gücü ekserjisinin özgül ekserji maliyeti 0.095 \$/MJ olarak hesaplanmıştır.

4.3 Kıyaslama

170 HP şaft gücü+9 kW elektriksel güç üreten turbodizel bir havacılık motoru ile havacılık benzini (AVGAS) yakan 180 HP'lık piston-prop motorun enerji, ekserji ve eksergo-ekonomik analiz sonuçları ve ikisinin değerleri arasındaki yüzdesel farklar Tablo 4'de verilmiştir. Tablo 4'deki bilgilere göre, piston-prop motoruna göre incelenen turbodizel havacılık motoru;

- % 4.48 daha az güç üretmesine rağmen %40.36 daha az yakıt tüketmektedir.
- % 54.58 daha az enerji kaybına sahiptir.
- % 66.89 daha fazla enerji verimine sahiptir
- % 92.40 daha az yakıt enerjisi kayıp oranı sahiptir.
- % 59.15 daha düşük üretim enerjisi kayıp oranına sahiptir.
- % 40.47 oranında daha az yakıt ekserjisi tüketmektedir.
- % 66.89 oranında daha fazla ekserji verimine sahiptir.
- % 22.25 oranında daha az yakıt ekserjisi kayıp oranına sahiptir.
- Üretim ekserjisi kayıp oranı % 54.72 oranında daha azdır.
- Çevresel etki faktörü % 54.71 oranında daha azdır.
- Ekolojik etki faktörü % 41.76 oranında daha azdır.
- Ekolojik objektif fonksiyon değeri % 78.87 oranında daha azdır.



- Ekolojik objektif fonksiyon indeksi % 79.32 oranında daha azdır.
- Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi % 120.97 oranında daha iyidir.
- Sürdürülebilir verimlilik faktörü % 28.63 oranında daha iyidir.
- Saatlik yakıt tüketim maliyeti % 73.24 oranında daha azdır.
- Sistem kaynaklı saatlik maliyet akışı % 99.97 oranında daha düşüktür.
- Üretim maliyet akışı % 73.70 oranında daha düşüktür.

Tablo 4. Turbodizel ve AVGAS Yakıtlı Piston-Prop Motorlarının Verileri ve Kıyaslaması

Parametre	Birim	Turbodizel motor (170 HP+9 kW)	Avgas piston-prop motor (180 HP) [20]	Fark (%)
\dot{W}	(MJ/h)	461.745	483.408	-4.48
\dot{E}_F	(MJ/h)	1144.957	1919.376	-40.36
\dot{E}_L	(MJ/h)	650.812	1435.968	-54.68
η_{en}	(%)	43.158	25.186	66.89
$FELR$	(%)	56.842	74.814	-92.40
$PELR$	(%)	131.705	322.385	-59.15
\dot{E}_{xF}		1215.463	2041.842	-40.47
η_{ex}	(%)	40.655	23.675	71.72
$FExLR$	(%)	59.345	76.325	-22.25
$PExLR$	(%)	145.973	322.385	-54.72
EEF	(-)	1.460	3.224	-54.71
EcoEF	(-)	2.460	4.224	-41.76
EOF	(MJ/h)	-227.173	-1075.026	-78.87
EOFI	(-)	-0.460	-2.224	-79.32
ExSI	(-)	0.685	0.310	120.97
SEF	(-)	1.685	1.310	28.63
\dot{C}_F	(\$/h)	33.183	123.984	-73.24
Z	(\$/h)	13.852	51.961	-99.97
\dot{C}_{Pr}	(\$/h)	47.035	175.945	-73.27
c_F	(\$/MJ)	0.027	0.061	-55.74
c_{Pr}	(\$/MJ)	0.095	0.364	-73.90
\dot{C}_{Wex}	(\$/h)	70.892	94.631	-25.09
r	(%)	248.655	499.404	-50.21
f	(%)	16.346	35.446	-53.88



- Özgül yakıt ekserji maliyeti % 55.74 oranında daha azdır.
- Özgül ürün ekserji maliyeti % 73.90 oranında daha düşüktür.
- Ekserji kaybı maliyeti % 25.09 oranında daha azdır.
- Bağlı maliyet farkı % 50.21 oranında daha düşüktür.
- Eksergo-ekonomik faktör değeri % 53.88 daha azdır. Bunun nedeni, turbodizel havacılık motorunun saatlik sistem temelli toplam maliyet akışının piston-prop motorununkinden % 99.97 oranında daha az olmasıdır.

5. SONUÇ

Bu çalışmada insansız hava araçlarında kullanılmak üzere geliştirilen ve üretilen bir turbodizel havacılık motoru incelenmiştir. Motor toplam 170 HP shaft gücü ve $2 \times 4.5 \text{ kW} = 9 \text{ kW}$ elektriksel güç üretmektedir. Söz konusu motorun enerji, ekserji, ekserji temelinde çevresel etki ve sürdürülebilirlik, eksergo-ekonomik analizleri detaylı bir şekilde yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar; shaft gücü üretimi 180 HP olan ve AVGAS (havacılık benzini) tüketen içten yanmalı piston-prop motorunun performans sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre turbodizel havacılık motorunun;

- Enerji verimi % 43.158 ve ekserji verimi % 40.655 olarak bulunmuştur.
- Çevresel etki faktörü 1.460 ve ekolojik etki faktörü 2.460 olarak hesaplanmıştır.
- Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 0.685 ve sürdürülebilir verimlilik faktörü 1.685 olarak elde edilmiştir.
- Özgül yakıt ekserji maliyeti 0.027 \$/MJ ve özgül motor üretim ekserji maliyeti 0.095 \$/MJ olarak bulunmuştur.
- Tablo 4’de de gösterildiği üzere diğer tüm performans değerlendirme kriterlerinin de piston-prop havacılık motorundan daha iyi olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmanın devamı olarak, turbodizel havacılık motorunun ekserji temelli çevre analizi ve yaşam döngüsü doğrulaması (LCA: life cycle assessment) analizleri yapılacaktır.

KISALTMALAR VE SEMBOLLER

ACC	Yıllık anapara akışı	(\$/yıl)
C_F	Saatlik yakıt veya girenlerin maliyet akışı	(\$/h)
c_F	Özgül yakıt ekserji maliyeti	(\$/MJ)
C_{Pr}	Saatlik üretim/ürünlerin maliyet akışı	(\$/h)
cPr	Özgül ürün ekserji maliyeti	(\$/MJ)
C_{WE}	Saatlik ekserji kaybı maliyet akışı	(\$/h)



CRF	Anapara geri kazanım faktörü	(-)
EcoEF	Ekoloji etki faktörü	(-)
EEF	Çevresel etki faktörü	(-)
\dot{E}_F	Yakıt enerji akışı	(MJ/h)
\dot{E}_{Pr}	Ürün enerji akışı	(MJ/h)
EOF	Ekolojik objektif fonksiyonu	(MJ/h)
\dot{E}_{WE}	Kayıp enerji akışı	(MJ/h)
\dot{E}_{xF}	Yakıt ekserji akışı	(MJ/h)
E_{xIP}	Ekserji iyileştirme potansiyeli	(MJ/h)
\dot{E}_{xPr}	Ürün ekserji akışı	(MJ/h)
ExSI	Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi	(-)
E_{xWE}	Kayıp ekserji akışı	(MJ/h)
f	Eksergo-ekonomik faktör	(%)
FELR	Yakıt enerjisi kayıp oranı	(%)
FExLR	Yakıt ekserjisi kayıp oranı	(%)
i	Yıllık faiz	(%)
FSP	Yakıt satış fiyatı	(\$/kg)
LHV	Yakıt alt ısı değer	(kJ/kg)
\dot{m}_F	Yakıt tüketimi	(kg/h)
n	Sistemin ömrü	(yıl)
OMC	Yıllık idame-işletme maliyet akışı	(\$/yıl)
PEC	Sistem alış maliyeti	(\$)
PELR	Ürün enerjisi kayıp oranı	(%)
PExLR	Ürün ekserjisi kayıp oranı	(%)
PVF	Şimdiki değer faktörü	
PW	Şimdiki değer maliyeti	(\$)
r	Bağıl maliyet farkı	(%)
SEF	Sürdürülebilir verimlilik faktörü	(-)
SPECO	Özgül ekserji maliyeti	(-)
SV	Hurda değeri	(\$)
\dot{Z}^{CI}	Saatlik anapara yatırım maliyeti	(\$/h)
\dot{Z}^{OM}	Saatlik idame-işletme maliyet akışı	(\$/h)
\dot{Z}^{TC}	Saatlik toplam maliyet akışı	(\$/h)



\dot{W}_{el}	Elektrik gücü	(MJ/h)
W_{saft}	Şaft gücü	(MJ/h)
η_{en}	Enerji verimi	(%)
η_{ex}	Ekserji verimi	(%)
η_{eximp}	İyileştirilmiş ekserji verimi	(%)
ϵ_F	Özgül yakıt ekserjisi	(kJ/kg)
ϕ	Yakıt ekserjisi kalite indeksi	(-)
π	Hurda değer yüzdesi	(%)
τ	Sistemin yıllık çalışma süresi	(h)

KAYNAKÇA

1. **Newcome LR.** Unmanned Aviation: A Brief History of Unmanned Air Vehicles, Reston: The American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
2. **Prior D, Shen ST, White AS, Odedra S, Karamanoglu M., Erbil MA, Foran T.** Development of a Novel Platform for Greater Situational Awareness in the Urban Military Terrain, Proc. 8th International Conference on Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics, San Diego, USA, 2009, pp. 120-125.
3. **Astrov I, Pedai A.** Control of Hovering Manoeuvres in Unmanned Helicopter for Enhanced Situational Awareness, Proc. International Conference on Industrial Mechatronics and Automation, Chengdu, China, 2009, pp. 143-146.X1.
4. **Colomina I, Molina P.** Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014 . 92: 79–97.
5. **Yali Y, Feng S, Yuanxi W.** Controller Design of Quadrotor Aerial Robot, Physics Procedia. 2012; 33: 1254 – 1260.
6. **Hoffmann GM, Huang H., Waslander SL., Tomlin CJ.** Precision flight control for a multi-vehicle quadrotor helicopter testbed, Control Engineering Practice, 2011; 19(9): 1023– 1036.
7. **Romero H., Salazar S, Lozano R.** Real Time Stabilization of an Eight-Rotor UAV Using Optical Flow, IEEE Transactions on Robotics, 2009; 25(4):809-817.
8. **Bošnjak M, Matko D, Blažič S.** Quadcopter control using an on-board video system with off-board processing, Robotics and Autonomous System, 2012; 60: 657-667.
9. **Aasen H, Honkavaara E, Lucieer A, Zarco-Tejada PJ.** Quantitative remote sensing at ultra-high resolution with UAV spectroscopy: A review of sensor technology, measurement procedures, and data correction workflows. Remote. Sensing. 2018, 10, 1091.
10. **Abdullah M, Faizan M, Bhatti MY, Hasham HJ.** System design and analysis of hand lunched UAV. In Proceedings of the 14th International Bhurban Conference on Appli-



ed Sciences and Technology (IBCAST), Islamabad, Pakistan, 10–14 January 2017; pp. 551–560. *Energies* 2022, 15, 455 22 of 25

11. **Adamo F, Andria G, Di-Nisio A, Carducci CGC, Lanzolla AM, Mattencini G.** Development and characterization of a measurement instrumentation system for UAV components testing. In Proceedings of the IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace, Padua, Italy, 21–23 June 2017; pp. 355–359.
12. **Gao X, Liu C, Huang Y, Son Z.** Design of an UAV-oriented wireless power transfer system with energy-efficient receiver. In Proceedings of the IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore, 18–21 October 2020; pp. 2025–2030.
13. **Liu C, Yu J, Lee CH.** A new electric magnetic-gear machine for electric unmanned aerial vehicles. *IEEE Trans. Magn.* 2017, 53:1-6.
14. **Kong X, Liu H.** Research progress of key technologies of aviation piston engine for UAV. *Small Intern. Combust. Engine Veh. Tech.* 2021, 50: 3.
15. **Saraçyakupoğlu T, Delibaş H D, Özçelik A D.** Bir İnsansız Hava Aracının İtki ve Manevra Hareketlerinde Gövde İçi Basınçlı Hava Kullanımı. *EJOSAT.* 2021; (24): 81-86.
16. **Kong X, Zhang Z, Lu J, Li J, Yu L.** Review of electric power system of distributed electric propulsion aircraft. *Acta Aeronaut. Astronaut. Sin.* 2018, 39: 021651.
17. **Zhang B, Song Z, Zhao F, Liu C.** Overview of Propulsion Systems for Unmanned Aerial Vehicles. *Energies* 2022, 15: 455. <https://doi.org/10.3390/en15020455>
18. TEI-PD170 Turbodizel havacılık motoru. www.tei.com.tr/tr/urunler/tei-pd170-turbodizel-havacilik-motoru Giriş Tarihi: 28 Nisan 2022
19. **Sünnetçi İbrahim.** TEI-PD170 Turbodizel havacılık motoru seri üretim teslim töreni (15 Ocak 2020). www.defenceturkey.com/tr/icerik/tei-pd170-turbodizel-havacilik-motoru-seri-uretim-teslim-toreni-3808 Giriş tarihi: 28 Nisan 2022
20. <https://jet-a1-fuel.com/price/turkey> . Giriş tarihi: 28 Nisan 2022-05-01
21. **Balli O.** Thermodynamic, thermoenvironmental and thermoeconomic analyses of piston-prop engines (PPEs) for landing and take-off (LTO) flight phases *Energy.* 2022; 250: 123725
22. **Akdeniz HY.** Landing and take-off (LTO) flight phase performances of various piston-prop aviation engines in terms of energy, exergy, irreversibility, aviation, sustainability and environmental viewpoints. *Energy* 2022;243:123179
23. **Balli O, Caliskan H.** Turbofan engine performances from aviation, thermodynamic and environmental perspectives. *Energy* 2021;232:121031.
24. **Balli O, Caliskan H.** On-design and off-design operation performance assessments of an aero turboprop engine used on unmanned aerial vehicles (UAVs) in terms of aviation, thermodynamic, environmental and sustainability perspectives. *Energy Convers Manag* 2021;243:114403.



25. **Rakopoulos CD, Giakoumis EG.** Second-law analyses applied to internal combustion engines operation. *Prog Energy Combust Sci* 2006;32(1):2e47.
26. **Balli O, Dalkiran A, Karakoc TH.** Energetic, exergetic, exergoeconomic, environmental (4E) and sustainability performances of an unmanned aerial vehicle micro turbojet engine. *Aircraft Eng Aero Technol* 2021;93(7): 1254-1275.
27. **Akdeniz HY, Balli O.** Energetic and exergetic assessment of operating biofuel, hydrogen and conventional JP-8 in a J69 type of aircraft turbojet engine. *J Therm Anal Calorim* 2021;146:1709-1721.
28. **Balli O, Ozbek E, Ekici S, Midilli A, Karakoc TH.** Thermodynamic comparison of TF33 turbofan engine fueled by hydrogen in benchmark with kerosene. *Fuel* 2021;306:121686.
29. **Balli O, Ekici S, Karakoc TH.** TF33 Turbofan engine in every respect: performance, environmental, and sustainability assessment. *Environ Prog Sustain Energy* 2021;40:e13578.
30. **Balli O, Dalkiran A.** Comparative thermodynamic, environmental and sustainability performance assessments of an aero turboprop engine utilizing jet fuel and biofuel. *Int J Green Energy* 2021. <https://doi.org/10.1080/15435075.2021.2005606>.
31. **Balli O.** General aviation and thermodynamic performance analyses of a micro turbojet engine used on drones and unmanned aerial vehicles (UAV). *J Aviat Res* 2020;2(2):115e41. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jar/issue/56600/726860>.
32. **Balli O.** Exergy modeling for evaluating sustainability level of a high bypass turbofan engine used on commercial aircrafts. *Appl Therm Eng* 2017;123:138-155.
33. **Balli O, Caliskan H.** Various thermoeconomic assessments of a heat and power system with a micro gas turbine engine used for industry. *Energy Convers Manag* 2022;252:114984.
34. **Akdeniz HY, Balli O, Caliskan H.** Energy, exergy, economic, environmental, energy based economic, exergoeconomic and enviroeconomic (7E) analyses of a jet fueled turbofan type of aircraft engine. *Fuel*. 2022: 322:124165.