



BİR HELİKOPTER MOTORUNUN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

Kahraman ÇOBAN¹, C. Özgür ÇOLPAN², T. Hikmet KARAKOÇ³

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

²Makine Mühendisliği Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi, Buca, İzmir, 35397, Türkiye

³Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Anadolu Üniversitesi, TR-26470, Eskişehir, Türkiye

DOI: [10.23890/SUHAD.2016.0106](https://doi.org/10.23890/SUHAD.2016.0106)

ÖZET

Turboşaft motor en basit hali ile helikopter rotoru gibi bir üniteye shaft gücü sağlamak için kullanılan bir gaz türbin olarak tanımlanabilir. Bu çalışmada, askeri helikopterde kullanılan bir turboşaft motorunun enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Yapılan çalışmanın temel amacı ise, motorun performansını incelemek ve motor modüllerindeki ekserji yıkımlarını belirlemektir. Tüm hesaplamalar, dört farklı yük değerinde (test #1 için 284 N·m, test #2 için 436 N·m, test #3 için 547 N·m ve test #4 için 579 N·m) yapılmış ve analizler teorik termodinamik performans değerlendirmeleri ve yer testlerinden elde edilen verilerle birlikte gerçekleştirilmiştir. Göreli tersinmezlik, yakıt tüketim oranı, üretkenlik kaybı, geliştirme potansiyeli gibi ekserjetik performans parametreleri incelenmiştir. Tüm modüller arasında en yüksek ekserji yıkım değerine sahip olan yanma odası modülünün ekserji yıkım değerleri ise test #1 için 1170.30 kW, test #2 için 1474.50 kW, test #3 için 1650.12 kW ve test #4 için 1702.50 kW olarak elde edilmiştir. Ayrıca ekserji yıkım değerinin toplam ekserji yıkım değerine oranı test #2'de en yüksek değeri (88.81%) yanma odası için elde edilirken; bu oranın en düşük değeri (0.75%) yine test #2'de yüksek basınç türbininde elde edilmiştir. Bu çalışmanın, motorun farklı yüklerdeki performans iyileştirme potansiyelini belirleyerek gelecekteki tasarım iyileştirme çalışmalarına katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Ekserji Analizi, Gaz Türbin, Turboşaft Motor, Enerji Analizi

ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF AN HELICOPTER ENGINE

ABSTRACT

By definition, a turboshaft engine is simply a gas turbine used to deliver shaft power such as to a helicopter rotor. This paper presents the energetic and exergetic analyses of a turboshaft engine which is used for military helicopter at various load values. The main objectives of this study are to assess the performance of the engine and to calculate the amount of exergy destructions in the components of the engine. The calculations were performed at four different load values (284 N·m for test #1, 436 N·m for test #2, 547 N·m for test #3 and 579 N·m for test #4) and all analyses were performed and presented on the basis of the experimental engine ground test data together with a theoretical thermodynamic performance evaluation. The exergetic performance parameters, such as the relative exergy destruction, the fuel depletion ratio, the productivity lack, the improvement potential were also investigated. The exergy destruction values for the combustion chamber, which has the highest exergy destruction among all the components, were calculated as 1170.30 kW, 1474.50 kW, 1650.12 kW, and 1702.50 kW for tests #1, #2, #3 and #4, respectively. In addition, the ratio of the exergy destruction to the total exergy destruction was obtained to be the highest in combustion chamber (88.81%) at test #2; whereas this ratio was found to be the lowest in the high-pressure turbine (0.75%) at test #2. This study would help to identify the performance improvement potential of the engine at various loads which may lead to design improvements in future.

Keywords: Exergy Analysis, Gas Turbine, Turboshaft Engine, Energy Analysis

1. GİRİŞ

Küresel enerji ve çevre sorunları nedeniyle, araştırmacılar, bilim insanları ve politikacılar ekonomik konuları da hesaba katarak enerji sistemlerinin verimliliğinin artırılması ve çevre

sorunlarının (örn. hava kirliliği, iklim değişikliği ve termal kirlilik) azaltılması ile ilgili çözümlere ilgi duymaktadır. Bu nedenle, son yıllarda daha fazla endüstriyel sektör sürdürülebilir enerji teknolojilerine yatırım yapmaktadır. Güç

sistemlerinde enerji tasarrufunu artırmak, enerji harcamalarını azaltmak ve çevre ile dost güç sistemlerini geliştirme için sürdürülebilir çözümlere yatırım yapan havacılık endüstrisi de bu sektörler arasındadır (Atılğan vd., 2013). Bu sektörde, ciddi küresel çevre sorunlarına yol açan jet motor emisyonları ciddi önem verilmektedir. (Brasseur ve Gupta, 2010) havacılığın tüm taşımacılık sektöründeki fosil yakıt emisyonlarının 13%'ünden ve antropojenik karbondioksitin 2%'sinden sorumlu olduğunu ortaya çıkarmıştır. Jet yakıtın yanması sonucu ortaya çıkan karbondioksit (CO₂), su buharı, ozon (O₃), nitrik oksit (N₂O) ve metan (CH₄) gibi sera gazlarının 1995 yılı değerlerinin 2050 yılına kadar 200% ile 500% arasında artması tahmin edilmektedir (Norton, 2014). Teknolojik çözümlerinin etkinliği ile ilgili en iyimser senaryo karşısında dahi, havayolu taşımacılığına olan güçlü ilgi nedeniyle 2036 yılındaki havacılık kaynaklı CO₂ emisyonlarının 2006 yılındaki değerlerinden 2.5 kat daha fazla olması beklenmektedir (European Commission, 2013). Çevresel endişelere ek olarak, doğrudan operasyon maliyetinin 20% ve 50% ye kadar da çıkabilen oranda sorumlusu olan yakıt maliyetleri de güç sistemlerindeki geliştirme etkenlerinden biridir. Böylece, hava yolları ve dolaylı olarak üreticiler yakıt tasarrufu ile ilgili teknolojilere çok büyük ilgi duymaktadır (Lee ve Mo, 2011). Sonuç olarak, yakıt tasarrufu sürdürülebilir bir havacılık endüstrisi için olmazsa olmaz bir konudur. Fakat, ekonomik ve çevresel endişeleri hesaba katarak bir yandan motorun daha iyi bir performansa sahip olmasını amaçlarken diğer yandan da yakıt tasarrufunu iyileştirmek için çalışma, motor tasarımcıları için çözümü zor bir problem olarak ortaya çıkmaktadır.

Enerji dönüştürücü bir sistemin performansı, enerji ve ekserji konseptleri kullanılarak termodinamik olarak incelenebilir. Bu konseptler literatürde termodinamik ve sürdürülebilir analizlerde kullanılmıştır (örn. Rosen vd., 1999, Bejan ve Siems, 2001 ve Kotas, 1995). Enerji analizi enerjinin miktarını dikkate alırken, ekserji analizi enerjinin kalitesi ile ilgilenmektedir. Ekserji, bir prosesin çevre ile denge gelirken elde edilebilecek en yüksek teorik iş olarak tanımlanmaktadır (Moran vd., 2011). Ekserji, sistemin verimsizliğine neden olan enerjinin bozulmasını açıkladığı için, yıkımların tipi, yeri ve büyüklüğünün belirlenmesinde kullanılabilir. Böylece, tasarımcılar en yüksek ekserji yıkımının olduğu komponenti belirleyerek enerji sistemini buna göre modifiye edebilirler (Tai vd., 2014). Sonuç olarak, birçok mühendis ve bilim insanı, daha fazla fikir vermesi ve enerji analizine göre verimliliğin artması çalışmalarında daha yararlı olması nedeniyle, termodinamik performansın en iyi ekserji analizi ile değerlendirilebileceğini belirtmektedir (Dincer ve Rosen, 2005).

Turboşaft motorlar genellikle yüksek güç ihtiyacı olan yerlerde kullanılmakta ve emniyetli, küçük boyutlu ve yükte hafif güç üretim sistemleri olmaları nedeniyle tercih edilmektedir. Kullanım yerlerinden biri helikopterler için tahrik sistemleridir. Bu tip motorlar turboprop motorlara benzemekte ve platformdaki transmisyon kutusuna türbin modülünden tahrik alan motor şaftı bağlanmaktadır. Turboşaft en basit tanımı ile dönen bir silindirik şaftı tahrik eden bir gaz türbindir. Bu şaft da açıklandığı şekilde, helikopter rotoruna bağlanarak dönmesini sağlamaktadır. Bunun için gerekli mekanik enerji, motora giren ortam havasının ve yakıtın yakılması sonucu ortaya çıkan termal enerjinin dönüştürülmesi ile elde edilir. Motor çalışması sırasında, güç türbini hızı kontrol sisteminin yakıt miktarını ayarlaması ile sabit tutulmaktadır. Turboşaft motorunun optimize edilmesi, tüm sistem performansının iyileştirilmesi ve özgül yakıt tüketimi ile kirletici emisyonların azaltılması için önemlidir. Turboşaft motorun çalışma prensibinin termodinamik kurallara dayanması nedeniyle, platformların tasarımlarında ekserji ve termodinamik optimizasyon metodlarının gerekliliği ortaya çıkmaktadır (Bejan ve Siems, 2001). Bu metodlar ile motor verimi ve yakıt tasarrufu artırılabilir, ayrıca çevresel etkiler önemli oranda azaltılabilir.

Havacılık motorlarında ekserji analizi uygulamaları bir çok çalışma literatürde bulunmaktadır. (Tona vd., 2010) uçak motorlarına ekserjetik yöntemleri uygulamışlardır. Yazarlar tüm görev zarfında motor performansını incelemiş ve farklı ölü hal noktalarının analiz sonuçlarında kritik olduğunu bulmuşlardır. (Etele ve Rosen 2001) bir turbojet motorunda farklı referans çevre modellerinin etkilerini deniz seviyesinden 15000 m'ye kadar farklı irtifalardaki durumlar için ekserji analizi ile incelemişlerdir. Bu çalışma sonucu, motorun verimi deniz seviyesinde 16.9% ve 15000 m'de 15.3% olarak elde edilmiş, sonuç olarak verimin artan irtifa ile birlikte azaldığı ortaya çıkarılmıştır. (Ballı vd., 2008), J69-T25 turbojet motorunun enerji ve ekserji performansını incelemiş ve ekserji verimini 34.84%, en yüksek ekserji yıkımını da yanma odasında 3.7 MW olarak bulmuşlardır. (Turgut vd., 2007), bir turbofan motoru için deniz seviyesi ve 11000 m irtifada ekserji analizi uygulamıştır. Bu çalışmada, her bir motor modülündeki ekserji yıkımları ile ekserji verimleri elde edilmiştir. 48.1% ile en yüksek ekserji yıkımı artıcıda ve deniz seviyesinde elde edilmiş, bu modülü sırasıyla 29.7% ile egzoz, 17.2% ile yanma odası ve son olarak 2.5% ile de türbin izlemiştir. (Şöhret vd., 2016), bir turboprop motorunun performansını incelemek için ekserji analizinde yararlanmıştır. Motorun enerji ve ekserji verimleri sırasıyla 27.89% ve 26.74% olarak bulunmuştur. (Ballı ve

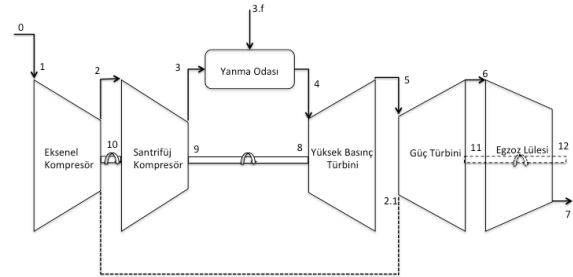
Hepbaşlı 2013), bir T56 Turboprop motorunu değerlendirmiştir. Tüm motorun ve modüllerinin enerjetik ve ekserjetik analizleri farklı yükte çalışma koşulları için hesaplanmıştır. Sonuç olarak en yüksek ekserji yıkım değerinin yanma odasında olduğu ve motorun yük değerleri arttıkça ekserji yıkım değerinin de arttığı görülmüştür. (Aydın vd., 2012), bir CT7 turboprop motorunda deneysel verilere ve sonucunda elde edilen performans parametrelerine dayanarak farklı yük değerleri için ekserjetik değerlendirme yapmışlardır. Çalışma sonucunda, tüm modüller için geçerli olmak üzere, tork değeri arttıkça ekserji yıkım değerleri de artmakta ve en düşük yıkım değeri motor için en yüksek yük değerinde elde edilmiştir. Son olarak, benzer bir Makila 1A1 motoru için yeni bir çalışma yapılmıştır (Turan ve Aydın, 2016). Yazarlar, motorun en yüksek güç değerinde motor ve modüller için enerji ve ekserji analizini yapmışlardır. Çalışmaya göre, motorun ekserji verimi 27.5% olarak elde edilmiştir. Ayrıca, ekserji verim değerleri kompresör için 83.8%, güç türbini için 88.6%, yanma odası için 80.6% ve gaz jeneratör türbini için de 91.4% olarak bulunmuştur.

Bu çalışmada, bir turboşaft motor için enerji ve ekserji analizleri yapılarak farklı yük koşullarındaki performansı incelenmiştir. İncelenen turboşaft motoru dünya çapında farklı iklim koşullarında kullanılan gelişmiş bir helikopter motorudur. Çalışmanın asıl amacı ise motorun ana modüllerinin ekserji verimlerini ve ekserji yıkım değerlerini belirleyerek aynı zamanda bazı ekserjetik performans değerlendirme parametrelerini de hesaplamaktır. Bu parametreler ise görelî tersinmezlik, yakıt tüketim oranı, üretkenlik kayıp oranı ve geliştirme potansiyeli olarak tanımlanabilir. Bu çalışmanın literatürdeki diğer çalışmalarından ve özellikle (Turan ve Aydın, 2016)'dan farkı ise turboşaft motorun ve modüllerinin farklı yük koşullarında deneysel verilere dayanarak detaylı bir enerji ve ekserji analizinin yapılmasıdır.

2. SİSTEM AÇIKLAMASI

Bu çalışmada seçilen turboşaft motoru (Makila 1A1) üretimine 1984 yılında başlanan Makila 1A motorunda türetilmiştir. Motor asıl olarak AS332 Puma ve AS532 Cougar helikopterleri tarafından çift motorlu konfigürasyonda kullanılmaktadır. Kalkış koşullarında 1820 ve seyir şartlarında ise 1589 shaft beygir gücü üretmektedir (Safran, 2016). Söz konusu motor farklı iklim koşullarında ve zorlu askeri şartlarda çok yönlülüğünü kanıtlamıştır. Alev sıcaklığının yanma odasında yaklaşık 2500 °C'e ulaşmasına rağmen yüksek basınç türbini kanatçıkları soğutmaya ihtiyaç duymamaktadır.

Motorun ana modülleri; aksel ve santrifüj kompresörler, yanma odası, yüksek basınç türbini, güç türbini ve lüle olarak tanımlanmış ve Şekil 1'de ilgili istasyon numaralandırması ile birlikte gösterilmiştir. Kompresör rotor modülü üç kademe aksel ve bir kademe santrifüj kompresörden oluşmaktadır. Üç kademe aksel kompresör ve bir kademe santrifüj motora giren havayı yanma odası öncesi basınçlandırmaktadır. Sıcak ve yüksek hızlı gazların enerjisi ise güç türbin tarafından çevrilen transmisyon şaftında torka dönüşmektedir. Dönüştürücü dişli ise aksesuarların sürülmesi için yüksek basınç türbinindeki düşük tork ve yüksek dönüş hız değerlerini yüksek tork ve düşük dönüş hızına çevirmektedir. İncelenen motor, test sisteminde güç türbini transmisyon şaftına bağlanan bir su frenli dinamometre ile test edilmektedir. Güç türbini hızı motor ve dinamometre üzerindeki sensörler tarafından ölçülmekte, ve birbiri ile test süresince karşılaştırılarak doğrulama yapılmaktadır. Ayrıca, güç türbini transmisyon şaftı tarafından üretilen tork değeri ise torkmetre sensörü ile hassas şekilde ölçülmektedir. Motorun test değerleri ile bazı teorik parametreleri ve analizlerde referans alınan çevresel koşulları Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Turboşaft motor kesit ve istasyon numaraları

3. YÖNTEM

3.1. Enerji Analizi

Bir kontrol hacmindeki kararlı haldeki bir proses için, kütle denge denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

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

burada \dot{m} kütle akış debisi ve altsimgeler in ve out girişi ve çıkışları sırasıyla simgelemektedir.

Kararlı haldeki bir kontrol hacim için genel enerji dengesi ise:

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum_{in} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_{out} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) = 0 \quad (2)$$

Burada \dot{Q} kontrol hacmine giren net ısı transferini, \dot{W} net iş üretimini, h özgül entalpiyi, V hızı, g

yerçekimi ivmesini ve z ise yüksekliği ifade etmektedir.

Tablo 1 Turboşaft motorun dört yer test adımıdaki parametreleri
Test adım numarası (Yük Değeri)

	1 (284 N·m)	2 (436 N·m)	3 (547 N·m)	4 (579 N·m)
Atmosferik basınç (kPa)	92	92	92	92
Atmosferik sıcaklık (K)	288.15	288.15	288.15	288.15
Güç (kW)	683.30	1053	1320.9	1405.1
Güç türbini hızı (rpm)	22997	23072	23071	23158
Gaz jeneratör hızı (rpm)	29103	31044	32634	33297
Hava debisi (kg s ⁻¹)	4.535	5.2	5.55	5.62
Yakıt debisi (kg s ⁻¹)	0.065	0.086	0.104	0.11
Güç türbini giriş sıcaklığı (K)	863.15	930.15	1010.55	1054.15
Yüksek basınç türbini giriş sıcaklığı (K)	1090.15	1191.15	1283.7	1327.5
Kompresör modülü çıkış basıncı (kPa)	669.85	802.05	889.64	912.46
Kompresör modülü çıkış sıcaklığı (K)	546.64	573.9	599.04	605.7
Hava-yakıt oranı	68.23	59.084	52.27	49.6

Yukarıdaki kütle ve enerji denklemleri turboşaft motor Makila 1A1'e uygulanarak sistem ve bileşenleri modellenmiştir. Kompresör, yanma odası, yüksek basınç türbini ve diğer modüllere özel denklemler aşağıda verilmiştir (Mansouri vd., 2012).

Santrifüj kompresör çıkışındaki basınç ve sıcaklık değerleri 3 ve 4 nolu denklemlerde sırasıyla verilmiştir.

$$P_3 = r P_1 \quad (3)$$

$$T_3 = T_1 \left(1 + \frac{1}{\eta_c} \left[r^{\gamma_a - 1/\gamma_a} - 1 \right] \right) \quad (4)$$

Burada P, r, T, η_c ve γ_a sırasıyla basınç, kompresör basınç oranı, sıcaklık, kompresör izantropik verimi ve havanın özgül ısı oranıdır.

Kompresörün ihtiyaç duyduğu güç ise denklem 5'de verilmiştir.

$$\dot{W}_c = \dot{m}_a (h_3 - h_2) \quad (5)$$

burada \dot{m}_a, \dot{W} ve h sırasıyla havanın kütle akış debisi, kompresör güç ihtiyacı ve özgül entalpiyi tanımlamaktadır.

Yanma odası enerji denklemi ise denklem 6 ile belirlenmektedir.

$$\dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_f LHV = \dot{m}_g h_4 + (1 - \eta_{cc}) \dot{m}_f LHV \quad (6)$$

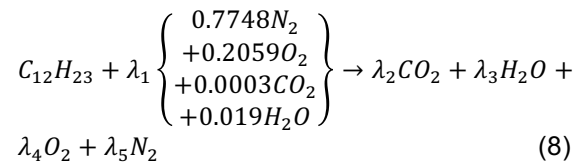
Burada $\dot{m}_f, \dot{m}_g, LHV$ ve η_{cc} sırasıyla yakıt akış debisi, yanma gazları akış debisi, yakıtın alt ısı değeri ve yanma odası verimini ifade etmektedir.

Yüksek basınç türbininin çıkışındaki sıcaklık değeri aşağıdaki denklemde verilmektedir.

$$T_5 = T_4 \left(1 - \frac{1}{\eta_T} \left[1 - \left(\frac{P_4}{P_5} \right)^{1 - \gamma_g/\gamma_g} \right] \right) \quad (7)$$

Burada η_T ve γ_g sırasıyla türbin izantropik verimini ve yanmış gazların özgül ısı oranını ifade etmektedir.

Motorda kullanılan yakıt kerozen tipinde JP-8 yakıtıdır ve C₁₂H₂₃ (Annamalai ve Puri, 2007) şeklinde formüle edilmiştir. Yanma denklemi denklem 8'de verilmiştir. Mol yada hacim temelli bakıldığında, kuru hava bileşimi 77.48% nitrojen, 20.59% oksijen, 0.03% karbondioksit ve 1.90 su baharı olarak varsayılmıştır. Yanma sırasında nitrojen atıl gaz olarak davranarak diğer bileşenlerle tepkiyeme girmez ve ihmal edilebilir oradan nitrik oksit formu oluşturur (Çengel ve Boles, 2006).



Yanma denkleminde bulunan yanma gazlarının katsayıları (örn. bir mol yakıt için mol sayıları) (λ), karbon, hidrojen, oksijen ve nitrojen atomlarının korunumu kuralı ile herbir farklı yük değeri için hesaplanmıştır. Bu sabitler, 4, 5, 6 ve 7 nolu istasyonlardaki yanmış gaz karışımının entalpi ve entropi değerlerinin hesaplanması için kullanılmıştır. Elde edilen değerler Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2 Farklı test adımlarında yanma reaksiyonu sabitleri

Sabit	Test adımı numarası			
	1	2	3	4
λ_1	393.64	340.88	301.58	285.7
λ_2	12.12	12.10	12.09	12.1
λ_3	19	18	17.2	16.9
λ_4	63.3	52.43	43.34	41.1
λ_5	305	264.12	233.66	221.4

Türbin modülü tarafından üretilen güç aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\dot{W}_T = \dot{m}_g (h_4 - h_5) \quad (9)$$

Motor tarafından üretilen shaft gücü ise dinamometre tarafından ölçülmekte ve güç türbini çıkış gücüne bağlıdır.

$$\dot{W}_{PT} = \frac{\dot{W}_{SP}}{\eta_m} \quad (10)$$

Burada \dot{W}_{PT} , η_m ve \dot{W}_{SP} sırasıyla güç türbini tarafından üretilen gücü, transmisyon shaftının mekanik verimini ve motor tarafından üretilen ve transmisyon shaftından elde edilen shaft gücünü ifade etmektedir.

Egzoz lülesi enerji denklemi ise denklem 11'de olduğu şekilde ifade edilebilir.

$$\eta_{ED} = \frac{c_{p,av}(T_6 - T_7a)}{c_{p,av}(T_6 - T_7s)} \quad (11)$$

Burada η_{ED} egzoz lülesinin enerji verimini ifade ederken, bu çalışmada değeri 99% olarak varsayılmıştır.

Nihai olarak ise, motorun genel verimi η_{TE} ise elde edilen net shaft gücünün motora sağlanan enerji miktarına oranı şeklinde denklem 12'de tanımlanmaktadır.

$$\eta_{TE} = \frac{\dot{W}_{SP}}{\dot{m}_f LHV} \quad (12)$$

3.2. Ekserji Analizi

Enerji bir işlem boyunca miktarı korunan bir nicelik olmasına rağmen, entropinin üretimi ile birlikte ekserji de yıkıma uğramaktadır. Termal sistemlerin tasarımı ve geliştirilmesi için ekserji analizi kütle ve enerji korunumu hesaplamalarını termodinamiğin ikinci yasasını ile birlikte kullanmaktadır.

Kararlı haldeki kontrol hacimler için ekserji denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{E}x_{heat} - \dot{E}x_{work} + \dot{E}x_{mass,in} - \dot{E}x_{mass,out} - \dot{E}x_{dest} = 0 \quad (13)$$

$$\dot{E}x_{heat} = \sum (1 - (T_0/T_j)) \dot{Q}_j \quad (14)$$

$$\dot{E}x_{work} = \dot{W} \quad (15)$$

$$\dot{E}x_{mass} = \sum \dot{m} ex_f \quad (16)$$

Burada \dot{Q}_j kontrol hacminin T_j sıcaklığındaki sınırından net ısı transferini, \dot{W} net iş transferini, $\dot{E}x$ giriş ve çıkışta ekserji miktarını, ex_f özgül akış ekserjisini ve $\dot{E}x_{dest}$ ekserji yıkım miktarını ifade etmektedir.

Özgül akış ekserjisi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$ex_f = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (17)$$

Burada s entropiyi ifade ederken indis sıfır (0) ise hareketsiz durum anlamında gelmektedir.

Denklem 17, ayrıca hava için ve sabit ısı katsayısı yaklaşımı ile aşağıdaki formda da yazılabilir:

$$ex_{f,air} = \left[c_p \left(T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right) + RT_0 \ln \frac{P}{P_0} \right] \quad (18)$$

Sıvı yakıtların birim kütleyle göre özgül kimyasal ekserjileri denklem 19'daki korelasyona göre hesaplanabilmektedir (Kotas, 1995).

$$\frac{ex_{ch,f}}{LHV} = \varphi = 1.0401 + 0.1728 \frac{h}{c} + 0.0432 \frac{o}{c} + 0.2169 \frac{s}{c} \left(1 - 2.0628 \frac{h}{c} \right) \quad (19)$$

Burada h, c, o ve s sırasıyla hidrojenin, karbonun, oksijenin ve sülfürün kütle kesirlerini simgelemektedir. Ayrıca, φ ise yakıtın ekserji korelasyon formülü olarak kabul edilmekte ve JP8 jet yakıtı için değeri de 1.06789 olarak hesaplanmıştır (LHV ise 42800 kJ/kg). $C_{12}H_{23}$ formülü ile verilen kerozen yakıtı için sülfür atomu ihmal edilmiştir çünkü yakıt bileşiminde bu atomun neredeyse sıfıra yakın bir oranda bulunmasıdır (Aydın vd., 2013).

Son olarak ise, egzoz gazları için kimyasal ekserji denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\overline{ex}_{ch,g} = \sum \overline{ex}_{ch,i} x_i + \bar{R} T_0 \sum x_i \ln x_i \quad (20)$$

Burada $\overline{ex}_{ch,i}$, x_i , \bar{R} ve T_0 sırasıyla molar kimyasal ekserjiyi, i gazının mol kesirini, universal gaz sabitini ve hareketsiz durumdaki denge sıcaklığını belirtmektedir. Kimyasal bileşenlerin kimyasal ekserjileri ise nitrojen için 639 kJ.kmol⁻¹, oksijen için 3951 kJ.kmol⁻¹, karbondioksit için 14176 kJ.kmol⁻¹ ve su buharı için ise 8636 kJ.kmol⁻¹ olarak verilmiştir (Bejan vd., 1996).

3.3. Sistem Bileşenlerinin Performans Değerlendirme Parametreleri

Sistemin termodinamik mükemmellik derecesini ölçmeyi hedefleyen ekserji verimi, yararlı ekserji çıkışının harcanan ekserji girişine oranı olarak tanımlanabilir.

Ana modüller için ekserji dengesi ve ekserji verimi denklemleri Tablo 3’de gösterilmiştir.

Ekserji verimine ek olarak, sistemin termodinamik olarak değerlendirilmesi için farklı parametreler de bulunmaktadır. Bu parametreler; göreceli tersinmezlik χ , yakıt tüketim oranı δ , üretkenlik kaybı ζ ve geliştirme potansiyeli $\dot{I}P$ dir Bu parametrelerin detaylı çalışması (Gool, 1997 ve Xiang vd., 2004)’de yapılmıştır. Bu parametrelerin tanımları ise aşağıdaki şekilde yapılabilir (Turgut vd., 2009b):

Göreceli tersinmezlik χ , sistemin bir bileşeninin ekserji yıkım miktarının tüm sistemin ekserji yıkım miktarına oranı şeklinde verilmektedir.

$$\chi_k = \frac{\dot{E}x_{D,k}}{\dot{E}x_{D,total}} \quad (21)$$

Yakıt tüketim oranı δ , sistemin bir bileşeninin ekserji yıkımının tüm sistemin toplam yakıt ekserjisine oranı olarak belirtilmektedir.

$$\delta_k = \frac{\dot{E}x_{D,k}}{\dot{E}x_{fuel,total}} \quad (22)$$

Üretkenlik kaybı, yakıt tüketim oranına benzer şekilde, ekserji yıkımı formunda ürün kayıp miktarını açıklamakta yani ürün ekserjisinin ne kadarının yıkım olarak kaybedildiğini açıklamaktadır.

$$\zeta_k = \frac{\dot{E}x_{D,k}}{\dot{E}x_{product,total}} \quad (23)$$

Geliştirme potansiyeli ise sistemin ne kadar daha iyileştirilebileceğini belirtmektedir. Ayrıca, bu parametre iyileştirme için uygun sistem bileşenlerinin belirlenmesini sağlamaktadır.

$$\dot{I}P_k = (1 - \eta_{ex,k})(\dot{E}x_{in} - \dot{E}x_{out}) \quad (24)$$

Tablo 3 Ekserji denge ve ekserji verimi denklemleri

Modül	Ekserji dengesi	Ekserji verimi
Eksenel kompresör (AC)	$\dot{E}x_1 + \dot{W}_{10} - (\dot{E}x_2 + \dot{E}x_{2,1}) = \dot{E}x_{D,AC}$	$\eta_{ex,AC} = \frac{(\dot{E}x_2 + \dot{E}x_{2,1}) - \dot{E}x_1}{\dot{W}_{AC}}$
Santrifüj kompresör (CeC)	$\dot{E}x_2 + \dot{W}_9 - \dot{E}x_3 = \dot{E}x_{D,CeC}$	$\eta_{ex,CeC} = \frac{\dot{E}x_3 - \dot{E}x_2}{\dot{W}_{CeC}}$
Yanma odası (CC)	$\dot{E}x_3 + \dot{E}x_{3,f} - \dot{E}x_4 = \dot{E}x_{D,CC}$	$\eta_{ex,CC} = \frac{\dot{E}x_4}{\dot{E}x_{3,f} + \dot{E}x_3}$
Yüksek basınç türbini (HPT)	$(\dot{E}x_4 - \dot{E}x_5) - \dot{W}_{HPT} = \dot{E}x_{D,HPT}$	$\eta_{ex,HPT} = \frac{\dot{W}_{HPT}}{\dot{E}x_4 - \dot{E}x_5}$
Güç türbini (PT)	$(\dot{E}x_{2,1} + \dot{E}x_5 - \dot{E}x_6) - \dot{W}_{PT} = \dot{E}x_{D,PT}$	$\eta_{ex,PT} = \frac{\dot{W}_{PT}}{(\dot{E}x_{2,1} + \dot{E}x_5) - \dot{E}x_6}$
Egzoz lülesi (ED)	$\dot{E}x_6 - \dot{E}x_7 = \dot{E}x_{D,ED}$	$\eta_{ex,ED} = \frac{\dot{E}x_7}{\dot{E}x_6}$
Turboşaft motor (TE)		$\eta_{ex,TE} = \frac{\dot{W}_{SP}}{\dot{m}_f \varepsilon_{ch,f}}$

4. SONUÇLAR

Turboşaft motoru bölüm 3’de yer alan enerji ve ekserji denklemleri kullanılarak incelenmiştir. Öncelikle, her bir istasyondaki termodinamik özellik (örn. modül giriş ve çıkışlarında sıcaklık basınç, özgül entalpi ve özgül entropi değerleri) motor testinden elde edilen değerler yardımıyla ve enerji analizi ile bulunmuştur. Bu kapsamda, test

verileri HPT, PT ve ED çıkışlarındaki termodinamik parametrelerin bulunması ve kompresör ile türbin modüllerinin izantropik verimlerinin hesaplanması için kullanılmıştır. Hesaplamalar dört farklı test adımı için de yapılarak farklı yük değerleri (247 N·m, 436 N·m, 547 N·m ve 579 N·m) için tüm parametreler elde edilmiştir. İstasyonlardaki bilinmeyen değerlerin bulunması

için kullanılan test verileri aşağıda ve Tablo 1’de verilmiştir.

- Çevre şartları basınç ve sıcaklık
- Eksenel kompresör giriş basıncı
- Santrifüj kompresör çıkış basıncı
- Eksenel kompresör giriş sıcaklığı
- Santrifüj kompresör çıkış sıcaklığı
- Yüksek basınç türbini giriş basıncı
- Yüksek basınç türbini giriş sıcaklığı
- Güç türbini giriş sıcaklığı
- Yakıt akış debisi
- Hava debisi
- Şaft gücü

Tüm sistem ve bileşenlerinin ekserji verimleri, ekserji yıkım değerleri ve noktaları ile diğer yukarıda bahsedilen parametrelerin (görelî tersinmezlik, yakıt tüketim oranı, üretkenlik kaybı ve geliştirme potansiyeli) belirlenmesi için detaylı bir ekserji analizi yapılmıştır.

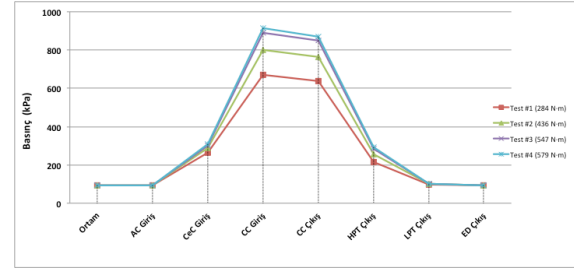
Bu çalışma boyunca yapılan varsayımlar ise aşağıda listelenmiştir:

- Hava ve egzoz gazları ideal gazdır.
- Özgül ısı kapasite değerleri için giriş ve çıkış sıcaklıklarının ortalaması alınarak sabit sıcaklık yaklaşımı yapılmıştır.
- Motor modülleri termal olarak izolelidir.
- Kinetik ve potansiyel enerji ile kinetik ve potansiyel ekserjideki değişimler ihmal edilmiştir.
- Yanma reaksiyonu tamamlanmıştır.
- Motor testleri statik koşullarda yapıldığı için motora giren hava hızı sıfır (0) olarak kabul edilmiştir.
- Türbin rulman bölgesini basınçlandırmak için gerekli olan tahliye havası miktarı motora giren toplam hava debisinin 2% si olacak şekilde varsayılmıştır.

a. Enerji analiz sonuçları

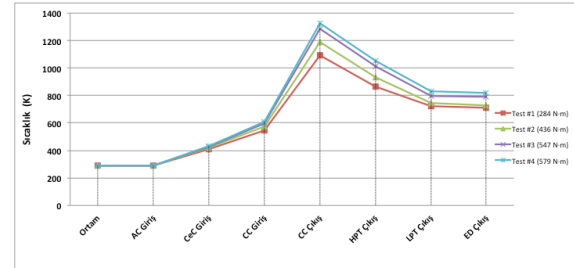
Farklı yüklerde gerçekleştirilen motor testlerinden elde edilen motor termodinamik parametreleri Tablo 1’de verilmiştir. Ek olarak, her bir istasyondaki akışın tipi, akışların kütsel akış debileri, basınçları, sıcaklıkları, özgül entalpileri, özgül entropileri ve ekserjileri de ilgili test numarası ve Şekil 1’de verilen istasyon numarası ile birlikte 4,5,6 ve 7 no’lu tablolarda gösterilmiştir. Bu tablolarda verilen deneysel test ve enerji analiz sonuçlarına göre, hava basıncının en yüksek değeri (912.46 kPa, 1405.10 kW güç ve test #4 için) eksenel ve santrifüj kompresörlerin yüksek basma oranları sayesinde yanma odasının girişinde görülmektedir. Diğer yandan, en düşük basınç değeri nihai genişlemenin olduğu egzoz lülesinde elde edilmiştir. Yanma odasında ise, yanma sırasında oluşan yüksek türbülans seviyesi nedeniyle hava basıncı yaklaşık 4-5% değerlerinde azalmaktadır. Basınç düşümü ise daha fazla yakıt

tüketimine ve daha düşük güç üretimine neden olmaktadır. Tüm motor için bakıldığında ise hava ve karışım gazlarının basıncı motoru güç seviyesi ile birlikte artmaktadır.



Şekil 2. Farklı test adımlarında motordaki basınç dağılımı

Motor boyunca sıcaklık değişimi Şekil 3’de görüldüğü üzere en yüksek sıcaklık değeri yüksek basınç türbini girişinde elde edilmektedir. Bu noktada en yüksek sıcaklık değeri ise test #4 için 1327.50 K elde edilmiştir. Yük seviyesi azaldıkça, bu sıcaklık değeri basınç değerinin azalması ile birlikte 1090 K değerine düşmektedir. Türbin giriş sıcaklığı, motorun daha fazla yük değerlerine çıkabilmesine olanak sağlaması bakımından kritik bir parametredir. Fakat, türbin kanatçıklarının malzeme özelliği nedeniyle belli bir sıcaklık değerinden daha fazla sıcaklığa dayanmamaktadır. Diğer yandan, yüksek sıcaklık değerleri ayrıca yüksek NOx değerlerine sebep olmaktadır. Bu olgu da, motor üreticileri ve araştırmacılar için önemli bir optimizasyon problemi olarak karşılına çıkmaktadır.



Şekil 3. Farklı test adımlarında motordaki sıcaklık dağılımı

b. Ekserji analiz sonuçları

Bu çalışmada, ekserji analizi ile turboşaft motorun modüllerindeki ekserji yıkımı ile yıkımın olduğu noktaların belirlenmesi amaçlanmıştır. 4,5,6 ve 7 no’lu Tablolardaki veriler kullanılarak, ekserji yıkım miktarları, ekserji verimleri, yakıt tüketim oranları, üretkenlik kayıpları, görelî tersinmezlikler ve geliştirme potansiyelleri her bir motor modülü için hesaplanmış ve 8,9,10 ve 11 no’lu Tablolarda farklı yük değerleri için ilgili sonuçlar verilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi, kinetik ekserji değeri ekserji akışının toplam ekserji değeri içinde çok küçük değerlere sahip olması nedeniyle ihmal edilmiştir. Ayrıca, giriş ve çıkış noktalarındaki yükseklik farkı da yok denecek kadar az kabul

edilerek, potansiyel ekserji de ekserji analizinde ihmal edilmiştir.

Tablo 4 Turboşaft motor termodinamik değerleri (test #1)

<i>İstasyon No.</i>	<i>Akışkan tipi/iş</i>	<i>Kütle debisi (kg s⁻¹)</i>	<i>Sıcaklık (K)</i>	<i>Basınç (kPa)</i>	<i>Özgül Entalpi (kJ/kg)</i>	<i>Özgül Entropi (kJ/kg.K)</i>	<i>Ekserji (kW)</i>
0	Hava	0	288.15	92.00	293.31	6.92	0
1	Hava	4.54	288.15	92.00	293.31	6.92	0
2	Hava	4.44	410.16	264.28	418.42	6.98	484.07
2.1	Hava	0.09	410.16	264.28	418.42	6.98	9.81
3	Hava	4.44	546.64	669.85	560.86	7.00	1078.51
3.f	Yakıt	0.065	288.15	220.00			2985.70
4	Yanmış gaz.	4.51	1090.15	637.12	1189.18	7.85	2893.91
5	Yanmış gaz.	4.51	863.15	215.44	921.52	7.89	1635.12
6	Yanmış gaz.	4.60	722.23	97.44	759.66	7.92	889.04
7	Yanmış gaz.	4.60	711.69	92.00	747.86	7.92	834.59
8	HPT iş çıkışı						1207.14
9	CeC iş girişi						632.42
10	AC iş girişi						527.61
11	PT iş çıkışı						699.29
12	Motor şaft gücü						683.30

Tablo 5 Turboşaft motor termodinamik değerleri (test #2)

<i>İstasyon No.</i>	<i>Akışkan tipi/iş</i>	<i>Kütle debisi (kg s⁻¹)</i>	<i>Sıcaklık (K)</i>	<i>Basınç (kPa)</i>	<i>Özgül Entalpi (kJ/kg)</i>	<i>Özgül Entropi (kJ/kg.K)</i>	<i>Ekserji (kW)</i>
0	Hava	0	288.15	92.00	293.31	6.92	0
1	Hava	5.20	288.15	92.00	293.31	6.92	0
2	Hava	5.10	419.16	286.39	427.71	6.97	604.79
2.1	Hava	0.10	419.16	286.39	427.71	6.97	11.86
3	Hava	5.10	573.89	802.06	589.76	7.00	1387.26
3.f	Yakıt	0.08	288.15	220.00			3964.09
4	Yanmış gaz.	5.18	1191.15	764.17	1315.58	7.93	3876.85
5	Yanmış gaz.	5.18	930.15	255.06	1000.77	7.94	2233.78
6	Yanmış gaz.	5.29	745.45	99.52	787.35	7.95	1125.57
7	Yanmış gaz.	5.29	730.72	92.00	770.71	7.96	1036.82
8	HPT iş çıkışı						1630.69
9	CeC iş girişi						826.43
10	AC iş girişi						656.11
11	PT iş çıkışı						1069.57
12	Motor şaft gücü						1053.00

Tablo 6 Turboşaft motor termodinamik değerleri (test #3)

<i>İstasyon No.</i>	<i>Akışkan tipi/iş</i>	<i>Kütle debisi (kg s⁻¹)</i>	<i>Sıcaklık (K)</i>	<i>Basınç (kPa)</i>	<i>Özgül Entalpi (kJ/kg)</i>	<i>Özgül Entropi (kJ/kg.K)</i>	<i>Ekserji (kW)</i>
0	Hava	0	288.15	92.00	293.31	6.92	0
1	Hava	5.55	288.15	92.00	293.31	6.92	0
2	Hava	5.44	429.22	301.62	438.12	6.98	686.81
2.1	Hava	0.11	429.22	301.62	438.12	6.98	13.89
3	Hava	5.44	599.04	889.64	616.58	7.02	1601.14
3.f	Yakıt	0.10	288.15	220.00			4777.12
4	Yanmış gaz.	5.55	1283.70	848.55	1433.7	7.99	4728.14
5	Yanmış gaz.	5.55	1010.55	282.67	1098.70	8.01	2827.55
6	Yanmış gaz.	5.66	797.81	99.63	848.67	8.04	1427.57
7	Yanmış gaz.	5.66	782.04	92.00	839.59	8.05	1357.03

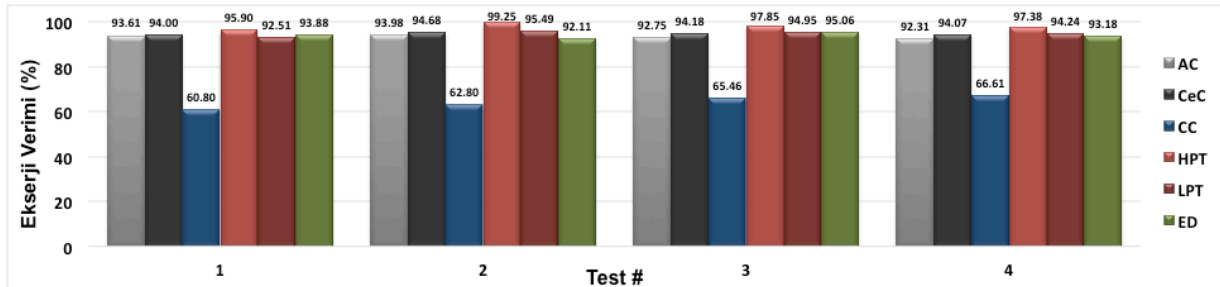
8	HPT iş çıkışı	1859.65
9	CeC iş girişi	970.82
10	AC iş girişi	755.47
11	PT iş çıkışı	1342.51
12	Motor shaft gücü	1320.90

Tablo 7 Turboşaft motor termodinamik değerleri (test #4)

İstasyon No.	Akışkan tipi/iş	Kütle debisi ($kg s^{-1}$)	Sıcaklık (K)	Basınç (kPa)	Özgül Entalpi (kJ/kg)	Özgül Entropi (kJ/kg.K)	Ekserji (kW)
0	Hava	0	288.15	92.00	293.31	6.92	0
1	Hava	5.62	288.15	92.00	293.31	6.92	0
2	Hava	5.51	433.24	308.45	442.28	6.99	713.63
2.1	Hava	0.11	433.24	308.45	442.28	6.99	14.25
3	Hava	5.51	605.67	912.46	623.67	7.02	1653.81
3.f	Yakıt	0.11	288.15	220.00			5098.65
4	Yanmış gaz.	5.62	1327.50	870.87	1490.47	8.03	5049.96
5	Yanmış gaz.	5.62	1054.15	292.54	1152.47	8.06	3099.27
6	Yanmış gaz.	5.73	833.17	99.69	890.25	8.09	1602.13
7	Yanmış gaz.	5.73	816.75	92.00	871.25	8.09	1492.85
8	HPT iş çıkışı						1899.54
9	CeC iş girişi						999.45
10	AC iş girişi						788.52
11	PT iş çıkışı						1424.40
12	Motor shaft gücü						1405.10

Şekil 4’de motor modüllerinin farklı yük koşullarındaki ekserjetik verimleri gösterilmektedir. AC ve CeC modüllerinin ekserjetik verimlerinde önemli bir değişim gözlemlenmezken, HPT,PT ve ED modülleri ekserji verimlerinde az miktarda değişimler olmuştur. Fakat, yanma odası için ekserji verimi değerleri belirgin olarak görülmekte ve 284 N·m tork değerinden 579 N·m tork değerine artış sırasında 10% luk iyileşme görülmektedir. Tablo 2’de de görüleceği üzere, yanma reaksiyonun stokiometrik yanma ortamına yaklaşarak tam yanma için daha az artık havanın olmasıdır. Nihai olarak, turboşaft motorun ekserjetik verimi tüm yük

değerleri için hesaplanarak, yakıt ekserji miktarları da test #1 için 2985.7 kW, test #2 için 3964 kW, test #3 için 4777.12 kW ve test #4 için 5098.65 kW olarak elde edilmiştir. Sonuçlara bakıldığında, motorun ürettiği shaft gücü artması ile birlikte ekserji veriminin de arttığı görülmüş ve 547 N·m tork değerinde en yüksek değeri aldığı görülmüştür. Sadece 4 nolu test adımıdaki ekserjetik veriminin bir önceki test adımına (test #3) göre az miktarda azaldığı (0.3%) görülmüştür. Dolayısıyla, daha fazla yakıt ekserjisi sağlanmasına rağmen elde edilen shaft gücü aynı oranda artmamıştır.



Şekil 4. Motor modüllerinin ekserjetik verimleri

Ekserji analizi sonucunda görülmüştür ki, tüm test adımlarında ve yüksek tersinmezlik nedeniyle yanma odası modülü diğer tüm modüller arasında en yüksek ekserji yıkımına uğrayan modül olmuştur. Yanma odası için ekserji yıkım değerleri

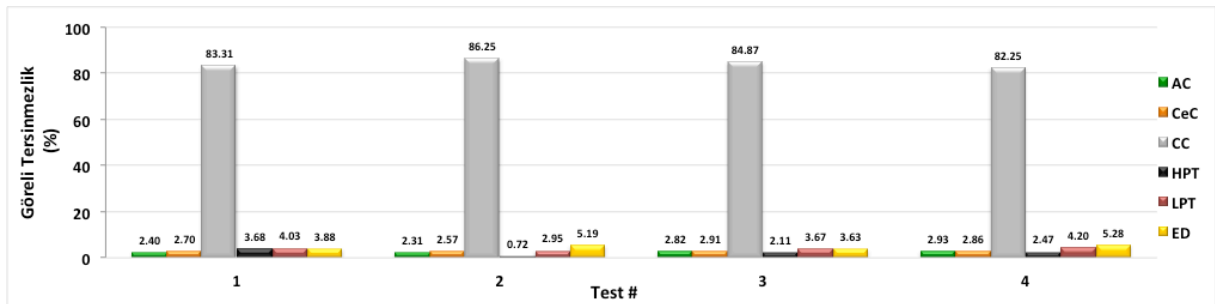
test #1’de 1170.30 kW, test #2’de 1474.50 kW, test #3’de 1650.12 kW ve test #4’de 1702.50 kW olarak elde edilmiştir. Gerçekte yanma prosesi ürünlerin entalpisinin daha yüksek değerlere ulaşmasını engelleyecek şekilde çok karmaşık bir süreçtir.

Sonuçlara bakıldığında, yakıt miktarı arttığında tüm modüller için ekserji yıkım değerleri de artmaktadır. 284 N·m yük değerinden 579 N·m yük değerine değişim sırasında AC için ekserji yıkım değeri 33.72 kW'dan 60.65 kW'a artarken CeC için 37.98 kW'dan 59.27 kW'a çıkmaktadır. Yük değerlerinin artışı ile birlikte ise HPT ve PT için ekserji yıkım değerleri değişkenlikler göstererek en düşük değerler HPT için 12.38 kW ve PT için 50.49 kW olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, ED için en yüksek ekserji yıkım değeri test #4'de 109.27 kW olarak bulunmuştur. Ekserji yıkım değerleri kullanılarak, tüm modüller için görel tersinmezlikleri hesaplanmış ve Şekil 5'de gösterilmiştir. Değerlere bakıldığında en yüksek görel tersinmezlik değeri (436 N·m motor yükünde 88.81%) beklendiği şekilde yanma odası modülünde elde edilmiştir.

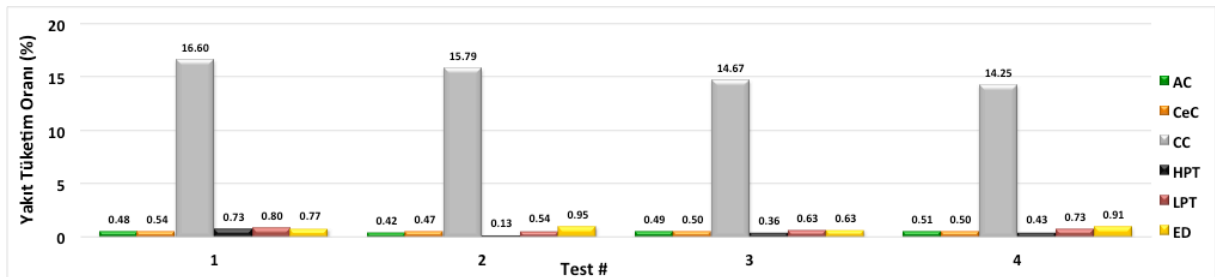
Tüm modüller için yakıt tüketim oranı ile üretkenlik kaybı değerleri tüm yük değerleri için Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmiştir. Resim 6'da görüldüğü üzere, test adımları ile uyumlu şekilde azalan değerler olmakla birlikte yanma odası en yüksek yakıt tüketim oranı ile üretkenlik kaybı değerlerine sahip modül olarak görülmektedir. Bu da bize büyük oranda yakıt ve ürün ekserji potansiyelinin bu modülde kaybedildiğini göstermektedir. Aslında ekserji yıkımının yanma odası modülünde en yüksek olması nedeniyle bu sonuç beklenmektedir. Diğer modüller için yakıt tüketim oranı ile üretkenlik kaybı değerleri önemli oranda değişmemekle birlikte, AC ve CeC için yakıt tüketim oranı değerleri sırası ile 0.42% ile 0.51% ve 0.47% ile 0.54% arasında değişiklik göstermektedir. Ek olarak, bu modüller için üretkenlik kaybı değerleri ise 0.52%-0.61% ve

0.58%-0.67% arasında değişim göstermiştir. HPT için yakıt tüketim oranı test #2'de azalmış ve sonrasında diğer testlerde az miktarda artış görülmüştür. Benzer durum bu modülün üretkenlik kaybı değeri için de geçerlidir. PT modülü de 0.66% ve 1.00% arasında değişen düşük değerlerde yakıt tüketim oranına sahipken, üretkenlik kaybı değerleri de HPT modülüne benzer şekilde eğilim göstermektedir. ED için ise yakıt tüketim oranı ve üretkenlik kaybı değerleri sırasıyla 0.63%-0.91% ve 0.76%-1.16% arasında değişmektedir.

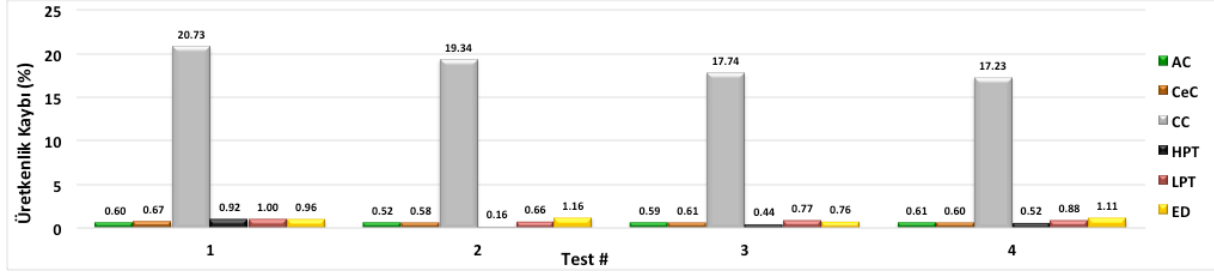
Tüm test adımlarında en yüksek ekserji geliştirme potansiyeli değeri ise yanma odası modülünde elde edilmiştir. Bu değer dört test adımı için 458.72 kW ve 569.99 kW değerleri arasında değişim göstermiş ve 547 N·m yük değerinde en yüksek değerine ulaşmıştır. Önemli bir geliştirme potansiyeli olan diğer modül ise ED olmuş ve değerleri 3.34 kW ile 7.45 kW arasında değişim göstermiştir. CeC ve AC modülleri için ise geliştirme potansiyeli değerleri motor yük değerleri arttıkça kararlı şekilde artış trendi göstererek sırasıyla 2.28 kW-3.51 kW ve 2.16 kW-4.66 kW değerlerinde değişiklik göstermiştir. Turboşaft motor için, en düşük geliştirme potansiyeline sahip modül HPT olmuş ve değerleri 0.09 kW ile 2.12 kW arasında elde edilmişken PT için bu değerler 2.28 kW ile 5.01 kW arasında olmuştur. Sonuçlara bakıldığında, yanma odası açık ara geliştirmeye en açık modül olarak öne çıkmaktadır. Ekserji yıkımını ve geliştirme potansiyelini azaltmak için yanma odasında oluşan tersinmezliklerin nedenlerini iyi anlamak gerekmektedir. Bu tersinmezliklere neden olan etkenlerden bazıları basınç düşümü, akışların karışımı, kimyasal reaksiyon ve ısı transferi prosesidir.



Şekil 5. Motor modüllerinin görel tersinmezlikleri



Şekil 6. Motor modüllerinin yakıt tüketim oranları



Şekil 7. Motor modüllerinin üretkenlik kaybı

Tablo 8 Motor modüllerinin performans parametreleri (test #1)

Modül	$\dot{E}x_D(kW)$	$\eta_{ex}(\%)$	$\chi(\%)$	$\delta(\%)$	$\zeta(\%)$	$\dot{I}P(kW)$
AC	33.72	93.61	2.44	0.48	0.60	2.16
CeC	37.98	94.00	2.74	0.54	0.67	2.28
CC	1170.30	60.80	84.56	16.60	20.73	458.72
HPT	51.65	95.90	3.73	0.73	0.92	2.12
PT	56.60	92.51	4.09	0.80	1.00	4.24
ED	54.45	93.88	3.93	0.77	0.96	3.34

Tablo 9 Motor modüllerinin performans parametreleri (test #2)

Modül	$\dot{E}x_D(kW)$	$\eta_{ex}(\%)$	$\chi(\%)$	$\delta(\%)$	$\zeta(\%)$	$\dot{I}P(kW)$
AC	39.46	93.98	2.38	0.42	0.52	2.37
CeC	43.96	94.68	2.65	0.47	0.58	2.34
CC	1474.50	62.80	88.81	15.79	19.34	548.46
HPT	12.38	99.25	0.75	0.13	0.16	0.09
PT	50.50	95.49	3.04	0.54	0.66	2.28
ED	88.75	92.11	5.35	0.95	1.16	7.00

Tablo 10 Motor modüllerinin performans parametreleri (test #3)

Modül	$\dot{E}x_D(kW)$	$\eta_{ex}(\%)$	$\chi(\%)$	$\delta(\%)$	$\zeta(\%)$	$\dot{I}P(kW)$
AC	54.77	92.75	2.84	0.49	0.59	3.97
CeC	56.49	94.18	2.93	0.50	0.61	3.29
CC	1650.12	65.46	85.57	14.67	17.74	569.99
HPT	40.94	97.85	2.12	0.36	0.44	0.88
PT	71.36	94.95	3.70	0.63	0.77	3.60
ED	70.54	95.06	3.66	0.63	0.76	3.49

Tablo 11 Motor modüllerinin performans parametreleri (test #4)

Modül	$\dot{E}x_D(kW)$	$\eta_{ex}(\%)$	$\chi(\%)$	$\delta(\%)$	$\zeta(\%)$	$\dot{I}P(kW)$
AC	60.64	92.31	3.00	0.51	0.61	4.66
CeC	59.27	94.07	2.93	0.50	0.60	3.51
CC	1702.50	66.61	84.23	14.25	17.23	568.49
HPT	51.15	97.38	2.53	0.43	0.52	1.34
PT	86.99	94.24	4.30	0.73	0.88	5.01
ED	109.28	93.18	5.41	0.91	1.11	7.45

5. DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada Makila 1A1 Turboşaft motorunun ve ana modüllerinin dört farklı yük değerinde modül-temelli enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır.

Enerji analizi sonuçlarına göre kompresör (AC ve CeC) ve türbin (HPT ve PT) izantropik verimleri sırasıyla 82%-84.3% ile 89.4%-94.4% değerlerinde değişim göstermektedir. En yüksek izantropik verim her iki modül için test #2'de (436 N·m yük değerinde) elde edilmiştir.

Turboşaft motor için gerçekleştirilen modül-temelli ekserji analizi sonuçlarına göre, yanma odası modülü tüm yük değerlerinde en yüksek ekserji yıkım değerlerine sahiptir. Aynı zamanda, bu modül yüksek tersinmezlik nedeniyle düşük ekserji verimi ve yüksek yakıt tüketim oranı, üretkenlik kaybı, görel tersinmezlik ve ekserjetik geliştirme potansiyeli değerlerine sahiptir. Böylece, optimizasyon için en büyük aday modül olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, turboşaft motor için en yüksek ekserji verimi test #3'de (547 N·m yük değerinde) 27.65% olarak bulunmuştur.

Tersinmezliklerin yerleri ve nedenlerinin belirlenmesi sonucu bu çalışmanın sonuçları geliştirme çalışmalarına bir yol gösterici olabilir. Sonuçlar ayrıca benzer turboşaft/turboprop tahrik

sistemlerinin tasarım ve geliştirme süreçlerinde kullanılabilir. Bu çalışma eksergo ekonomik, eksergo çevresel ve eksergo sürdürülebilirlik analizlerini de içerecek şekilde gelecek çalışmalarda daha da geliştirilebilir.

Teşekkür

Bu çalışmaya destek sağlayan Anadolu Üniversitesi'ne teşekkür ederiz.

Semboller ve Kısaltma Listesi

AC	Eksenel kompresör
AFR	Kütleye göre Hava-Yakıt oranı
CC	Yanma odası
CeC	Santrifüj kompresör
cp	Sabit basınçta özgül ısı (kJ/kg.K)
\dot{E}	Enerji akımı (kW)
ED	Egzoz lüle
ex	Özgül ekserji (kJ/kg)
\bar{e}_x	Özgül molar ekserji (kJ/kmol)
\dot{E}_x	Ekserji akımı (kW)
h	Entalpi (kJ/kg)
HPT	Yüksek basınç türbini
$\dot{I}P$	Geliştirme potansiyeli (kW)
LHV	Alt ısı değer (kJ/kg)
\dot{m}	Kütle debisi (kg/s)
pe	Potansiyel enerji (kW)
P	Basınç (kPa)
PT	Güç türbini
r	Kompresör basınç oranı
\dot{Q}	Isı transfer akımı (kW)
R	Gaz sabiti (J/kg.K)
SP	Şaft gücü
T	Sıcaklık (K)
TE	Turboşaft motor
\dot{W}	Güç (kW)
x_i	Yanma gazı i nin mol kesri
ε	Akımın özgül ekserjisi (kJ/kg)
η	Verim
χ	Görel tersinmezlik

δ	Yakıt tüketim oranı
ζ	Üretkenlik kaybı
λ	Yanma denklemi sabiti
γ	Özgül ısı oranı
φ	Yakıtın ekserji korelasyon formülü

İndisler

0	Ölü hal
a	Hava
c	Kompresör
ch	Kimyasal
D	Yıkım
exh	Egzoz
f	Yakıt
g	Yanma gazları
in	Giriş
k	Kinetik
m	Mekanik
out	Çıkış
p	Potansiyel
ph	Fiziksel
SP	Şaft gücü
T	Türbin

Kaynaklar

- Annamalai,K., and Puri,I.K. (2007).*Combustion Science and engineering*. Boca Raton.:CRC Press/Taylor&Francis
- Atilgan,R., Turan, O.,Altuntaş,O.,Aydın,H., Synlyo,K. (2013). Environmental impact assessment of a turboprop engine with the aid of exergy. *Energy* 58,664-671.
- Aydın H., Turan O., Karakoç T.H., Midilli A. (2012). Component-based exergetic measures of an experimental turboprop/turboshaft engine for propeller aircrafts and helicopters. *International Journal of Exergy*. Vol. 11: 322-348.
- Aydın H., Turan O., Karakoç T.H., Midilli A., (2013). Energetic and exergetic performance assessment of a turboprop engine at various loads. *International Journal of Exergy*. Vol. 13: 543-563.
- Aydın, H.,Turan, O. (2016).Numerical calculation of energy and exergy flows of a turboshaft engine for power generation and helicopter applications.*Energy*,115.914-923.
- Balli O, Aras H, Aras N, Hepbasli A. (2008). Exergetic and exergoeconomic analysis of an Aircraft Jet Engine (AJE). *Int J Exergy*;5(5/6):567-81.
- Balli,O.,Hepbasli,A.(2013).Energetic and exergetic analyses of T56 turboprop engine.*Energy convergent.and Management*.73.106-120.

- Bejan A., Siems D.L., (2001). The need for exergy analysis and thermodynamic optimization in aircraft development, *Exergy, An International Journal* 1: 14-24.
- Bejan A, Tsatsaronis G, Moran M., (1996). *Thermal design and optimization*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Brasseur, G.P. and Gupta, M. (2010). Impact of Aviation on Climate: Research Priorities. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 91, 461-463.
- Cengel Y.A., Boles M., (2006). *Thermodynamics: An Engineering Approach 5th Edition*. McGraw-Hill Higher Education.
- Dincer, I., and Rosen, M.A. (2005). Thermodynamic aspects of renewables and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 9, 169–189.
- Etele, J. and Rosen, M.A. (2001). Sensitivity of exergy efficiencies of aerospace engines to reference environmental selection. *International Journal of Exergy*, Vol. 1, No. 2, pp.91–99.
- European Commission (2013). *Impact assessment on Proposal From the Commission to the European Parliament and Council for derogating from Directive 2003/87/EC*. Retrieved from http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/aviation/docs/swd_2013_430_en.pdf
- Gool, V. (1997). Energy policy fairy tales and factualities. *Innovation and Technology-Strategies and Policies*, Kluwer, Dordrecht. 93–105.
- Kotas, T.J. (1995). *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis, Reprint ed.*, Krieger, Malabar, Florida.
- Lee, J., Mo, J. (2011). Analysis of Technological Innovation and Environmental Performance Improvement in Aviation Sector. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 8, 3777-3795.
- Mansouri M.T., Ahmadi, P., Kaviri, A.G., Jaafar, M.N.M. (2012). Exergetic and economic evaluation of the effect of HRSG configurations on the performance of combined cycle power plants. *Energy Convers Management*; 58: 47–58.
- Moran, M.J., Shapiro, H.N., Boettner, D.D., Bailey, M. B. (2011). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. Westford. John Wiley & Sons, Inc.
- Norton, Travis M. (2014). Aircraft Greenhouse Gas Emissions during the Landing and Takeoff Cycle at Bay Area Airports. Master's Projects. Paper 15.
- Rosen, M.A., Pedinelli, N. and Dincer, I. (1999). Energy and exergy analyses of cold thermal storage systems. *Int. J. Energy Res.*; 23: 1029-1038.
- Söhret, Y., Sogut, M.Z., Karakoc, T.H., Turan, O. (2016). Customised application of exergy analysis method to PW120A turboprop engine for performance evaluation. *International Journal of Exergy*. Vol. 20, 48 – 65.
- Tai, V.C., Mares, C., See, P.C. (2014). Optimisation of energy and exergy of turbofan engines using genetic algorithms. *Int. J. Sustainable Aviation*, Vol. 1, No. 1, 25-42.
- Tona C., Antonio P., 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.
- Turgut E.T, Karakoc T.H, Hepbasli A. (2007). Exergetic analysis of an aircraft turbofan engine. *Int J Energy Res*; 31(14):1383–97.
- Turgut, E.T., Karakoc, T.H., Hepbasli, A., and Rosen, M.A. (2009b). Exergy analysis of a turbofan aircraft engine. *International Journal of Exergy*. Vol. 6, No. 2, 181–199.
- www.safran-helicopter-engines.com/helicopter-engines/over-2000-shp/makila/makila-1a1/1a2/1k2 [last access: October 11, 2016]
- Xiang, J.Y., 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*, Vol. 28, No. 2, 101–115.