

KÜÇÜK BİR TURBOJET MOTORUN FARKLI YAKIT KULLANIMLARINDA EKSERJETİK VE EKSERGOEKONOMİK PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI

Kahraman ÇOBAN¹, Yasin ŞÖHRET², C. Özgür ÇOLPAN³, T. Hikmet KARAKOÇ⁴

¹Kahraman ÇOBAN, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uçak-Gövde-Motor ABD, Anadolu Üniversitesi, TR-26470, Eskişehir, Türkiye

²Yasin ŞÖHRET, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 32260 Türkiye

³C. Özgür ÇOLPAN, Makine Mühendisliği Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi, Buca, İzmir, 35397, Türkiye

⁴T. Hikmet KARAKOÇ, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Anadolu Üniversitesi, TR-26470, Eskişehir, Türkiye

DOI: [10.23890/SUHAD.2017.0202](https://doi.org/10.23890/SUHAD.2017.0202)

ÖZET

Günümüzde, küresel ısınmaya ve diğer çevresel konulara ek olarak, enerji kaynaklarının hızlı tükenmesi ve artan maliyetleri büyük endişe yaratmaktadır. Her şeye rağmen, enerji verimli sistem gelişmeleri ve biyoyakıt teknolojisindeki ilerleme umut verici çözümlerdir. Havacılık sektörü, sektörün troposfer üzerindeki çevresel etkiden sorumlu olduğu ana konulardan biridir. Bu çerçevede, bu çalışmada, deneysel bir turbojet motorun ekserji temelli değerlendirmesi yapılmaktadır. Bu amaçla, geleneksel havacılık yakıtı ve biyoyakıt tüketimleri için karşılaştırmalı olarak ekserji ve ekonomik performansı yapılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, hava kompresörü, yanma odası ve gaz türbini bileşenlerinin ekserji verimi, biyoyakıtla çalışan durumlarda sırasıyla %74.52, %47.68 ve %99.00 olarak bulunmuştur. Öte yandan, motor, konvansiyonel havacılık yakıtıyla beslenirken, hava kompresörü, yanma odası ve gaz türbini bileşenlerinin ekserji verimi % 75.22, %48.34 ve %98.44 olarak hesaplanmıştır. Buna ek olarak, konvansiyonel havacılık yakıtının ve biyoyakıtın saatlik düzeydeki maliyetleri sırasıyla saat 7.070 US\$ ve 8.215 US\$ olarak tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Biyoyakıt, Eksergoekonomi, Ekserji, Turbojet

USING EXERGY FOR THE PERFORMANCE COMPARISON AND THE ECONOMIC EVALUATION OF AN EXPERIMENTAL TURBOJET ENGINE FED WITH VARIOUS FUELS

ABSTRACT

Today, rapid depletion and increasing costs of energy resources are major concerns in addition to global warming and other environmental issues. Despite all, energy efficient system developments and progress in biofuel technology are promising solutions. Aviation industry is one of the main sectors that is responsible for environmental impact over the troposphere. In this framework, exergy-based evaluation of an experimental version of a turbojet engine is scoped in the present study. For this purpose, exergetic performance and economic aspects of the engine are discussed comparing the conventional aviation fuel and biofuel cases. As a result of this study, exergy efficiencies of air compressor, combustion chamber and gas turbine components are found to be 74.52%, 47.68% and 99.00%, respectively, for the biofuel-using engine. While engine is fed with the conventional aviation fuel, exergy efficiencies of air compressor, combustion chamber and gas turbine components are calculated to be 75.22%, 48.34% and 98.44%, respectively. In addition, costs of the conventional aviation fuel and the biofuel are found as 7.070 US\$ and 8.215 US\$ per hour, respectively.

Keywords: Biofuel, Exergoeconomics, Exergy, Turbojet

1. GİRİŞ

Bilindiği gibi, günümüzde alternatif ve yenilenebilir enerji teknolojilerinde kaydedilen ilerlemelere rağmen, gerekli enerji çoğunlukla fosil yakıtlar tarafından sağlanmaktadır. Ekonomik olarak gelişmekte olan ülkelerin yüksek orandaki talepleri, artan maliyet ve sürekli artan fosil yakıt tüketimi nedeniyle oluşan çevre sorunlarına karşılık, daha verimli sistemlerin geliştirilmesi ve alternatif enerji kaynaklarının kullanılması, sürdürülebilir enerji kullanımı için gereksinimlerdir. Bu nedenlerle, enerji sistemlerinin ekonomik ve çevresel yönleri de termodinamik mühendislikte ayrıca kapsanmalıdır (Stougie ve Kooi, 2012, Bilgen ve Sarıkaya, 2015, Kanoğlu vd., 2012, Zafar ve Dincer, 2014, Dincer ve Cengel, 2001). Bu amaçla termodinamikte enerji ve ekserji temelli analizler en çok kullanılan araçlardır. Ekserji analizi, incelenen sistemdeki tersinmezlikleri ve verimsizlikleri anlamak için önemli bir araç olarak ortaya çıkmakta, böylece termodinamik yasalar temelinde sistem performansının iyileştirilmesine önemli katkı sağlamaktadır. Ekserji analizini ekonomik analizle birleştirmek ise, ekonomik kayıpları ve sistem iyileştirmesiyle ilgili potansiyel kazanımları ortaya çıkarabilmektedir (Tsatsaronis, 2007, Tsatsaronis ve Morosuk, 2015).

Gaz türbinleri, enerji santrallerinde elektrik üretimi ve hava araçlarında gerekli itkinin sağlanması için kullanılan enerji üretim sistemleridir. Bu nedenle, gaz türbinleri endüstriyel ve havacılık amaçlı kullanım olarak sınıflandırılabilir. Endüstriyel gaz türbinleri, enerji güç santrallerinde nihai olarak elektrik üretimi, ısıtma gibi amaçlar için kullanılmaktadır. Havacılıkta kullanılan gaz türbinleri ise turbojet, turbofan ve turboprop / turboşaft motorlar olarak sınıflandırılmaktadır. Turbojet motorlar gaz türbinlerin temel hali olarak tüm diğer tip motorların çekirdeğini oluşturur. Turbofan ve turboprop / turboşaft motorlar ise turbojet motorlara göre daha verimli şekilde çalışmaktadır. Detaylı bilgiler birçok kitapta bulunabilir (Mattingly vd., 2002, El-Sayed, 2008, Boyce, 2011).

Bugüne kadar birçok araştırmacı ve araştırma grubu, havacılık tipi gaz türbini motorlarını ekserji yardımı ile araştırmıştır. Art Yanmalı bir uçak motoru, Ehyaei vd. (2013) tarafından 200 m/s hızda 11000 m irtifada ekserjetik olarak incelenmiştir. Araştırmacılar, her bir motor komponentinin giriş ve çıkışları için birim zamandaki ekserjilerini bularak, ilgili komponentlerin ekserji verimlerini ve entropi üretimlerini de hesaplamışlardır. Giriş hava sıcaklığındaki 1°C'lik artış, turbojet motorun ekserji veriminde 0.45% oranında bir azalmaya neden olmaktadır. Diğer bir çalışmada da (Aydın vd., 2013) bir turboprop motorun termodinamik analizi farklı yük koşullarında gerçekleştirilmiştir. Buna göre, en yüksek birinci ve ikinci yasa verimleri sırasıyla 30.7% ve 29.2%

olarak elde edilmiştir. Turan vd. (2014) ise bir turbofan motorunun kalkış (take-off) koşullarında (en yüksek güç ihtiyacı durumunda) ekserji analizini yapmışlardır. Çalışma sonunda, her bir komponent ve motor bütünü için yakıt tüketim oranı, üretkenlik kaybı, göreceli tersinmezlik ve ekserji verimi değerleri hesaplanmıştır. Askeri tip bir turbojet motor ise, farklı bir araştırmada ekserjetik olarak incelenmiştir (Balli, 2014). Bu çalışmada, turbojet motor askeri ve aryanmalı çalışma şartlarında ele alınmış ve ekserji yönünden karşılaştırmaları sunulmuştur. Tai vd. (2014) ise iki şaftlı turbofan motor için enerji ve ekserji parametrelerini genetik algoritmalar yardımı ile optimize edebilecek bir yazılım üzerinde çalışmışlardır. Diğer bir çalışma ile de (Baklacioglu vd., 2015), genetik algoritmalar ve yapay sinir ağları bir turboprop motorun ekserji modeli için kullanılmıştır. Böylece, elde edilen deneysel veriler ekserji hesaplamalarında kullanılmak üzere modele girdi olarak verilmiştir. Yine bir turboprop motor için Şöhret vd. (2016) tarafından ekserjetik performans analizi yapılmıştır. Turboprop motorun enerji ve ekserji verimleri sırasıyla 27.89% ve 26.74% olarak bulunmuştur. Benzer bir yaklaşım, kerozen ve metanol karışımlarını kullanan bir turboprop motorun ekserjetik karakteristiğini belirlemek için de yapılmıştır (Ekici vd., 2016). Ekserjetik performans sonuçlarına ek olarak, bu çalışma ile sürdürülebilirlik göstergeleri de elde edilmiştir. Yine Sohret vd. (2015) tarafından insansız hava aracı için geliştirilen bir turbofan motorun birinci ve ikinci yasa kuralları ile analizi, hava aracının gözetleme görevi süresince yapılmıştır. Çalışma sonuçlarına bakıldığında, yanma odası en yüksek tersinmezliğe sahip komponent olarak bulunurken, yüksek basınç türbininin ise en verimli komponent olduğu görülmüştür. Ayrıca, turbofan motorun ekserji verimi 4.39% ile 11.10% değerleri arasında değişmektedir. Havacılıkta kullanılan gaz türbin motorlar üzerinde yapılan ekserji analizlerine ek olarak ise, eksergoekonomik analizler de birçok motor için yapılmıştır (Balli vd., 2008, Tona vd., 2010, Aydın vd., 2012 ve Balli ve Hepbasli, 2014). Bu çalışmalar ile her bir motor komponentinin giriş ve çıkışında enerji ve ekserji akımlarının maliyet oranları elde edilmiştir.

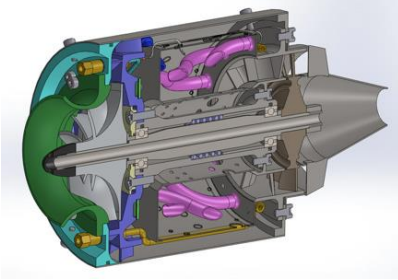
Yukarıda bahsedilen literatür araştırmasına göre, birçok araştırmada havacılıkta kullanılan gaz türbin motor incelemeleri, standart jet yakıt kullanım durumuna göre yapılmıştır. Fakat, biyoyakıt kullanımının gaz türbin motorların ekserji performansına etkisi yeterince incelenmemiştir. Havacılıkta kullanılan gaz türbin motorların çevresel etkilerini inceleyen bazı çalışmalarda (Rojo vd., 2015, Habib vd., 2010, Bergthorson ve Thomson, 2015, Winchester vd., 2015 ve Cremonez vd., 2015) biyoyakıt kullanımı özellikle önerilmiştir. Biyoyakıt üretim teknolojisindeki

gelişmeler, biyoyakıtın birçok alanda kullanımına izin vermektedir. Bu nedenle, biyoyakıtların gaz türbin motor performansı üzerinde etkileri incelenmelidir. Bu çalışma ile, literatürdeki bu boşluğun doldurulması hedeflenmiştir. Standart jet yakıt ve biyoyakıt kullanan bir turbojet motorun ekserji ve maliyet oluşumlarının karşılaştırılması yapılmıştır.

2. YÖNTEM

2.1. Deney Düzenegi

İncelenen motor, tek şaftlı küçük ölçekli özgün bir turbojet motordur. Motor, Şekil 1'de gösterildiği şekilde, temel olarak bir kademe santrifüj kompresör, aksenal difüzör, doğrusal akışlı dairesel yanma odası, bir kademe yüksek basınç türbini ve egzoz lülesi komponentlerinden oluşmaktadır. Santrifüj kompresörde sıkıştırılan motora giren hava, yanma odasında buharlaşan yakıt ile birlikte yakılmaktadır. Oluşan egzoz gazları yüksek basınç türbininden geçer ve türbin de böylece santrifüj kompresörü dönmesini sağlamaktadır. Turbojet motor maksimum güçte 120000 RPM şaft hızına sahip olmakla birlikte, bu noktada 177 N itki üretmektedir. Ayrıca, yine en verimli çalıştığı bu noktada, $125 \text{ g}\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ özgül yakıt tüketim değerine sahiptir.



Şekil 1. Örnek bir küçük turbojet motor kesit gösterimi (İnternet,2017)

Turbojet motor, temel olarak teknoloji gösterim amacı ile tasarlanmış olmakla birlikte, yer testlerinin tamamlanması ile birlikte, insansız hava araçlarında kullanım için uçuş testleri yapılması hedeflenmiştir. Motorun uzun çalışma sürelerine ulaşabilmesi için, benzer motorlarda bulunmayan kapalı devre yağlama sistemi entegre edilmiştir. Bu sistem sayesinde, motorun güvenilirliği ve çalışma süresi artırılmış, farklı küçük model platformlarda uçuş testleri gerçekleştirilmiştir.

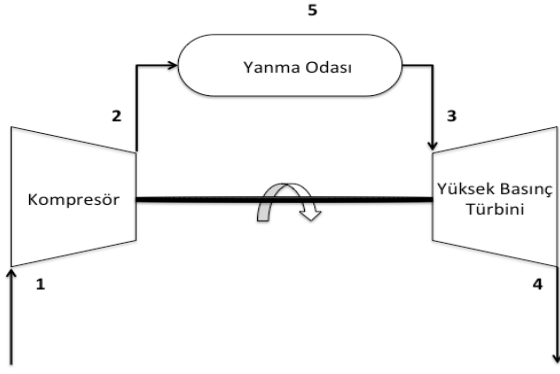
Yapılan testlerde, aşağıda listelenen parametreler ölçülmüştür:

- Ortam basınç ve sıcaklığı (P_0, T_0)
- Kompresör giriş ve çıkış basıncı (P_1, P_2)
- Kompresör giriş ve çıkış sıcaklığı (T_1, T_2)
- Türbin çıkış sıcaklığı (T_4)
- Türbin çıkış basıncı (P_4)
- Yakıt tüketimi (\dot{m}_f)
- Giriş hava debisi (\dot{m}_a)
- İtki (N)

Her bir test adımında, motor çalışma esnasından yakıt tipi değiştirilmemiştir. Testler 306 K sıcaklık ve 91.4 kPa basınç değerlerine sahip ortam koşullarında gerçekleştirilmiştir. Motor ateşleme yapıldığında, öncelikle rölanti devrine (35000 RPM) hızlanmaktadır. Bu noktada, denge durumuna geldikten sonra, gaz kolu motor maksimum hız değerine doğru artırılarak, veri toplama işlemine başlanmıştır. Test operatörü veri toplama sistemi yardımı ile, tüm sıcaklık, basınç değerleri ile motor hız ve itki verilerini test ekranından görerek, kayıt altına alınmıştır. Deniz seviyesine göre doğrulanmış deneysel veriler Tablo 1'de Şekil 2'deki istasyon numaralandırılmasına göre sunulmuştur.

Tablo 1: Turbojet motorun deneysel verileri

İstasyon No	Akışkan Türü	Jet Yakıtı			Biyoyakıt		
		Sıcaklık (K)	Basınç (kPa)	Kütle Debisi ($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$)	Sıcaklık (K)	Basınç (kPa)	Kütle Debisi ($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$)
0	Hava	308.00	91.40	0.00	308.00	91.40	0.00
1	Hava	306.15	91.40	236	302.15	91.40	240
2	Hava	469.15	275.00	236	465.15	275.00	240
3	Yanmış gaz	1080.15	264.00	239.7	1066.15	264.00	244.3
4	Yanmış gaz	944.15	125.00	239.7	930.15	125.00	244.3
5	Yakıt	306.15	91.40	3.7	302.15	91.40	4.3



Şekil 2: Motor istasyon numaralandırılması

2.2. Enerji Analizi

Ekserji analizinden önce, Şekil 2’de gösterilen sistemdeki her bir komponenti çevreleyen kontrol hacminde birim zamanda kütle (Denklem 1) ve enerji (Denklem 2) dengeleri kararlı durum için yapılmalıdır (Dincer ve Rosen, 2012, Kotas, 1985 ve Bejan vd., 1995):

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (1)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_{in} [h_{in} + (V_{in}^2/2) + gz_{in}] - \sum \dot{m}_{out} [h_{out} + (V_{out}^2/2) + gz_{out}] = 0 \quad (2)$$

Burada, \dot{m} birim zamandaki kütle akışımı simgelerken \dot{Q} , \dot{W} , h , $V^2/2$, ve gz ise sırasıyla, birim zamanda ısı transfer ve iş, entalpiyi, özgül kinetik ve özgül potansiyel enerjileri belirtmektedir.

2.3. Ekserji Analizi

Açık sistemler için birim zamanda ekserji dengesi ise sırasıyla Denklem 3.a ve 3.b ile açıklanabilmektedir (Dincer ve Rosen, 2012, Kotas, 1985 ve Bejan vd., 1995):

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} - \dot{W} + \sum_{in} \dot{m} ex - \sum_{out} \dot{m} ex - \dot{D} - \dot{L} = 0 \quad (3a)$$

$$\dot{F} - \dot{P} - \dot{D} - \dot{L} = 0 \quad (3b)$$

3a ve 3b denklemlerinde \dot{F} ve \dot{P} sırasıyla sistemdeki birim zamandaki yakıt ve ürünün ekserjileri, \dot{D} ve \dot{L} ise sırasıyla birim zamandaki ekserji yıkım ile ekserji kayıplarını göstermektedir. Ekserji ise diğer etkiler göz ardı edildiğinde, temel olarak fiziksel, kimyasal, kinetik ve potansiyel bileşenlerden oluşmaktadır (Dincer ve Rosen, 2012, Kotas, 1985 ve Bejan vd., 1995):

$$\dot{E}x = \dot{m}(ex^{PH} + ex^{CH} + ex^{KN} + ex^{PT}) \quad (4)$$

Özgül fiziksel ekserji aşağıdaki şekilde açıklanabilir:

$$ex^{PH} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (5)$$

Mükemmel gaz ve sabit basınçta özgül ısı varsayımına göre Denklem 5 aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$ex^{PH} = c_p(T - T_0) - T_0 [c_p \ln(T/T_0) - R \ln(P/P_0)] \quad (6)$$

Bir gaz karışımının molar kimyasal ekserjisi ile sıvı bir yakıtın kütle kimyasal ekserjisi Denklem 7 - 9 de sırasıyla verilmektedir (Dincer ve Rosen, 2012, Kotas, 1985 ve Bejan vd., 1995):

$$\bar{e}x_{mix}^{CH} = \sum x_k \bar{e}x_k^{CH} + \bar{R}_U T_0 \sum x_k \ln x_k \quad (7)$$

$$ex_f^{CH} = \gamma LHV \quad (8)$$

$$\gamma = 1.0401 + 0.1728 \frac{h}{c} + 0.0432 \frac{o}{c} + 0.2169 \frac{s}{c} (1 - 2.0628 \frac{h}{c}) \quad (9)$$

Burada x_k ve \bar{R}_U sırasıyla her bir gaz karışım bileşeninin mol oranı ile evrensel gaz sabitini göstermektedir. Diğer yandan LHV ve γ sırasıyla, yakıtın alt ısıl değeri ile kimyasal ekserjisinin yakıt enerjisine oranını gösterirken h , c , o , ve s ise hidrojen, karbon, oksijen ve kükürt’ün atom numaralarını belirtmektedir.

Ekserji verimi, geliştirme potansiyeli, göreceli tersinmezlik, yakıt tüketim oranı ve üretkenlik kaybı genel olarak ekserjetik performansı ölçmek için kullanılan parametrelerdir. Buna göre, ekserji verimi ürün ekserjisinin yakıt ekserjisine oranı olarak tanımlanabilir (Bejan vd., 1995 ve Xiang vd., 2004):

$$\varepsilon = \frac{\dot{P}}{\dot{F}} \quad (10)$$

Geliştirme potansiyeli bir diğer performans parametresi olarak, sistemdeki ekserji yıkımının azaltılması oranı olarak tanımlanabilir (van Gool, 1992):

$$\dot{I}P = \dot{D}(1 - \varepsilon) \quad (11)$$

Göreceli tersinmezlik sistemin bir bileşeninin ekserji yıkım miktarının tüm sistemin ekserji yıkım miktarına oranı şeklinde verilmektedir (Xiang vd., 2004):

$$\chi = \frac{\dot{D}}{\sum \dot{D}} \quad (12)$$

Yakıt tüketim oranı sistemin bir bileşeninin ekserji yıkımının tüm sistemin toplam yakıt ekserjisine oranı olarak belirtilmektedir (Xiang vd., 2004):

$$\delta = \frac{\dot{D}}{\sum \dot{F}} \quad (13)$$

Üretkenlik kaybı ise yakıt tüketim oranına benzer şekilde, ekserji yıkımı formunda ürün kayıp miktarını açıklamakta yani ürün ekserjisinin ne kadarının yıkım olarak kaybedildiğini açıklamaktadır (Xiang vd., 2004):

$$\xi = \frac{\dot{D}}{\sum \dot{P}} \quad (14)$$

2.4. Ekonomik Analiz

Bu çalışmada, ekonomi analizi için düzeltilmiş maliyet yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde göre, sistemin mevcut değeri, hurda değeri, mevcut değer faktörü, yıllık sermaye maliyeti, sermaye geri kazanım faktörü ve yıllık ekipman maliyeti değerleri elde edilebilmektedir (Balli, vd.,2008, Aydın vd., 2012):

$$PW = CIC - S PWF(i, n) \quad (15)$$

$$S = CIC j \quad (16)$$

$$PWF = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (17)$$

$$ACIC = PW CRF(i, n) \quad (18)$$

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (19)$$

$$\dot{Z}^T = \frac{\phi ACIC}{3600\tau} \quad (20)$$

Burada, ϕ tüm sistemin işletim ve bakım maliyetini simgelemektedir. Denklem 20 ayrıca herhangi bir sistem komponenti için, işletme ve bakım maliyeti değişimine göre saatlik düzeltilmiş sermaye yatırım maliyeti olarak da aşağıdaki şekilde türetilebilir (Balli, vd.,2008, Aydın vd., 2012):

$$\dot{Z}^{CIC} = \frac{ACIC}{\tau} \quad (21)$$

Bir sistem komponenti için saatlik düzeltilmiş sermaye yatırım maliyeti aşağıdaki şekilde yazılabilir (Balli, vd.,2008, Aydın vd., 2012):

$$\dot{Z}_k^{CIC} = \dot{Z}^{CIC} \frac{PEC_k}{\sum PEC} \quad (22)$$

Benzer şekilde, bir sistem komponenti için saatlik düzeltilmiş işletme ve bakım maliyeti ise (Balli, vd.,2008, Aydın vd., 2012):

$$\dot{Z}_k^{OM} = \frac{\dot{C}^{OM} PEC_k}{\tau \sum PEC} \quad (23)$$

Yakıtın ekserjetik saatlik düzeltilmiş maliyeti ise (Balli, vd.,2008, Aydın vd., 2012):

$$\dot{C}^f = \frac{F \dot{C}_e LHV}{\tau ex^{CH}} \quad (24)$$

2.5. Eksergoekonomik Analiz

Literatürde, çok sayıda yöntem ile ekserji ve ekonomi analizleri birleştirilmiştir (Torres vd.,2002, Lazzaretto ve Tsatsaronis, 2006 ,Rosen ve Dincer 2003, Kwak vd., 2003). Bu çalışmada ise, birçok çalışmada tercih edilmiş olan özgül ekserji maliyeti (SPECO) yöntemi tercih edilmiştir. SPECO yöntemi yakıt ve ürün kuralına dayanmaktadır. Yakıt kuralı, bir ekserji akımı içerisinde herhangi bir sistem bileşeninden ekserjinin çıkarılarak, yakıtın tanımında giriş ve çıkış arasındaki ekserji farkı dikkate alınır. Ürün kuralı ise, ilgili sistem bileşeninin içindeki bir ekserji akımına ayrıca ekserji eklenmesi durumunu tanımlamaktadır. Ürün yaklaşımı, sistem bileşeni içinde ürün olarak tanımlanan akımlara eklenecek her ekserji akımının aynı ortalama maliyette olduğunu öngörmektedir. SPECO yaklaşımına göre tüm sistem ve komponentleri için geçerli olan maliyet denge denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir (Balli vd.,2008, Bejan vd., 1995 ve Lazzaretto ve Tsatsaronis, 2006):

$$\sum_{in} \dot{C} + \dot{Z}^T = \sum_{out} \dot{C} + \dot{C}_W \quad (25)$$

Burada, \dot{C} ve \dot{C}_W ekserji akımlarının ve gücün ekserji maliyetlerini göstermektedir. \dot{Z}^T ise incelenen sistemin toplam düzeltilmiş maliyetini simgelemekte ve aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$\dot{Z}^T = \dot{Z}^{CIC} + \dot{Z}^{OM} \quad (26)$$

3. DENEYSEL TURBOJET MOTORUN İNCELENMESİ

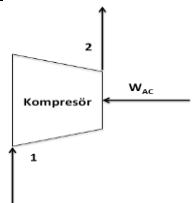
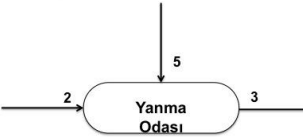
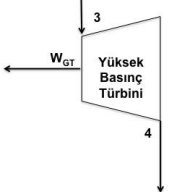
3.1. Sistem Tanımı ve Varsayımlar

Birinci ve ikinci termodinamik yasaları için sistemin iyi tanımlanması önemlidir. Tüm sistemin şematik gösterimi Şekil 2’de gösterilmiştir. Ek olarak, bu çalışmada kabul edilen varsayımlar aşağıdadır:

- Gaz türbin motor durağan durum ve durağan akış koşullarında çalışmıştır. Deneyler test odasında statik koşullarda yapılmıştır.
- Kompresör, yanma odası ve türbin komponentleri adyabatiktir.
- Yanma odasındaki basınç düşümü ihmal edilebilir seviyededir.
- Kinetik, potansiyel enerji ve ekserjilerdeki değişimler ihmal edilebilir seviyededir.

- Standart jet yakıt ve biyoyakıtın kimyasal formülleri sırasıyla $C_{12}H_{23}$ (Baklacioglu vd., 2015) ve $C_{19}H_{36}O_2$ olarak alınmıştır (Habib vd., 2010).
- Alt ısı değerleri sırasıyla jet yakıt için $42800 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, biyoyakıt için ise $37400 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ olarak alınmıştır.

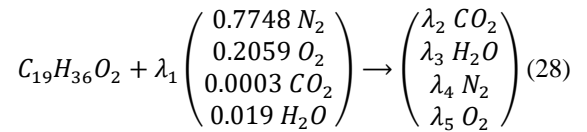
Tablo 2: Motor komponentlerinin enerji korunumu, ekserji ve eksergoekonomi denge denklemleri

Komponent	Kontrol Hacmi	Enerji ve Ekserji Denklemleri	Eksergoekonomi Denklemleri
Kompresör (K)		$\dot{W}_K + \dot{E}X_1 - \dot{E}X_2 = \dot{D}_K$ $\dot{W}_K = \dot{m}(h_2 - h_1)$ $\epsilon_K = \frac{\dot{E}X_2 - \dot{E}X_1}{\dot{W}_K}$	$\dot{C}_1 + \dot{C}_{W,K} - \dot{C}_2 + \dot{Z}_K^T = 0$
Yanma Odası (YO)		$\dot{E}X_2 + \dot{E}X_5 - \dot{E}X_3 = \dot{D}_{YO}$ $\epsilon_{YO} = \frac{\dot{E}X_3}{\dot{E}X_2 + \dot{E}X_5}$	$\dot{C}_2 + \dot{C}_5 - \dot{C}_3 + \dot{Z}_{YO}^T = 0$
Yüksek Basınç Türbini (YBT)		$\dot{E}X_3 - \dot{E}X_4 - \dot{W}_{YBT} = \dot{D}_{YBT}$ $\dot{W}_{YBT} = \dot{m}(h_3 - h_4)$ $\epsilon_{YBT} = \frac{\dot{W}_{YBT}}{\dot{E}X_3 - \dot{E}X_4}$	$\dot{C}_3 + \dot{C}_{W,YBT} - \dot{C}_4 + \dot{Z}_{YBT}^T = 0$

Tablo 3: Yanma denklemleri katsayıları

Sabit	JetYakıt		Biyoyakıt	
	İdeal	Gerçek	İdeal	Gerçek
λ_1	82.29	368.66	131.13	574.94
λ_2	12.024	12.11	19.04	19.17
λ_3	13.063	18.50	20.50	28.92
λ_4	61.289	274.58	97.66	428.21
λ_5	0.00	58.15	0.00	90.38

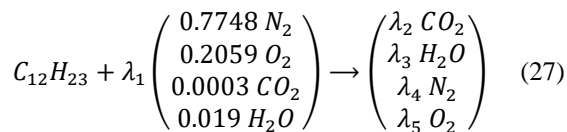
- Deneysel sırasındaki ortam koşulları sıcaklık ve basınç değerleri sırasıyla 306 K ve 91.4 kPa olarak alınmıştır.
- Havanın bileşimi %77.48 nitrojen, %20.59 oksijen, %0.03 karbon dioksit ve %1.9 su buharı olarak kabul edilmiştir.
- Hava ve yanmış egzoz gazları ideal gaz olarak kabul edilmiştir.



Yanma denklemlerindeki, λ_1 , λ_2 , λ_3 , λ_4 ve λ_5 ise, yanma reaksiyon katsayılarını simgelemekte ve değerleri Tablo 3'de verilmiştir.

3.2. Motor Komponentlerinin I. ve II. Yasa Analizleri

Yapılan varsayımlara göre, her bir komponenti için enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri Tablo 2'de verilmiştir. Diğer taraftan, jet yakıt ve biyoyakıt için yanma denklemleri sırasıyla aşağıdaki şekilde yazılmıştır:



3.3. Motor Komponentlerinin Eksergoekonomik Analizleri

Ekserji ve ekonomi analizini yapmadan önce, sistemin ekonomik verisi elde edilmelidir. Turbojet motorun analizi için gerekli ekonomik veriler Tablo 4 ve 5'de verilmiştir. Ayrıca, Denklem 25'in her bir motor komponenti için düzenlenmiş durumları Tablo 2'de verilmiştir. Tüm motor için ise eksergoekonomik denge denklemleri:

$$\dot{C}_1 + \dot{C}_5 - \dot{C}_4 + \dot{Z}_{TJE}^T = 0 \quad (29)$$

Tablo 4: Turbojet motorun ve komponentlerinin yatırım maliyetleri

Komponent	PEC (US\$)	\dot{Z}_k^{CIC} (US\$/h)	\dot{Z}_k^{OM} (US\$/h)	\dot{Z}^T (US\$/h)
Kompresör (K)	1070.70	205.22	178.45	383.67
Yanma Odası (YO)	797.98	152.95	133.00	285.94
Yüksek Basınç Türbini (YBT)	1131.30	216.83	188.55	405.38
Turbojet Motor (TJ)	3000.00	575.00	500.00	1074.99

Tablo 5: Eksergoekonomi analizi için ekonomik girdi parametreleri

Parametre	Birim	Değer
CIC	US\$	3000
OM	US\$.yr ⁻¹	400
i	%	10
j	%	15
n	yr	10
τ	h. yr ⁻¹	0.8
PR (Jet Yakıt)	TL.lt ⁻¹	3
PR (Biyoyakıt)	TL.lt ⁻¹	3
ER	TL.US\$ ⁻¹	3

4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışmada, küçük ölçekli bir turbojet motoru ekserji ve eksergoekonomi yöntemleri ile incelenmiştir. Bu inceleme standart jet yakıt ve biyoyakıt kullanım durumları için yapılmıştır. Böylece, performans ve eksergoekonomi karşılaştırması da turbojet motor için yapılmıştır.

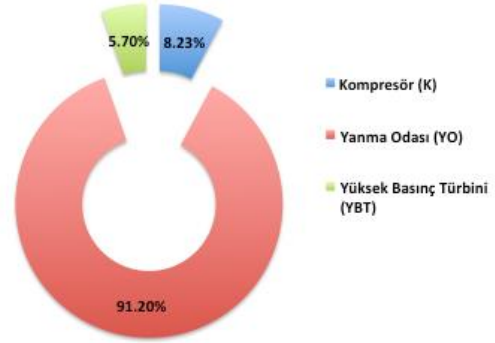
4.1. Ekserji Analiz Sonuçları

Standart havacılık yakıtıyla beslenen turbojet motor için ekserji analizi Tablo 6'da sunulmuştur. En yüksek ekserji yıkımı diğer tüm komponentlere kıyasla yanma odasında gerçekleşmektedir. Kompresör, yanma odası ve gaz türbini bileşenleri için ise ekserji yıkım oranları sırasıyla 10.10 kW, 111.98 kW ve 0.70 kW'dır. Bilindiği gibi, ekserji yıkımı sistemdeki tersinmezliği ve verimliliği belirtmektedir. Bu nedenle, yüksek basınç türbini sistemdeki en yüksek ekserji verimine sahiptir. Kompresör, yanma odası ve yüksek basınç türbini bileşenlerinin ekserji verimleri sırasıyla %75.22, %48.34 ve %98.44 olarak tespit edilmiştir. Tablo 6'dan da anlaşılabilir gibi, yakıt tüketim oranı ve tersinmezlik ekserji verimliliği ile ters orantılıdır.

Tablo 6: Jet yakıt ile ekserji analiz sonuçları

Komponent	F (kW)	P (kW)	D (kW)	ϵ (%)	IP (kW)	χ (%)	δ	ξ
Kompresör (K)	40.75	30.65	10.10	75.22	2.50	8.23	0.03	0.06
Yanma Odası (YO)	216.76	104.78	111.98	48.34	57.85	91.20	0.37	0.62
Yüksek Basınç Türbini (YBT)	45.23	44.52	0.70	98.44	0.01	0.57	0.00	0.00

Tabloya ek olarak, Şekil 3 farklı bir bakış açısından yanma odasındaki en yüksek ekserji yıkımını göstermektedir.

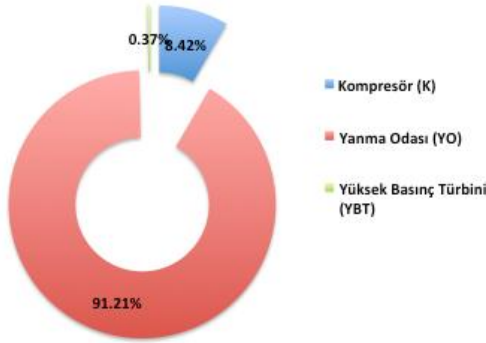


Şekil 3: Jet yakıt ile komponentlerin göreceli tersinmezlik değerleri

Tablo 7, biyoyakıtla beslenen turbojet motorunun ekserji analizinden elde edilen sonuçlarını özetlemektedir. Standart havacılık yakıtı durumuna benzer şekilde ekserjetik yaklaşım yapılabilir. Tablo 7'den anlaşılacağı üzere kompresör, yanma odası ve yüksek basınç türbini komponentleri için ekserji yıkım oranı sırasıyla 10.54 kW, 114.21 kW ve 0.46 kW olarak hesaplanmıştır. Komponentlerdeki ekserji yıkım oranı ile ters orantılı olarak, kompresör, yanma odası ve yüksek basınç türbini için ekserji verimleri sırasıyla %74.52, %47.68 ve %99.00 olarak bulunmuştur. Ekserji yıkım ve iyileştirme potansiyeli arasındaki ilişkiye bağlı olarak, iyileştirme potansiyeli oranları kompresör ve yanma odası için sırasıyla 2.69 kW ve 59.76 kW'tır. Ek olarak, yüksek basınç türbininin iyileştirme potansiyeli, sıfıra yakın olması nedeniyle göz ardı edilebilir. Bileşenlerin görece ekserji yıkımları da Şekil 4'te gösterilmektedir.

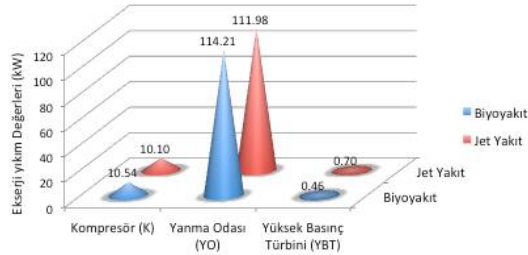
Tablo 7: Biyoyakıt ile ekserji analiz sonuçları

Komponent	F (kW)	P (kW)	D (kW)	ε (%)	IP (kW)	χ (%)	δ	ξ
Kompresör (K)	41.37	30.83	10.54	74.52	2.69	8.42	0.03	0.06
Yanma Odası (YO)	218.28	104.07	114.21	47.68	59.76	91.21	0.37	0.63
Yüksek Basınç Türbini (YBT)	45.87	45.41	0.46	99.00	0.00	0.37	0.00	0.00

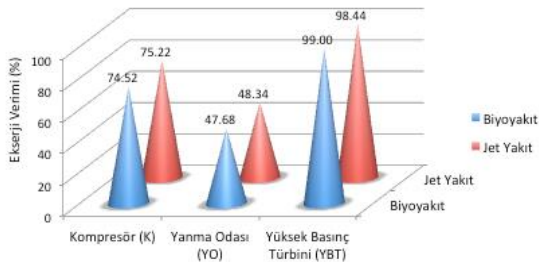


Şekil 4: Biyoyakıt ile komponentlerin göreceli tersinmezlik değerleri

Şekil 5, motor standart havacılık yakıtı ve biyoyakıt ile çalıştırılırken, motor komponentlerindeki ekserji yıkım oranlarını karşılaştırmak üzere çizilmiştir. Standart havacılık yakıtıyla beslenen motor için, kompresör ve yanma odası içerisindeki ekserji yıkım oranı, biyoyakıt kullanım durumundan daha yüksektir. Öte yandan, yüksek basınç türbinindeki ekserji yıkım oranı, biyoyakıt kullanım durumunda daha yüksek olmaktadır. Komponentlerin ekserji verimliliği değerlerine bakıldığında, Şekil 6'ya göre biyoyakıt kullanımı, kompresörün ve yüksek basınç türbininin ekserji verimliliğini artırırken, yanma odasının ekserjetik performansı bozulmaktadır.

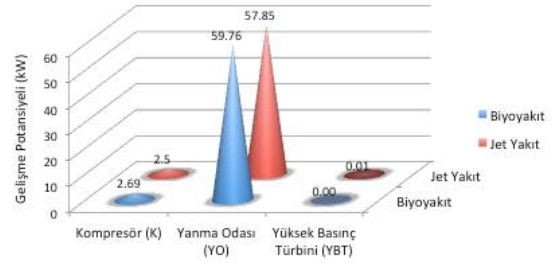


Şekil 5: Komponentlerin ekserji yıkım değerleri



Şekil 6: Komponentlerin ekserji verimleri

Şekil 7'den açıkça anlaşıldığı üzere, motor standart havacılık yakıtını kullanırken, yüksek basınç türbini hariç diğer komponentler biyoyakıt kullanım durumuna göre daha az iyileştirme potansiyeline sahiptir. Yüksek basınç türbini iyileştirme potansiyeli ise biyoyakıt kullanımında iyileştirmeye ihtiyaç duymamaktadır.



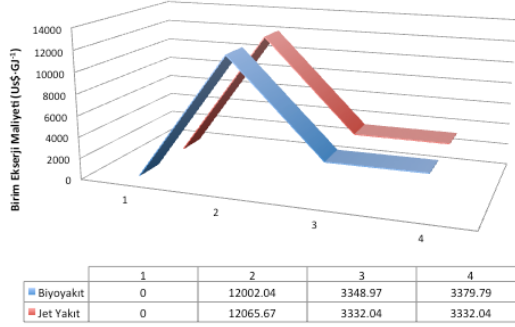
Şekil 7: Komponentlerin gelişme potansiyelleri

4.2. Eksergoekonomik Analiz Sonuçları

Standart havacılık ve biyoyakıtın saatlik kullanım maliyetleri sırasıyla 7.070 US\$ ve 8.215 US\$ olarak elde edilmiştir. Böylece, düzeltilmiş maliyetler ile ekserjetik maliyet değerleri her bir motor istasyonunda hesaplanmıştır. Her bir akım için ekserji ve birim ekserji maliyeti Table 8'de verilmiştir. Burada, yanma odasının birim yakıt ekserji maliyeti standart havacılık yakıtı için 9.060 US\$·GJ⁻¹, biyoyakıt için ise 10.455 US\$·GJ⁻¹ olarak bulunmuştur. Ek olarak, Şekil 8'de de görüleceği üzere, ekserji maliyeti yanma odası çıkışında en yüksek iken, kompresör girişinde ortam şartları nedeniyle ekserji maliyeti bulunmamaktadır. Bu durum her iki yakıt kullanımı için de geçerli olmaktadır.

Tablo 8: Eksergoekonomi sonuçları

İstasyon No	Jet Yakıtı			Biyoyakıt		
	\dot{E}_x (GJ/h)	\dot{C} (US\$/h)	c (US\$/GJ)	\dot{E}_x (GJ/h)	\dot{C} (US\$/h)	c (US\$/GJ)
1	0	0	0	0	0	0
2	0.11	1331.64	12065.67	0.11	1332.21	12002.04
3	0.49	1624.65	3332.04	0.48	1626.37	3348.97
4	0.32	1082.06	3332.04	0.32	1083.21	3379.79
5	0.78	7.07	9.06	0.78	8.22	10.46



Şekil 8: Turbojet motorda ekserji akım maliyetlerinin değişimi

5. SONUÇ

Bu çalışma ekserji tabanlı yöntemler kullanarak deneysel bir turbojet motorun performans ve ekonomik parametrelerini karşılaştırması nedeniyle literatüre katkıda bulunmaktadır. Bu çalışmanın sonunda, aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir:

- İncelenen turbojet motorda biyoyakıt kullanımı önemli bir performans iyileştirmesine neden olmamıştır.
- Standart havacılık yakıtı kullanım durumuna benzer şekilde, motor biyoyakıt ile çalıştırıldığında da en yüksek ekserji yıkımı yanma odasında gerçekleşmektedir.
- Biyoyakıtın daha yüksek ekserji maliyetine sahip olması, standart havacılık yakıtı yerine kullanım için ekonomik olarak değerlendirilmesi gereken bir parametre olmaktadır.
- Biyoyakıt ile kullanımda, motorun ekserjetik performansında önemli bir gelişme yada kayıp olmamaktadır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu araştırmaya 1503F106 no'lu BAP projesi ile verilen destek nedeniyle Anadolu Üniversitesi'ne teşekkür ederler.

SEMBOLLER DİZİNİ

ACIC	Yıllık sermaye maliyeti (US\$/yr ⁻¹)
c	Ortalama birim ekserji maliyeti (US\$/GJ ⁻¹)
c_p	Sabit basınçta özgül ısı (kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
C	Ekserji maliyeti (US\$/h ⁻¹)
CIC	Sermaye maliyeti (US\$)

CRF	Sermayenin yeniden elde edilmesi faktörü
\dot{D}	Ekserji yıkımı (kW)
e_x	Özgül ekserji (kJ·kg ⁻¹)
\dot{E}_x	Ekserji akımı (kW)
\dot{F}	Yakıt ekserjisi (kW)
$\dot{F}C$	Yıllık yakıt maliyeti (US\$/yr ⁻¹)
h	Özgül entalpi (kJ·kg ⁻¹)
$\dot{I}P$	Geliştirme potansiyeli (kW)
i	Faiz oranı (%)
j	Amortisman oranı (%)
K	Kompresör
\dot{L}	Birim zamanda ekserji kaybı (kW)
LHV	Alt ısıl değer (kJ·kg ⁻¹)
\dot{m}	Kütle akışı (kg·s ⁻¹)
\dot{P}	Ürün ekserjisi (kW)
P	Basınç (kPa)
PEC	Satın alınan ekipman maliyeti (US\$)
PW	Mevcut değer (US\$)
PWF	Mevcut değer faktörü
\dot{Q}	Isı (kW)
R_u	Evrensel gaz sabiti (kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
S	Hurda değeri (US\$)
T	Sıcaklık (K)
TJ	Turbojet motor
\dot{W}	İş (kW)
x	Mol kesri
YBT	Yüksek basınç türbini
YO	Yanma odası
\dot{Z}	Sermaye maliyet akımı (US\$/h ⁻¹)
γ	Ekserjinin enerjiye oranı
δ	Yakıt tüketim oranı
ε	Ekserji verimi
ξ	Üretkenlik kaybı
τ	Tam yükte yıllık çalışma saati (h)
χ	Görelî tersinmezlik
ϕ	İşletme ve bakım faktörü

İndisler

0	Referans hal
a	Hava
CH	Kimyasal
e	Enerjetik
f	Yakıt
in	Giriş
k	Bileşen
KN	Kinetik
mix	Karışım
OM	İşletme ve bakım

out	Çıkış
PH	Fiziksel
PT	Potansiyel
T	Toplam
W	İş

KAYNAKLAR

- Aydin, H., Turan, O., Midilli, A. and Karakoc, T.H. (2012) 'Exergetic and exergo-economic analysis of a turboprop engine: a case study for CT7-9C', *Int. J. Exergy*, Vol. 11, No. 1, pp.69–88.
- Aydin, H., Turan, O., Midilli, A., Karakoc, T.H., (2013).Energetic and exergetic performance assessment of a turboprop engine at various loads, *International Journal of Exergy* 13: 543-564.
- Baklacioglu, T., Turan, O., Aydin, H. (2015). Dynamic modeling of exergy efficiency of turboprop engine components using hybrid genetic algorithm-artificial neural networks. *Energy*.
- Balli, O., (2014).Afterburning effect on the energetic and exergetic performance of an experimental turbojet engine (TJE), *International Journal of Exergy* 14: 212-243.
- Balli, O., Aras, H., Aras, N., Hepbasli, A., (2008).Exergetic and exergoeconomic analysis of an Aircraft Jet Engine (AJE), *International Journal of Exergy* 5: 567-581.
- Balli, O., Hepbasli, A., (2014).Exergoeconomic, sustainability and environmental damage cost analyses of T56 turboprop engine, *Energy* 64 582-600.
- Bejan A, Tsatsaronis G, Moran M. (1995) *Thermal design and optimization*, John Wiley & Sons Inc.
- Bilgen, S., Sarıkaya, İ. (2015). Exergy for environment, ecology and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1115-1131.ZZ
- Boyce, M. P. (2011). *Gas turbine engineering handbook*. Elsevier.
- C. Rojo, X. Vancassel, P. Mirabel, J.-L. Ponche, F. Garnier, (2015). Impact of alternative jet fuels on aircraft-induced aerosols, *Fuel*, Volume 144, Pages 335-341, doi: 10.1016/j.fuel.2014.12.021.
- Dincer, I. Rosen, M. A. (2012) *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*, Elsevier.
- Dincer, I., & Cengel, Y. A. (2001). Energy, entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering. *Entropy*, 3(3), 116-149.
- Ehyaei, M.A., Anjiridezfuli, A., Rosen, M.A., (2013). Exergetic analysis of an aircraft turbojet engine with an afterburner, *Thermal Science* 17: 1181-1194.
- Ekici, S., Altuntas, O., Açıkkalp, E., Sogut, M. Z., Karakoc, T.H., (2016). Assessment of thermodynamic performance and exergetic sustainability of turboprop engine using mixture of kerosene and methanol, *International Journal of Exergy*, 19, 295-314.
- El-Sayed, A.F. (2008). *Aircraft Propulsion and Gas Turbine Engines*. CRC Press.
- İnternet,2017, <https://grabcad.com/library/wren-mw54-gas-turbine-engine-1>
- Jeffrey M. Bergthorson, Murray J. Thomson, (2015).A review of the combustion and emissions properties of advanced transportation biofuels and their impact on existing and future engines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 42, Pages 1393-1417, doi: 10.1016/j.rser.2014.10.034.
- Kanoğlu, M., Çengel, Y. A., & Dinçer, İ. (2012). Efficiency, Environment, and Sustainability. In *Efficiency Evaluation of Energy Systems* (pp. 1-7). Springer New York.
- Kotas, T.J. (1985). *the Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. Anchor Brendon Ltd.
- Kwak, H. Y., Kim, D. J., Jeon, J. S., (2003). Exergetic and thermoeconomic analyses of power plants. *Energy*, 28: 343-360.
- Lazzaretto, A., Tsatsaronis, G., (2006).SPECO: a systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. *Energy*, 31,1257-1289.
- Mattingly, J.D., Heiser, W.H., Pratt, D.T. (2002). *Aircraft engine design* (2nd Ed.). AIAA Education Series.
- Niven Winchester, Robert Malina, Mark D. Staples, Steven R.H. Barrett, (2015).The impact of advanced biofuels on aviation emissions and operations in the U.S., *Energy Economics*, Volume 49, Pages 482-491, doi: 10.1016/j.eneco.2015.03.024.
- Paulo André Cremonez, Michael Feroldi, Amanda Viana de Araújo, Maykon Negreiros Borges, Thompson Weiser Meier, Armin Feiden, Joel Gustavo Teleken, (2015).Biofuels in Brazilian aviation: Current scenario and prospects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 43, Pages 1063-1072, doi: 10.1016/j.rser.2014.11.097.
- Rosen, M. A., Dincer, I., (2003).Exergy–cost–energy–mass analysis of thermal systems and processes. *Energy Conversion and Management*, 44, 1633-1651.
- Sohret, Y., Dinc, A., Karakoc, T.H., (2015).Exergy analysis of a turbofan engine for an unmanned aerial vehicle during a surveillance mission, *Energy* 93: 716-729, doi: 10.1016/j.energy.2015.09.081
- Sohret, Y., Sogut, M.Z., Karakoc, T.H., Turan, O. (2016). Customized Application of Exergy Analysis Method to PW120A Turboprop Engine for Performance Evaluation. *International Journal of Exergy*, 20(1), 48-65, DOI: 10.1504/IJEX.2016.076678.

- Stougie, L., Kooi, H. J. V. D. (2012). Exergy and sustainability. *International Journal of Exergy*, 11(4), 508-517.
- Tai, V.C., See, P.C., Mares, C., (2014). Optimisation of energy and exergy of turbofan engines using genetic algorithms, *International Journal of Sustainable Aviation* 1: 25-42.
- Tona, C., Raviolo, P.A., Pellegrini, L.F., de Oliveira Jr. S., (2010). Exergy and thermoeconomic analysis of a turbofan engine during a typical commercial flight, *Energy* 35: 952-959.
- Torres, C., Valero, A., Serra, L., & Royo, J., (2002). Structural theory and thermoeconomic diagnosis: Part I. On malfunction and dysfunction analysis. *Energy conversion and management*, 43: 1503-1518.
- Tsatsaronis, G. (2007). Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics. *Energy*, 32(4), 249-253.
- Tsatsaronis, G., & Morosuk, T. (2015). Understanding the Formation of Costs and Environmental Impacts Using Exergy-Based Methods. In *Energy Security and Development* (pp. 271-291). Springer India.
- Turan, O., Aydın, H., Karakoc, T.H., Midilli, A., (2014). Some exergetic measures of a JT8D turbofan engine, *Journal of Automation and Control Engineering* 2: 110-114.
- van Gool, W. (1992). Exergy analysis of industrial processes. *Energy*, 17(8), pp.791-803.
- Xiang, J., Cali, M. and Santarelli, M. (2004). Calculation for physical and chemical exergy of flows in systems elaborating mixed-phase flows and a case study in an IRSOFC plant. *International Journal of Energy Research*, 28(2), pp.101-115
- Zafar, S. Dincer, I. (2014). Energy, exergy and exergoeconomic analyses of a combined renewable energy system for residential applications, *Energy and Buildings* 71: 68-79.
- Zehra Habib, Ramkumar Parthasarathy, Subramanyam Gollahalli, (2010). Performance and emission characteristics of biofuel in a small-scale gas turbine engine, *Applied Energy*, Volume 87, Issue 5, Pages 1701-1709, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.10.024.