

**BİR TURBOPROP UÇAK MOTORUNUN
FARKLI YÜKLERDEKİ
EKSERGO-ÇEVRESEL ANALİZİ**

Ramazan ATILGAN

Yüksek Lisans Tezi

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı

Temmuz-2014

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Ramazan ATILGAN'ın “**Bir Turboprop Uçak Motorunun Farklı Yüklerdeki Eksergo-Çevresel Analizi**” başlıklı **Uçak Gövde Motor Bakım** Anabilim Dalındaki Yüksek Lisans tezi, 22.07.2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Adı Soyadı		İmza
Üye (Tez Danışmanı): Doç. Dr. Önder TURAN	
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Alper ULUDAĞ
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Emre KIYAK

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BİR TURBOPROP UÇAK MOTORUNUN FARKLI YÜKLERDEKİ EKSERGO-ÇEVRESEL ANALİZİ

Ramazan ATILGAN

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Önder TURAN

2014, 57 sayfa

Eksergo-çevresel analiz enerji dönüşüm sistemlerinin çevresel performansını değerlendirmek için kullanılan ideal bir yöntemdir ve bu çalışmada ilk defa bir uçak motoruna uygulanmıştır. Bu analiz vasıtasıyla çevresel etkilerin yeri, büyüklüğü ve kaynağı ekserji yıkım akımları vasıtasıyla komponent bazında belirlenebilir. Bu tez çalışmasında bir turboprop uçak motorunun eksergo-çevresel analizi sırasıyla 240 Nm, 350 Nm, 485 Nm, 552 Nm, 580 Nm ve 630 Nm tork değerleri için gerçekleştirilmiştir. Motor verileri test şartlarında elde edilmiş olup, kalan değerler parametrik olarak hesaplanmıştır. Sonuçlara göre bütün tork değerlerinde en fazla ekserji yıkımı kaynaklı çevresel etkinin olduğu komponent, kimyasal reaksiyonun gerçekleştiği yanma odası olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, komponent kaynaklı çevresel etkiler kompresör, yanma odası, gaz jeneratör türbin ve güç türbini için sırasıyla 6,14 Pts/sa, 2,44 Pts/sa, 6,42 Pts/sa ve 3,11 Pts/sa olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eksergo-çevresel analiz, Turboprop, Ekserji, Yaşam döngü değerlendirmesi

ABSTRACT

Master of Science Thesis

EXERGO-ENVIRONMENTAL ANALYSIS OF AN EXPERIMENTAL TURBOPROP AIRCRAFT ENGINE UNDER DIFFERENT LOADS

Ramazan ATILGAN

Anadolu University

Graduate School of Sciences

Aircraft Airframe Powerplant Maintenance Program

Supervisor: Doç. Dr. Önder TURAN

2014, 57 pages

Exergo-environmental analysis is a suitable tool for evaluating environmental performance of energy conversion systems and it is firstly performed to aircraft engines in this study. Exergo-environmental analysis identifies and quantifies locations, magnitudes and sources of environmental impacts through exergy destruction rates of each engine component. In this study, exergo-environmental analysis is performed to an aircraft turboprop engine for torque values of 240 Nm, 350 Nm, 485 Nm, 552 Nm, 580 Nm and 630 Nm, respectively. Engine data is mainly obtained from engine tests, remains are calculated parametrically. Results are showed that the biggest environmental impact value of exergy destruction for all torques is found for combustion chamber where chemical reaction occurs. Furthermore, total component related environmental impacts are found as 6,14 Pts/h, 2,44 Pts/h, 6,42 Pts/h and 3,11 Pts/h for compressor, combustion chamber, gas generator turbine and power turbine, respectively.

Keywords: Exergo-environmental analysis, Turboprop, Exergy, Life cycle assessment

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Önemi	1
1.2. Motor Emisyonları.....	2
1.3. Teknolojik Gelişmeler	3
1.4. Ekserjetik Analizler	4
1.5. Turboprop Motorlar	4
1.6. Literatür Taraması	5
2. TURBOPROP UÇAK MOTORU SİSTEM TANIMI	7
2.1. Genel Özellikler.....	7
2.2. Turboprop Motor Çeşitleri	8
2.3. Turboprop Motorların Avantaj ve Dezavantajları.....	10
2.4. Deneysel Turboprop Motor.....	11
3. ANALİZ	14
3.1. Yöntem.....	14
3.2. Kabuller.....	15
3.3. Ekserji Analizi	17
3.4. Eksergo-Ekonomik Analiz	19
3.5. Yaşam Döngü Değerlendirmesi	23
3.6. Eksergo-Çevresel Analiz.....	24

4. BULGULAR VE TARTIŞMA	26
4.1. Eksergo-Ekonomik Analiz Sonuçları	26
4.2. Eksergo-Çevresel Analiz Sonuçları.....	29
5. SONUÇ	44
KAYNAKLAR.....	47
Ek-1 Turboprop Motor Termodinamik Parametreleri	52
Ek-2 Turboprop Motor Ekserji Analizi Sonuçları	55

ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1. Turboprop motor komponentleri.....	7
2.2. Turboprop motor çalışma şeması.....	8
2.3. Turboprop motor şematik gösterimi	13
3.1. Eksergo-çevresel analiz aşamaları	14
4.1. Turboprop motor komponentleri çevresel maliyetleri	29
4.2. 240 Nm için motor istasyonlarına ait eksergo-çevresel değişkenler	31
4.3. 240 Nm tork değeri için eksergo-çevresel analiz sonuçları.....	31
4.4. 350 Nm için motor istasyonlarına ait eksergo-çevresel değişkenler	33
4.5. 350 Nm tork değeri için eksergo-çevresel analiz sonuçları.....	33
4.6. 485 Nm için motor istasyonlarına ait eksergo-çevresel değişkenler	35
4.7. 485 Nm tork değeri için eksergo-çevresel analiz sonuçları.....	35
4.8. 552 Nm için motor istasyonlarına ait eksergo-çevresel değişkenler	37
4.9. 552 Nm tork değeri için eksergo-çevresel analiz sonuçları.....	37
4.10. 580 Nm için motor istasyonlarına ait eksergo-çevresel değişkenler.....	39
4.11. 580 Nm tork değeri için eksergo-çevresel analiz sonuçları.....	39
4.12. 630 Nm için motor istasyonlarına ait eksergo-çevresel değişkenler.....	41
4.13. 630 Nm tork değeri için eksergo-çevresel analiz sonuçları.....	41
4.14. CT7-9C motoru için dinamik eksergo-çevresel analiz sonuçları.....	43

ÇİZELGELER DİZİNİ

2.1. CT7-9C turboprop motorunun kullanıldığı bazı uçak tipleri	12
3.1. Dinamik operasyon şartlarındaki turboprop motor parametreleri	16
3.2. Turboprop motora ait enerji ve ekserji denge denklemleri	18
3.3. Turboprop motora ait eksergo-ekonomik parametreler	19
3.4. Turboprop motora ait komponent maliyetleri.....	21
3.5. Turboprop motorunun farklı tork değerlerine ait matris sistemleri	22
4.1. Turboprop motora ait eksergo-ekonomik analiz sonuçları.....	27

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

- ER : TL/USD oranı
- I : Faiz oranı
- LHV : Alt ısııl değęer (Lower heating value)
- N : Motor ömrü
- PEC : Komponent maliyetleri (Purchased equipment cost)
- PM : Partikül madde (Particule matter)
- PR : Yakıt fiyatı
- RPM : Dakikadaki devir sayısı (Revolution per minute)
- USD : Amerikan doları
- YDD : Yaşam döngü değęerlendirmesi (Life cycle assessment)

Semboller

- \dot{B} : Çevresel etki akımı (Pts/sa)
- b : Özgül çevresel etki (Pts/GJ)
- \dot{C} : Ekonomik maliyet akımı (USD/sa)
- c : Birim ekserji maliyeti (USD/GJ)
- \dot{E} : Enerji akımı (MW)
- $\dot{E}x$: Ekserji akımı (MW)
- M : Mach sayısı (Mach number)
- \dot{Y} : Komponent kaynaklı çevresel etki (Pts/sa)
- \dot{W} : İş (MW)
- \dot{Z} : Ekonomik maliyet akımı (USD/sa)

Alt ve üst indisler

komp : Kompresör

yo : Yanma odası

gg : Gaz jeneratör türbin

gt : Güç türbini

yık : Yıkım

0,1...5 : Motor komponentleri istasyon numaraları

k : k'ncı komponent

CIC : İlk yatırım

OM : Bakım ve işletme

TOT : Toplam

in : Komponent girişi

out : Komponent çıkışı

1. GİRİŞ

Enerji kaynaklarının tükenmesi ve artan ekonomik endişeler bilim insanlarını ve tasarımcıları enerji verimliliği ve maliyet kavramlarını birlikte değerlendirmeye sevk etmiştir. Bununla birlikte, enerji dönüşüm sistemlerinin çevre üzerindeki olumsuz etkisi son zamanlarda ilgi çekmeye başlamıştır. Ekolojik denge ve çevre üzerindeki insan kaynaklı olumsuz etkinin göz ardı edilemez hale gelmesi (küresel ısınma, ozon tabakasının zarar görmesi, canlı çeşitliliğinin tehdit altında olması, asit yağmuru ve fotokimyasal duman gibi) ve çevre konusundaki bilincin artması; enerji dönüşüm sistemlerinin çevresel performansının tasarım ve işletme aşamasında anahtar rol üstlenmesine sebep olmuştur.

Sivil hava taşımacılığının yolcu trafiği yıllık % 5.1'lik oranda bir artış göstermektedir. Bu büyüme oranı sektörün ihtiyacı olan uçak sayısında, ve bu uçakların sebep olacağı trafiği karşılamak için uçuş sayılarında bir artışı gerektirmektedir. Uçak ve uçuş sayısındaki bu artış, insan sağlığı ve hayat kalitesi üzerinde olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir: zararlı jet motor emisyonları, trafik sıkışıklığı sonucu oluşan beklenmedik rötalar, havaalanı civarında devamlı olarak meydana gelen gürültü emisyonu vb... Çevre üzerinde oldukça fazla olumsuz etki potansiyeli olan bu ve benzeri durumların önüne geçmek, en azından etkilerini azaltmak için sektör paydaşlarının ciddi çaba göstermesi gerekmektedir. Bunun için bilim insanları, karar verici konumundaki resmi otoriteler ve havacılık sanayii temsilcilerinin birlikte hareket etmeleri gerekmektedir [1-6].

1.1. Tezin Amacı ve Önemi

Bu tez çalışması deneysel bir turboprop motorun çevresel performansını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu değerlendirme, termodinamik yaklaşımlardan olan enerji ve ekserji analizleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada incelenen turboprop motor (CT7-9C), bölgesel uçaklarda yaygın olarak kullanılan bir motor olup halen Türk Silahlı Kuvvetleri envanterindeki uçaklarda da kullanılmaktadır. Aynı motorun turboşaft modeli (T-700) ise sivil ve askeri birçok helikopter modelinde kullanılmaktadır.

Bu çalışmada turboprop motorun çevresel performansını değerlendirmede seçilen yöntem eksergo-çevresel analizdir. Bu yöntem ilk defa bir uçak motoruna, dolayısıyla da bir turboprop motora uygulanmıştır. Ayrıca bu analizde 6 farklı tork değeri için eksergo-ekonomik analiz ve eksergo-çevresel analiz ayrı ayrı uygulanarak, ilk defa bu analizler dinamik olarak bir uçak motoruna uygulanmıştır.

1.2. Motor Emisyonları

Havacılık sektörü toplam küresel sera gazı salınımlarının % 2'sinden sorumlu durumdadır. Bu salınımların nedeni, ana motorların ve yardımcı güç ünitelerinin kullandığı fosil yakıtların yanması sonucu açığa çıkan zararlı emisyonlardır. Uçak güç sistemleri (ana motorlar ve yardımcı güç üniteleri), fosil kökenli bir yakıt olan kerozen kullanmaktadır ve bu kullanım dünya çapındaki toplam fosil yakıt tüketiminin % 2'lik bir kısmını oluşturmaktadır. Sektörün söz konusu büyüme eğilimi devam ederse, 2050 yılında bu oranın % 3 olacağı tahmin edilmektedir. Yukarıda bahsedilen % 2- % 3'lük oran az gibi gözükse de; her sene artan büyüme oranları ve bahsedilen salınımların troposferin üst kısmı ile stratosferin alt kısmında gerçekleşiyor olması (8-13 km irtifaları arası) bu salınımların etkisini önemli ölçüde artırmaktadır [7].

Son zamanlarda uçak emisyonlarının yerel ve bölgesel hava kalitesine etkisi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Uçaklar yaklaşma, iniş, taksi, kalkış, tırmanmanın ilk safhaları ve motor çalıştırmaları dolayısıyla havaalanları etrafında hava kirliliğinin ana sebebidir. Yapılan çalışmalarda jet motor egzoz gazlarının, havaalanı civarında toplam emisyon kütesinin % 50'sini oluşturduğu tespit edilmiştir. Mevcut durumda çalışmaların yoğunlaştırıldığı nokta, nitrojen oksit (NO_x) oluşumları ve partikül madde (PM) emisyonlarıdır. Çünkü bu emisyonlar fotokimyasal sis ve bölgesel duman gibi insan sağlığı ve hayat kalitesi üzerinde direkt etkiye sebep olan emisyonlardır. Özellikle yerleşim yerleri yakınında, hatta yerleşim yerlerinin içerisinde yer alan hava alanlarında bu etki daha büyük önem arz etmektedir. Sivil hava taşımacılığına ait sera gazı, NO_x ve PM emisyonları; hava aktivitesi azaltılarak ve uçuş modlarının verimliliği artırılarak düşürülebilir [8-10]. Havacılık endüstrisi kullanılan yakıt dolayısıyla ortaya çıkan emisyonları ve gürültüyü azaltma

konusunda kararlı adımlar atmaktadır. Uçakların çevre üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için mutlaka sera gazı, NO_x ve PM emisyonları minimize edilmelidir. Bu da uçak güç sistemlerinin enerji verimliliği maksimize edilerek sağlanabilir [11].

1.3. Teknolojik Gelişmeler

Enerji, sürdürülebilir bir çevre için en önemli araçlardan biridir. Enerji verimliliği, “yeşil havacılık” hedeflerinin yakalanmasında ve küresel ısınma, gürültü, atmosferik kirlenme gibi çevresel problemlerin giderilmesinde kilit faktördür [12, 13]. Enerji verimliliği, yakıt tüketimi üzerine direkt etki etmektedir. Daha verimli motorlar daha az yakıt tüketimi, bu da daha az olumsuz çevresel etki demektir. Bu durumda, hava araçlarının çevresel etkilerini değerlendirmede enerji verimliliği bir ölçü olarak kabul edilebilir. Hava taşımacılığının çevresel etkilerini azaltmada teknoloji kilit rol oynamaktadır. Bu durumda, havayolu firması için yakıt tüketimini azaltmanın en kısa ve uygulanabilir yolu kullanılan uçakların ve komponentlerin var olan en ileri teknolojiye sahip olmasıdır. Bu yüzden birçok havayolu firması yakıt tüketimini azaltmak için filosunu gençleştirme yolunu seçmektedir [14-16]. Halihazırda kullanılmakta olan modern uçak ve güç sistemi tasarımları nispeten daha eski teknolojiye sahip uçaklara göre yıllık yaklaşık olarak % 1- % 2 daha verimli yakıt tüketim değerlerine sahiptirler. Bununla birlikte, uçak motorlarının ortalama ekonomik ömürlerinin 20-30 yıl olduğu göz önüne alınırsa, yeni nesil motor teknolojilerinin olumlu etkisini hissedebilmek için yıllar geçmesi gerekebilir. Teknolojik gelişmelerin bir diğer ayağı ise; günümüzde kullanılan ve fosil kökenli bir yakıt olan kerozone alternatif havacılık yakıtlarının geliştirilmesi olarak ifade edilebilir. Geliştirilecek alternatif yakıtın mevcut motor konfigürasyonlarında önemli bir değişikliğe sebep olmadan direkt olarak kullanabilmesi ve havacılık sektörünün yüksek gereksinimleri karşılayabilmesi gerekmektedir. Ancak bu özelliklere sahip alternatif yakıtın geliştirilmesi ve yaygın olarak kullanılabilmesi kısa ve orta vadede mümkün görünmemektedir (alternatif yakıtların arasında uygulanabilirlik açısından en güçlü adayın Fisher-Tropsch yakıtları olduğu söylenebilir). Bu nedenle, çevresel etkiler söz konusu olduğunda uçak motorlarının enerji analizleri daha elle tutulur sonuçlar vermektedir ve iyileştirme potansiyelleri daha somuttur [17-22].

1.4. Ekserjetik Analizler

Enerji ve ekserji analizleri çevresel sürdürülebilirliği sağlayabilmek için yaygın olarak kullanılan güvenilir konseptlerdir. Kirlenici emisyonların neden olduğu olumsuz çevresel etkileri azaltmak için enerji kaynakları verimli bir şekilde kullanılmalıdır. Çevresel etkileri termodinamik bakış açısıyla incelemeye yarayan iki yaklaşım vardır: enerji analizi ve ekserji analizi [18, 23-25]. Wall [26], ekserji analizinin atık emisyonların çevresel etkisini ölçmek için uygun bir araç olduğunu ifade etmiştir. Bu bağlamda yapılan ve ulaştırma sektöründeki atık gaz salınımlarını değerlendiren çalışmalar mevcuttur [27, 28]. Çevreye salınan bir emisyonun ekserjisi, emisyonun çevreyi değiştirme ya da etkileme potansiyelinin bir ölçüsüdür. Ekserji analizi kullanılarak motor emisyonlarının çevre üzerindeki olumsuz etkileri niceliksel olarak ifade edilebilir [21].

1.5. Turboprop Motorlar

Hava trafiğindeki, dolayısıyla havacılık kaynaklı emisyonlardaki artış oranları ve yüksek yakıt fiyatları turboprop motorlara olan talebin artmasına neden olmaktadır. 2010 yılında, dünya genelinde ortalama olarak 15 yaşında 2080 adet turboprop motor hizmette iken; 2030 yılında 2440 adet yeni turboprop motorun teslim edilmesiyle dünya genelindeki turboprop motor filosu 3295'e yükselecektir [29]. Benzer şekilde Embraer ve Bombardier firmaları pazar tahminlerinde turboprop motor talebinde oluşacak artışa dikkat çekmişlerdir. Embraer, 2010-2029 yılları arasında 30-120 arası yolcu kapasitesine sahip uçakların % 32'sinin turboprop motorlar tarafından güçlendirileceğini öngörmektedir. Bombardier ise 2010-2019 yılları arasında, 20-99 arası yolcu kapasitesine sahip uçakların % 39'unun turboprop motorlar tarafından güçlendirileceğini ifade etmektedir [30]. Bu öngörüler ışığında gelişmiş turboprop motor konseptine sahip uçakların, dünya genelinde bölgesel uçak filolarının önemli bir bölümünü oluşturacağı söylenebilir. Turboprop uçaklar ile bölgesel jetler kıyaslandığında ise, bölgesel jetlerde yolculara daha konforlu bir uçuş sunulmaktadır. Ancak yüksek yakıt maliyetleri, özellikle kısa mesafe uçuşlarda,

işletmecilerin turboprop motorlara yönelmesine yol açmıştır. Çünkü turboprop uçaklar bölgesel jetlere göre düşük yakıt tüketimleri ile bilinmektedirler. Bu yüzden, kısa mesafe uçuşlarda yakıt tasarrufu yolcu konforunun önüne geçmiş ve turboprop motora sahip uçakların bölgesel jetlere nispeten daha çok tercih edilmesine yol açmıştır [22-31]. Tüm bu bilgiler ışığında, enerji verimliliğini maksimize edip, yakıt tüketimini minimize edecek ve dolayısıyla çevresel etkiyi de minimize edecek uçak gaz türbinli motorları geliştirmek için araştırmacılar yoğun olarak çalışmaktadır. Bu durum sürdürülebilir bir havacılık sektörü meydana getirmek için kaçınılmaz bir durumdur. Bunun için en uygun araçlardan bir tanesi de, termodinamiğin ikinci yasası yardımıyla motor ve komponentleri içerisindeki verimsizlikleri tespit edip minimize etmeye yarayan ekserji analizidir.

1.6. Literatür Taraması

Literatür taraması yapıldığında ekserji analizinin yaygın olarak kullanılan bir yöntem olduğu anlaşılmıştır [32, 33]. Gaz türbinli motorların ekserji analizleri incelendiğinde ise, öncelikli olarak bu yöntemin sabit gaz türbinlerine uygulandığı görülmüştür. Hava araçlarında kullanılan gaz türbinlerine ekserji ve eksergo-ekonomi analizinin uygulanmasının ise daha az, ama gittikçe artan sayıda literatürde mevcut olduğu görülmüştür [31, 34-44]. Bu çalışmada incelenen turboprop motorların ekserji analizi ile ilgili ise, Aydın ve ark. [31, 34] tarafından yapılan çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda CT7-9C turboprop motoru incelenmiştir. Yapılan ölçümler ve hesaplamalar ile motor komponentlerine ait giriş-çıkış istasyonları için hava debisi, sıcaklık ve basınç değerleri belirlenmiştir. Bununla birlikte eksergo-çevresel metodolojinin turboprop motorlara uygulandığı bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır.

Eksergo-çevresel analiz nispeten yeni geliştirilmiş bir metot olmasına rağmen birçok farklı enerji dönüşüm sisteminin çevreye olan olumsuz etkilerinin incelenmesinde kullanılmıştır. Altuntaş ve ark. [45] pistonlu motorla güçlendirilmiş pervaneli bir uçağın iniş ve kalkış fazlarındaki eksergo-ekonomik performansını incelemiştir. Ahmadi ve Dinçer [46] ise bir güç tesisini incelemiş ve bu tesis için bir simülasyon kodu geliştirmiştir. Daha sonra gerçek değerler ile simülasyon sonucu

elde edilen değerleri karşılaştırmıştır. Yapılan çevresel optimizasyon çalışması sonucu tesisin çevresel etkisinde % 50.50 bir azalma olduğu ifade edilmiştir. Boyano ve ark. [47] hidrojen üretiminde kullanılan ve doğalgaz ile çalışan bir reaktörü incelemiştir. Konvansiyonel ve gelişmiş eksergo-çevresel analiz aynı tesise uygulanmış ve en yüksek çevresel etkinin kimyasal reaksiyonun gerçekleştiği komponentte olduğu bildirilmiştir [48]. Meyer ve ark. [49] eksergo-çevresel analizin genel metodolojisini verdikten sonra, bir yüksek sıcaklık katı oksitli yakıt hücresini incelemiştir. Bununla birlikte aynı çalışmada eksergo-çevresel analizde kullanılan yaşam döngüsü değerlendirmesinin kısıtlarından bahsedilmiştir. Ahmadi ve ark. [50] bir mikro gaz türbinine sahip trijenerasyon sistemini incelemiştir. Petrakopoulou ve ark. [51] kombine çevrimli bir güç tesisini incelemiş ve gelişmiş ekserji bazlı metotların konvansiyonel olanlara göre daha isabetli sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Altuntaş ve ark. [52] tarafından 4 farklı uçuş fazı için (kalkış, tırmanma, yaklaşma ve taksit) piston motorlu pervaneli bir uçak incelenmiştir. Yaptıkları çalışmada çevresel etkiyi minimize edecek en uygun hava/yakıt oranı ve irtifa/gaz kolu ayarı belirlenmiştir. Restrepo ve ark. [53] Brezilya'da bulunan kömür tesisinin ekserji ve çevresel analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar göstermiştir ki; güç tesisin yol açtığı en büyük çevresel etki değeri, en büyük ekserji yıkım değeri sonucu meydana gelmiştir. Ahmadi ve Dinçer [54] bir kombine ısı-güç tesisini modellemiş ve daha sonra bu tesisin eksergo-çevresel optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Sonuçlara göre kompresöre ve gaz türbinine ait yüksek izantropik verim değerleri, bu komponentlerde daha düşük ekserji yıkımına yol açmaktadır. Bu da daha düşük yakıt tüketimi dolayısıyla, daha düşük çevresel etki ve operasyonel maliyet anlamına gelmektedir.

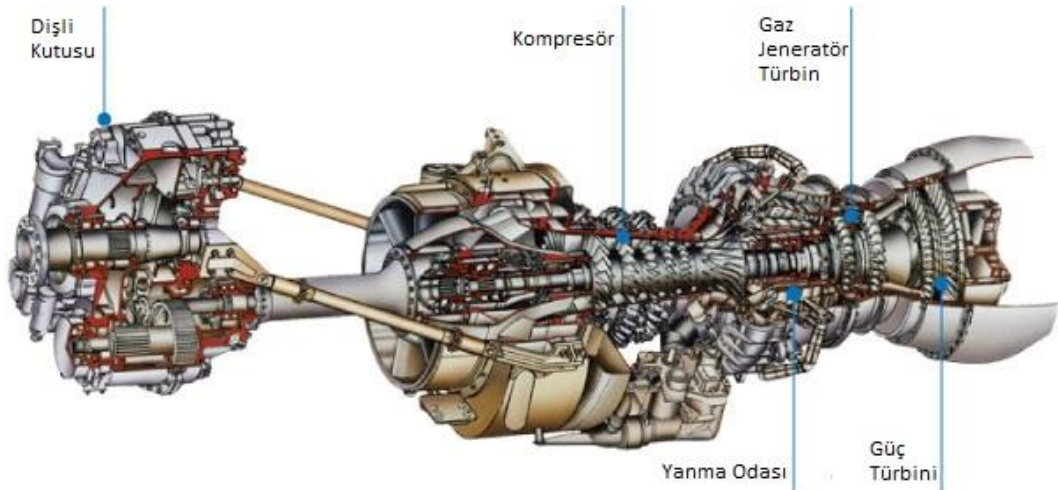
Yukarıdaki literatür analizinden de anlaşılacağı üzere havacılık sektörüne ait eksergo-çevresel analizin uygulandığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu tez çalışması bir turboprop uçak motoruna, eksergo-çevresel analizin uyguladığı ilk çalışmadır. Yapılan analiz sonucunda 6 farklı tork değeri için motora ait eksergo-çevresel analiz parametreleri belirlenmiştir.

2. TURBOPROP UÇAK MOTORU SİSTEM TANIMI

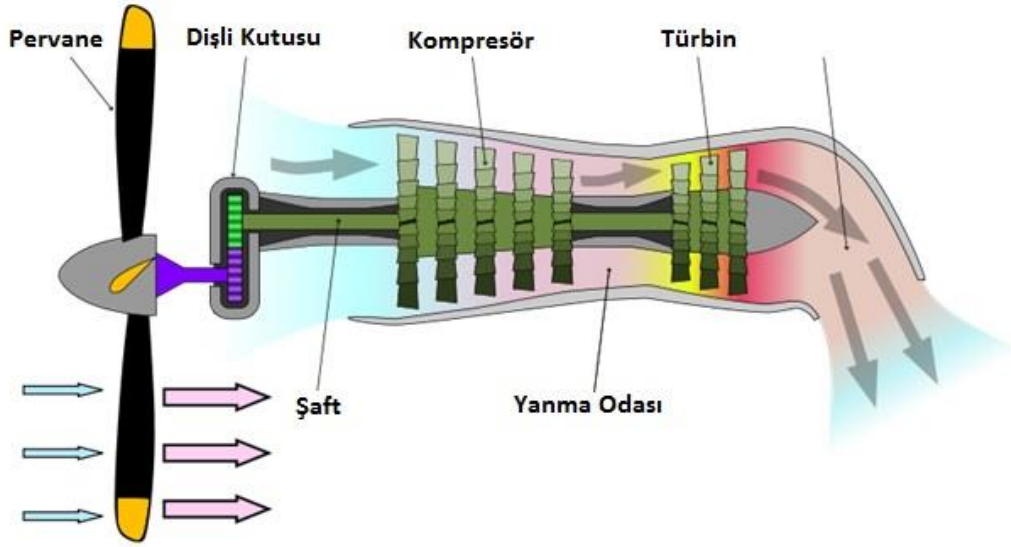
2.1. Genel Özellikler

Havacılık endüstrisinin turbojet teknolojisi ile tanışmasının hemen akabinde turboprop motorlar geliştirilmiştir. Konsept olarak turbofan motorlarla benzerlik göstermektedir. Turbofan motorlar gibi yüksek bypass oranına sahiptirler. Turbofan motorlarda motor kaportası içerisinde yer alan fanın türbin tarafından döndürülmesine benzer olarak; turboprop motor kaportasının dışında yer alan pervane, yine türbin tarafından döndürülmektedir (Şekil 2.1).

Turboprop motorlar düşük yakıt tüketimleri dolayısıyla (belli irtifa ve hız limitlerine uymak koşuluyla) 1000 milin altındaki kısa mesafe uçuşlarda tercih edilmektedir [55]. Turbojet ve turbofan motorlarla kıyaslandığında 650 km/sa hız değerlerine kadar en yüksek itki verimine sahiptir [56]. Ayrıca, yapılan bir çalışmada söz konusu yüksek itki verimine sahip olacak 640-700 km/sa arası seyir hızında uçacak turboprop uçak konseptinin düşük yakıt tüketimi sayesinde, karbondioksit salınımında % 25'lik bir azalma olacağı ifade edilmiştir [57].



Şekil 2.1. Turboprop motor komponentleri [58]



Şekil 2.2. Turboprop motor çalışma şeması [59]

Pervaneyi döndürmek için gerekli olan şaft gücünü bir gaz türbini vasıtasıyla elde eden motorlar turboprop motorlar olarak adlandırılırlar. Bir turboprop motor iki çeşit itki elde eder. Bunlardan ilki; pervanenin dönüşü sonucu oluşan itki, diğeri de sıcak egzoz gazlarının motoru terk etmesiyle elde edilen itkidir (Şekil 2.2). İlk olarak bahsedilen itki (yani pervane dönüşü ile oluşan itki) toplam itkinin % 85'ini oluştururken, kalan % 15'lik kısım egzoz gazları vasıtasıyla elde edilmektedir [56].

2.2. Turboprop Motor Çeşitleri

Turboprop motorlar pervanenin dönüş gücünü konvansiyonel yapıdaki bir gaz türbin çekirdeğinden almaktadır. Pervanenin dönüş gücünü aldığı türbinin çeşidine göre ikiye ayrılmaktadırlar; *tek şaftlı turboprop motorlar* ve *serbest türbinli turboprop motorlar*. Bu iki tip motor arasındaki temel fark, türbinden elde edilen gücün pervaneye aktarılış şeklindedir. Tek şaftlı motorlarda pervane, kompresörü döndüren aynı şaft tarafından döndürülmektedir. Serbest türbine sahip motorlar da ise pervane, bir şaftla bağlı olduğu ayrı bir türbin tarafından döndürülmektedir. Bu türbin 'güç türbini' olarak adlandırılır. 'Gaz jeneratör türbin' adı verilen diğeri türbin ise kompresörü döndürmektedir. Bu türbin ve kendisine bağlı olan kompresör –

pervane hızı ve hatvesinden bağımsız olarak- neredeyse sabit bir RPM değerinde dönmektedir.

Turboprop motorlarda türbin ile kompresör arasında devir düşürücü dişli kutusu kullanılmak zorundadır. Böyle bir dişli kutusu vasıtasıyla 1:15 mertebelerinde devir düşürme işlemi gerçekleştirilmektedir. Pervanenin türbinin döndüğü hızlara nispeten çok düşük hızda dönmesi zorunluluğundan dolayı yapılan bu devir düşürme işleminin iki nedeni vardır [56];

- Büyük çaptaki pervane palelerinin (2-4 metre arası ya da daha fazla) yüksek değerdeki santrifüj kuvvetlere dayanamayacak olmasıdır. Çünkü dönüş sırasında pervane palelerinin bağlı olduğu pale köklerinde çok yüksek gerilme değerlerine ulaşılır. Pervane boyutu arttıkça dönüş hızı azalmalıdır. Türbinlerin dönüş hızında oluşacak gerilme değerleri, pervane palelerinin dayanım sınırlarının çok üzerindedir. Bu yüzden devir düşürücü dişli kutusu vasıtasıyla pervanenin türbine göre daha düşük hızlarda dönmesi sağlanır.
- Pervanenin dönüşü sırasında, uçak ses hızına ulaşmadan önce pale ucundaki bağıl hız ses hızına yaklaşabilir. Havanın sıkıştırılabilirlik etkisinden dolayı karşılaşılan bu durum pervane tasarımını kısıtlayan etkenlerin başındadır. Bu durumun sonucunda yüksek sesaltı hızlarda ($M > 0,7$), pervane paleleri ucundaki hızlar sesüstü değerlere ulaşabilir. Bu istenmeyen bir durumdur ve akış ayrılması ya da şok dalgası oluşumu gibi pervane verimi ve motor performansını düşürücü sonuçlara yol açmaktadır.

2.3. Turboprop Motorların Avantaj ve Dezavantajları

Turboprop uçak motorlarının sahip olduğu avantajları maddeler halinde sıralayacak olursak [56]:

- Turboprop motorların sahip olduğu avantajlardan en önemlisi düşük yakıt tüketimidir. Bunun sebebi, oldukça az miktardaki havanın motor içerisinde yakılmasıdır. Turboprop motorlar düşük miktarda yakıt tüketerek (düşük ve orta irtifa seviyelerinde) yüksek itki elde edebilirler.
- Yüksek kalkış itkilerine sahiptirler. Bu sayede daha kısa kalkış mesafesine ihtiyaç duyarlar.
- 650 km/sa civarı seyir hızlarında turbofan ve turbojet motorlara kıyasla daha yüksek itki verimine sahiptirler.
- Kokpitten verilen komutlara turbojet motorlara göre daha hızlı cevap verirler.

Turboprop uçak motorlarının yukarıda sıralanan avantajlarının yanında bazı dezavantajları da mevcuttur. Bunlar şu şekilde sıralanabilir [56]:

- En önemli dezavantajlarından biri, sahip oldukları yüksek titreşim ve yüksek gürültü salınımıdır.
- Operasyon şartları sesaltı hızlar (yaklaşık olarak 650 km/sa ve altı) ve düşük irtifalar (yaklaşık olarak 9000 m ve altı) ile sınırlıdır. Bu limitlerin üzerinde performanslarında çok ciddi düşüşler görülmektedir.
- Pervane, devir düşürücü dişli kutusu, hatve kontrol mekanizması gibi ekstra komponentler önemli miktarda ağırlık artışına neden olmaktadır. Benzer bir gaz jeneratörüne sahip turbojet bir motora kıyasla turboprop motorlar 1,5 kat daha ağır olabilmektedir.

2.4. Deneysel Turboprop Motor

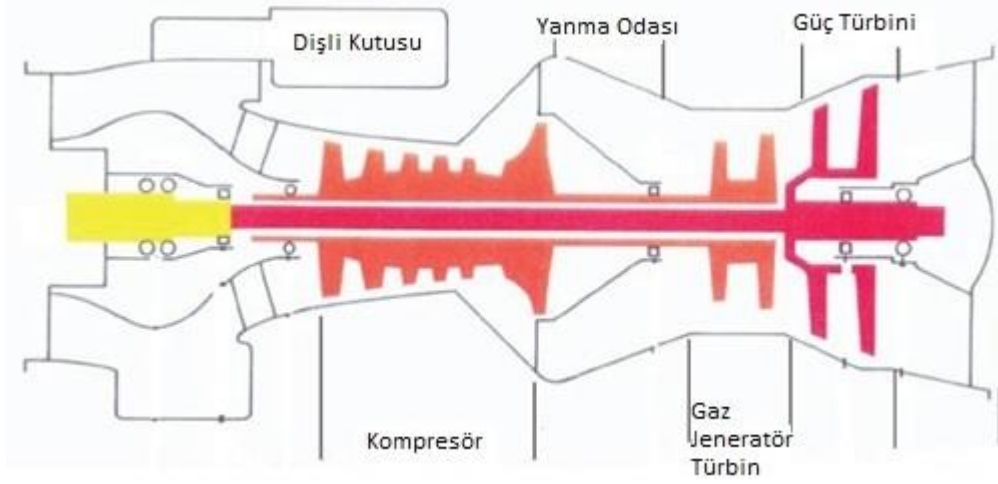
Bu çalışmada incelenen turboprop motor, General Electric firması tarafından geliştirilmiş olan ve helikopterlerde kullanılan T700 turboşaft motorundan türetilmiş CT7-9C motorudur. SAAB 340, Let L-610G, Sukhoi Su-80 ve CASA CN-235 gibi bölgesel yolcu ve nakliye uçaklarında kullanılmaktadır (Çizelge 2.1).

CT7 motorları günümüzde toplamda 600 civarında uçakta kullanılmaktadır ve toplam uçuş saati 14 milyon saati aşmış bulunmaktadır. Türk Silahlı Kuvvetleri envanterinde yer alan C-235 askeri nakliye uçağında 1750 SHP güç üreten CT7-9C modeli bulunmaktadır ve aynı zamanda T-700 turboşaft modelinin değişik versiyonları askeri nakliye ve hücum helikopterlerinde kullanılmaktadır.

Çizelge 2.1. CT7-9C turboprop motorunun kullanıldığı bazı uçak tipleri

	<p>CASA CN-235 (Airbus - İspanya)</p>
	<p>Let L-610 (Çek Cumhuriyeti)</p>
	<p>Saab 340 (İsveç)</p>
	<p>Sukhoi Su-80 (Rusya)</p>

Şekil 2.3’de gösterildiği gibi turboprop motorun ana bileşenleri sırasıyla şu şekildedir: 5 eksenel kademe ve 1 santrifüj kademedan oluşan kompresör (komp), annular tip yanma odası (yo), 2 eksenel kademedan oluşan gaz jeneratör türbin (gg) ve yine 2 eksenel kademedan oluşan güç türbin (gt).



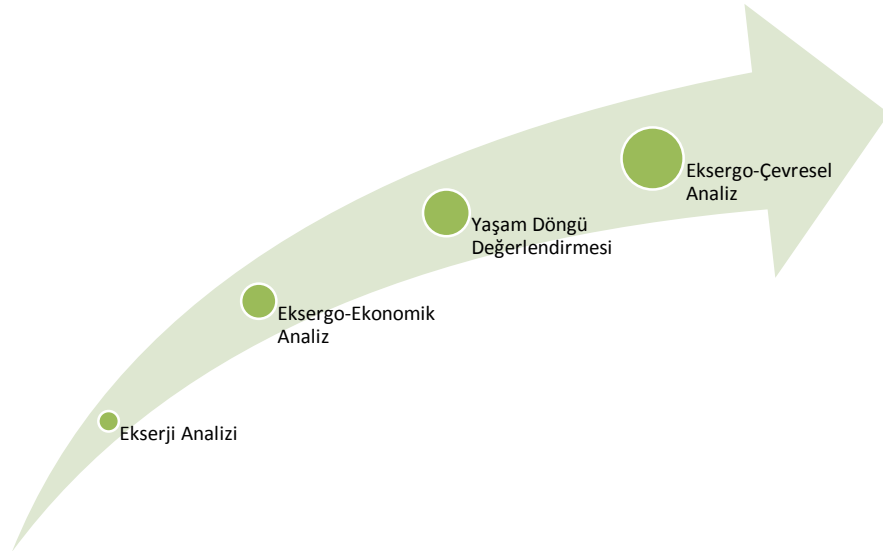
Şekil 2.3. Turboprop motor şematik gösterimi [31]

3. ANALİZ

3.1. Yöntem

Eksergo-çevresel analiz, ekserji analizi ve yaşam döngü değerlendirmesinin (YDD) bir kombinasyonu olarak düşünülebilir. Bu çalışmada farklı olarak CT7-9C motoru için eksergo-ekonomi analizi de gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar eksergo-çevresel analiz uygulanırken kullanılmıştır.

Söz konusu deneysel turboprop uçak motoru için eksergo-çevresel analiz 4 aşamada gerçekleştirilmiştir. Öncelikle motora ait ekserji analizi yapılmıştır [34]. Bu aşamada her bir motor komponentine ait giriş ve çıkış ekserji akımlarının elde edilmesi gerekmektedir. Böylelikle her bir motor komponentine ait ekserji yıkımı değerleri hesaplanabilir. İkinci aşamada ise eksergo-ekonomi analiz aynı motora uygulanır. Bunun sonucunda da komponent seviyesinde ekonomik maliyet giriş ve çıkış ekserji akımları vasıtasıyla tespit edilir. Üçüncü aşamada ise ilgili komponentlerin ve komple sistemin (uçak motoru) yaşam döngü değerlendirmesi yapılır. Son olarak, elde edilen denklemler ve veriler yardımıyla komponentlerin çevreye olan olumsuz etkileri değerlendirilir.



Şekil 3.1. Eksergo-çevresel analiz aşamaları

3.2. Kabuller

Ekserji analizlerinde yapılan kabuller büyük önem arz etmektedir. Özellikle referans çevre şartlarının çok iyi belirlenmesi gerekir. Zaten ekserji ‘referans alınan çevre ile var olan dengesizlikten kaynaklanan iş potansiyeli’ olarak tanımlandığı için, hesaplamalar bu referans çevre şartları kabullerinin üzerinden yapılmaktadır. Yani, bir enerji dönüşüm sisteminin ekserjetik analizleri (ekserji analizi, eksergo-ekonomi analizi veya eksergo-çevresel analiz) yapılırken ilk yapılması gereken referans çevre şartlarının belirlenmesidir diyebiliriz. Bu tez çalışmasında incelenen turboprop motor için yapılan kabuller aşağıda listelenmiştir.

- Referans çevre sıcaklığı (T_0) ve referans çevre basıncı (P_0) sırasıyla 281 K ve 92,4 kPa olarak alınmıştır,
- Turboprop motorun servis ömrü 30 yıl, ve tam güçteki yıllık çalışma süresi de 700 saat olarak belirlenmiştir,
- Sistemdeki tüm komponentler adyabatik olarak değerlendirilmiştir,
- Motor içerisinde kullanılan hava ve yanmış egzoz gazları ideal gaz olarak alınmıştır,
- Motor içerisinde tam bir yanma olduğu varsayılmıştır,
- Kompresör kademelerinden alınan havanın % 5’lik kısmının soğutma ve contaların basınçlandırılmasında kullanıldığı varsayılmıştır,
- Pompalar (yakıt, yağ ve hidrolik) ve ısı değiştiriciler (yakıt=hava veya yakıt=yağ) bu çalışmada dikkate alınmamıştır,
- Kinetik ve potansiyel ekserjiler ihmal edilmiştir,
- Yanma odası dışındaki komponentler için kimyasal ekserji ihmal edilmiştir,
- $C_{w,komp} = C_{w,gg}$,
- $C_4 = C_{45} = C_5$.

Çizelge 3.1’de turboprop motora ait parametreler yer almaktadır. Bu parametrelerin bir kısmı motor testleri sırasında ölçülmüş değerlerdir. Test sırasında ölçülemeyen bazı parametreler ise parametrik çevrim analizi yapılarak belirlenmiştir. Bu parametreler 6 farklı yük değeri için tespit edilmiş ve bu parametreler yardımıyla eksergo-çevresel analiz 6 farklı yük değeri için ayrı ayrı uygulanmıştır.

Çizelge 3.1. Dinamik operasyon şartlarındaki turboprop motor parametreleri [60]

	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Motor torku (Nm)	240	350	485	552	580	630
SHP	745	1081	1500	1709	1835	1948
Atmosfer Basıncı (kPa)	92,4	92,4	92,4	92,4	92,4	92,4
Atmosfer Sıcaklığı (K)	281	281	281	281	281	281
Kompresör Çıkış Sıcaklığı (K)	644	673	705	721	730	740
Kompresör Çıkış Basıncı (kPa)	1067	1254	1465	1563	1619	1668
Nem (%)	38,98	38,43	38,32	38,03	38,41	38,38
Güç Türbini Giriş Sıcaklığı (K)	958	1018	1093	1130	1152	1175
Güç Türbini Dönüş Hızı (rpm)	22001	22002	22001	22002	22001	22001
Gaz Türbini Dönüş Hızı (rpm)	39335	40448	41538	42196	42541	42772
Hava Debisi (kg/sn)	3,38	3,86	4,33	4,54	4,61	4,71
Yakıt Isıl Değeri (kJ/kg)	43360	43360	43360	43360	43360	43360
Yakıt Debisi (kg/sn)	0,059	0,0721	0,0893	0,0984	0,1038	0,1091
Hava- Yakıt Oranı	54,4	50,9	46,2	43,9	42,3	41,1

3.3. Ekserji Analizi

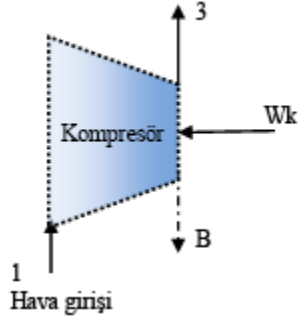
Bir enerji dönüşüm sisteminin performansı hakkında net bilgi elde edebilmek için enerji analizinin yanında ekserji analizinin yapılmasına da ihtiyaç duyulmaktadır. Enerji analizi tek başına değerlendirildiğinde yanıltıcı olabilmektedir. Ekserji analizi ise enerji analizini tamamlar ve bize sistemdeki gerçek verimsizlik ve düzensizlikler hakkında daha doğru bilgiler verir.

Enerji ve ekserji analizi ile ilgili temel denklemler detaylı olarak birçok kaynakta verilmiştir. Turboprop motorun 6 farklı yük değeri için ekserji analizi ise Aydın [60] tarafından gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.2. Turboprop motora ait enerji ve ekserji denge denklemleri

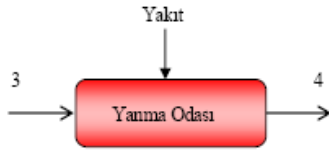
Kontrol Hacmi

Enerji ve Ekserji Denge Denklemleri



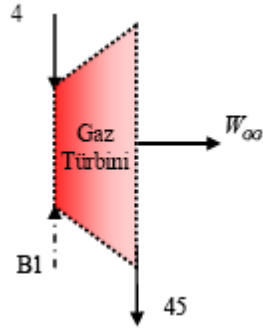
$$\dot{E}_1 + \dot{W}_{komp} - \dot{E}_3 - \dot{E}_B = 0$$

$$\dot{W}_{komp} + \dot{E}x_1 - (\dot{E}x_3 + \dot{E}x_B) = \dot{E}x_{yık,komp}$$



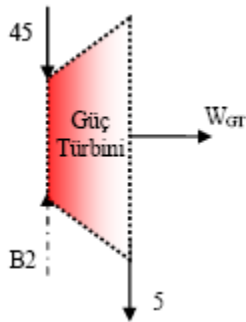
$$\dot{E}_{yakıt} + \dot{E}_3 - \dot{E}_4 = 0$$

$$\dot{E}x_{yakıt} + \dot{E}x_3 - \dot{E}x_4 = \dot{E}x_{yık,yo}$$



$$\dot{E}_4 + \dot{E}_{B1} - \dot{E}_{45} - \dot{W}_{gg} = 0$$

$$\dot{E}x_4 + \dot{E}x_{B1} - \dot{E}x_{45} - \dot{W}_{gg} = \dot{E}x_{yık,gg}$$



$$\dot{E}_{45} + \dot{E}_{B2} - \dot{E}_5 - \dot{W}_{gt} = 0$$

$$\dot{E}x_{45} + \dot{E}x_{B2} - \dot{E}x_5 - \dot{W}_{gt} = \dot{E}x_{yık,gt}$$

Çizelge 3.2’de turboprop motorun komponentlerine ait enerji ve ekserji denge denklemleri verilmiştir. Analizini yapacağımız sistemin uçak motoru, komponentlerin de uçak motor komponentleri olduğunu düşünürsek, ekserji analizi yapabilmek için turboprop motorun her istasyonundaki debi (kg/sn), sıcaklık (K) ve basınç (kPa) bilgilerine ihtiyaç duyarız. Bu bilgiler Ek-1’de verilmiştir.

Çizelge 3.2’de verilen denklemler ve Ek-1’de verilen debi, sıcaklık ve basınç bilgileri kullanılarak ekserji analizi gerçekleştirilir ve her bir komponente ait giriş ve çıkış ekserji değerleri elde edilir. Bu çalışmada incelenen turboprop motora ait ekserji analizi sonuçları Ek-2’de verilmiştir.

3.4. Eksergo-Ekonomik Analiz

Eksergo-ekonomik analiz; ekserji analizi ve maliyet analizinin birleştirilmesiyle, tasarımcılara ya da işletmecilere komponent bazında maliyet çıktılarını veren bir analiz türüdür. Bu çıktılar her komponente ait giriş ve çıkış ekserji akımlarına bir parasal değer atanarak elde edilir. Bu çıktılara enerji, ekserji ya da maliyet analizleri ayrı ayrı uygulanarak ulaşılamaz. Bu yüzden eksergo-ekonomik yöntem geliştirilmiştir.

Çizelge 3.3. Turboprop motora ait eksergo-ekonomik parametreler

Parametre	Birim	Değer
CO	USD	1000000
OM	USD/yıl	112000
I	%	10
J	%	12
N	yıl	30
s	sa/yıl	700
PR	TL/kg	1,50
ER	TL/USD	1,50
LHV	kJ/kg	43360

Çizelge 3.3’de turboprop motorun eksergo-ekonomik analizinde kullanılan bazı parametreler verilmiştir. Turboprop motorun eksergo-ekonomik analizi maksimum tork değeri için Aydın ve ark. [34] tarafından ve minimum tork değeri için de Atılgan ve ark. [62] gerçekleştirilmiştir. Ancak bu tez çalışmasında test koşullarında elde edilen 6 farklı tork değeri için eksergo-ekonomik analiz aynı motora uygulanmıştır.

Komponentlere ait maliyet değerleri (PEC), Amerikan doları cinsinden belirlenmiştir. Bu değerler motor komponentlerini oluşturan elemanların (aksesuarlar, dişli kutusu, kaportalar vs.) ortalama fiyatlarının toplanmasıyla elde edilmiş olup tahmini değerlerdir.

$$\sum_{in} \dot{C}_k + \dot{Z}_k^{TOT} = \sum_{out} \dot{C}_k + \dot{C}_w \quad (3.1)$$

$$\dot{C}_k = c \times \dot{E}x_k \quad (3.2)$$

$$\dot{C}_w = c \times \dot{W} \quad (3.3)$$

$$\dot{Z}_k^{TOT} = \dot{Z}_k^{CIC} + \dot{Z}_k^{OM} \quad (3.4)$$

Çizelge 3.4 Turboprop motora ait komponent maliyetleri

Komponent	PEC (USD)	\dot{Z}_k^{CIC} (USD/sa)	\dot{Z}_k^{OM} (USD/sa)	\dot{Z}_k^{TOT} (USD/sa)
Kompresör	310000	46,65	49,60	96,25
Yanma Odası	125000	18,81	20,00	38,81
Gaz Türbini	330000	49,66	52,80	102,46
Güç Türbini	165000	24,83	26,40	51,23

Çizelge 3.4’de verilen komponent maliyet değerlerinin belirlenmesinden sonra, her komponente ait seviyelendirilmiş ilk yatırım maliyeti \dot{Z}_k^{CIC} ve bakım işletme maliyeti \dot{Z}_k^{OM} ’nin belirlenmesi gerekmektedir. Çizelge 3.3’de verilen parametreler yardımıyla belirlenen bu değerler Çizelge 3.4’de verilmiştir.

$$\dot{C}_1 + \dot{C}_{w,komp} + \dot{Z}_{komp}^{TOT} = \dot{C}_3 + \dot{C}_B \quad (3.5)$$

$$\dot{C}_3 + \dot{C}_{yakut} + \dot{Z}_{yo}^{TOT} = \dot{C}_4 \quad (3.6)$$

$$\dot{C}_4 + \dot{Z}_{gg}^{TOT} = \dot{C}_{w,gg} + \dot{C}_{45} \quad (3.7)$$

$$\dot{C}_{45} + \dot{C}_B + \dot{Z}_{gt}^{TOT} = \dot{C}_{w,gt} + \dot{C}_5 \quad (3.8)$$

Denklemler (3.1), (3.2), (3.3), (3.4) ve Çizelge 3.4’de verilen bilgiler kullanılarak (3.5), (3.6), (3.7) ve (3.8)’de verilen turboprop motora ait maliyet denge denklemleri oluşturulur. Oluşan bu lineer denklem sistemini çözmek için bu denklemlere ait matris sistemler oluşturulur ve daha sonra çözümler yapılarak her bir istasyona ait eksergo-ekonomik değişkenler elde edilir.

Çizelge 3.4. Turboprop motorunun farklı tork değerlerine ait matris sistemleri

Tork Değeri	Matris Sistemleri				
	c_3	c_4	$c_{w_{gr}}$	$c_{w_{pr}}$	$sbt.$
240 Nm (Test 1)	-4.075	0	4.788	0	-96.25
	4.075	-10.692	0	0	-267.91
	0	0.637	-4.835	0	-102.46
	0	4.975	0	-2.030	-51.23
350 Nm (Test 2)	c_3	c_4	$c_{w_{gr}}$	$c_{w_{pr}}$	$sbt.$
	-5.098	0	6.041	0	-96.25
	5.098	-13.482	0	0	-318.71
	0	0.734	-6.102	0	-102.46
485 Nm (Test 3)	0	6.232	0	-2.945	-51.23
	c_3	c_4	$c_{w_{gr}}$	$c_{w_{pr}}$	$sbt.$
	-6.253	0	7.423	0	-96.25
	6.253	-16.902	0	0	-385.51
552 Nm (Test 4)	0	0.432	-7.499	0	-102.46
	0	8.006	0	-4.090	-51.23
	c_3	c_4	$c_{w_{gr}}$	$c_{w_{pr}}$	$sbt.$
	-6.815	0	8.104	0	-96.25
580 Nm (Test 5)	6.815	-18.691	0	0	-420.91
	0	0.554	-8.186	0	-102.46
	0	8.658	0	-4.662	-51.23
	c_3	c_4	$c_{w_{gr}}$	$c_{w_{pr}}$	$sbt.$
630 Nm (Test 6)	-7.088	0	8.431	0	-96.25
	7.088	-19.699	0	0	-441.81
	0	0.644	-8.514	0	-102.46
	0	8.943	0	-5.004	-51.23
630 Nm (Test 6)	c_3	c_4	$c_{w_{gr}}$	$c_{w_{pr}}$	$sbt.$
	-7.394	0	8.820	0	-96.25
	7.394	-20.696	0	0	-462.41
	0	0.597	-8.910	0	-102.46
630 Nm (Test 6)	0	9.367	0	-5.314	-51.23

3.5. Yaşam Döngü Değerlendirmesi

Yaşam döngü değerlendirme (life cycle assessment), enerji dönüşüm sistemlerinin çevresel performansını değerlendirmeye yarayan ve yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Ele alınan süreçleri *beşikten mezara* diye tabir edilen bir bakış açısıyla incelediği için ezber bozan bir yaklaşımdır. Örneğin bir uçak motoru değerlendirilecek olursa; motoru oluşturan komponentlerin hammaddelerinin doğadan elde edilişi esnasında oluşan çevresel etkiden, komponentlerin servis ömrünü tamamlayıp atık olarak değerlendirildiği durumda oluşan çevresel etkiye kadarki bütün etkiler hesaba katılır. Bu değerlendirmeyi tam anlamıyla yapabilmek için çok fazla veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak bu tez çalışmasında çok detaylı bir YDD yapmak yerine, YDD yaklaşımının vermiş olduğu bakış açısı ve ulaşılabilen veriler kullanılarak ‘kabaca’ bir YDD gerçekleştirilmiş ve eksergo-çevresel analiz yapılmıştır.

YDD nicel bir indikatör yardımıyla yapılmaktadır. Çevresel etki performans değerlendirmelerinde kullanılan birçok nicel indikatör olmasına karşılık bu çalışmada *Eco-indicator 99* kullanılmıştır. Bunun sebebi Eco-indicator 99’un Avrupa ülkelerine ait ortalama değerleri kullanması ve çevresel etkiyi üç ana hasar kategorisi üzerinden değerlendiriyor olmasıdır:

- İnsan sağlığı,
- Ekosistem kalitesi,
- Doğal kaynaklar.

İndikatörün bize vermiş olduğu çıktı, bu üç hasar kategorisi üzerindeki etkilerin toplamıdır ve ‘eco-indicator points – Pts’ olarak ifade edilir. Ne kadar fazla olumsuz etki varsa, çıktı olarak o kadar yüksek ‘points’ değeri elde edilir ve bu şekilde bir mukayese yapma şansı yakalanır.

Bu çalışmada YDD yaklaşımı hazır bir program olan SimaPro 7.2 kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.6. Eksergo-Çevresel Analiz

Eksergo-çevresel metodoloji, eksergo-ekonomik metodoloji ile büyük benzerlik göstermektedir. Eksergo-ekonomik anlayıştaki yaklaşım aynı şekilde çevresel etkileri hesaplamak için kullanılır. Yine benzer şekilde komponentlerle alakalı toplam çevresel etki \dot{Y}_k^{TOT} , ilk yatırım esnasındaki çevresel etki \dot{Y}_k^{CO} ve işletme/bakım sırasında oluşan çevresel etkinin (\dot{Y}_k^{OM}) toplamıdır ve birimi de (Pts/sa)'dir.

$$\dot{Y}_k^{TOT} = \dot{Y}_k^{CO} + \dot{Y}_k^{OM} \quad (3.9)$$

Her istasyondaki özgül çevresel etkiyi (b_j) bulmak için (3.10) kullanılır. Burada (\dot{B}_j) çevresel etki akımı ve ($\dot{E}x_j$) de her istasyondaki ekserjiyi ifade etmektedir.

$$\dot{B}_j = b_j \times \dot{E}x_j \quad (3.10)$$

İş ifadesi için de (3.10)'a benzer şekilde (3.11) kullanılarak çözümler yapılabilir.

$$\dot{B}_w = b_w \times \dot{W} \quad (3.11)$$

Tüm komponentlere ait çevresel etki denge denklemlerini türetebilmek için, aşağıda verilen denklemler kullanılır. \dot{Y}_k^{TOT} ifadesi (3.9) yardımıyla elde edildikten sonra (3.12) kullanılarak çevresel etki akımı ($\dot{B}_{yık}$) ekserji yıkımı cinsinden elde edilir. Son olarak bu iki çevresel etki toplanarak toplam çevresel etki akımı \dot{B}_k^{TOT} elde edilir.

$$\dot{B}_{yık} = b_j \times \dot{E}x_{yık} \quad (3.12)$$

$$\dot{B}_k^{TOT} = \dot{B}_{yık} + \dot{Y}_k^{TOT} \quad (3.13)$$

Yukarıda verilen ana denklemler kullanılarak her bir komponent için ayrı ayrı eksergo-çevresel denge denklemleri oluşturulur. Eksergo-ekonomik denge denklemlerine oldukça benzeyen bu denklemler çözülerek eksergo-çevresel analiz sonuçlarına ulaşılır. Eksergo-çevresel denge denklemleri sırasıyla kompresör, yanma odası, gaz jeneratör türbini ve güç türbini için sırasıyla aşağıda (3.14), (3.15), (3.16) ve (3.17)'de verilmiştir.

$$\dot{B}_1 + \dot{B}_{w,komp} + \dot{Y}_{komp}^{TOT} = \dot{B}_3 + \dot{B}_B \quad (3.14)$$

$$\dot{B}_3 + \dot{B}_{yakıt} + \dot{Y}_{yo}^{TOT} = \dot{B}_4 \quad (3.15)$$

$$\dot{B}_4 + \dot{Y}_{gg}^{TOT} = \dot{B}_{w,gg} + \dot{B}_{45} \quad (3.16)$$

$$\dot{B}_{45} + \dot{B}_B + \dot{Y}_{gt}^{TOT} = \dot{B}_{w,gt} + \dot{B}_5 \quad (3.17)$$

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Eksergo-çevresel analiz motor komponentlerine ait çevresel etkilerin yeri, büyüklüğü ve kaynağı hakkında bilgiler vermektedir. Bu analiz, ekserji analizinin ve yaşam döngü değerlendirmesinin birlikte uygulanması ile yapılır. Bu tez çalışmasında bir turboprop uçak motorunun 6 farklı tork değeri için çevresel performansı ekserjetik yöntemler kullanılarak değerlendirilmiştir. Aynı motora ait ekserji analizi ve maksimum tork değeri için eksergo-ekonomik analizi uygulamaları literatürde mevcuttur.

Ekserjetik yöntemler uçak motorlarının çevresel performansını değerlendirmek için gittikçe artan oranda kullanılmaktadır ve literatürde uçak motorlarına yapılan uygulamalar ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Bir turboprop motorun çevresel performansını ekserjetik bakış açısıyla değerlendirebilmek için, motor komponentlerine ait aşağıdaki parametreler dikkate alınmalıdır:

- a) Ekserjetik değerler,
- b) Ekonomik maliyetler ve eksergo-ekonomik parametreler,
- c) Ekonomik maliyet akımları ve birim ekserji maliyetleri,
- d) Eksergo-çevresel değişkenler.

4.1. Eksergo-Ekonomik Analiz Sonuçları

Bu tez çalışmasında incelenen deneysel turboprop motor komponentlerinin giriş-çıkış istasyonlarına ait sıcaklık, debi ve basınç değerleri ile bu değerler kullanılarak yapılan ekserji analizinin sonuçları Ek-1 ve Ek-2’de verilmiştir. Daha sonra ekserji analizi sonuçları ve eksergo-ekonomik parametreler kullanılarak eksergo-ekonomik analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizin sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Burada (c) ifadeleri komponent giriş-çıkış istasyonlarındaki birim ekserji maliyetini belirtmektedir ve birimi de (\$/GJ) olarak verilmiştir. Daha sonra (3.2) ve (3.3) yardımıyla (\dot{C}) ifadeleri elde edilir. Ekonomik maliyet akımları da diyebileceğimiz bu ifadelerin birimi de (GJ/sa) olarak verilmiştir.

Çizelge 4.1. Turboprop motora ait eksergo-ekonomik analiz sonuçları

Tork Değeri	Matris Sistemleri			
240 Nm (Test 1)	İstasyon Numarası	<i>c</i> (\$/GJ)	<i>Ex</i> (GJ/sa)	<i>Ç</i> (\$/sa)
	3	56	4,07	226,92
	4	46	10,69	494,81
	45	46	10,05	465,33
	5	46	5,08	235,08
	<i>w_{komp}</i>	27	4,79	130,65
	<i>w_{gg}</i>	27	4,83	131,93
	<i>w_{pt}</i>	139	2,03	281,52
	350 Nm (Test 2)	İstasyon Numarası	<i>c</i> (\$/GJ)	<i>Ex</i> (GJ/sa)
3		45	5,10	227,09
4		40	13,48	545,82
45		40	12,75	516,09
5		40	6,52	263,80
<i>w_{komp}</i>		22	6,04	130,85
<i>w_{gg}</i>		22	6,10	132,17
<i>w_{pt}</i>		103	2,94	303,51
485 Nm (Test 3)		İstasyon Numarası	<i>c</i> (\$/GJ)	<i>Ex</i> (GJ/sa)
	3	34	6,25	212,81
	4	35	16,90	598,31
	45	35	16,47	583,02
	5	35	8,46	299,60
	<i>w_{komp}</i>	16	7,42	116,56
	<i>w_{gg}</i>	16	7,50	117,75
	<i>w_{pt}</i>	82	4,09	334,60

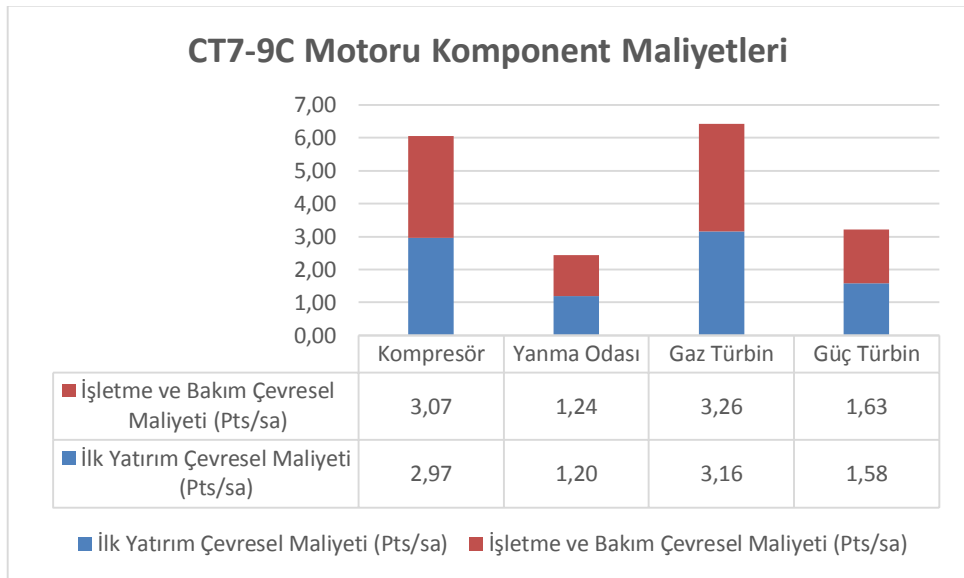
Çizelge 4.1. (Devam) Turboprop motora ait eksergo-ekonomik analiz sonuçları

552 Nm (Test 4)	İstasyon Numarası	<i>c</i> (\$/GJ)	<i>E_x</i> (GJ/sa)	<i>Ĉ</i> (\$/sa)
	3	32	6,81	216,38
	4	34	18,69	637,29
	45	34	18,14	618,39
	5	34	9,48	323,19
	<i>w_{komp}</i>	15	8,10	120,13
	<i>w_{gg}</i>	15	8,19	121,35
	<i>w_{pt}</i>	74	4,66	346,44
	580 Nm (Test 5)	İstasyon Numarası	<i>c</i> (\$/GJ)	<i>E_x</i> (GJ/sa)
3		31	7,09	219,12
4		34	19,70	660,93
45		34	19,05	639,31
5		34	10,11	339,28
<i>w_{komp}</i>		15	8,43	122,86
<i>w_{gg}</i>		15	8,51	124,07
<i>w_{pt}</i>		70	5,00	351,28
630 Nm (Test 6)		İstasyon Numarası	<i>c</i> (\$/GJ)	<i>E_x</i> (GJ/sa)
	3	29	7,39	217,09
	4	33	20,70	679,50
	45	33	20,10	659,88
	5	33	10,73	352,34
	<i>w_{komp}</i>	14	8,82	120,82
	<i>w_{gg}</i>	14	8,91	122,06
	<i>w_{pt}</i>	68	5,31	358,74

4.2. Eksergo-Çevresel Analiz Sonuçları

Bu çalışmada serbest güç türbinine sahip bir turboprop motorun 6 farklı tork değeri için eksergo-çevresel analizi; hava debisi, yakıt debisi, sıcaklık ve basınç gibi motor komponentlerine ait ve test şartlarında ölçülmüş verilerin kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Kompresör girişindeki hava şartları (referans çevre şartları da diyebiliriz) 92.4 kPa ve 281 K olarak ölçülmüştür. Parametrik çevrim analizi yapılarak gaz jeneratör türbin ve güç türbin giriş sıcaklıkları sırasıyla; 240 Nm için 1360 K ve 958 K, 350 Nm için 1429 K ve 1018 K, 485 Nm için 1520 K ve 1100 K, 552 Nm için 1567 K ve 1130 K, 580 Nm için 1602 K ve 1152 K, 630 Nm için 1631 K ve 1175 K olarak hesaplanmıştır.

Turboprop motor komponentlerine ait toplam çevresel etkinin (\dot{B}_k^{TOT}) iki bileşeni vardır. Bunlar; *komponent kaynaklı toplam çevresel etki* (\dot{Y}_k^{TOT}) ve *ekserji yıkımı kaynaklı toplam çevresel etki* ($\dot{B}_{yık}$)'dir. Komponent kaynaklı çevresel etkinin de iki bileşeni vardır: a) motor komponentlerinin üretimi esnasında oluşan çevresel etki (ilk yatırım çevresel maliyeti); b) motor komponentlerinin işletmesi ve bakımı esnasında oluşan çevresel etki (işletme ve bakım çevresel maliyeti).

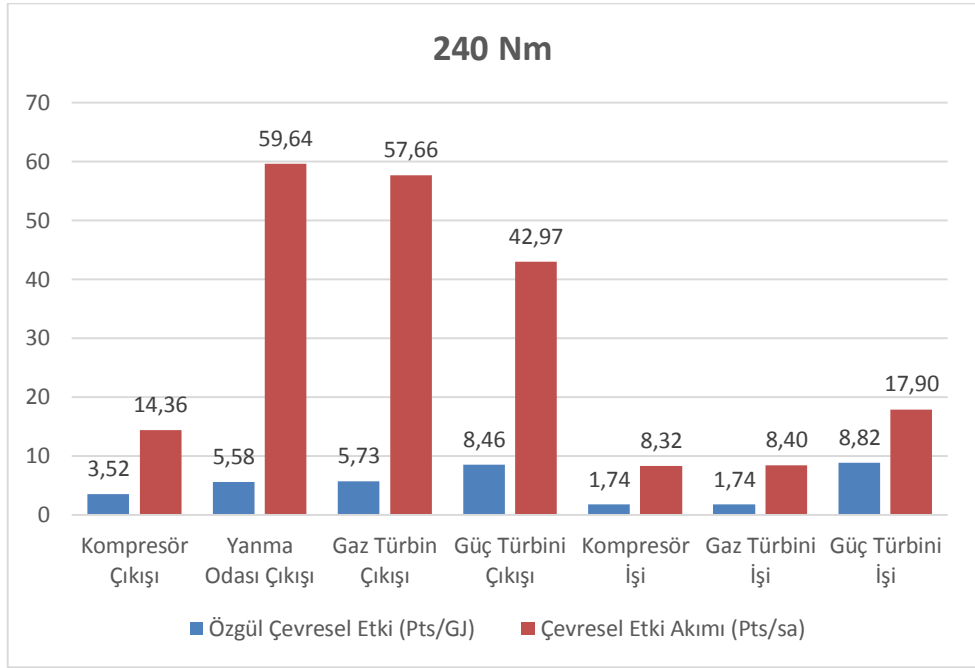


Şekil 4.1. Turboprop motor komponentleri çevresel maliyetleri

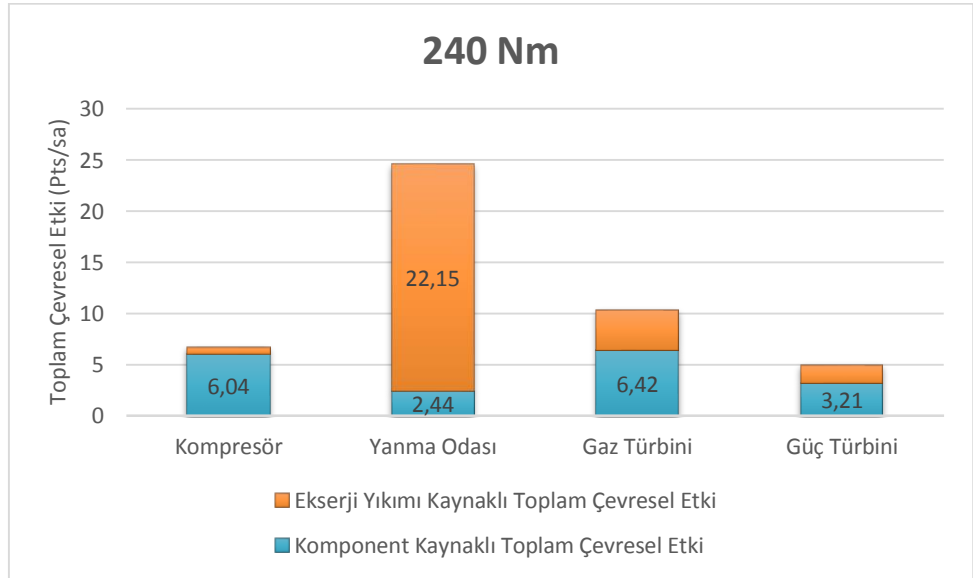
Şekil 4.1'e göre, en büyük komponent kaynaklı toplam çevresel etkiye sahip motor komponenti gaz jeneratör türbindir. Bileşenler olarak incelenirse, ilk yatırım çevresel maliyetleri arasında 3,16 Pts/sa ile en büyük değer yine gaz jeneratör türbine aittir. Aynı şekilde işletme ve bakım çevresel maliyetleri arasında da 3,26 Pts/sa ile en büyük değer gaz jeneratör türbine aittir. Bununla birlikte, en düşük komponent kaynaklı toplam çevresel etkiye sahip motor komponenti yanma odası olarak gözükmektedir (\dot{Y}_{yo}^{CO} için 1,20 Pts/sa ve \dot{Y}_{yo}^{OM} için 1,24 Pts/sa).

Yine Şekil 4.1'de gösterildiği üzere kompresör, gaz jeneratör türbinden sonra en yüksek komponent kaynaklı çevresel maliyete sahip motor komponentidir ve gaz jeneratör türbine oldukça yakın bir değere sahiptir ($\dot{Y}_{komp}^{TOT}=6,04$ Pts/sa). Son olarak güç türbini için ilk yatırım ve işletme/bakım çevresel maliyetleri sırasıyla şu şekildedir: (\dot{Y}_{gt}^{CO} için 1,58 Pts/sa ve \dot{Y}_{gt}^{OM} için 1,63 Pts/sa).

Bu durumda turboprop motorun komponentlerine ait komponent kaynaklı toplam çevresel etkinin % 35,30, % 8,42, % 37,52 ve % 18,76'sı sırasıyla kompresör, yanma odası, gaz jeneratör türbin ve güç türbini tarafından oluşturulmaktadır.



Şekil 4.2. 240 Nm için motor istasyonlarına ait eksergo-çevresel değişkenler

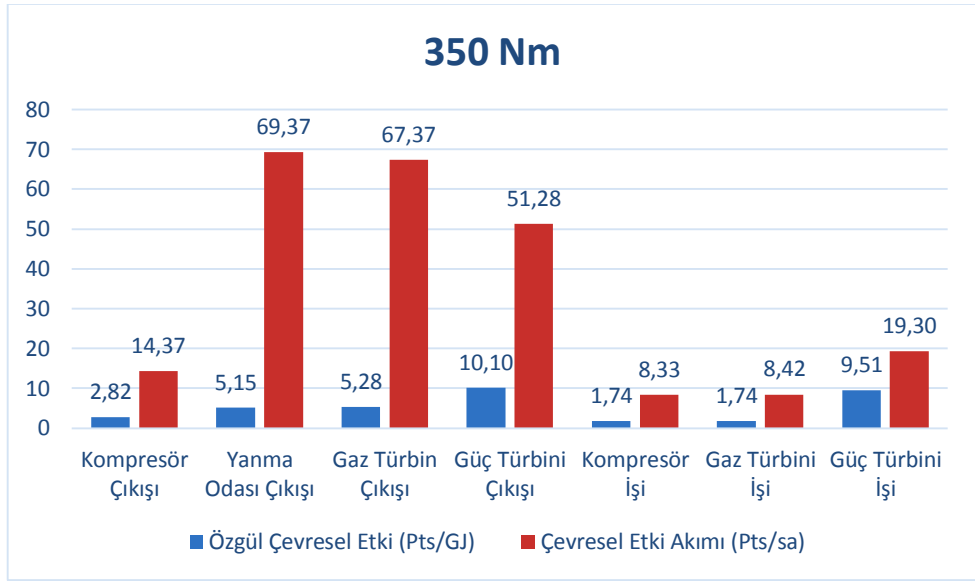


Şekil 4.3. 240 Nm tork değeri için eksergo-çevresel analiz sonuçları

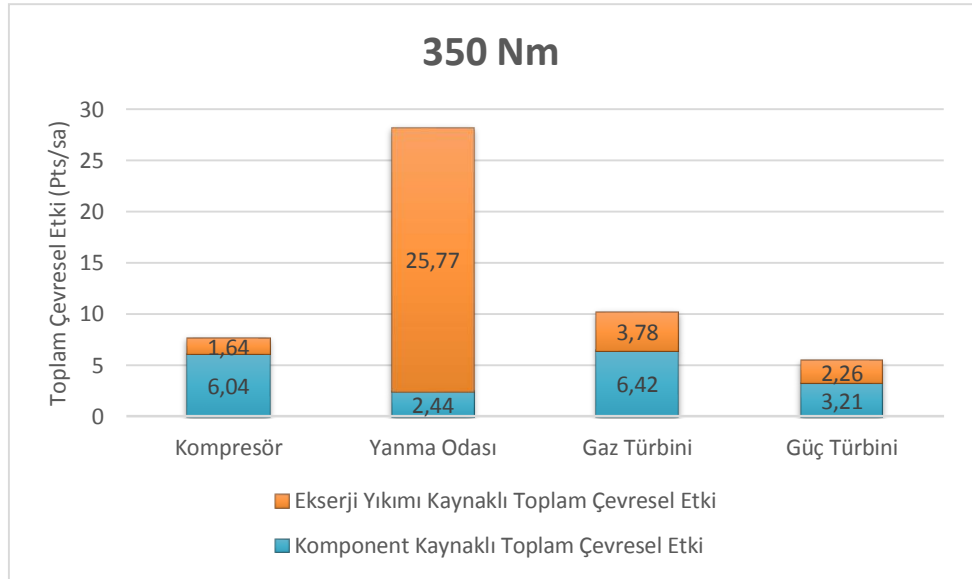
Şekil 4.2’de 240 Nm tork değeri için turboprop motor istasyonlarına ait eksergo-çevresel değişkenler verilmiştir. Burada kırmızı renk ile gösterilen değerler, motor komponentlerinin giriş-çıkış istasyonlarına ait çevresel etki akımı (\dot{B}) değerlerini göstermektedir. Koyu mavi renk ile gösterilen değerler ise, motor komponentlerinin giriş-çıkış istasyonlarına ait özgül çevresel etki (b) değerlerini göstermektedir. Bu değerlerin birimleri (\dot{B}) ve (b) için sırasıyla Pts/sa ve Pts/GJ’dur.

Şekil 4.3’de ise 240 Nm tork değeri için eksergo-çevresel analiz sonuçları verilmiştir. Açık mavi ile gösterilen değerler komponent kaynaklı çevresel etkiyi, turuncu ile gösterilen değerler ise ekserji yıkımı kaynaklı çevresel etkiyi göstermektedir. Bu durumda, yanma odası çıkışı 59,64 Pts/sa değeri ile en yüksek çevresel etki akımına sahip motor istasyonudur. İkinci en yüksek değer ise 57,66 Pts/sa ile gaz türbin çıkışına aittir. En düşük çevresel etki değerine sahip motor istasyonu ise 14,36 Pts/sa ile kompresör çıkışı olarak belirlenmiştir. Özgül çevresel etki değerleri (b) olarak incelenecek olursa, en yüksek değer 8,459 Pts/GJ ile güç türbin çıkışına aittir. Bu istasyonu sırasıyla gaz türbin çıkışı ve yanma odası çıkışı izlemektedir: 5,735 Pts/GJ ve 5,578 Pts/GJ. En düşük özgül çevresel etki değeri ise 3,524 Pts/GJ ile kompresör çıkışına aittir.

Bu sonuçlara göre en fazla çevresel etkiye sahip motor komponenti, % 52,76’lık oranla yanma odasıdır. Bu komponentin neden olduğu çevresel etkinin % 90,08’lik kısmı ekserji yıkımı sonucunda meydana gelmektedir. Bu komponenti sırasıyla gaz türbini (% 22,23), kompresör (% 14,40) ve güç türbini (% 10,61) izlemektedir. 240 Nm tork değeri için hesaplanan toplam çevresel etki değerinin % 61,14’lük kısmı ekserji kaynaklı olup, kalan % 38,86’lık kısım ise komponent kaynaklı olarak meydana gelmektedir.



Şekil 4.4. 350 Nm için motor istasyonlarına ait eksergo-çevresel değişkenler

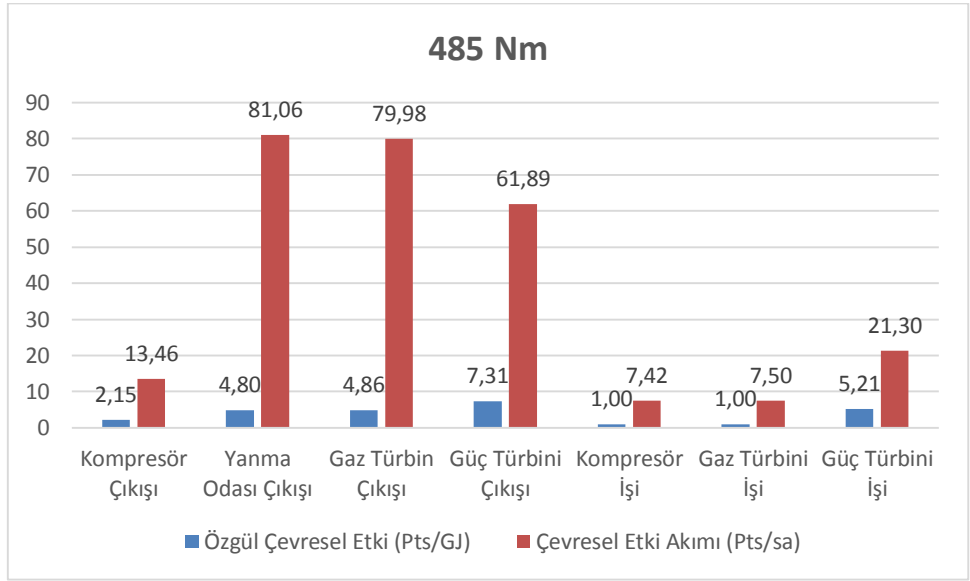


Şekil 4.5. 350 Nm tork değeri için eksergo-çevresel analiz sonuçları

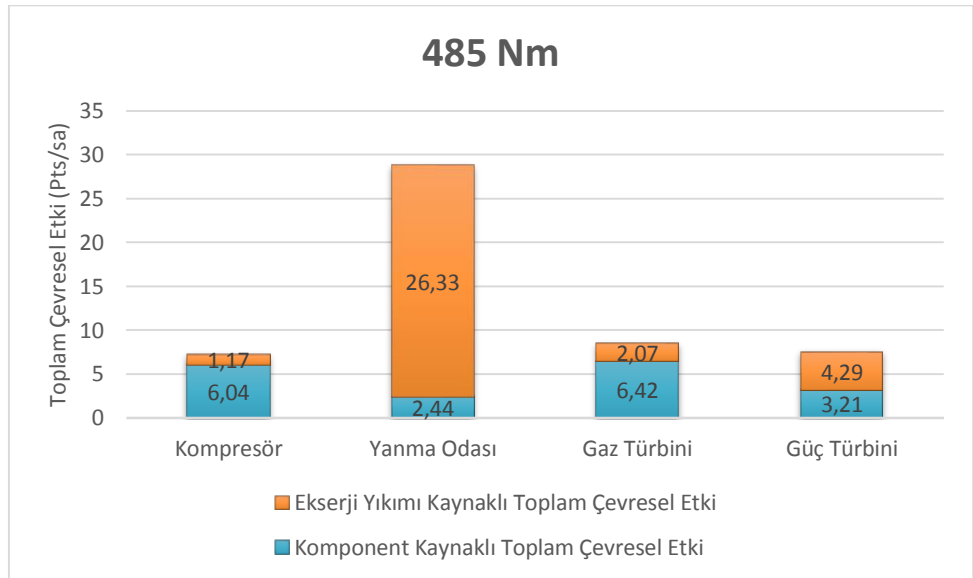
Şekil 4.4’de 350 Nm tork değeri için turboprop motor istasyonlarına ait eksergo-çevresel değişkenler verilmiştir. Burada kırmızı renk ile gösterilen değerler, motor komponentlerinin giriş-çıkış istasyonlarına ait çevresel etki akımı (\dot{B}) değerlerini göstermektedir. Koyu mavi renk ile gösterilen değerler ise, motor komponentlerinin giriş-çıkış istasyonlarına ait özgül çevresel etki (b) değerlerini göstermektedir. Bu değerlerin birimleri (\dot{B}) ve (b) için sırasıyla Pts/sa ve Pts/GJ’dur.

Şekil 4.5’de ise 350 Nm tork değeri için eksergo-çevresel analiz sonuçları verilmiştir. Açık mavi ile gösterilen değerler komponent kaynaklı çevresel etkiyi, turuncu ile gösterilen değerler ise ekserji yıkımı kaynaklı çevresel etkiyi göstermektedir. Bu durumda, yanma odası çıkışı 69,37 Pts/sa değeri ile en yüksek çevresel etki akımına sahip motor istasyonudur. İkinci en yüksek değer ise 67,37 Pts/sa ile gaz türbin çıkışına aittir. En düşük çevresel etki değerine sahip motor istasyonu ise 14,37 Pts/sa ile kompresör çıkışı olarak belirlenmiştir. Özgül çevresel etki değerleri (b) olarak incelenecek olursa, en yüksek değer 10,09 Pts/GJ ile güç türbin çıkışına aittir. Bu istasyonu sırasıyla gaz türbin çıkışı ve yanma odası çıkışı izlemektedir: 5,28 Pts/GJ ve 5,14 Pts/GJ. En düşük özgül çevresel etki değeri ise 2,82 Pts/GJ ile kompresör çıkışına aittir.

Bu sonuçlara göre en fazla çevresel etkiye sahip motor komponenti, % 54,70’lik oranla yanma odasıdır. Bu komponentin neden olduğu çevresel etkinin % 92,04’lük kısmı ekserji yıkımı sonucunda meydana gelmektedir. Bu komponenti sırasıyla gaz türbini (% 19,78), kompresör (% 14,90) ve güç türbini (% 10,62) izlemektedir. 240 Nm tork değeri için hesaplanan toplam çevresel etki değerinin % 64,88’lik kısmı ekserji kaynaklı olup, kalan % 35,12’lik kısım ise komponent kaynaklı olarak meydana gelmektedir.



Şekil 4.6. 485 Nm için motor istasyonlarına ait eksergo-çevresel değişkenler



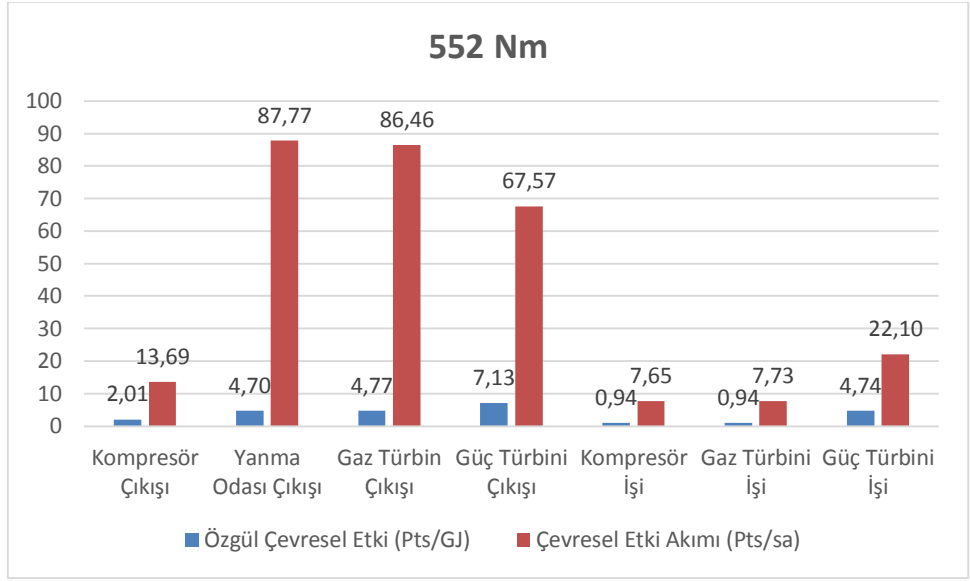
Şekil 4.7. 485 Nm tork değeri için eksergo-çevresel analiz sonuçları

Şekil 4.6’da 485 Nm tork değeri için turboprop motor istasyonlarına ait eksergo-çevresel değişkenler verilmiştir. Burada kırmızı renk ile gösterilen değerler, motor komponentlerinin giriş-çıkış istasyonlarına ait çevresel etki akımı (\dot{B}) değerlerini göstermektedir. Koyu mavi renk ile gösterilen değerler ise, motor komponentlerinin giriş-çıkış istasyonlarına ait özgül çevresel etki (b) değerlerini göstermektedir. Bu değerlerin birimleri (\dot{B}) ve (b) için sırasıyla Pts/sa ve Pts/GJ’dur.

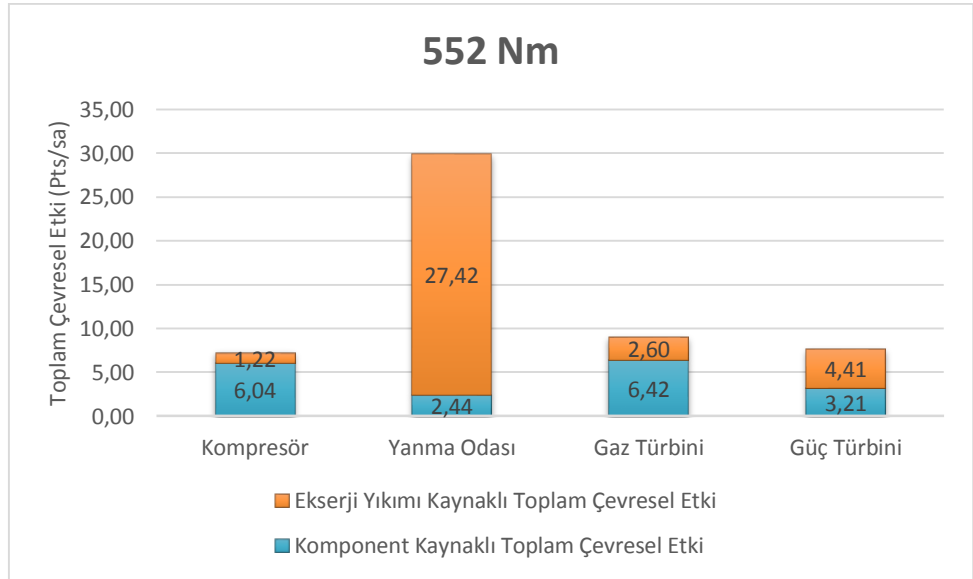
Şekil 4.7’de ise 485 Nm tork değeri için eksergo-çevresel analiz sonuçları verilmiştir. Açık mavi ile gösterilen değerler komponent kaynaklı çevresel etkiyi, turuncu ile gösterilen değerler ise ekserji yıkımı kaynaklı çevresel etkiyi göstermektedir.

Bu durumda, yanma odası çıkışı 81,06 Pts/sa değeri ile en yüksek çevresel etki akımına sahip motor istasyonudur. İkinci en yüksek değer ise 79,98 Pts/sa ile gaz türbin çıkışına aittir. En düşük çevresel etki değerine sahip motor istasyonu ise 13,46 Pts/sa ile kompresör çıkışı olarak belirlenmiştir. Özgül çevresel etki değerleri (b) olarak incelenecek olursa, en yüksek değer 7,31 Pts/GJ ile güç türbin çıkışına aittir. Bu istasyonu sırasıyla gaz türbin çıkışı ve yanma odası çıkışı izlemektedir: 4,86 Pts/GJ ve 4,80 Pts/GJ. En düşük özgül çevresel etki değeri ise 2,15 Pts/GJ ile kompresör çıkışına aittir.

Bu sonuçlara göre en fazla çevresel etkiye sahip motor komponenti, % 55,35’lik oranla yanma odasıdır. Bu komponentin neden olduğu çevresel etkinin % 91,52’lik kısmı ekserji yıkımı sonucunda meydana gelmektedir. Bu komponenti sırasıyla gaz türbini (% 16,34), güç türbini (% 14,44) ve kompresör (% 13,87) izlemektedir. 485 Nm tork değeri için hesaplanan toplam çevresel etki değerinin % 65,15’lik kısmı ekserji kaynaklı olup, kalan % 34,85’lik kısım ise komponent kaynaklı olarak meydana gelmektedir.



Şekil 4.8. 552 Nm için motor istasyonlarına ait eksergo-çevresel değişkenler



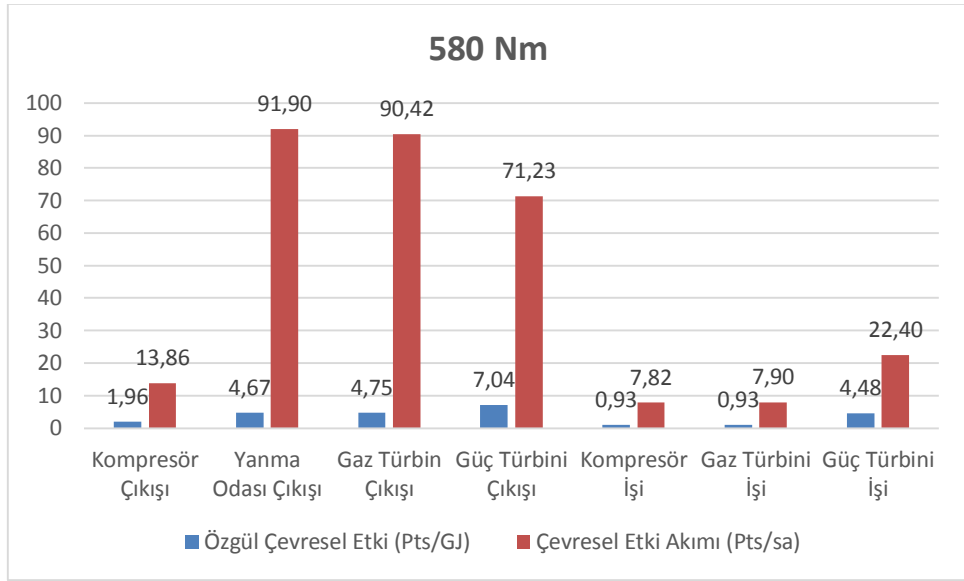
Şekil 4.9. 552 Nm tork değeri için eksergo-çevresel analiz sonuçları

Şekil 4.8’de 552 Nm tork değeri için turboprop motor istasyonlarına ait eksergo-çevresel değişkenler verilmiştir. Burada kırmızı renk ile gösterilen değerler, motor komponentlerinin giriş-çıkış istasyonlarına ait çevresel etki akımı (\dot{B}) değerlerini göstermektedir. Koyu mavi renk ile gösterilen değerler ise, motor komponentlerinin giriş-çıkış istasyonlarına ait özgül çevresel etki (b) değerlerini göstermektedir. Bu değerlerin birimleri (\dot{B}) ve (b) için sırasıyla Pts/sa ve Pts/GJ’dur.

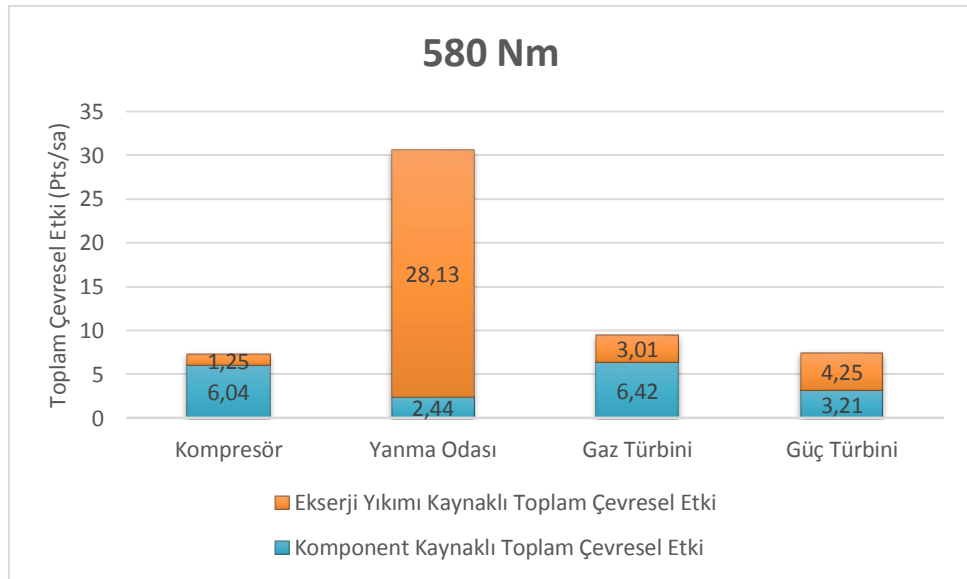
Şekil 4.9’da ise 552 Nm tork değeri için eksergo-çevresel analiz sonuçları verilmiştir. Açık mavi ile gösterilen değerler komponent kaynaklı çevresel etkiyi, turuncu ile gösterilen değerler ise ekserji yıkımı kaynaklı çevresel etkiyi göstermektedir.

Bu durumda, yanma odası çıkışı 87,77 Pts/sa değeri ile en yüksek çevresel etki akımına sahip motor istasyonudur. İkinci en yüksek değer ise 86,46 Pts/sa ile gaz türbin çıkışına aittir. En düşük çevresel etki değerine sahip motor istasyonu ise 13,69 Pts/sa ile kompresör çıkışı olarak belirlenmiştir. Özgül çevresel etki değerleri (b) olarak incelenecek olursa, en yüksek değer 7,13 Pts/GJ ile güç türbin çıkışına aittir. Bu istasyonu sırasıyla gaz türbin çıkışı ve yanma odası çıkışı izlemektedir: 4,77 Pts/GJ ve 4,67 Pts/GJ. En düşük özgül çevresel etki değeri ise 2,01 Pts/GJ ile kompresör çıkışına aittir.

Bu sonuçlara göre en fazla çevresel etkiye sahip motor komponenti, % 55,54’lük oranla yanma odasıdır. Bu komponentin neden olduğu çevresel etkinin % 91,85’lük kısmı ekserji yıkımı sonucunda meydana gelmektedir. Bu komponenti sırasıyla gaz türbini (% 16,78), güç türbini (% 14,17) ve kompresör (% 13,51) izlemektedir. 552 Nm tork değeri için hesaplanan toplam çevresel etki değerinin % 66,32’lik kısmı ekserji kaynaklı olup, kalan % 33,68’lük kısım ise komponent kaynaklı olarak meydana gelmektedir.



Şekil 4.10. 580 Nm için motor istasyonlarına ait eksergo-çevresel değişkenler



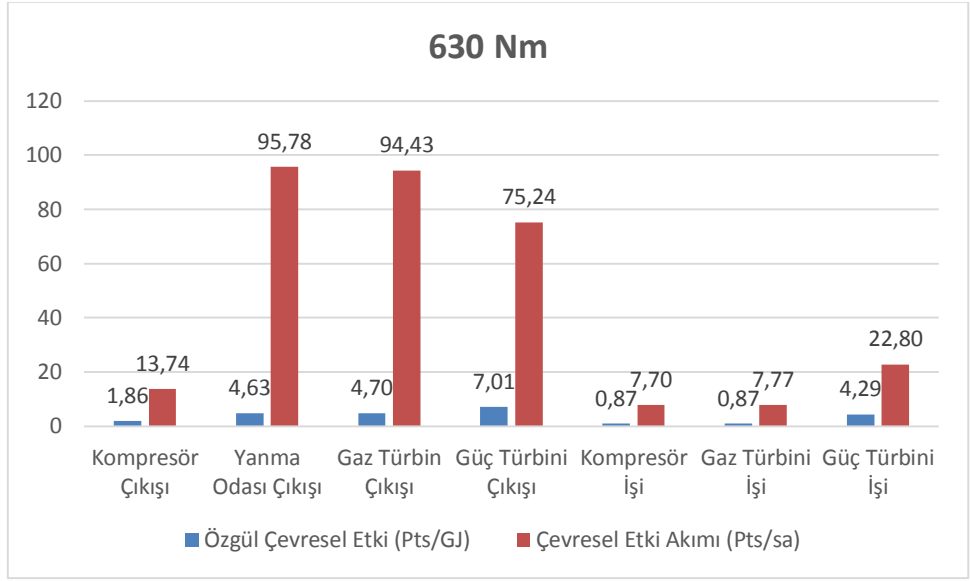
Şekil 4.11. 580 Nm tork değeri için eksergo-çevresel analiz sonuçları

Şekil 4.10'da 580 Nm tork değeri için turboprop motor istasyonlarına ait eksergo-çevresel değişkenler verilmiştir. Burada kırmızı renk ile gösterilen değerler, motor komponentlerinin giriş-çıkış istasyonlarına ait çevresel etki akımı (\dot{B}) değerlerini göstermektedir. Koyu mavi renk ile gösterilen değerler ise, motor komponentlerinin giriş-çıkış istasyonlarına ait özgül çevresel etki (b) değerlerini göstermektedir. Bu değerlerin birimleri (\dot{B}) ve (b) için sırasıyla Pts/sa ve Pts/GJ'dur.

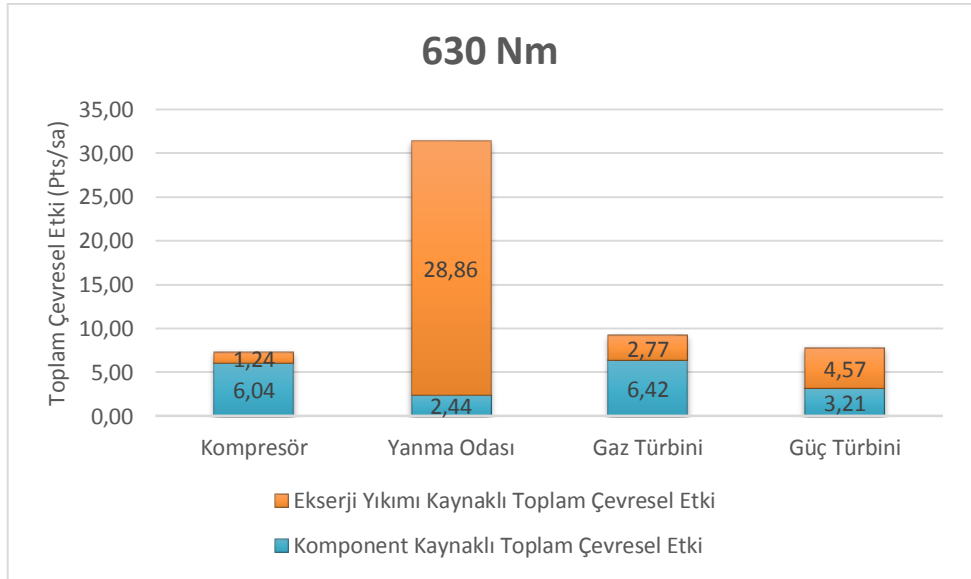
Şekil 4.11'de ise 580 Nm tork değeri için eksergo-çevresel analiz sonuçları verilmiştir. Açık mavi ile gösterilen değerler komponent kaynaklı çevresel etkiyi, turuncu ile gösterilen değerler ise ekserji yıkımı kaynaklı çevresel etkiyi göstermektedir.

Bu durumda, yanma odası çıkışı 91,90 Pts/sa değeri ile en yüksek çevresel etki akımına sahip motor istasyonudur. İkinci en yüksek değer ise 90,42 Pts/sa ile gaz türbin çıkışına aittir. En düşük çevresel etki değerine sahip motor istasyonu ise 13,86 Pts/sa ile kompresör çıkışı olarak belirlenmiştir. Özgül çevresel etki değerleri (b) olarak incelenecek olursa, en yüksek değer 7,04 Pts/GJ ile güç türbin çıkışına aittir. Bu istasyonu sırasıyla gaz türbin çıkışı ve yanma odası çıkışı izlemektedir: 4,74 Pts/GJ ve 4,66 Pts/GJ. En düşük özgül çevresel etki değeri ise 1,95 Pts/GJ ile kompresör çıkışına aittir.

Bu sonuçlara göre en fazla çevresel etkiye sahip motor komponenti, % 55,84'lük oranla yanma odasıdır. Bu komponentin neden olduğu çevresel etkinin % 92,02'lik kısmı ekserji yıkımı sonucunda meydana gelmektedir. Bu komponenti sırasıyla gaz türbini (% 17,22), güç türbini (% 13,63) ve kompresör (% 13,31) izlemektedir. 580 Nm tork değeri için hesaplanan toplam çevresel etki değerinin % 66,92'lik kısmı ekserji kaynaklı olup, kalan % 33,08'lik kısım ise komponent kaynaklı olarak meydana gelmektedir.



Şekil 4.12. 630 Nm için motor istasyonlarına ait eksergo-çevresel değişkenler



Şekil 4.13. 630 Nm tork değeri için eksergo-çevresel analiz sonuçları

Şekil 4.12’de 630 Nm tork değeri için turboprop motor istasyonlarına ait eksergo-çevresel değişkenler verilmiştir. Burada kırmızı renk ile gösterilen değerler, motor komponentlerinin giriş-çıkış istasyonlarına ait çevresel etki akımı (\dot{B}) değerlerini göstermektedir. Koyu mavi renk ile gösterilen değerler ise, motor komponentlerinin giriş-çıkış istasyonlarına ait özgül çevresel etki (b) değerlerini göstermektedir. Bu değerlerin birimleri (\dot{B}) ve (b) için sırasıyla Pts/sa ve Pts/GJ’dur.

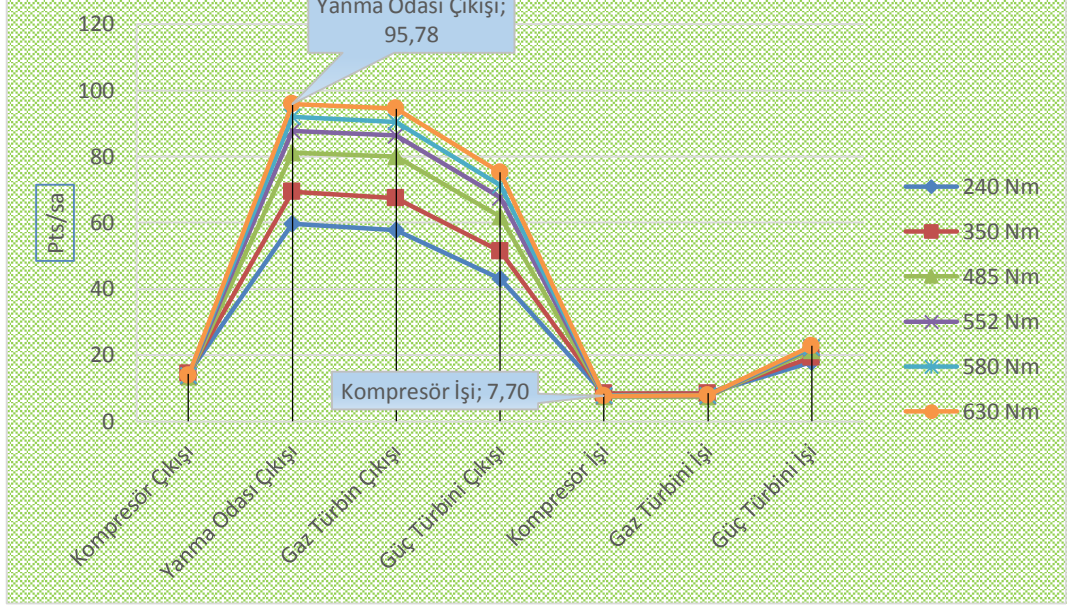
Şekil 4.13’de ise 630 Nm tork değeri için eksergo-çevresel analiz sonuçları verilmiştir. Açık mavi ile gösterilen değerler komponent kaynaklı çevresel etkiyi, turuncu ile gösterilen değerler ise ekserji yıkımı kaynaklı çevresel etkiyi göstermektedir.

Bu durumda, yanma odası çıkışı 95,78 Pts/sa değeri ile en yüksek çevresel etki akımına sahip motor istasyonudur. İkinci en yüksek değer ise 94,43 Pts/sa ile gaz türbin çıkışına aittir. En düşük çevresel etki değerine sahip motor istasyonu ise 13,74 Pts/sa ile kompresör çıkışı olarak belirlenmiştir. Özgül çevresel etki değerleri (b) olarak incelenecek olursa, en yüksek değer 7,01 Pts/GJ ile güç türbin çıkışına aittir. Bu istasyonu sırasıyla gaz türbin çıkışı ve yanma odası çıkışı izlemektedir: 4,70 Pts/GJ ve 4,63 Pts/GJ. En düşük özgül çevresel etki değeri ise 1,86 Pts/GJ ile kompresör çıkışına aittir.

Bu sonuçlara göre en fazla çevresel etkiye sahip motor komponenti, % 56,35’lik oranla yanma odasıdır. Bu komponentin neden olduğu çevresel etkinin % 92,20’lik kısmı ekserji yıkımı sonucunda meydana gelmektedir. Bu komponenti sırasıyla gaz türbini (% 16,54), güç türbini (% 14,00) ve kompresör (% 13,11) izlemektedir. 630 Nm tork değeri için hesaplanan toplam çevresel etki değerinin % 67,40’lık kısmı ekserji kaynaklı olup, kalan % 32,60’lık kısım ise komponent kaynaklı olarak meydana gelmektedir.

Şekil 4.14’de ise dinamik eksergo-çevresel analiz sonucu elde edilen çevresel etki akımı değerleri, bütün motor istasyonları ve 6 farklı tork değeri için aynı grafik üzerinde gösterilmiştir.

Dinamik Eksergo-çevresel Analiz



Şekil 4.14. CT7-9C motoru için dinamik eksergo-çevresel analiz sonuçları

5. SONUÇ

Çevre dostu güç sistemleri için yapılan çalışmalar ve gelişen teknolojiye rağmen, yakın gelecekteki en uygun çözümün var olan enerji kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılması olduğu anlaşılmaktadır. Alternatif yakıtlar ya da radikal tasarımların yaygın olarak kullanılabilmesi ve mevcut kısıtlamalarının ortadan kaldırılması on yıllar istemektedir. Havacılık bağlamında düşünülürse, uçak güç sistemlerinin (ana motorlar ve yardımcı güç ünitesi) çevresel performansını anlamak ve gerekli iyileştirmeleri yapmak için termodinamik verimlilik mekanizmaları dikkatle incelenmelidir. Bu tez çalışmasında motor içerisinde termodinamik olarak ne olup bittiğini en iyi anlamamızı sağlayan yöntemlerden biri olan eksergo-çevresel analiz ilk defa bir turboprop motora uygulanmıştır. Sonuçlar kimyasal reaksiyonun gerçekleştiği komponent olan yanma odasının en büyük çevresel etki değerine sahip olduğunu, bu nedenle de yapılacak iyileştirmeler için değerlendirilmesi gereken en öncelikli komponent olduğunu ortaya koymaktadır. Analiz sonuçlarına göre;

- Motor komponentlerine ait \dot{Y}^{TOT} değerleri; kompresör için 6,14 Pts/sa, yanma odası için 2,44 Pts/sa, gaz jeneratör türbin için 6,42 Pts/sa ve güç türbini için 3,11 Pts/sa olarak hesaplanmıştır.
- 240 Nm tork değeri için toplam çevresel etkinin komponentler arasında dağılımı; yanma odası (% 52,76), gaz türbini (% 22,23), kompresör (% 14,40) ve güç türbini (% 10,61) şeklinde olmuştur.
- 350 Nm tork değeri için toplam çevresel etkinin komponentler arasında dağılımı; yanma odası (% 54,70), gaz türbini (% 19,78), kompresör (% 14,90) ve güç türbini (% 10,62) şeklinde olmuştur.
- 485 Nm tork değeri için toplam çevresel etkinin komponentler arasında dağılımı; yanma odası (% 55,35), gaz türbini (% 16,34), güç türbini (% 14,44) ve kompresör (% 13,87) şeklinde olmuştur.
- 552 Nm tork değeri için toplam çevresel etkinin komponentler arasında dağılımı; yanma odası (% 55,54), gaz türbini (% 16,78), güç türbini (% 14,17) ve kompresör (% 13,51) şeklinde olmuştur.
- 580 Nm tork değeri için toplam çevresel etkinin komponentler arasında dağılımı; yanma odası (% 55,84), gaz türbini (% 17,22), güç türbini (% 13,63) ve kompresör (% 13,31) şeklinde olmuştur.

- 630 Nm tork değeri için toplam çevresel etkinin komponentler arasında dağılımı; yanma odası (% 56,35), gaz türbini (% 16,54), güç türbini (%14,00) ve kompresör (% 13,11) şeklinde olmuştur.

Yapılan literatür incelemeleri göstermiştir ki, konvansiyonel ekserji bazlı analizlerin yanı sıra bu analizleri destekleyen gelişmiş ekserji bazlı analizlerin kullanılması daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır. Bunun nedeni, gelişmiş ekserji bazlı analizlerde konvansiyonel analizler vasıtasıyla elde edilen çevresel etki değerlerinin kaçınılabilir ve kaçınılamaz etkiler olarak bileşenlerine ayrılmasıdır.

Bilim insanları ve araştırmacılar havacılık endüstrisinin insan kaynaklı olumsuz çevresel etkisini azaltmak için yoğun çaba sarf etmektedir. Çözümlerden bir tanesi, halihazırda kullanılan ve fosil kökenli bir yakıt olan kerozene daha çevre dostu alternatiflerin bulunmasıdır (biyoyakıt ya da hidrojen gibi). Ancak kısa ya da orta vadede bulunan alternatif yakıtların uçak güç sistemlerine uygulanabilmesi çok gerçekçi gözükmemektedir. Bu durum fosil kökenli yakıtlara bağımlılığın kaçınılmaz bir şekilde devam edeceğini göstermektedir. Bu yüzden eksergo-çevresel analiz gibi ekserji bazlı metodlar kullanılarak yeşil havacılık hedeflerinin yakalanmasına katkı sağlanabilir.

TEZDEN ÇIKAN YAYINLAR

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

Atılgan, R., Turan, O., Altuntas, O., Aydın, H. and Synylo, K., "Environmental Impact Assessment of a Turboprop Engine with the Aid of Exergy", Energy, The International Journal, Vol.58, pp.664-671, (Pergamon-Elsevier, doi:10.1016/j.energy.2013.05.064), 29/07/2013

Yazılan Uluslararası Kitaplardaki Bölümler

Atılgan, R., Turan, O. and Aydın, H., "Exergo-Economic Analysis of an Experimental Aircraft Turboprop Engine under Low Torque Condition" (Chapter 42), Springer Proceedings in Physics, Vol. 155, pp. 329-335, (Springer, isbn: 978-3-319-05521-3, doi: 10.1007/978-3-319-05521-3_42), 07/07/2014

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitaplarında Basılan Bildiriler

Atılgan R., Turan Ö. ve Aydın H., ""Exergo-Environmental Definitions of an Aircraft Turboprop Engine", The 8th International Green Energy Conference (IGEC-VIII), Kiev, Ukrayna 17/06/2013

KAYNAKLAR

- [1] NASA, *Green aviation: a better way to treat the planet*, 2013.
http://www.aeronautics.nasa.gov/pdf/green_aviation_fact_sheet_web.pdf
- [2] ENVIRO, *Beginners guide: Biofuels*, 2011.
http://www.enviro.aero/Content/Upload/File/BeginnersGuide_Biofuels_Web
- [3] IATA, *Forecast Summary*, 2011.
http://www.boeing.com/commercial/cmo/forecast_summary.html
- [4] BOEING, 2014. <http://www.boeing.com>
- [5] Leea J, Ian J, Waitz A, Brian Y, Kim C, Gregg G ve ark. "System for assessing aviation's global emissions (SAGE), part 2: uncertainty assessment," *TransportRes D-Tr E.*, **12**, 381-95, 2007.
- [6] USHP, 2006. <http://www.house.gov/transportation/aviation/02-15-06/02-15-06memo.html>
- [7] Parker R. "From blue skies to green skies: engine technology to reduce the climate-change impacts of aviation," *Technol Anal Strateg Manage*, **21**, 61-78, 2009.
- [8] Becerra AT, Martinez PP, Bravo XL, Pastor IO, "A methodology for territorial distribution of CO2 emission reductions in transport sector," *Int J Energy Res*, **14**, 1298-313, 2012.
- [9] Schipper L, Scholl L, Price L, "Energy use and carbon emissions from freight in 10 industrialized countries: an analysis of trends from 1973 to 1992", *TransportRes D-Tr E*, **1**, 57-76, 1997.
- [10] Timilsina GR ve Shrestha A, "Development factors affecting transport sector CO2 emissions growth in Latin American and Caribbean countries: an LMDI decomposition analysis", *Int J Energy Res*, **33**, 396-414, 2009.
- [11] Ayres RU, Ayres LW ve Martina K, "Eco-thermodynamics: exergy and life cycle analysis" *INSEAD, Center for the Management of Environmental Resources*, Working paper 961041, 1996.
- [12] Ahmadi P, Dincer I ve Rosen MA, "Exergy, exergoeconomic and environmental analyses and evolutionary algorithm based multi-objective optimization of combined cycle power plants", *Energy*, **36**, 5886-98, 2011.

- [13] Ptasiniski KJ, Koymans MN ve Verspagen HHG, “Performance of the Dutch energy sector based on energy, exergy and extended exergy accounting”, *Energy*, **31**, 3135-44, 2006.
- [14] Babikian R, Lukachko SP ve Waitz IA, “The historical fuel efficiency characteristics of regional aircraft from technological, operational, and cost perspectives”, *J Air Transp Manag*, **8**, 389-400, 2002.
- [15] Peeters PM, Middel J ve Hoolhorst A, “Fuel efficiency of commercial aircraft: an overview of historical and future trends”, *NLR-CR*, 2005-669, 2005.
- [16] MIT, Airline industry analysis, 2011, http://web.mit.edu/airlines/analysis/analysis_airline_industry.html
- [17] Midilli A ve Dincer I, “Development of some exergetic parameters for PEM fuel cells for measuring environmental impact and sustainability”, *Int J Hydrogen Energy*, **34**, 3858-72, 2009.
- [18] Midilli A ve Dincer I, “Effects of some micro-level exergetic parameters of a PEMFC on the environment and sustainability”, *Int J Global Warm.*, **2(1)**, 65-80, 2010.
- [19] Norberg S, Tamm G, Highley J, Rounds M, Boettner D, Arnas O, “Teaching thermodynamics via analysis of the west point power plant”, *Int J Green Energy*, **6(3)**, 230-44, 2009.
- [20] Dincer I, Rosen MA, “Worldwide perspective on energy, environment and sustainable development”, *Int J Energ Res*, **22**, 1305-21, 1998.
- [21] Ao Y, Gunnewiek L, Rosen MA, “Critical review of exergy-based indicators for the environmental impact of emissions”, *Int J Green Energy*, **5**, 87-104, 2008.
- [22] Dincer I, Rosen MA, “Thermodynamic aspects of renewables and sustainable development”, *Renew Sust Energ Rev*, **9**, 169-89, 2005.
- [23] Ji X, Chen GQ, Chen B, Jiang MM, “Exergy-based assessment for waste gas emissions from Chinese transportation”, *Energy Policy*, **37**, 2231-40, 2009.
- [24] Ayres RU, Ayres LW, Martina K, “Exergy, waste accounting, and lifecycle analysis”, *Energy*, **23(5)**, 355-63, 1998.
- [25] Rosen MA, Dincer I, Kanoglu M, “Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact”, *Energy Policy*, **36**, 128-37, 2008.
- [26] Wall G, “Exergy tools, proceedings”, *Institution of Mechanical Engineering*, 125-36, 2003.

- [27] Soylu S, “Estimation of Turkish road transport emissions”, *Energy Policy*, **35**, 4088-94, 2007.
- [28] Federici M, Ulgiati S, Basosi R, “A thermodynamic, environmental, and material flow analysis of the Italian highway and railway transport systems”, *Energy*, **33**, 760-75, 2008.
- [29] Embraer, *Market outlook 2011-2030*, 2011. <http://www.embraer.com>
- [30] Deloitte, *Global aerospace market outlook and forecast report*, 2012. <http://www.aiac.ca>
- [31] Aydın H, Turan O, Midilli A, Karakoc TH, “Component-based exergetic measures of an experimental turboprop/turboshaft engine for propeller aircrafts and helicopters”, *Int J Exergy*, **11**, 322-48, 2012.
- [32] Favrat D, Marechal F, Epelly O, “The challenge of introducing an exergy indicator in a local law on energy”, *Energy*, **33**, 130-6, 2008.
- [33] Federici M, Ulgiati S, Basosi R, “Air versus terrestrial transport modalities: an energy and environmental comparison”, *Energy*, **34**, 1493-503, 2009.
- [34] Aydın H, Turan O, Midilli A, Karakoc TH, “Exergetic and exergo-economic analysis of a turboprop engine: a case study for CT7-9C”, *Int J Exergy*, **11**, 69-88, 2012.
- [35] Ballı O, Aras H, Hepbaşlı A, “Exergetic and exergoeconomic analysis of an aircraft jet engine (AJE)”, *Int J Exergy*, **5**, 567-81, 2008.
- [36] Bejan A, Siems DL, “The need for exergy analysis and thermodynamic optimization in aircraft development”, *Int J Exergy*, **1**, 14-24, 2001.
- [37] Cesare T, Paolo AR, Luiz F, Oliveira SDJ, “Exergy and thermoeconomic analysis of a turbofan engine during a typical commercial flight”, *Energy*, **35**, 952-9, 2010.
- [38] Diango A, Perilhon C, Descombes G, Danho E, “Application of exergy balances for the optimization of non-adiabatic small turbomachines operation”, *Energy*, **36**, 2924-36, 2011.
- [39] Etele J, Rosen MA, “Sensitivity of exergy efficiencies of aerospace engines to reference environmental selection”, *Int J Exergy*, **1**, 91-9, 2001.
- [40] Rosen MA, Etele J, “Aerospace systems and exergy analysis: applications and methodology development needs”, *Int J Exergy*, **1**, 411-25, 2004.

- [41] Roth BA, Mavris DN., “A comparison of thermodynamic loss models applied to the J79 turbojet engine”, *Joint propulsion conference and exhibit, 36th*, Huntsville, AL; 16-19 July 2000.
- [42] Roth B, Mavris D. A work availability perspective of turbofan engine performance. AIAA publication no. 0391. American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2001.
- [43] Turan O, “ Effect of reference altitudes for a turbofan engine with the aid of specific-exergy based method”, *Int J Exergy*, **11**, 252-70, 2012.
- [44] Turan O, “Exergetic effects of some design parameters on the small turbojet engine for unmanned air vehicle applications”, *Energy*, **46**, 51-61, 2012.
- [45] Altuntas O, Karakoc TH, Hepbasli A, “Exergetic, exergoeconomic and sustainability assessment of piston-prop aircraft engine”, *Int J Thermal Sci Technol*, **32(2)**, 133-43, 2012.
- [46] Ahmadi P ve Dincer I, “Thermodynamic and exergoenvironmental analyses, and multi-objective optimization of a gas turbine power plant”, *Appl Thermal Eng*, **31:25**, 29-40, 2011.
- [47] Boyano A, Morosuk T, Blanco-Marigorta AM, Tsatsaronis G, “Conventional and advanced exergoenvironmental analysis of a steam methane reforming reactor for hydrogen production”, *Int J Cleaner Prod*, **20**, 152-60, 2012.
- [48] Boyano A, Morosuk T, Blanco-Marigorta AM, Tsatsaronis G, “Exergoenvironmental analysis of a steam methane reforming process for hydrogen production”, *Energy*, **36**, 2202-14, 2011.
- [49] Meyer L, Tsatsaronis G, Buchgeister J, Schebek L, “Exergoenvironmental analysis for evaluation of the environmental impact of energy conversion systems”, *Energy*, **34**, 75-89, 2009.
- [50] Ahmadi P, Dincer I, Rosen MA, “Exergoenvironmental analysis of a trigeneration system based on micro gas turbine and organic rankine cycles”, *Proceedings of the global conference on global warming*, Portugal; 2011.
- [51] Petrakopoulou F, Tsatsaronis G, Morosuk T, Paitazoglou C, “Environmental evaluation of a power plant using conventional and advanced exergy-based methods”, *Energy*, **45**, 23-30, 2012.
- [52] Altuntas O, Karakoc TH, Hepbasli A, “Exergoenvironmental analysis of pistonprop aircrafts”, *Exergy Int J*, **10(3)**, 290-8, 2012.

- [53] Restrepo A, Miyake R, Kleveston F, Bazzo E, “Exergetic and environmental analysis of a pulverized coal power plant” *Energy*, **45**, 195-202, 2012.
- [54] Ahmadi P ve Dincer I, “Exergoenvironmental analysis and optimization of a cogeneration plant system using Multimodal Genetic Algorithm (MGA)”, *Energy*, **35**, 5161-72, 2010.
- [55] Ryerson MS, Hansen M, “The potential of turboprops for reducing aviation fuel consumption”, *Transportation Research Part D*, 15, 305-314, 2010.
- [56] El-Sayed AF, *Aircraft propulsion and gas turbine engines*. USA: CRC Press. 2008.
- [57] Akermann J. Sustainable air transport-on track in 2050. *Transportation Research Part D*, 10, 111-126, 2005.
- [58] Regional Airline Association, *Aircraft Engines*, 2014. <http://www.raa.org/AircraftEngines/tabid/119/Default.aspx>
- [59] Wikipedia, *Schematic diagram showing the operation of a turboprop engine*, 2014. <http://en.wikipedia.org/wiki/Turboprop>
- [60] Aydın H., *Ticari uçakların ekserjetik sürdürülebilirlik indikatörlerinin geliştirilmesi*, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2012.
- [61] Atılğan R., Turan Ö., ve Aydın H., “Exergo-Economic Analysis of an Experimental Aircraft Turboprop Engine under Low Torque Condition”, *Int. Cong. on Energy Eff. and Materials (ENEFM)*, 09/09/2013, Kemer, Türkiye.

Ek-1 Turboprop Motor Termodinamik Parametreleri

(240 Nm için)

İstasyon No	İstasyon adı	Hava debisi (kg/sn)	Sıcaklık (K)	Basınç (kPa)	Enerji (kW)	Ekserji (kW)
0	Hava	3.38	281	92.4	0	0
2	Kompresör girişi	3.38	281	92.25	0.00	0
B	Soğutma ve basınçlandırma havası	0.17	644	1067	67	57
3	Yanma odası girişi	3.21	644	1067	1263	1075
3f	Yakıt	0.059	281	2500	2558	2731
4.1	Gaz türbin girişi	3.27	1360	1028	4176	3026
4.5	Güç türbin girişi	3.41	958	239	2635	1512
8	Güç türbin çıkışı	3.41	805	95.04	2000	847

(350 Nm için)

İstasyon No	İstasyon adı	Hava debisi (kg/sn)	Sıcaklık (K)	Basınç (kPa)	Enerji (kW)	Ekserji (kW)
0	Hava	3.86	281	92.4	0	0
2	Kompresör girişi	3.86	281	92.2	0.00	0
B	Soğutma&basınçlandırma havası	0.19	673	1254	77	70
3	Yanma odası girişi	3.670	673	1254	1601	1346
3f	Yakıt	0.072	281	2500	3126	3380
4.1	Gaz türbin girişi	3.742	1429	1213	5072	3745
4.5	Güç türbin girişi	3.910	1018	244	3294	1929
8	Güç türbin çıkışı	3.910	813	95.8	2317	992

Ek-1 Turboprop Motor Termodinamik Parametreleri (devamı)

(485 Nm için)

Istasyon No	Istasyon adı	Hava debisi (kg/sn)	Sıcaklık (K)	Basınç (kPa)	Enerji (kW)	Ekserji (kW)
0	Hava	4.335	281	92.4	0	0
2	Kompresör girişi	4.335	281	92.1	0.00	0
B	Soğutma&basınçlandırma havası	0.210	705	1465	100	84
3	Yanma odası girişi	4.125	705	1465	1817	1653
3f	Yakıt	0.0893	281	2500	3873	4136
4.1	Gaz türbin girişi	4.210	1520	1420	6314	4695
4.5	Güç türbin girişi	4.400	1100	310	4244	2605
8	Güç türbin çıkışı	4.400	836	97.2	2784	1215

(552 Nm için)

Istasyon No	Istasyon adı	Hava debisi (kg s-1)	Sıcaklık (K)	Basınç (kPa)	Enerji (kW)	Ekserji (kW)
0	Hava	4.540	281	92.4	0	0
2	Kompresör girişi	4.540	281	92.1	0.00	0
B	Soğutma&basınçlandırma havası	0.220	721	1563	109	92
3	Yanma odası girişi	4.320	721	1563	2142	1801
3f	Yakıt	0.098	281	2500	4267	4555
4.1	Gaz jeneratör girişi	4.420	1567	1511	6921	5192
4.5	Güç türbin girişi	4.620	1130	326	5657	2890
8	Güç türbin çıkışı	4.620	852	97.4	3028	1338

Ek-1 Turboprop Motor Termodinamik Parametreleri (devamı)

(580 Nm için)

Istasyon No	Istasyon adı	Hava debisi (kg/sn)	Sıcaklık (K)	Basınç (kPa)	Enerji (kW)	Ekserji (kW)
0	Hava	4.616	281	92.4	0	0
2	Kompresör girişi	4.616	281	92	0.00	0
B	Soğutma basınçlandırma havası	0.230	730	1619	116	98
3	Yanma odası girişi	4.390	730	1619	2226	1871
3f	Yakıt	0.104	281	2500	4501	4805
4.1	Gaz türbin girişi	4.490	1602	1565	7278	5472
4.5	Güç türbin girişi	4.690	1152	342	4886	3058
8	Güç türbin çıkışı	4.690	867	97.7	3175	1419

(630 Nm için)

Istasyon No	Istasyon adı	Hava debisi (kg/sn)	Sıcaklık (K)	Basınç (kPa)	Enerji (kW)	Ekserji (kW)
0	Hava	4.713	281	92.4	0	0
2	Kompresör girişi	4.713	281	91	0.00	0
B	Soğutma basınçlandırma havası	0.235	740	1668	122	102
3	Yanma odası girişi	4.480	740	1668	2328	1952
3f	Yakıt	0.109	281	2500	4731	5051
4.1	Gaz türbin girişi	4.590	1631	1613	7622	5749
4.5	Güç türbin girişi	4.800	1175	353	5159	3251
8	Güç türbin çıkışı	4.800	880	97.9	3336	1505

Ek-2 Turboprop Motor Ekserji Analizi Sonuçları

(240 Nm için)

Motor elemanları	Giriş ekserjisi (kW)	Çıkış ekserjisi (kW)	Yakıt ekserjisi (kW)	Ürün ekserjisi (kW)	Yıkım ekserjisi (kW)	Ekserji verimi	Ekserji yıkım oranı	Ekserji iyileştirme potansiyeli (kW)
Kompresör	1330	1132	1330	1132	198	0.851	0.134	29.5
Yanma odası	3910	2970	3910	2970	940	0.760	0.639	226.0
Gaz türbini	3026	2793	1576	1343	233	0.923	0.158	17.9
Güç türbini	1512	1411	665	564	101	0.933	0.069	6.8
Motor	2731	564	2731	564	2167	0.206		

(350 Nm için)

Motor elemanları	Giriş ekserjisi (kW)	Çıkış ekserjisi (kW)	Yakıt ekserjisi (kW)	Ürün ekserjisi (kW)	Yıkım ekserjisi (kW)	Ekserji verimi	Ekserji yıkım oranı	Ekserji iyileştirme potansiyeli (kW)
Kompresör	1678	1416	1678	1416	262	0.844	0.167	40.9
Yanma odası	4726	3745	4726	3745	981	0.792	0.626	203.6
Gaz türbin	3745	3541	1899	1695	204	0.945	0.130	11.1
Güç türbini	1929	1810	937	818	119	0.938	0.076	7.3
Motor	3380	818	2731	818	1913	0.242		

Ek-2 Turboprop Motor Ekserji Analizi Sonuçları (devamı)

(485 Nm için)

Motor elemanları	Giriş ekserjisi (kW)	Çıkış ekserjisi (kW)	Yakıt ekserjisi (kW)	Ürün ekserjisi (kW)	Yıkım ekserjisi (kW)	Ekserji verimi	Ekserji yıkım oranı	Ekserji iyileştirme potansiyeli (kW)
Kompresör	2062	1737	2062	1737	325	0.842	0.181	51.2
Yanma odası	5789	4695	5789	4711	1094	0.811	0.610	206.7
Gaz türbini	4695	4575	2202	2083	119.9	0.974	0.067	3.0
Güç türbini	2605	2351	1390	1136	253.8	0.903	0.142	24.7
Motor	4136	1136	4136	1136	3000	0.275		

(552 Nm için)

Motor elemanları	Giriş ekserjisi (kW)	Çıkış ekserjisi (kW)	Yakıt ekserjisi (kW)	Ürün ekserjisi (kW)	Yıkım ekserjisi (kW)	Ekserji verimi	Ekserji yıkım oranı	Ekserji iyileştirme potansiyeli (kW)
Kompresör	2251	1893	2251	1,893	358	0.841	0.185	56.9
Yanma odası	6356	5192	6356	5192	1164	0.817	0.602	213.3
Gaz türbini	5192	5038	2427	2274	154	0.970	0.079	4.5
Güç türbini	2890	2633	1552	1295	257	0.911	0.133	22.9
Motor	4555	1295	4555	1295	3260	0.284		

Ek-2 Turboprop Motor Ekserji Analizi Sonuçları (devamı)

(580 Nm için)

Motor elemanları	Giriş ekserjisi (kW)	Çıkış ekserjisi (kW)	Yakıt ekserjisi (kW)	Ürün ekserjisi (kW)	Yıkım ekserjisi (kW)	Ekserji verimi	Ekserji yıkım oranı	Ekserji iyileştirme potansiyeli (kW)
Kompresör	2342	1969	2342	1969	373	0.841	0.186	59.4
Yanma odası	6676	5472	6676	5472	1204	0.820	0.601	217.3
Gaz türbini	5472	5293	2544	2365	179	0.967	0.089	5.9
Güç türbini	3058	2809	1639	1390	249	0.918	0.124	20.3
Motor	4805	1390	4805	1390	3415	0.289		

(630 Nm için)

Motor elemanları	Giriş ekserjisi (kW)	Çıkış ekserjisi (kW)	Yakıt ekserjisi (kW)	Ürün ekserjisi (kW)	Yıkım ekserjisi (kW)	Ekserji verimi	Ekserji yıkım oranı	Ekserji iyileştirme potansiyeli (kW)
Kompresör	2450	2054	2450	2054	396	0.838	0.190	64.0
Yanma odası	7003	5749	7003	5749	1254	0.821	0.601	224.5
Gaz türbini	5749	5583	2640	2475	166	0.971	0.079	4.8
Güç türbini	3251	2981	1746	1476	270	0.917	0.130	22.5
Motor	5051	1476	5051	1476	3575	0.292		