

Gaz Türbinli Uçak Motorlarının Termodinamik Modellenmesi

Thermodynamic Modeling of Gas Turbine Aero-Engines

Yasin ŞÖHRET^{1*}, T. Hikmet KARAKOÇ²

Özet- Bu çalışmada, uçak motorlarında kullanılmakta olan bir gaz türbinli motorun termodinamik bağıntılar yardımıyla modellenmesi ve irdelenmesinde kullanılacak yöntem açıklanmıştır. Gaz türbinli motor, bileşenlere ayrılmış ve her bir bileşen termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarıyla değerlendirilmiştir. Bu çalışmada ortaya konulan yöntem; ileride yapılabilecek turbojet, turboprop ve turbofan tipi gaz türbinli uçak motorlarının termodinamik analiz çalışmalarına temel oluşturacak ve ulusal literatüre kazandırılmıştır. Yöntemin daha iyi anlaşılması için, basit bir gaz türbinli uçak motorunun termodinamik analizi yapılarak; kompresör, yanma odası ve türbinin ekserji verimleri sırasıyla %89.72, %70.85 ve %93.01 olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler- Gaz türbini, uçak motoru, ekserji, termodinamik

Abstract- In this study, a methodology for thermodynamic modeling and assessment of gas turbine engines operating on aircrafts is introduced. Gas turbine engine is analyzed for components separately and each component is evaluated on the basis of first and second laws of thermodynamics. Methodology which is expressed in this paper can provide a basis for thermodynamic analysis of turbojet, turboprop and turbofan engines in the future. On the other hand, methodology for thermodynamic evaluation of gas turbine aero-engines is added to national literature by this study. For better understanding of the methodology, a simple gas turbine engine assessed; exergy efficiencies of compressor, combustion chamber and turbine are found to be 89.72%, 70.85% and 93.01% respectively.

Keywords- Gas turbine, aircraft engine, aircraft, exergy, thermodynamics

I. GİRİŞ

Günümüzde, geleneksel enerji kaynaklarında meydana gelen azalma daha verimli sistem tasarımlarına ve alternatif enerji kaynaklarının kullanımını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle, sistemlerin termodinamik kurallara göre irdelenmesi ve verimliliklerinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Termodinamiğin birinci yasası, enerjinin korunumu olarak bilinmektedir. Birinci yasa analizleri kullanılarak, bir sistemin enerji verimliliği belirlenebilir ve tersinir olması durumunda ulaşılabilecek teorik verim ile kıyaslanması mümkündür. Birinci yasa, enerjinin niceliğini incelerken, ikinci yasa ile enerjinin niteliği irdelenebilir. İkinci yasa, bir enerji sisteminin çalışma koşullarının sınırlandırılmaları dahilinde ulaşabileceği en yüksek verimi belirlemek için kullanılır. Bu sayede, sistemdeki tersinmezlikler ve sistemin iyileştirilebilirlik potansiyeli ortaya konulabilir. [1, 2].

Ekserji, bir sistemin çevre ile termodinamik denge haline gelmesi sırasında sistemden elde edilebilecek en yüksek teorik iş olarak tanımlanmaktadır [3]. Uluslararası literatürde yer alan pek çok çalışma, termodinamik modelleme yöntemi olarak ekserji analizi yapmanın gerekliliğini ortaya koymaktadır. Ekserji temelli bir termodinamik analiz yapılarak meydana enerji kayıplarının sistemdeki yerlerinin ve büyüklüklerinin belirlenmesi mümkündür. Böylelikle kayıpların azaltılması ve en aza indirilmesi mümkün olacaktır. Ayrıca ekserji analizi, sistemin tasarımı aşamasında verimliliğinin ne düzeyde gerçekçi olup olmadığı konusunda da ipucu vermektedir [4].

Türkiye ulaşım sektörünün enerji ve ekserji analizleri, büyüekte olan havacılık sektörünün enerji tüketiminde ve çevresel etkiler konusunda etkin rol oynadığını göstermiştir [5]. Diğer yandan, ekserji analizi uçak motor tasarım sürecinde her ne kadar göz ardı edilse de gereklidir. Günümüzde gerçekleştirilen uçak

^{1*} Sorumlu yazar iletişim: ysohret@gmail.com

Uçak Gövde-Motor Bakım Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Anadolu Üniversitesi, Yunus Emre Kampüsü, Eskişehir

² İletişim: hkarakoc@anadolu.edu.tr

Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Anadolu Üniversitesi, İki Eylül Kampüsü, Eskişehir

motoru tasarımları, yakıt tüketiminin optimizasyonu ilkesine dayalı yürütülmektedir. Oysa ki, termodinamik optimizasyon ve entropi üretiminin en aza indirilmesi çalışmaları, daha verimli tasarımlar ortaya çıkaracaktır [6].

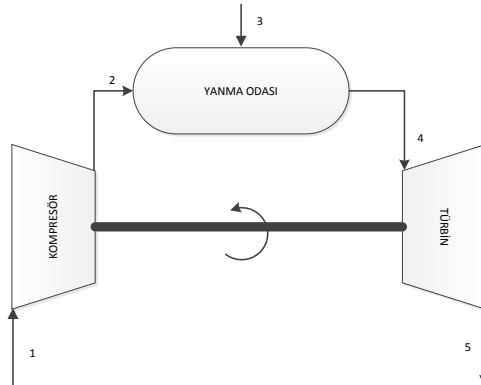
Uluslararası literatürde gaz türbinli uçak motorlarının termodinamik analiz çalışmalarına sıkça rastlansa da ulusal literatürde bu konuya ilişkin yeterli yayın bulunmamaktadır [7-15]. Bu nedenle, bir gaz türbinli uçak motorunun termodinamik incelemelerinin yapılabilmesine imkan sağlayacak modelleme çalışması yapılmıştır. Ulusal literatüre kazandırılacak modelleme ile ekserjinin tasarım aşamasındaki gerekliliği vurgulanmış olacak ve ileride yapılması muhtemel çalışmalara temel oluşturacaktır.

II. SİSTEM TANIMI

Bir uçağa etki eden aerodinamik kuvvetlerden olan itki elde etmek amacıyla gaz türbinli motorlardan yararlanılır. Gaz türbinli uçak motorları; turbojet, turboprop ve turbofan olarak sınıflandırılmaktadır. Temelde Brayton çevrimine dayalı çalışmakta olan her üç motorun özellikleri ve birbirlerinden farkları bu bölümde açıklanmıştır.

A. Turbojet Motor

Turbojet motorlar, basit bir gaz türbinli motor tipidir. Sırasıyla hava alığı, kompresör, yanma odası, türbin ve egzoz lülesi bileşenlerinden meydana gelmektedir. Ortamdan alınan hava, alık vasıtasıyla kompresör girişine yönlendirilirken akışın düzenli bir hal alması sağlanır. Kompresörde basınçlandırılan ve buna bağlı olarak sıcaklığı artan hava, daha sonra yanma odasına doğru ilerler. Basınçlandırılmış ve sıcaklığı yükseltilmiş hava üzerine çeşitli yollarla buharlaştırılmış olan yakıt püskürtülerek yanma sağlanır. Bunun sonucunda, yüksek sıcaklıklara ulaşan yanma gazı türbinden geçerek güç üretimi sağlar. Burada üretilen güç, kompresörün ve mekanik aksamın ihtiyacını karşılayacak düzeydedir. Türbini terk eden yanma gazları, egzoz lülesi yardımıyla hızlandırılarak dış ortama atılır. Böylelikle hava aracının hareketi için gereken itki sağlanmış olur [16,17]. Şekil 1'de bir turbojet motorunun şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1. Bir turbojet motorunun şematik gösterimi

B. Turboprop Motor

Turboprop motorlar, kısa mesafeli uçuşlar gerçekleştiren uçaklarda yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Basit bir gaz türbinli uçak motoruna bir pervane eklenerek türetilmişlerdir. Pervanenin görevi, havanın motora alınmadan önce sıkıştırılmasını sağlayarak motora giren hava debisini artırmaktır. Tek şaftlı veya iki şaftlı olarak sınıflandırılırlar. Tek şaftlı turboprop motorlarda, turbojetlerde olduğu gibi türbin yanma gazlarını kullanarak ürettiği gücü şaft aracılığıyla hem kompresöre hem de pervaneye iletir. İki şaftlı turboprop motorlarda ise, serbest türbin ya da güç türbini olarak adlandırılan bir türbin daha bulunur. Bir şaft türbinden aldığı gücü kompresöre iletirken, ikinci şaft serbest türbinden elde edilen gücü doğrudan pervaneye aktarır [16-19].

C. Turbofan Motor

Turbofan motorlar, gaz türbinli uçak motorlarının günümüzdeki en gelişmiş tipidir. Turboprop motorlarda bulunan pervane yerine fan kullanılmaktadır. Fanın kullanım amacı tıpkı pervanede olduğu gibi

havanın kompresöre girmeden önce kısmen de olsa basıncının yükseltilmesi ve motora birim zamanda giren hava miktarının artırılmasıdır. Ayrık akışlı ve tümleşik akışlı tipleri bulunan turbofan motorlar, günümüzde kullanılan pek çok yolcu uçağının ana güç ünitesidir [16, 17].

III. TERMODİNAMİK ALTYAPI

A. Enerji Terimleri

Bir termodinamik sistemin enerji analizi, enerjinin korunumu ilkesine dayalıdır. Sürekli akışlı sürekli açık bir sistem olan gaz türbinli uçak motorunun bileşenleri de sürekli akışlı sürekli açık sistem olarak değerlendirilir. Bu nedenle kütle korunumu ve enerjinin korunumu ifadeleri yazılabilir [20]:

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \quad (1)$$

$$\sum \dot{E}_g = \sum \dot{E}_ç \quad (2)$$

Denklem 2'den de görüleceği üzere, sürekli akışlı sürekli açık bir sistemde sisteme giren ve sistemden çıkan enerjiler eşittir. Başka bir deyişle, sistemde kütle ve enerji birikimi söz konusu değildir.

B. Ekserji Terimleri

Ekserjinin bileşenleri; kinetik ekserji, potansiyel ekserji fiziksel ekserji ve kimyasal ekserji olarak tanımlanmaktadır [21]:

$$\dot{E}x = \dot{E}x_k + \dot{E}x_p + \dot{E}x_{fz} + \dot{E}x_{km} \quad (3)$$

İş akışkanının kinetik ve potansiyel enerji değişimlerinin ihmal edilmesi durumunda ekserji yalnızca fiziksel ve kimyasal ekserji bileşenlerinden meydana gelmektedir. Fiziksel ekserji ifadesi aşağıda verilmiştir [22]:

$$\dot{E}x_{fz} = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (4)$$

Brayton çevrimine dayalı çalışan güç sistemlerinde kullanılan iş akışkanlı hava ve yanma sonu gazlarıdır. İdeal gaz kabulleri doğrultusunda fiziksel ekserji için aşağıdaki ifade yazılabilir [22]:

$$\dot{E}x_{fz} = \dot{m}[c_p(T - T_0) - T_0(c_p \ln(T/T_0) - R \ln(P/P_0))] \quad (5)$$

Eşitlik 5'te verilen sabit basınçta özgül ısı değeri hava ve yanma sonu gazları için sırasıyla Eşitlik 6 ve 7'de verilen bağıntılar yardımıyla hesaplanır [23]:

$$c_{p,hava} = 1.04841 - (383.719/10^6)T + (9.45378/10^7)T^2 - (5.49031/10^{10})T^3 + (7.92981/10^{14})T^4 \quad (6)$$

$$c_{p,egzoz} = (\sum N_i M_i c_{p,i}) / (\sum N_i M_i) \quad (7)$$

$C_x H_y O_z S_w$ yapısındaki bir sıvı yakıt ve yanma sonu gazlarının kimyasal ekserji hesabı için H_{alt} yakıtın alt ısı değeri olmak üzere, sırasıyla aşağıdaki bağıntı kullanılabilir [22, 24]:

$$\dot{E}x_{km,yakıt} = \dot{m}_{yakıt} H_{alt} \begin{bmatrix} 1.0401 \\ +0.01728(y/x) \\ +0.0432(z/x) \\ +0.2196(w/x)(1 - 2.0628(y/x)) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\dot{E}x_{km,egzoz} = (\dot{m}_{egzoz}/M_{egzoz}) [\sum x_i \bar{e}x_{km,i} + \bar{R}T_0 \sum x_i \ln x_i] \quad (9)$$

Eşitlik 9'da yer alan x_i , yanma gazı bileşenin molar oranını, M_{egzoz} ise mol ağırlığını ifade etmektedir. Literatürde tanımlanan F-P kuralına (F: fuel, P: product) göre; bir termodinamik sistemden elde edilmek istenen

büyüklikler ürün, bu amaçla sisteme verilen büyüklikler ise yakıt olarak tanımlanır. Bu doğrultuda sistemde oluşan ekserji yıkımı ise şu şekilde ifade edilir [24]:

$$\dot{E}x_{yıkım} = \dot{E}x_{yakıt} - \dot{E}x_{ürün} - \dot{E}x_{kayıp} \quad (10)$$

Eşitlik 10'da ifade edildiği üzere; bir sistemde meydana gelen ekserji yıkımı, sisteme giren yakıtların ve sistemden çıkan ürünlerin ekserji değerleri ile sistemde meydana gelen ekserji kayıplarına bağlıdır. Burada sisteme giren tüm büyüklikler yakıt olarak tanımlanır. Benzer şekilde sistem sınırlarından çıkan ısı, iş ve akışkanların tümü ürün olarak isimlendirilmektedir. Ekserji kaybı ise, sistemde iyileştirmeler yapılsa dahi önüne geçilemeyen ekserji yıkımlarını kapsamaktadır.

C. Termodinamik Performans Parametreleri

Termodinamik yasalarına dayalı olarak incelenen bir sistemin irdelenmesi ve kıyaslanabilmesi için geliştirilmiş olan kavramlar bu bölümde açıklanacaktır. Bir sistem veya sistem bileşeni için enerji verimi ve ekserji verimi, sistem için tanımlanmış ürünlerin enerji veya ekserji değerinin yakıt ekserji değerine oranıdır [24]:

$$\eta = \dot{E}x_{ürün} / \dot{E}x_{yakıt} \quad (11)$$

$$\eta_{Ex} = \dot{E}x_{ürün} / \dot{E}x_{yakıt} = 1 - [(\dot{E}x_{yıkım} + \dot{E}x_{kayıp}) / \dot{E}x_{yakıt}] \quad (12)$$

Termodinamik sistemlerde yapılacak iyileştirmelerle tersinmezlikleri en aza indirmek ve ekserji yıkımlarını azaltmak mümkündür. Buna bağlı olarak, ekserji iyileştirme potansiyeli van Gool tarafından aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir [25]:

$$I\dot{P}_{Ex} = (1 - \eta_{Ex})\dot{E}x_{yıkım} \quad (13)$$

Bir termodinamik sistemi meydana getiren herhangi bir bileşende meydana gelen ekserji yıkımının sistemin tümünde meydana gelen ekserji yıkımına oranlanmasıyla izafi ekserji yıkım oranı elde edilir [26]:

$$\chi_i = \dot{E}x_{yıkım,i} / \dot{E}x_{yıkım} \quad (14)$$

Yakıt tüketim oranı ise, sistem bileşeninde meydana gelen ekserji yıkımının sisteme verilen toplam yakıtların ekserji miktarına oranıdır [26]:

$$\delta_i = \dot{E}x_{yıkım,i} / \dot{E}x_{yakıt} \quad (15)$$

Ürün tüketim oranı benzer şekilde yazılırsa [26]:

$$\xi_i = \dot{E}x_{yıkım,i} / \dot{E}x_{ürün} \quad (16)$$

Ekserji faktör kavramı Xiang ve arkadaşları tarafından, herhangi bir sistem bileşeni için tanımlanan yakıt ekserjisinin sistemin tümü için tanımlanan yakıt ekserji miktarına oranı olarak ifade edilmiştir [26]:

$$f_i = \dot{E}x_{yakıt,i} / \dot{E}x_{yakıt} \quad (16)$$

IV. GAZ TÜRBİNLİ UÇAK MOTORLARININ TERMODİNAMİK MODELİ

A. Kabuller

Gaz türbinli uçak motorlarının termodinamik analizleri, aşağıdaki kabullere dayandırılarak yapılmaktadır:

- ❖ Sistem, sürekli akışlı sürekli açıktır.
- ❖ İş akışkanı olan hava ve yanmış gazlar ideal gaz olarak değerlendirilir.
- ❖ Tam yanma gerçekleştiği kabul edilir.
- ❖ Kompresör ve türbin adyabatik olarak ele alınır.
- ❖ Kinetik enerji ve ekserji, potansiyel enerji ve ekserji değişimleri ihmal edilebilir düzeydedir.

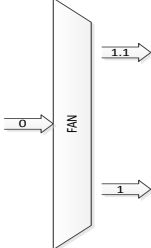
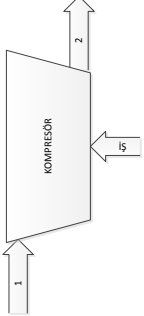
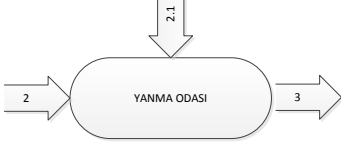
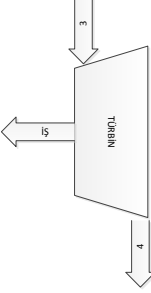
Bunlara ek olarak, motorun çalıştırıldığı ortam şartları, ekserji analizleri için ölü koşul olarak değerlendirilir. Ayrıca gaz türbinli motorun çalıştırılması sırasında kullanılan yakıtın alt ısıl değeri için kabul yapılabilir veya hesaplanabilir.

Diğer yandan, motora alınan ve yanma reaksiyonuna giren havanın nemli ya da kuru olması yanma analizine ve yanma sonu gazların termodinamik analizlerine doğrudan etki eder. Bu kapsamda havanın %75.76 azot, %20.35 oksijen, %0.0345 karbondioksit ve %3.03 su buharından ve %0.8255 diğer gazlardan oluştuğu kabul edilebilir [20].

B. Termodinamik Analiz Yöntemi

Yukarıda açıklanan termodinamik kavramlar ve yapılan kabuller doğrultusunda bir gaz türbinli uçak motorunun termodinamik analizini yapabilmek için sistemin her bir bileşeni için yakıt ve ürün kavramları belirlenmelidir. Bu nedenle bu bölümde diğer uçak motor tiplerinin de incelenmesine de yardımcı olacak turbofan motor bileşenleri için tanımlanan yakıt ve ürün kavramları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: Bir gaz türbinli uçak motor bileşenleri için tanımlanmış termodinamik büyüklükler

Sematik gösterim	Yakıt	Ürün
	$\dot{E}x_0$ \dot{E}_0	$\dot{E}x_1 + \dot{E}x_{1.1}$ $\dot{E}_1 + \dot{E}_{1.1}$
	$\dot{E}x_1 + \dot{E}x_{i\dot{s}}$ $\dot{E}_1 + \dot{E}_{i\dot{s}}$	$\dot{E}x_2$ \dot{E}_2
	$\dot{E}x_2 + \dot{E}x_{2.1}$ $\dot{E}_2 + \dot{E}_{2.1}$	$\dot{E}x_3$ \dot{E}_3
	$\dot{E}x_3$ \dot{E}_3	$\dot{E}x_4 + \dot{E}x_{i\dot{s}}$ $\dot{E}_4 + \dot{E}_{i\dot{s}}$

Tablo 1’de verilen ifadeler, kompresörün belirli kademelerinden tahliye havası alınmadığı durum için geçerlidir. Tahliye havasının söz konusu olması durumunda kompresör ara kademesinden bir çıkış daha olacaktır. Bu durum termodinamik analize dahil edilmelidir.

C. Uygulama

Tablo 2. Basit bir gaz türbinli uçak motorunun termodinamik çevrim değerleri

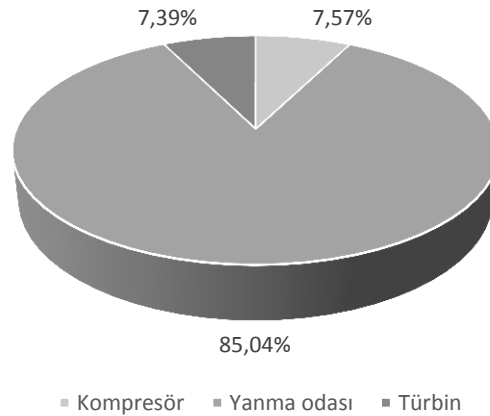
İSTASYON	AKIŞKAN	P (kPa)	T (K)	\dot{m} (kg/s)
0	Hava	101.325	298.150	4.250
1	Hava	101.325	310.150	4.250
2	Hava	1213.785	648.990	4.250
3	Yakıt	101.325	310.150	0.082
4	Yanma gazı	1140.957	1395.852	4.332
5	Yanma gazı	182.553	982.500	4.332

Daha önce yapılan kabuller doğrultusunda, Şekil 1’de şematik gösterimi ve Tablo 2’de termodinamik çevrim değerleri verilen basit bir gaz türbinli uçak motorunun ekserji analizi bu bölümde sunulmuştur. Ekserji analizi sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo 3’te sunulmuştur.

Tablo 3. Basit bir gaz türbinli uçak motorunun termodinamik analiz sonuçları

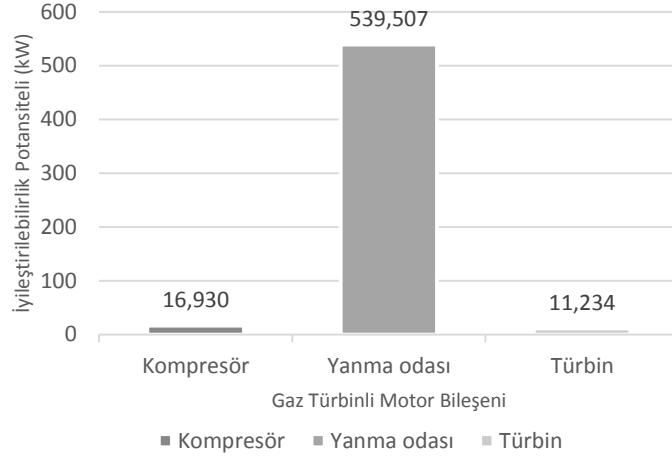
Bileşen (i)	$\dot{E}x_{yıkım,i}$ (kW)	η_{Ex} (%)	$\dot{I}P_{Ex}$ (kW)	χ_i	δ_i	ξ_i
Kompresör	164.750	89.72	16.930	0.075	0.016	0.020
Yanma odası	1851.389	70.85	539.507	0.850	0.180	0.229
Türbin	160.909	93.01	11.234	0.073	0.015	0.019

Şekil 2’de görüldüğü üzere, ekserji yıkımı %85.04 oran ile en yüksek yanma odasında gerçekleşmektedir. Bu durum, yanma sürecindeki tersinmezliklerin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Buna paralel olarak, en düşük ekserji verimi de % 70.85 ile yanma odasına aittir. Diğer yandan türbin bileşeninin ekserji veriminin çok yüksek olmasının sonucunda en düşük ekserji yıkımı türbinde meydana gelmektedir.



Şekil 2. Gaz türbinli motor içerisinde ekserji yıkım oranının dağılımı

Şekil 3’ten görüldüğü üzere, en yüksek iyileştirilebilirlik potansiyeline sahip motor bileşeni, yanma odasıdır. Yanma odasını sırasıyla 16.93 ve 11.234 oranlarıyla kompresör ve türbin izlemektedir. Buna göre, sistemin iyileştirilebilmesi için, öncelik yanma odasına verilmelidir. Böylelikle 539.507 kW değerine kadar kazanım sağlanabilecektir.



Şekil 3. Gaz türbinli motor içerisinde ekserji iyileştirilebilirlik potansiyelinin dağılımı

V. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışma ile bir gaz türbinli uçak motorunun termodinamik prensipler doğrultusunda performans incelemesine yönelik kullanılan yöntem tanıtılmıştır. Pek çok enerji sisteminin performans irdelemelerinde kullanılan bu yöntem, gaz türbinli uçak motorlarının analizinde de yoğun olarak kullanılmakta olup, ulusal literatürde yeterince yer bulamamıştır.

Bu çalışma sonucunda;

- ❖ Uluslararası literatürde incelenen bu konu ulusal literatüre kazandırılmıştır.
- ❖ Basit bir gaz türbinli uçak motoru için termodinamik performans parametreleri ortaya konulmuştur.
- ❖ İleride yapılabilecek termodinamik analiz çalışmaları için bir yöntem ortaya konulmuştur.
- ❖ İleride yapılabilecek termo-ekonomik çalışmalar için temel oluşturulmuştur.

Bu çalışmanın devamında, açıklanan yöntem kullanılarak bir gaz türbinli uçak motorunun termodinamik analizi yapılacaktır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, çalışmaya vermiş olduğu destek ve katkılardan dolayı Anadolu Üniversitesi'ne teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- [1] Dincer, I., Rosen, M. A., *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*, Elsevier, 2012.
- [2] Cengel, Y.A., Wood, B., Dincer, I., "Is bigger thermodynamically better?", *Exergy An International Journal*, vol. 2, pp. 62-68, 2002.
- [3] Tsatsaronis, G., "Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics", *Energy*, vol. 32, pp. 249-253, 2007.
- [4] Dincer, I., "The Role of Exergy in Energy Policy Making", *Energy Policy*, vol. 30, pp. 137-149, 2002.
- [5] Utlu, Z., Hepbasli, A., "Assessment of the energy utilization efficiency in the Turkish transportation sector between 2000 and 2020 using energy and exergy analysis method", *Energy Policy*, vol. 34, pp. 1611-1618, 2006.
- [6] Bejan, A., Siems D.L. "The need for exergy analysis and thermodynamic optimization in aircraft development", *Exergy, An International Journal*, vol. 1, pp. 14-24, 2001.
- [7] Turan, O., "Exergetic effects of some design parameters on the small turbojet engine for unmanned air vehicle applications", *Energy*, vol. 46, pp. 51-61, 2012.

- [8] Turgut, E.T., Karakoc, T.H., Hepbasli, A., “Exergetic analysis of an aircraft turbofan engine”, *International Journal Of Energy Research*, vol. 31, pp. 1383-1397, 2007.
- [9] Turgut, E.T., Karakoc, T.H., Hepbasli, A., Rosen, M.A., “Exergy analysis of a turbofan aircraft engine”, *International Journal Of Exergy*, vol. 6, pp. 181-199, 2009.
- [10] Turgut, E.T., Karakoc, T.H., Hepbasli, A., “Exergoeconomic analysis of an aircraft turbofan engine”, *International Journal Of Exergy*, vol. 6, pp. 277-294, 2009.
- [11] Aydin, H., Turan, O., Midilli, A., Karakoc, T.H., “Exergetic and exergo-economic analysis of a turboprop engine: a case study for CT7-9C”, *International Journal Of Exergy*, Vol. 11, pp.69-88, 2012.
- [12] Aydin, H., Turan, O., Midilli, A., Karakoc, T.H., “Energetic and exergetic performance assessment of a turboprop engine at various loads”, *International Journal Of Exergy*, Vol. 13, pp. 543-564, 2013.
- [13] Balli, O., Hepbasli, A., “Exergoeconomic, sustainability and environmental damage cost analyses of T56 turboprop engine”, *Energy*, vol. 64, pp. 582-600, 2013.
- [14] Tona, C., Antonio, P., Pellegrini, L. F., de Oliveira, Jr. S., “Exergy and thermoeconomic analysis of a turbofan engine during a typical commercial flight”, *Energy*, vol. 35, pp. 952-959, 2010.
- [15] Tai, V.C., See, P.C., Mares, C., “Optimisation of energy and exergy of turbofan engines using genetic algorithms”, *International Journal of Sustainable Aviation*, vol.1, pp. 25-42, 2014.
- [16] Mattingly, J. D., *Elements of Propulsion Gas Turbines and Rockets*, AIAA Education Series, Virginia, 2006.
- [17] Kerrebrock, J. L., *Aircraft Engines and Gas Turbines*, 2nd ed., MIT Press, Cambridge, 1992.
- [18] Lange, R. H., “A Review of Advanced Turboprop Transport Aircraft”, *Progress in Aerospace Science*, vol. 23, pp.151-166, 1986.
- [19] Saravanamuttoo H.I.H., “Modern Turboprop Engines”, *Progress in Aerospace Science*, vol. 24, pp. 225-248, 1987.
- [20] Moran, M.J., Shapiro, H.N., Boettner, D.D., Bailey, M.B., *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, John Wiley & Sons Inc, 2011.
- [21] Romero, J. C., Linares, P., “Exergy as a global energy sustainability indicator: a review of the state of the art”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, pp. 427-442, 2014.
- [22] Kotas, T.J., *The Exergy Method Of Thermal Plant Analysis*, Exergon Publishing Company UK Ltd., London, 2012.
- [23] Heywood, J. B., *Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-Hill, 1988
- [24] Tsatsaronis, G., “Thermoeconomic Analysis and Optimization of Energy Systems”, *Progress in Energy and Combustion Systems*, vol. 19, pp. 227-257, 1993.
- [25] Van Gool, W., “Exergy analysis of industrial processes”, *Energy*, vol. 17, pp. 791-803, 1992.
- [26] Xiang, J.Y., Cali, M. and Santarelli, M., “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*, vol. 28, pp.101-115, 2004.