

**DİNAMİK KOŞULLAR ALTINDA ÇALIŞAN BİR TURBOPROP UÇAK
MOTORUNUN İLERİ EKSERJİ ANALİZİ**

Ramazan ATILGAN

Doktora Tezi

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Önder TURAN

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ocak 2021

ÖZET

DİNAMİK KOŞULLAR ALTINDA ÇALIŞAN BİR TURBOPROP UÇAK MOTORUNUN İLERİ EKSERJİ ANALİZİ

Ramazan ATILGAN

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2021

Danışman: Prof. Dr. Önder TURAN

Bu tez çalışmasında kargo uçaklarında kullanılan modern bir turboprop uçak motoruna 6 farklı tork değeri için ileri eksergo-ekonomik analiz uygulanmıştır. Yapılan analizler sonucunda turboprop motor komponentlerinin gerçek iyileştirme potansiyelleri ve komponentler arasındaki etkileşim ortaya konmuştur. Böylelikle turboprop motor komponentlerinin farklı çalışma koşulları altındaki termal ve ekonomik performansları değerlendirilmiştir. 630 Nm tork değeri için yapılan geleneksel ekserji analizi sonuçlarına göre en yüksek iyileştirme potansiyeli 224,5 kW ile yanma odasına aittir. İleri ekserji analizi sonuçlarına göre ise yanma odasına ait önlenebilir/içsel ekserji yıkımı değeri sadece 7,55 kW olarak bulunmuştur. Bu tork değerinde en yüksek önlenebilir/içsel ekserji yıkımı değeri ise 43,20 kW ile kompresörde tespit edilmiştir. En yüksek önlenebilir/içsel toplam maliyet ise 10,72 USD/sa ile kompresöre aittir. Turboprop motor ana komponentleri için önlenebilir/içsel eksergo-ekonomik faktör değerleri kompresör, yanma odası, gaz jeneratör türbin ve güç türbini için sırasıyla %80, %84, %94 ve %66 olarak hesaplanmıştır. Analiz sonuçları ileri ekserji ve ileri eksergo-ekonomik analizlerin, geleneksel ekserjetik analizlere göre daha isabetli sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Anahtar Sözcükler: İleri eksergo-ekonomi, İleri ekserji, Turboprop, İtki, Gaz türbini.

ABSTRACT

ADVANCED EXERGY ANALYSIS OF A TURBOPROP AIRCRAFT ENGINE UNDER DYNAMIC CONDITIONS

Ramazan ATILGAN

Department of Aircraft Airframe Powerplant Maintenance

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, January 2021

Supervisor: Prof. Dr. Önder TURAN

In this thesis, advanced exergo-economic analysis is applied to a modern turboprop aircraft engine used by cargo aircrafts for 6 different torques. As a result of the analysis, the real improvement potentials of the turboprop engine components and the interaction between the components have been revealed. Thus, thermal and economic efficiency performances of turboprop engine components under different operating conditions were evaluated. According to the conventional exergy analysis results of 630 Nm torque, the highest improvement potential is at the combustion chamber with the value of 224,5 kW. However, according to the results of advanced exergy analysis, the avoidable/endogenous exergy destruction value of the combustion chamber is only 7,55 kW. The highest avoidable/endogenous exergy destruction is found at the compressor with 43,20 kW. The highest avoidable/endogenous total cost is found at the compressor with 10,72 USD/h. Avoidable/endogenous exergo-economic factor for turboprop engine main components of compressor, combustion chamber, gas generator turbine and power turbine are calculated as %80, %84, %94 and %66, respectively. The results showed that advanced exergy and advanced exergo-economic analyzes give more accurate results than conventional exergetic analyzes.

Keywords: Advanced exergo-economy, Advanced exergy, Turboprop, Propulsion, Gas turbine.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, doktora başladığım 2014 yılından 2021 yılına kadar öyle farklı aşamalardan geçti ki, şu anda tamamlanmış olması birçok insana teşekkür etmemi zorunlu kılıyor.

Öncelikle kendisiyle tanışmaktan ve birlikte çalışmaktan onur duyduğum, yüksek lisanstan itibaren bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren saygıdeğer hocam Prof. Dr. Önder TURAN’a, bütün bu süreç boyunca vermiş olduğu destek ve gösterdiği anlayış için teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Tez izleme komitemde yer alan değerli hocalarım Doç. Dr. Tolga BAKLACIOĞLU ve Dr. Öğr. Üyesi Nevzet KAYA’ya tezin gelişimine yapmış oldukları katkılardan dolayı teşekkür ederim. Tez savunma jürimde bulunan kıymetli hocalarım Prof. Dr. M. Ziya SÖĞÜT, Doç. Dr. Özer CAN ve Dr. Öğr. Üyesi Elif KORUYUCU’ya yorum ve değerlendirmeleri için minnettarlığımı sunarım. Doç. Dr. Hakan AYDIN hocama da vermiş olduğu katkılardan dolayı ayrıca teşekkür ederim.

Annem Ayşe ATILGAN, babam A. Kerim ATILGAN ve kardeşim Mustafa ATILGAN... Her şey sizlerle daha güzel, daha kolay. İyi ki varsınız...

Ve tabi ki sevgili eşim Dr. Fatma ATILGAN. “İyi günde, kötü günde; hastalıkta, sağlıkta” sözünü klişe olmaktan çıkarıp, hayatıma girdiğin günden itibaren güzellik getirdin. Sabrın, anlayışın ve sevgin için teşekkür ederim.

Son olarak, 2020 yılında her şeye rağmen hayatımıza getirdiği neşe ve umut ile belki farkında olmasa da tezin sonuçlanmasında en büyük motivasyonlardan biri olan biricik oğlum Kerim Burak ATILGAN, hoş geldin...

Ramazan ATILGAN

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Ramazan ATILGAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı	2
1.2. Tezin Özgünlüğü	3
1.3. Tezin Ekonomik ve Sosyal Faydaları	4
1.4. Tez Çalışma Planı.....	5
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	7
2.1. Havacılık Alanında İleri Ekserji Analizi Uygulamaları	7
2.2. Havacılık Alanında Eksergo-Ekonomik Analiz Uygulamaları.....	9
2.3. Havacılık Alanında İleri Ekserji Analizi Uygulamaları.....	11
2.4. Havacılık Alanında İleri Eksergo-Ekonomik Analiz Uygulamaları	14
3. TURBOPROP MOTOR SİSTEM TANIMI	15
3.1. Kompresör	16
3.2. Yanma Odası	17
3.3. Gaz Jeneratör Türbin	18
3.4. Güç Türbini	19
4. YÖNTEM VE ANALİZ	21

4.1. Uçuş Fazları	23
4.2. Kabuller	24
4.3. Ekserji Analizi	25
4.4. Eksergo-Ekonomik Analiz	28
4.5. İleri Ekserji Analizi.....	29
4.5.1. Önlenebilir ve önlenemez ekserji yıkımı	30
4.5.2. İçsel ve dışsal ekserji yıkımı	31
4.5.3. Önlenebilir/önlenemez ve içsel/dışsal ekserji yıkımlarının birleştirilmesi	32
4.6. İleri Eksergo-Ekonomik Analiz	33
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	35
5.1. Ekserji Analizi	35
5.2. Eksergo-Ekonomik Analiz Sonuçları.....	40
5.3. İleri Ekserji Analiz Sonuçları	44
5.3.1. Önlenebilir ve önlenemez ekserji yıkımına ait sonuçlar	44
5.3.2. İçsel ve dışsal ekserji yıkımına ait sonuçlar	52
5.3.3. Önlenebilir/önlenemez ve içsel/dışsal ekserji yıkımlarının birleştirilme sonuçları	60
5.4. İleri Eksergo-Ekonomik Analiz Sonuçları.....	65
5.5. Geleneksel ve İleri Eksergo-Ekonomik Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	79
6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	95
KAYNAKÇA.....	99
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 4.1. 6 farklı tork değeri için yanma denklemleri.....	26
Tablo 4.2. 6 farklı tork değeri için yanma sonrası özgül ısı denklemleri.....	27
Tablo 5.1. 240 Nm için belirlenen önlenemez ve ideal şartlar.....	44
Tablo 5.2. 350 Nm için belirlenen önlenemez ve ideal şartlar.....	45
Tablo 5.3. 485 Nm için belirlenen önlenemez ve ideal şartlar.....	47
Tablo 5.4. 552 Nm için belirlenen önlenemez ve ideal şartlar.....	48
Tablo 5.5. 580 Nm için belirlenen önlenemez ve ideal şartlar.....	49
Tablo 5.6. 630 Nm için belirlenen önlenemez ve ideal şartlar.....	51
Tablo 5.7. 240 Nm için ileri ekserji analiz sonuçları	60
Tablo 5.8. 350 Nm için ileri ekserji analiz sonuçları	61
Tablo 5.9. 485 Nm için ileri ekserji analiz sonuçları	62
Tablo 5.10. 552 Nm için ileri ekserji analiz sonuçları	63
Tablo 5.11. 580 Nm için ileri ekserji analiz sonuçları	64
Tablo 5.12. 630 Nm için ileri ekserji analiz sonuçları	65
Tablo 5.13. 240 Nm için hesaplanan ekserji maliyeti sonuçları	66
Tablo 5.14. 350 Nm için hesaplanan ekserji maliyeti sonuçları	68
Tablo 5.15. 485 Nm için hesaplanan ekserji maliyeti sonuçları	70
Tablo 5.16. 552 Nm için hesaplanan ekserji maliyeti sonuçları	72
Tablo 5.17. 580 Nm için hesaplanan ekserji maliyeti sonuçları	74
Tablo 5.18. 630 Nm için hesaplanan ekserji maliyeti sonuçları	76
Tablo 5.19. Turboprop motora ait ekipman maliyeti sonuçları	78
Tablo 5.20. 240 Nm için geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analiz sonuçlarının karşılaştırılması	81
Tablo 5.21. 350 Nm için geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analiz sonuçlarının karşılaştırılması	83
Tablo 5.22. 485 Nm için geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analiz sonuçlarının karşılaştırılması	85
Tablo 5.23. 552 Nm için geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analiz sonuçlarının karşılaştırılması	88
Tablo 5.24. 580 Nm için geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analiz sonuçlarının karşılaştırılması	90

Tablo 5.25. 630 Nm için geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analiz sonuçlarının karşılaştırılması	92
---	----



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Turboprop motor şematik gösterimi.....	15
Şekil 3.2. Kompresör kontrol hacmi.....	17
Şekil 3.3. Yanma odası kontrol hacmi.....	18
Şekil 3.4 Gaz jeneratör türbin kontrol hacmi	19
Şekil 3.5. Güç türbinine ait kontrol hacmi.....	20
Şekil 4.1. İleri eksergo-ekonomik analiz metodolojisinin uygulama akış şeması.....	22
Şekil 4.2. Uçuş profili boyunca motor tork değerleri	24
Şekil 5.1. Dinamik yükler altında turboprop motor komponentlerine ait ekserji verimleri	35
Şekil 5.2. Dinamik yükler altında turboprop motor komponentlerine ait iyileştirme potansiyelleri.....	36
Şekil 5.3. 240 Nm için izafi tersinmezlik oranları.....	37
Şekil 5.4. 350 Nm için izafi tersinmezlik oranları.....	38
Şekil 5.5. 485 Nm için izafi tersinmezlik oranları.....	38
Şekil 5.6. 552 Nm için izafi tersinmezlik oranları.....	39
Şekil 5.7. 580 Nm için izafi tersinmezlik oranları.....	39
Şekil 5.8. 630 Nm için izafi tersinmezlik oranları.....	40
Şekil 5.9. Dinamik yükler altında turboprop motor komponentlerine ait ekipman maliyetleri	41
Şekil 5.10. Dinamik yükler altında turboprop motor istasyonlarına ait birim ekserji maliyetleri.....	42
Şekil 5.11. Dinamik yükler altında turboprop motor istasyonlarına ait ekserji yıkım maliyetleri.....	43
Şekil 5.12. 240 Nm için önlenebilir/önlenebilir ekserji yıkımı bileşenleri	45
Şekil 5.13. 350 Nm için önlenebilir/önlenebilir ekserji yıkımı bileşenleri	46
Şekil 5.14. 485 Nm için önlenebilir/önlenebilir ekserji yıkımı bileşenleri	47
Şekil 5.15. 552 Nm için önlenebilir/önlenebilir ekserji yıkımı bileşenleri	49
Şekil 5.16. 580 Nm için önlenebilir/önlenebilir ekserji yıkımı bileşenleri	50
Şekil 5.17. 630 Nm için önlenebilir/önlenebilir ekserji yıkımı bileşenleri	51
Şekil 5.18. 240 Nm için içsel/dışsal ekserji yıkımı bileşenleri.....	53
Şekil 5.19. 350 Nm için içsel/dışsal ekserji yıkımı bileşenleri.....	54

Şekil 5.20. 485 Nm için içsel/dışsal ekserji yıkımı bileşenleri.....	55
Şekil 5.21. 552 Nm için içsel/dışsal ekserji yıkımı bileşenleri.....	56
Şekil 5.22. 580 Nm için içsel/dışsal ekserji yıkımı bileşenleri.....	58
Şekil 5.23. 630 Nm için içsel/dışsal ekserji yıkımı bileşenleri.....	59



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AID	: Alt ısııl değęer (kJ/kg)
AV	: Önlenebilir
c	: Birim ekserji maliyeti (USD/GJ)
C	: Ekserji maliyeti (USD/sa)
CIC	: İlk yatırım maliyeti (USD/sa)
çık	: Çıkan
EN	: İçsel
EX	: Dışsal
Ex	: Ekserji (kJ)
<i>f</i>	: Eksergo-ekonomik faktör (%)
fız	: Fiziksel
gir	: Giren
GJ	: Gigajoule
gjt	: Gaz jeneratör türbin
gt	: Güç türbini
HYO	: Hava-yakıt oranı
ICAO	: Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı
IP	: İyileştirme potansiyeli (kW)
k	: k'ıncı komponent
K	: Kelvin
kim	: Kimyasal
kin	: Kinetik
Komp	: Kompresör
Nm	: Newton-metre
OM	: Bakım/işletme
P	: Basınç; Ürün
PEC	: Satın alma maliyeti (USD/sa)
pot	: Potansiyel
sa	: Saat
T	: Sıcaklık

TM	:	Turboprop motor
TOP	:	Toplam
UN	:	Önlenemez
USD	:	Amerikan doları
W	:	İş (kJ)
X	:	İzafi tersinmezlik oranı (%)
y	:	Yakıt
yık	:	Yıkım
YO	:	Yanma odası
Z	:	Ekipman maliyeti (USD/sa)
0	:	Çevre koşulları
1,2...8	:	Motor istasyonları

1. GİRİŞ

Enerji, medeniyetimizin sosyal, ekonomik ve teknolojik kalkınması için oldukça önemli ve gerekli bir kavramdır. Sanayi devrimiyle birlikte fosil kökenli enerji kaynaklarına olan ihtiyaç bir nevi bağımlılığa dönüşmüştür. Hayatımıza giren her yeni teknoloji ile birlikte daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulmuş ve günümüze kadar bu ihtiyaç büyük ölçüde kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil kökenli enerji kaynaklarından karşılanmıştır. İçinde bulunduğumuz 21. yy.'da alternatif enerji kaynaklarının kullanım oranı artmış olsa da, hala büyük ölçüde fosil yakıtlara bağımlılık söz konusudur. Buradaki problem, söz konusu fosil yakıtların sonsuz olmaması ve tükenme riski ile karşı karşıya olmamızdır. Bununla birlikte, yakıtların ekonomik ve çevresel maliyetleri de dikkate alınması gereken diğer önemli konulardır. Geline nokta sürdürülebilir bir dünya ve gelecek için enerji verimliliğinin gerekliliği tartışılmaz durumdadır [1-3].

Mevcut enerji kaynaklarının verimli kullanılması sürdürülebilir bir geleceğe iki yönlü katkı sunmaktadır. İlk olarak; daha az yakıt kullanımı demek, daha az ekonomik maliyet ve ekonomik kaynakların daha etkin kullanılması demektir. İkinci olarak ise; daha az fosil yakıt kullanımı daha az olumsuz çevresel etki anlamına gelmektedir. Bu iki katkıdan hangisinin daha değerli olduğunu belirlemek gerçekten zordur. 20. yy sonlarına kadar ekonomik katkı daha fazla önemsenmiş olsa da, 21. yy ile birlikte çevresel katkının önemi de görmezden gelinemez bir seviyeye ulaşmıştır. Başta uluslararası örgütler ve hükümetler olmak üzere bütün karar vericiler bu konuyla alakalı eylem planları ve hedefler açıklamışlardır [4-6].

Havacılık endüstrisi sürdürülebilir kalkınmanın en önemli sac ayaklarından birisi konumundadır. Diğer sektörlere göre daha hızlı kararlar almış ve bunları işleme koymuştur. Örneğin, Birleşmiş Milletler bünyesinde yer alan ve dünya genelinde sivil havacılığın çatı örgütü konumunda bulunan Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı (ICAO) tarafından 3 aşamalı bir karbon sıfır büyüme (carbon neutral growth) planı duyurulmuştur. Bu plana göre;

- 2020 yılından itibaren sektörel bazdaki net karbon salınımının sabitlenmesi ve büyümenin bu şekilde sağlanması,

- 2020 yılından itibaren halihazırdaki uçak filolarının daha yenileri ile değiştirilerek yakıt verimliliğinin yıllık %1,5 oranında iyileştirilmesi,
- 2050 yılına kadar havacılık kaynaklı net karbon emisyonunun 2005 yılındaki değerlerin %50'si olması hedeflenmiştir.

Bu hedeflerin gerçekleştirilebilmesi için bazı yöntemler önerilmiş ve bunlardan bazıları uygulamaya konulmuştur. Öncelikle hava taşımacılığında kullanılan mevcut uçak filosunun kademeli olarak yenilenmesi gerekmektedir. Yeni nesil uçaklar (A320neo, tartışmalı Boeing 737 Max ve hatta Boeing 787 ile Airbus A350 gibi) emsallerine göre daha hafif olmaktadır ve bu uçakların kullandıkları motorlar daha yüksek yakıt verimliliğine sahiptir. Böylelikle toplamda %30'a varan yakıt tasarrufu elde edilebilmektedir. Sürdürülebilir havacılık yakıtları ise en güçlü alternatiflerden bir tanesidir. Bazı havayolu şirketleri tarafından sürdürülebilir havacılık yakıtları ile uçuşlar başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bazı havalimanları bu yakıtların kullanılabilmesi için altyapılarını uygun hale getirmiştir. Fakat sadece sürdürülebilir yakıtların kullanımı tek başına yeterli değildir. Geleneksel enerji kaynaklarının verimli kullanımı da çok büyük önem arz etmektedir. Fosil yakıt kullanımının ve fosil yakıtlara bağımlılığın kısa ve orta vadede sürmeye devam edeceği aşikardır [7-9]. Bu nedenle uçak motorlarının verimliliğinin artırılması en uygun opsiyon olarak değerlendirilebilir. Söz konusu durum, bu tez çalışmasının da temel motivasyon kaynaklarından bir tanesidir.

1.1. Tezin Amacı

Bu tez çalışması, dinamik koşullar altında çalışan bir turboprop uçak motorunun performansını ileri ekserji analiz yöntemiyle değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bunu gerçekleştirebilmek için öncelikle söz konusu motor termodinamik olarak modellenmiştir ve motor komponentlerine ait enerji-ekserji analizleri sırasıyla gerçekleştirilmiştir. Termodinamik incelemeye ek olarak ekonomik performansın değerlendirilmesi için eksergo-ekonomik analiz uygulanmıştır. Daha sonra ileri ekserji analiz kapsamında ekserji yıkım değerleri komponentlerine ayrılarak, içsel-dışsal ve önlenabilir-önlenemez ekserji yıkımları hesaplanmıştır. Son olarak da ekserji yıkımı kaynaklı ekonomik maliyetler benzer şekilde içsel-dışsal ve önlenabilir-önlenemez şeklinde komponentlerine ayrılarak çalışma tamamlanmıştır. Söz konusu bütün hesaplamalar 6 farklı tork değeri

için ayrı ayrı olacak şekilde yapılmıştır. Böylelikle uçağın 6 farklı uçuş fazı için termodinamik ve ekonomik verimliliğini değerlendirme imkanı elde edilmiştir. Tez kapsamında yapılması amaçlanan çalışmalar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Turboprop motorun ve komponentlerinin dinamik koşullar altındaki termodinamik performansını ekserjetik parametrelerle değerlendirmek,
- Komponent maliyetlerini ve motor istasyonlarındaki ekserji yıkım maliyetlerini hesaplamak,
- Komponentlerde meydana gelen ekserji yıkımlarını önlenebilir/önlenebilir ve içsel/dışsal olacak şekilde alt bileşenlere ayırmak,
- Turboprop motora ait komponent ve ekserji maliyetlerini önlenebilir/önlenebilir ve içsel/dışsal olacak şekilde alt bileşenlere ayırmak,
- Turboprop motorun ve komponentlerinin termodinamik ve ekonomik olarak gerçek iyileştirme potansiyellerini tespit etmek.

1.2. Tezin Özgünlüğü

Bu tez çalışmasında turboprop motorun performansını değerlendirmek için seçilen yöntem ileri ekserji analizidir. Geleneksel ekserji analizine göre nispeten daha yeni bir yöntem olan ileri ekserji analizi, havacılık motorlarına sınırlı sayıda çalışmada uygulanmıştır. Bu çalışmada ise ilk defa bir turboprop motora 6 farklı tork değeri için uygulanmış ve böylelikle motorun bütün uçuş profili boyunca, 6 farklı uçuş fazı için verimlilik performansı değerlendirilmiştir.

Ayrıca, detaylı literatür analizinde de görüleceği üzere, ileri eksergo-ekonomi analizi ilk defa bir uçak motoruna, dolayısıyla da bir turboprop motora uygulanmıştır. İleri ekserji analizinde olduğu gibi 6 farklı tork değeri için ileri eksergo-ekonomik analizlerin yapılmış olması dolayısıyla, *ileri eksergo-ekonomik analiz ilk defa dinamik olarak bir turboprop uçak motoruna uygulanarak literatüre özgün bir katkıda bulunulmuştur.*

1.3. Tezin Ekonomik ve Sosyal Faydaları

2019 yılında dünya genelinde 4,5 milyar yolcu hava taşımacılığını kullanmıştır. Bu sayı 2012 yılında yaklaşık olarak 3 milyar yolcu olarak rapor edilmiştir. Henüz 10 yıl olmadan taşınan yolcu sayısının %50'den fazla artış gösterdiği görülebilmektedir. Hava taşımacılığını gerçekleştiren havayolu firmalarının operasyonel maliyetlerinin en büyük bileşenini yakıt giderleri oluşturmaktadır. 2019 yılında bir havayolu firması operasyonel maliyetlerinin yaklaşık dörtte birini (%23,7) yakıtı harcamak durumunda kalmıştır. Ekonomik maliyetlerin yanında çevresel maliyetler de önem arz etmektedir. 2019 yılında uçuş faaliyetleri neticesinde 915 milyon ton karbondioksit gazının atmosfere atıldığı hesaplanmıştır. Bu miktar dünya genelindeki insan kaynaklı karbondioksit salınımının %2'sini oluşturmaktadır. Alınan tüm önlemlere rağmen artan yolcu trafiği ile bu oran da artmaya devam etmektedir. Ayrıca yapılan uçuş faaliyetlerinin %80'i 1500 km ve üzeri irtifalarda gerçekleşmektedir. Bu durum da söz konusu emisyonların çevreye olan olumsuz etkisini daha dramatik hale getirmektedir [10].

Yukarıdaki istatistiklerden de anlaşılacağı üzere, verimlilik iyileştirme çalışmaları havacılık sektörü için kritik öneme sahiptir. Operasyonel maliyetlerin dörtte birini oluşturan yakıt maliyetlerini azaltmanın ve dolaylı olarak olumsuz çevresel etkiyi de azaltmanın en uygulanabilir yolu, motor ve komponent verimliliklerini artırmaktır. Bu tez kapsamında öncelikle motor komponentlerinin gerçek verimlilik değerleri ve gerçek iyileştirme potansiyelleri ortaya konmuştur. Böylelikle yapılacak iyileştirme çalışmalarının hangi komponente yoğunlaşacağı tespit edilebilmektedir. Bu durum operatörlere ya da tasarımcılara hem zaman anlamında hem de ekonomik anlamda kazanç sağlayacaktır. Ayrıca önlenebilir ekonomik maliyetler de komponent bazında hesaplanmıştır. Bu şekilde motor komponentlerinin ekonomik açıdan da performansları kıyaslanabilmekte ve iyileştirme çalışmaları daha isabetli olarak gerçekleştirilebilecektir. Bununla birlikte eksergo-ekonomik faktör gibi boyutsuz parametreler yardımıyla benzer sistemleri karşılaştırma imkanı doğmaktadır. Örneğin bir operatör gereksinimleri doğrultusunda en uygun motor seçimini termodinamik ve ekonomik parametreleri kıyaslayarak daha rahat belirleyebilecektir. Çalışmanın 6 farklı tork değeri için yapılmış olması ise, motorun farklı uçuş fazlarındaki performansını değerlendirme imkanı vermiştir. Böylelikle bütün bir uçuş görev profili için ekonomik maliyetlerin ve olumsuz çevresel etkinin azaltılması sağlanabilecektir.

1.4. Tez Çalışma Planı

İkinci bölümde tez çalışmasında incelenmiş olan turboprop motor sistemi ve alt komponentleri şematik diyagramlar ve kontrol hacimleri verilerek detaylı olarak tanıtılmıştır. Komponentlere ait kontrol hacimleri ile ekserji denge denklemleri ve verim ifadeleri de bu bölümde verilmiştir.

Üçüncü bölümde detaylı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Ekserji analizi yaygın kullanılan bir yöntem olduğu için öncelikli olarak havacılık alanındaki ekserji analizi uygulamaları incelenmiştir. Bölüm 3.1’de havacılıkta kullanılan farklı motor tipleri üzerine yapılmış ekserji analizi çalışmaları ve sonuçları paylaşılmıştır. Daha sonra Bölüm 3.2’de havacılık alanındaki eksergo-ekonomik analiz uygulamaları incelenmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir. Bölüm 3.3’te ise ileri ekserji analizi konusundaki literatürde bulunan az sayıdaki havacılık motoru uygulamaları incelenmiştir. Son olarak Bölüm 3.4’te ileri eksergo-ekonomik analizin havacılık uygulamaları ile alakalı ulusal ve uluslararası literatür detaylı olarak araştırılmış ve bu tez çalışmasının literatürdeki ilk çalışma olacağı tespit edilmiştir.

Dördüncü bölümde tez çalışması kapsamında kullanılan yöntemler detaylı olarak açıklanmıştır. Tezin amaçları doğrultusunda turboprop motorun termodinamik ve ekonomik performansını belirlemek için kullanılan ekserjetik metodoloji sırasıyla açıklanmıştır. Öncelikle Bölüm 4.1’de analizler sırasında yapılan kabuller verilmiştir. Daha sonra Bölüm 4.2’de ekserji analizine ait temel denklemler, kimyasal yanma denklemleri ve özgül ısı bağıntıları gösterilmiştir. Bölüm 4.3’te komponent ve ekserji maliyetlerinin hesaplanmasında kullanılan denklemler verilmiştir. Bölüm 4.4’te ileri ekserjinin nasıl gerçekleştirileceği ve hesaplamaların nasıl yapılacağı gösterilmiştir. Bölüm 4.5’te ise ileri eksergo-ekonomik analizin aşamaları anlatılarak maliyetlerin nasıl bileşenlerine ayrılacağı denklemler yardımıyla ifade edilmiştir.

Beşinci bölümde, gerçekleştirilmiş olan bütün analizler sonrasında elde edilen tüm sonuçlar aşama aşama paylaşılmış ve yorumlanmıştır. Bölüm 5.1’de geleneksel ekserji analizi sonucu elde edilen ekserji verimi, iyileştirme potansiyeli ve izafi tersinmezlik oranı değerleri her bir komponent ve 6 farklı tork değeri için ayrı ayrı verilmiştir. Bölüm 5.2’de eksergo-ekonomik analiz sonucu elde edilen ekipman maliyetleri ve ekserji maliyetleri verilmiştir. Bölüm 5.3’te ileri ekserji analizi sonucu önlenabilir/önlenemez ve içsel/dışsal şeklinde kategorize edilen ekserji yıkımları, her bir tork değeri için belirlenen önlenemez ve ideal şartlar da belirtilerek paylaşılmıştır. Daha

sonra kategorize edilen bu ekserji yıkımlarının birleştirilmesi ile elde edilen önlenemez/içsel, önlenemez/dışsal, önlenebilir/içsel ve önlenebilir/dışsal ekserji yıkımları verilmiştir. Bölüm 5.4'te ileri eksergo-ekonomik analiz sonucunda elde edilen ekserji maliyetlerinin ve komponent maliyetlerinin bileşenleri paylaşılmıştır. Bölüm 5.5'te ekserji analizi ve eksergo-ekonomik analiz sonucunda elde edilen 3 parametre seçilmiş ve bunların ileri ekserji analizi sonucunda elde edilen muadilleri ile kıyaslaması yapılmıştır. Sonuçlar her bir tork değeri için ayrı ayrı yorumlanmıştır.

Altıncı bölümde ise tez çalışmasının son bir değerlendirmesi yapılmıştır.



2. LİTERATÜR TARAMASI

Akademik literatür taranırken öncelikle havacılık motorlarına uygulanan ekserji analizleri incelenmiştir. Daha sonra sırasıyla havacılık motorları üzerine yapılmış olan eksergo-ekonomi, ileri ekserji analizi ve ileri eksergo-ekonomi analizleri detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan bu detaylı inceleme sonucunda, bu tez çalışmasının turboprop motorlar, daha genel bir ifadeyle uçak motorları üzerine yapılacak olan *ilk ileri eksergo-ekonomi analizi* uygulaması olduğu anlaşılmıştır.

2.1. Havacılık Alanında İleri Ekserji Analizi Uygulamaları

Hayes ve ark. [11] tarafından yapılan çalışmada havacılık alanında ekserjinin şimdiye dek uygulama alanı bulduğu çalışmalar detaylı olarak incelenmiştir. Ekserji analizinin uçak tasarımında sadece güç sistemlerini değil, bütün alt sistemleri de kapsayacak şekilde bütüncül bir bakış açısıyla mükemmel bir optimizasyon aracı olacağı ifade edilmiştir. Tasarım sürecinde uçak gövdesi ve buna bağlı tersinmezlikler de dahil olmak üzere, komple uçak sistemlerinin ekserji analizi yardımıyla bir nevi ekserji yıkım ya da entropi üretimine göre haritalandırılabileceği belirtilmiştir. Bu sayede oluşturulan ortak matematiksel dil ile farklı uçak tasarımlarının mukayese edilebileceği örneklerle izah edilmiştir. Ayrıca ekserji bazlı çok disiplinli tasarım yöntemlerinin gelecekteki hava araçlarının tasarımında anahtar rol oynayabileceği yapılan araştırmalardan örnekler verilerek detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Balli ve ark. [12] tarafından askeri eğitim uçaklarında kullanılan bir eğitim uçağının ekserjetik performansına yakıtın etkisi incelenmiştir. Öncelikle test koşullarında elde edilen veriler ile jet yakıtı kullanan motorun ekserjetik performansı hesaplanmış, daha sonra hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı varsayılarak parametrik olarak ekserjetik hesaplamalar tekrar yapılmıştır. Sonuçlar kıyaslandığında, hidrojen kullanımının ekserjetik verimi %15,40'tan %14,33'e düşürdüğü tespit edilmiştir. Sonuç olarak hidrojenin yakıt olarak kullanımının turbojet motor ve komponentlerinin ekserjetik performansını düşürdüğü ifade edilmiştir. Bununla birlikte egzoz emisyonlarının 0,509 kg/s değerinden 0,0045 kg/s değerine düştüğü gözlemlenmiştir.

Coban ve ark. [13] askeri bir helikopterlerde kullanılan bir turboşaft motorun farklı yük değerlerindeki ekserji analizini gerçekleştirmiştir. 284 Nm, 436 Nm, 547 Nm

ve 579 Nm yük değerleri için yapılan bu analizler sonucunda en yüksek ekserji yıkım oranı %88,81 ile yanma odasında ve en düşük oran ise % 0,75 ile yüksek basınç türbininde elde edilmiştir (436 Nm için).

Zhang ve ark. [14] SABRE (Synergistic Air-Breathing Rocket Engine) adı verilen ve çift modda çalışabilen bir roket motoru için ekserji verimi değerlerini kullanarak termodinamik verimlilik analizi gerçekleştirmiştir. Bu motorlar belli bir irtifa ve hız değerine kadar (26 km ve 5 Mach) hava soluyan klasik bir turbojet motor gibi davranırken, bu limitlerin üzerinde roket motor moduna geçmekte ve hızla atmosferi terk etmektedirler.

Reddy ve Poondla [15] tarafından yapılan çalışmada, güneş enerjisi ile güçlendirilmiş küçük bir insansız hava aracının performansı analiz edilirken metot olarak ekserji analizi seçilmiştir. Bunun sebebi olarak da, ekserji analizinin enerji kaynaklarının çevreye olan etkisini incelemede önemli bir araç olduğu ve aynı zamanda tasarımın gerçekleştirilebilir olup olmadığını anlamada yardımcı rol oynadığı ifade edilmiştir. Sonuç olarak tasarımın enerji verimliliği %11, ekserji verimliliği ise %10 olarak hesaplanmıştır.

Bender [16] tarafından yapılan bu çalışmada sivil uçaklarda toplam enerji tüketiminin %3-5'inden sorumlu olan ECS (Enviromental control system) yani uçak iklimlendirme sisteminin 4 uçuş fazı için (take-off, cruise, landing and taxi) enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Bu çalışmada ekserji bazlı analizlerin karar verme aracı olarak avantajlı gözüktükleri ve sistem ile komponentlerini analiz etmek ve karşılaştırmak için güçlü bir metot olarak seçilebileceği ifade edilmektedir. Ayrıca ekserji yıkım oranlarının büyük oranda komponent içerisinden geçen kütle ve enerji akımına bağlı olmasından dolayı komponent bazında kıyaslamanın sağlıklı bir değerlendirme imkanı vermeyeceğini, bunun yerine ekserji verimlerini kıyaslayarak komponentler bazında daha doğru bir kıyaslama yapılabileceği belirtilmiştir. Son olarak aynı çalışmada ısı dönüştürücü (heat exchanger) örneği verilerek havacılık komponentleri üzerinde çalışmanın zorluğu izah edilmiştir.

Balli [17] tarafından yapılan çalışmada Boeing 747 serilerinde kullanılan ve bir yüksek by-pass turbofan motoru olan PW4056 motorunun, ekserji metodolojisi kullanılarak sürdürülebilirlik değerlendirilmesi yapılmıştır. 12 farklı sürdürülebilirlik parametresi iki farklı mod için ayrı ayrı hesaplanmış ve bu sayede benzer sistemlerle kıyaslama yapılabileceği ifade edilmiştir.

Şöhret ve ark. [18] tarafından yapılan çalışmada yakıt olarak hidrojen kullanan bir ramjet motorunun enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak giriş lülesi, yanma odası, egzoz lülesi ve komple motor için ekserji verimliliği değerleri sırasıyla %3,88, %7,62, %0,03 ve %8,85 olarak hesaplanmıştır.

2.2. Havacılık Alanında Eksergo-Ekonomik Analiz Uygulamaları

Balli ve Hepbasli [19] T56 turboprop motorunun 4 farklı yük değeri altındaki performansını incelemiştir. Bu incelemeyi yaparken 2 farklı senaryo üzerinden sonuçları tartışmışlardır. İlk senaryoya göre (Case A) sadece şaft gücü enerji ve ekserji denge denklemlerinde göz önüne alınırken, ikinci senaryoya göre (Case B) şaft gücü ve egzoz gazlarının kinetik enerji ve ekserjisi de denge denklemlerinde göz önüne alınmıştır. Yazarlar her ne kadar literatürde birinci senaryonun daha yaygın kullanıldığını belirtse de, ikinci senaryonun daha isabetli sonuçlar vereceğini ifade etmişlerdir. Sonuçlara göre egzoz gazlarının ekserji oranlarının hesaba katılması ekserji verimlerini artırırken, ekserjetik iyileştirme potansiyellerini ise azaltmıştır. Ayrıca şaft gücüne ait birim ekserji maliyetinin, artan şaft gücüyle birlikte 76,34 USD/GJ'den 58,32 USD/GJ'e düştüğü gözlenmiştir. Yanma odasının içerisinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar dolayısıyla en düşük eksergo-ekonomik faktöre sahip olduğu belirtilmiştir. Yüksek güç isteyen kalkış (take-off) modunda yanma odasına ait eksergo-ekonomik faktör değerinin, %75 moduna göre %5,3 den %4,2'ye düştüğü rapor edilmiştir. Bu yüzden yanma odasına ek ilk yatırım maliyeti eklenip, komponentin eksergo-ekonomik faktörünü artırmak için çaba sağlanabileceği ifade edilmiştir.

Turan ve Aydın [20] bir turbofan uçak motoru olan CF6-80C2'den türetilmiş ve kojenerasyon tesislerinde kullanılan LM6000 motorunun eksergo-ekonomik analizini gerçekleştirmiştir. Motorun ekserjetik veriminin %39 olduğu ifade edilirken, motora ait birim ekserji maliyeti ve ekserji maliyet oranları sırasıyla 24,37 USD/GW ve 3798,80 USD/sa olarak rapor edilmiştir. Yüksek basınç türbini %35,97 ile en yüksek eksergo-ekonomik faktöre sahip komponent olarak ifade edilmiştir. Bu komponenti %21,90 ve %17,24 değerleri ile sırasıyla düşük basınç kompresörü ve düşük basınç türbini takip etmiştir. Yanma odası ve yüksek basınç türbininin ise diğer komponentlere kıyasla daha düşük eksergo-ekonomik faktöre sahip olduğu raporlanmıştır: sırasıyla %2,25 ve %4,67.

Aygün ve Turan [21] PW4000 turbofan motoruna ait 19 farklı RPM değeri için eksergo-ekonomi analizini gerçekleştirmiştir. Sonuçlara göre, motorun güç seviyesi arttıkça eksergo-ekonomik faktörün azaldığı gözlenmiştir. Yanma odasının bütün güç değerlerinde en düşük eksergo-ekonomik faktöre sahip olduğu ifade edilmiştir ve değeri %5,36-%2,15 arasında değişmektedir. Düşük basınç türbini için ise eksergo-ekonomik faktörün değişen güç değerinden daha fazla etkilendiği rapor edilmiştir. Bu değer farklı RPM değerleri için %79,55-%21,07 arasında değişmektedir. Ekserji yıkım maliyeti en yüksek ve en düşük komponentler sırasıyla yanma odası (1688 USD/sa) ve düşük basınç türbini (288 USD/sa) olarak tespit edilmiştir.

Turgut ve ark. [22] turbofan bir uçak motorunun eksergo-ekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. İzafi maliyet farkının ve eksergo-ekonomik faktörün bakım/işletme maliyeti ve yıllık çalışma süresi ile değişimi de ayrıca incelenmiştir. Sonuçlara göre bakım/işletme maliyetinin, ilk yatırım maliyetine göre izafi maliyet farkı ve eksergo-ekonomik faktörü üzerinde daha az bir etkisi olduğu belirtilmiştir. Ayrıca yıllık çalışma süresinin izafi maliyet farkı ve eksergo-ekonomik faktörü üzerinde oldukça yüksek bir etkisi olduğu ifade edilmiştir. Bu etkinin özellikle motor komponentleri arasında en pahalı komponentler olan alçak basınç ve yüksek basınç kompresörlerinde daha fazla olduğu rapor edilmiştir.

Balli ve ark. [23] ise turbojet bir uçak motorunun eksergo-ekonomik analizini gerçekleştirmiştir. Sonuçlara göre, komponentler arasında en yüksek ilk yatırım maliyetine sahip komponent 69410 USD/sa gaz türbini olarak hesaplanmıştır. Bu komponenti 54687 USD/sa değeriyle hava kompresörü ve 21033 USD/sa değeriyle yanma odası takip etmektedir. Komponentlerin işletme/bakım maliyetleri ile toplam komponent maliyetlerindeki sıralama da bu şekilde belirtilmiştir. Motor istasyonlarının ekserji maliyet akımları değerlendirildiğinde en yüksek değer 1005,513 USD/sa ile 4 nolu istasyonda (yani yanma odası çıkışı/türbin girişi) gözlenmiştir. Birim ekserji maliyeti ise en yüksek 137,634 USD/GW değeriyle 2 nolu istasyonda (yani kompresör çıkışı/yanma odası girişi) tespit edilmiştir.

Sahu ve ark. [24] tarafından yapılan çalışmada, bizim de çalışmamızda incelediğimiz motora oldukça benzer bir motor çeşidi incelenmiştir: CT7-7A. Söz konusu motorun genel performansı ekserji, eksergo-ekonomi ve eksergo-çevresel analizler yardımıyla değerlendirilmiştir. CT7-7A motoruna ait ekserji verimi %31,50 olarak hesaplanırken, en yüksek ekserji yıkımı ve en düşük ekserji verimi yanma odasında

gözlenmiştir. Yazarlar tarafından ekserji verimliliği, ekserji kayıp ve yıkım oranları, çevresel etki maliyeti, sürdürülebilirlik indeksi ve sürdürülebilirlik maliyet indeksi gibi ekserjetik sürdürülebilirlik parametrelerinin, hava araçlarının gerçekleştireceği operasyonlar için en uygun motor seçiminde önemli rol oynayacağı ifade edilmiştir.

Coban ve ark. [25] küçük insansız hava araçları için üretilmiş olan, maksimum 177 N thrust değerine sahip küçük bir turbojet motorun ekserji ve eksergo-ekonomi analizlerini yapmışlar ve bu analizi yakıtı biyodizel olarak değiştirerek tekrarlamışlardır. Sonuçlara göre yüksek basınç türbininin iyileştirme potansiyelinin neredeyse sıfır değerine yakın olduğu anlaşılmıştır. Diğer komponentlerin iyileştirme potansiyelinin biyodizel kullanıldığı durumda arttığı gözlemlenmiştir. Biyodizelin maliyet akımının (8,22 USD/sa değeriyle), geleneksel havacılık jet yakıtının maliyet akımına göre (7,07 USD/sa) daha fazla olduğu tespit edilmiş ve bu durumda motor operasyonları için tamamen saf biyodizel kullanımının ekonomik olarak uygulanabilir olmadığı yazarlar tarafından rapor edilmiştir.

2.3. Havacılık Alanında İleri Ekserji Analizi Uygulamaları

Şöhret ve ark. [26] tarafından yapılan çalışmaya göre dünya üzerindeki insan nüfusunun giderek artması ve buna karşılık hızla azalan enerji kaynakları, insanoğlu için daha verimli enerji sistemleri geliştirmeyi ve ayrıca enerji tüketimini sürdürülebilir bir şekilde yapmayı bir zorunluluk haline getirmiştir. Bu noktada ekserji analizinin birinci ve ikinci yasa bakış açılarını birleştirerek, enerji sistemlerinin performanslarının değerlendirilmesinde önemli bir araç haline geldiği ifade edilmiştir. Yazarlara göre, ekserji analizinin gaz türbinli motor teknolojisinin gelişimindeki önemi bazı araştırmacılar tarafından vurgulanmasına karşın, endüstri tarafından henüz tam anlamıyla anlaşılamamıştır. Bu çalışmada **JT3D turbofan motorunun çekirdek kısmına** ileri ekserji analizi uygulanmıştır. Öncelikle motor komponentlerine ait ekserji yıkım oranları belirlenmiştir. Daha sonra bunlar içsel/dışsal ve önlenebilir/önlenemez şeklinde bölümlere ayrılmıştır. Bu sayede daha gerçekçi ve daha isabetli sonuçlar elde edileceği ifade edilmiştir. Sonuç olarak;

- Ekserji yıkımının %81'inin dışsal olduğu ve bu nedenle komponentler arası etkileşimin zayıf olduğu,

- Ekserji yıkımının %94'ünün önlenemez olduğu, yani teorik limitlere yaklaşıldığı ve bu nedenle sistemin iyileştirme potansiyelinin düşük olduğu,
- Maksimum iyileştirme potansiyelinin yanma odasında ait olduğu, çünkü en yüksek önlenebilir ekserji yıkımının 2,716 MW'lık değer ile bu komponente ait olduğu,
- İyileştirme potansiyellerinin daha çok komponentlerin kendileri ile alakalı olduğu, çünkü önlenemez içsel ekserji yıkımlarının önlenemez dışsal ekserji yıkımlarından fazla olduğu,

ifade edilmiştir. Tüm bu nedenlerden dolayı iyileştirme çalışmalarının yanma odasına yoğunlaşabileceği rapor edilmiştir.

Balli [27] tarafından yapılan çalışmada, **askeri bir uçağa ait J57 tipi çift şaftlı turbojet** motoruna ileri ekserji analizi uygulanmıştır. Bu çerçevede öncelikle her bir motor komponenti için ana ekserji parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra komponentlere ait ekserji yıkım oranları içsel/dışsal ve önlenebilir/önlenemez şeklinde parçalara ayrılmıştır. Analiz motora ait iki mod için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir: MIL modu (ardyanmasız maksimum itki modu) ve AB modu (ardyanmalı maksimum itki modu). Araştırma sonucunda motor komponentleri arasındaki karşılıklı etkileşimlerin anlaşılması ve gerçekçi iyileştirme potansiyellerinin hesaplanabilmesi amaçlanmıştır. Sonuç olarak;

- Ekserji yıkımının MIL modunda %83'ünün, AB modunda %94'ünün dışsal olduğu ve bu nedenle komponentler arası etkileşimin zayıf olduğu,
- Ekserji yıkımının MIL modunda %93'ünün, AB modunda %98'inin önlenemez olduğu, yani teorik limitlere yaklaşıldığı ve bu nedenle sistemin iyileştirme potansiyelinin düşük olduğu,
- Yüksek basınç kompresörü (HPC), yanma odası (CC) ve ardyanma egzoz lülesinin (ABED) iyileştirme potansiyellerinin daha çok kendilerinden kaynaklı olduğu çünkü bu komponentlerin önlenemez içsel ekserji yıkımlarının, önlenemez dışsal ekserji yıkımlarından yüksek olduğu,

ifade edilmiştir. Çalışma sonucu elde edilen veriler ışığında, iyileştirme çalışmalarının düşük basınç kompresörü (LPC), yüksek basınç kompresörü (HPC), yanma odası (CC) ve ardyanma egzoz lülesine (ABED) yoğunlaşabileceği tavsiye edilmiştir.

Balli [28] tarafından yapılan çalışmada, **JT3D-3B tipi çift şaftlı turbofan** motoruna ileri ekserji analizi uygulanmıştır. Turbofan motorun ana komponentleri sırasıyla Fan (FAN), düşük basınç kompresörü (LPC), yüksek basınç kompresörü (HPC), yanma odası (CC), yüksek basınç türbini (HPT), düşük basınç türbini (LPT) ve egzoz lülesi (ED) şeklindedir. Analiz kapsamında öncelikle her bir motor komponenti için ana ekserji parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra komponentlere ait ekserji yıkım oranları içsel/dışsal ve önlenebilir/önlenemez şeklinde parçalara ayrılmıştır. Sonuç olarak;

- Ekserji yıkımının %73'ünün dışsal olduğu ve bu nedenle komponentler arası etkileşimin zayıf olduğu,
- Ekserji yıkımının %90'ının önlenemez olduğu, yani teorik limitlere yaklaşıldığı ve bu nedenle sistemin iyileştirme potansiyelinin düşük olduğu,
- FAN, LPC, HPC LPT ve ED komponentlerinin önlenebilir dışsal ekserji yıkım oranlarının diğer komponentlere nazaran daha yüksek olduğu,
- İyileştirme potansiyellerinin daha çok komponentlerin kendileri ile alakalı olduğu, çünkü önlenemez içsel ekserji yıkımlarının önlenemez dışsal ekserji yıkımlarından fazla olduğu,

ifade edilmiştir. Çalışma sonucu elde edilen veriler ışığında, iyileştirme çalışmalarının fan (FAN) ve yanma odası (CC) komponentlerine yoğunlaşabileceği tavsiye edilmiştir.

Balli tarafından yapılan çalışmada [29], **PT6-62 tipi çift şaftlı turboprop** motoruna ileri ekserji analizi uygulanmıştır. Turboprop motorun ana komponentleri aksesuar dişli kutusu (ADG), aksesuar dişli kutusu şaftı (ADMS), hava kompresörü (AC), yanma odası (CC), gaz jeneratör türbini (GT), gaz jeneratör türbin şaftı (GTMS), güç türbini (PT), güç türbini şaftı (PTMS), pervane devir düşürücü dişli kutusu (PGB) ve pervane şaftı (PMS) şeklindedir. Analiz kapsamında öncelikle her bir motor komponenti için ana ekserji parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra komponentlere ait ekserji yıkım oranları içsel/dışsal ve önlenebilir/önlenemez şeklinde parçalara ayrılmıştır. Sonuç olarak;

- Ekserji yıkımının %86'sının dışsal olduğu ve bu nedenle komponentler arası etkileşimin zayıf olduğu,
- Ekserji yıkımının %94'ünün önlenemez olduğu, yani teorik limitlere yaklaşıldığı ve bu nedenle sistemin iyileştirme potansiyelinin düşük olduğu,
- İyileştirme potansiyellerinin daha çok komponentlerin kendileri ile alakalı olduğu, çünkü önlenemez içsel ekserji yıkımlarının önlenemez dışsal ekserji yıkımlarında fazla olduğu,

ifade edilmiştir. Geleneksel ekserji analizi sonuçlarına göre, CC 601,32 kW ile en yüksek ekserjetik iyileştirme potansiyeline sahip komponent olarak gözükmemektedir. Ancak ileri ekserji analizi sayesinde AC ve PT'nin en yüksek gerçekçi iyileştirme potansiyeline sahip oldukları görülmektedir. Çünkü bu komponentlerin iyileştirilebilir ekserji yıkım oranları en yüksek olacak şekilde sırasıyla 52,30 kW ve 21,60 kW olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucu elde edilen veriler ışığında, iyileştirme çalışmalarının fan (FAN) ve yanma odası (CC) komponentlerine yoğunlaşabileceği tavsiye edilmiştir.

Yüksel ve ark. [30] askeri bir turbojet motora iki farklı yakıt kullanım senaryosu (JP-8 ve hidrojen) üzerinden ileri ekserji analizi uygulamışlardır. Bremze ortamında JP-8 yakıt kullanılarak, MIL ve AB (ardyanma) olmak üzere iki farklı mod için alınan veriler kullanılarak çalışma gerçekleştirilmiştir. Hidrojen kullanıldığı durumdaki değerlerin parametrik olarak elde edildiği ifade edilmiştir. Yazarlar tarafından hidrojen kullanımında motorun daha düşük verimle çalıştığı ancak daha az sera gazı emisyonuna yol açtığını raporlanmıştır. JP-8 kullanımında motor ekserji verimi MIL modu için %30,85, AB modu için %16,98 olarak; hidrojen kullanımında ise MIL modu için %28,62, AB modu için %15,33 olarak hesaplanmıştır. Ekserji yıkımlarının büyük kısmının önlenemez/içsel olduğu ve motorun düşük bir iyileştirme potansiyeli olduğu ifade edilmiştir.

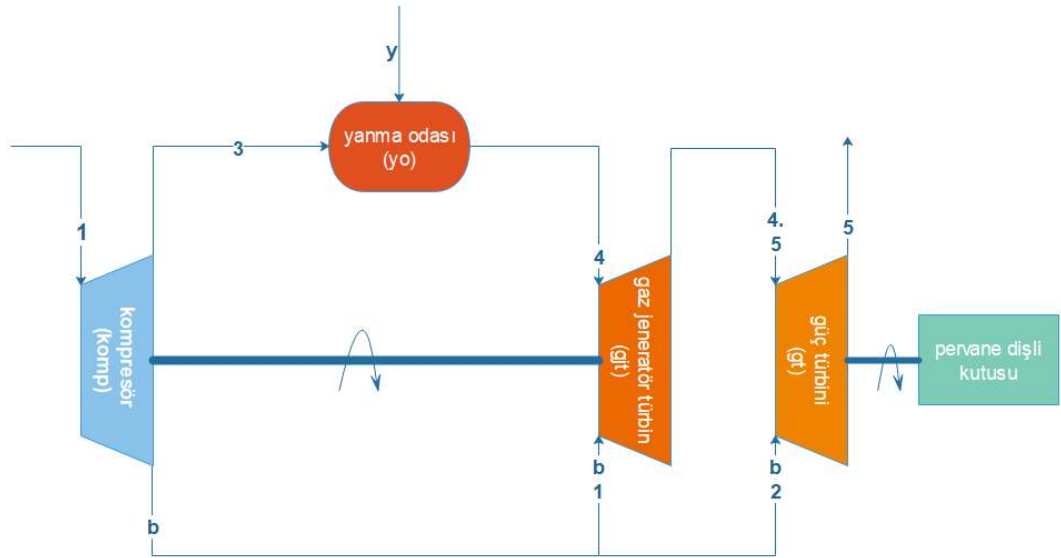
2.4. Havacılık Alanında İleri Eksergo-Ekonomik Analiz Uygulamaları

Daha önce de belirtildiği gibi, yapılan detaylı literatür taraması sonucunda havacılık alanında ileri eksergo-ekonomik analiz ile alakalı ulusal ve uluslararası literatürde herhangi bir çalışma bulunamamıştır. Bu tez çalışması bu alanda literatürdeki ilk çalışmadır.

3. TURBOPROP MOTOR SİSTEM TANIMI

Bu tez çalışmasında incelenmiş olan turboprop motor (CT7-9C) Su-80 ve Saab 340 gibi bölgesel yolcu uçakları ile Casa CN 235 gibi kargo uçaklarında kullanılmaktadır. Ayrıca bu motorun temel aldığı T 700 turboşaft motoru da askeri ve sivil birçok helikopter modelinde kullanılmaktadır. Geliştirildiği günden itibaren 1500'ten fazla uçakta kullanılmış olan CT7, şu ana kadar dünya genelinde 30 milyon saatin üzerinde toplam uçuş saatine sahiptir [31].

Söz konusu turboprop motora ait şematik diyagram Şekil 3.1'de gösterilmiştir. CT7-9C turboprop motorun ana komponentleri sırasıyla kompresör, yanma odası, gaz jeneratör türbin ve güç türbinidir. Söz konusu motor iki şaftlı bir motor olup serbest türbine sahiptir. Bunun anlamı, türbinin iki kısımdan oluşması ve pervanenin bir dişli kutusu üzerinden ayrı bir türbin aracılığıyla döndürülmesidir [32].



Şekil 3.1. Turboprop motor şematik gösterimi

Turboprop motor sistemi iki ana bölüme ayrılarak değerlendirilebilir: soğuk kısım ve sıcak kısım. Soğuk kısım kompresörü içerirken; sıcak kısım yanma odası, gaz jeneratör türbin ve güç türbinden oluşmaktadır. Analizde yapılan hesaplamalarda iş yapan akışkan

soğuk kısımda hava, sıcak kısımda ise egzoz gazı olarak kabul edilmiştir. Bu ayrım kimyasal yanma denklemleri oluşturulurken önem arz etmektedir [33].

3.1. Kompresör

Kompresör 6 kademedan oluşmaktadır: 5 eksenel kademe ve 1 santrifüj kademe. Kompresörden çıkan havanın bir kısmı contaların basınçlandırılması ve sıcak kısımdaki komponentlerin soğutulması için kullanılmaktadır. Kompresör bağlı bulunduğu bir şaft vasıtasıyla gaz jeneratör türbin tarafından döndürülmektedir. Gaz türbininin ürettiği gücün %1'inin sürtünmeler dolayısıyla kaybedildiği varsayılmaktadır. Kompresöre ait kontrol hacmi Şekil 3.2'de gösterilmiştir. F-P (fuel-product/yakıt-ürün) kuralına göre ekserji dengesini yazacak olursak; sistemin yakıt ekserji oranı ($\dot{Ex}_{yakıt}$), ürün ekserji oranı ($\dot{Ex}_{ürün}$) ile ekserji yıkım oranının ($\dot{Ex}_{yık}$) toplamına eşittir [34].

$$\dot{Ex}_{yakıt} = \dot{Ex}_{ürün} + \dot{Ex}_{yık} \quad (3.1)$$

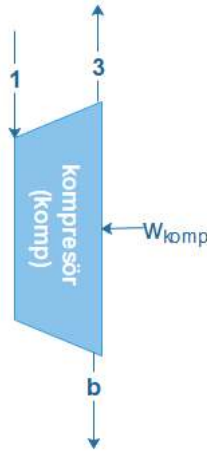
Kompresöre ait ekserji denge denklemleri aşağıda verilmiştir:

$$\dot{Ex}_{yakıt} = \dot{W}_{komp} \quad (3.2)$$

$$\dot{Ex}_{ürün} = \dot{Ex}_3 + \dot{Ex}_b - \dot{Ex}_1 \quad (3.3)$$

$$\eta_{ex,komp} = \frac{\dot{Ex}_3 + \dot{Ex}_b - \dot{Ex}_1}{\dot{W}_{komp}} \quad (3.4)$$

$$\dot{Ex}_{yık} = \dot{W}_{komp} + \dot{Ex}_1 - \dot{Ex}_3 - \dot{Ex}_b \quad (3.5)$$



Şekil 3.2. Kompresör kontrol hacmi

Kompresörden motorun sıcak kısmının soğutulması amacıyla çekilen hava yanma sürecine dahil olmaz. Bu amaçla kullanılan hava, itkinin ve motorun ısı veriminin düşmesine sebep olmaktadır. Bu çalışmada kompresör havasının %5'inin türbin kanatçıklarının soğutulması amacıyla kullanıldığı varsayılmıştır. Kompresör mekanik olarak bir şaft vasıtasıyla direkt olarak bağlı bulunduğu gaz jeneratör türbin tarafından döndürülmektedir. Bununla beraber gaz jeneratör türbindeki entalpi düşüşü, kompresörde meydana gelen entalpi artışına eşit değildir. Bunun sebepleri arasında sürtünme kaynaklı kayıplar ve dönel kanatçıkların uçlarında meydana gelen hava akışı gösterilebilir. Ayrıca motor üzerindeki aksesuarların da gaz jeneratör türbinin döndürmüş olduğu şafttan gücünü alması, bu eşitsizliğin sebepleri arasında gösterilebilir. İncelenen motorda 22,5 kW'lık bir güç aksesuarların tahrik edilmesi amacıyla kullanılmaktadır.

3.2. Yanma Odası

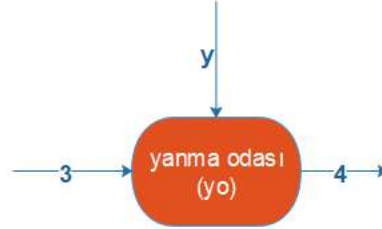
Yanma odasına giren ve çıkan akışlar Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Kompresörden elde edilen yüksek basınçtaki hava, yanma odasında yakıtla karıştırılarak yanma işlemi gerçekleştirilmektedir. Kararlı bir yanma elde edebilmek için yakıt-hava karışımı uygun oranda olmalıdır. Yanma odasına ait ekserji denklemleri aşağıda verilmiştir:

$$\dot{E}x_{yakıt} = \dot{E}x_y \quad (3.6)$$

$$\dot{E}x_{ürün} = \dot{E}x_4 - \dot{E}x_3 \quad (3.7)$$

$$\eta_{ex,komp} = \frac{\dot{E}x_4 - \dot{E}x_3}{\dot{E}x_y} \quad (3.8)$$

$$\dot{E}x_{yık} = \dot{E}x_y - (\dot{E}x_4 - \dot{E}x_3) \quad (3.9)$$



Şekil 3.3. Yanma odası kontrol hacmi

3.3. Gaz Jeneratör Türbin

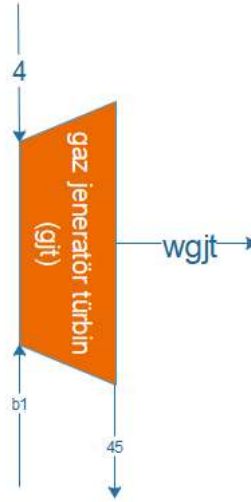
CT7-9C turboprop motorun ana komponentlerinden olan gaz jeneratör türbin, 2 eksenel kademeden oluşmaktadır. Bağlı bulunduğu bir şaft vasıtasıyla kompresörü ve motor aksesuarlarını döndürür. Bu şaft %100 motor hızında 44700 rpm değerinde dönmektedir. Yanma odasında yakıt ve havanın bir araya gelip yanma işleminin gerçekleşmesinden sonra, sıcak gazlar yanma odasını terk eder ve gaz jeneratör türbine ulaşır. Burada gaz jeneratör türbine ait sabit ve dönel kanatçıklar arasında genişirler. Sabit ve dönel kanatçıkların ısıl dayanımları çok önemlidir ve motor tasarımında kritik parametrelerden biri olan türbin giriş sıcaklığının belirlenmesine direkt etki eder. Gelişmiş kaplama teknolojileri ve hava soğutma bu sıcaklığı artırmak için kullanılan yöntemlerdendir. Kompresör kademelerinden alınan hava burada türbin kanatçıklarının soğutulması amacıyla kullanılmaktadır. Gaz jeneratör türbine ait kontrol hacmi Şekil 3.4'te verilmiştir. Gaz jeneratör türbine ait ekserji denklemleri aşağıda verilmiştir:

$$\dot{E}x_{yakıt} = (\dot{E}x_4 + \dot{E}x_{b1}) - \dot{E}x_{45} \quad (3.10)$$

$$\dot{E}x_{ürün} = \dot{W}_{gjt} \quad (3.11)$$

$$\eta_{ex,gjt} = \frac{\dot{W}_{gjt}}{(\dot{E}x_4 + \dot{E}x_{b1}) - \dot{E}x_{45}} \quad (3.12)$$

$$\dot{E}x_{yık} = [(\dot{E}x_4 + \dot{E}x_{b1}) - \dot{E}x_{45}] - \dot{W}_{gjt} \quad (3.13)$$



Şekil 3.4 Gaz jeneratör türbin kontrol hacmi

Yanma odasından çıkan sıcak gazlar, gaz jeneratör türbin boyunca dönel kanatçıklara çarpar ve bu şekilde gazların sahip olduğu kinetik enerjinin büyük kısmı mekanik enerjiye çevrilmiş olur. Diğer bir ifadeyle; bu enerji transferi sonucunda gaz jeneratör türbin, dolayısıyla da kompresör döndürülmüş olur. Ayrıca kompresörle aynı şaft üzerinden güç alan ve motorun düzgün bir şekilde çalışması için gerekli olan yakıt kontrol ünitesi, yakıt pompası, yağ pompası ve jeneratör gibi aksesuarlar da bu sayede döndürülmüş olur. Gaz jeneratörden çıkan gazın toplam miktarı, yanma sonrası oluşan sıcak gazlar ile soğutma amaçlı kompresörden çekilen havanın toplam miktarına eşittir.

3.4. Güç Türbini

Güç türbini iki eksenel kademedен oluşmaktadır. Şekil 3.5'te güç türbinine ait kontrol hacmi bulunmaktadır. Gaz jeneratör türbinden çıkan gazlar güç türbini kademelerine yönlendirilir. Burada gazlar tekrar genişler ve sıcaklıkları biraz daha düşer. Dönel kanatçıklara çarpan gazlar türbini ve dolayısıyla türbinin bağlı olduğu şaftı döndürür. Bu sayede gazların kinetik enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülmüş olur. Güç türbini şaftı vasıtasıyla mekanik enerji pervane dişli kutusu üzerinden pervaneye aktarılır ve bu şekilde pervane döndürülmüş olur. Güç türbini görece çok yüksek devirlerde dönmektedir. Bu yüzden güç türbini şaftı direkt pervaneye bağlanmaz. Arada bir dişli kutusu bulunmaktadır. Bu dişli kutusu yardımıyla 15,9 oranında hız düşürülerek

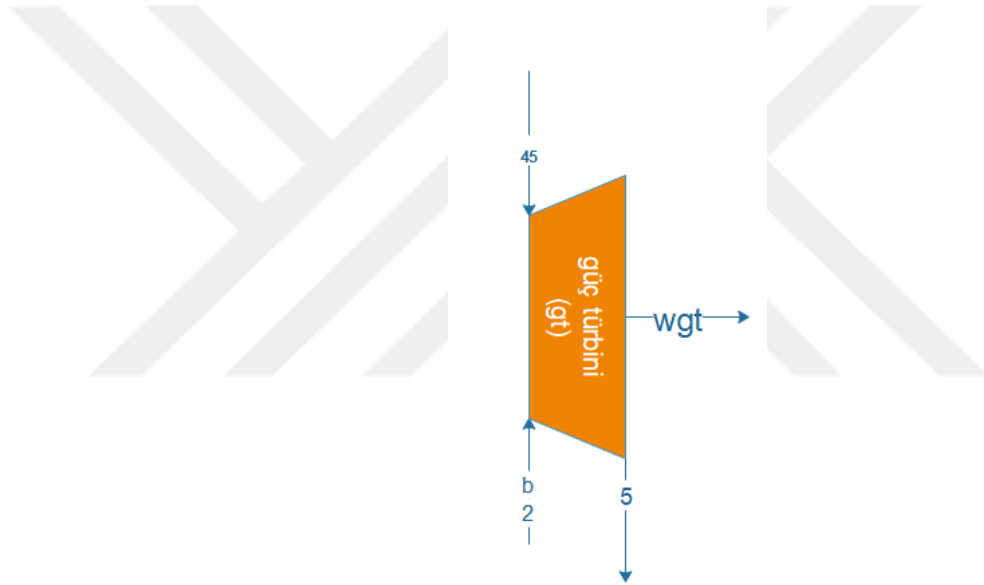
pervaneye aktarılır. Güç türbininin dönüş hızı %100 motor devrinde 22400 rpm'dir. Güç türbinine ait ekserji denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\dot{Ex}_{yakıt} = (\dot{Ex}_{45} + \dot{Ex}_{b2}) - \dot{Ex}_5 \quad (3.14)$$

$$\dot{Ex}_{ürün} = \dot{W}_{gt} \quad (3.15)$$

$$\eta_{ex,gt} = \frac{\dot{W}_{gt}}{(\dot{Ex}_{45} + \dot{Ex}_{b2}) - \dot{Ex}_5} \quad (3.16)$$

$$\dot{Ex}_{yık} = [(\dot{Ex}_{45} + \dot{Ex}_{b2}) - \dot{Ex}_5] - \dot{W}_{gt} \quad (3.17)$$

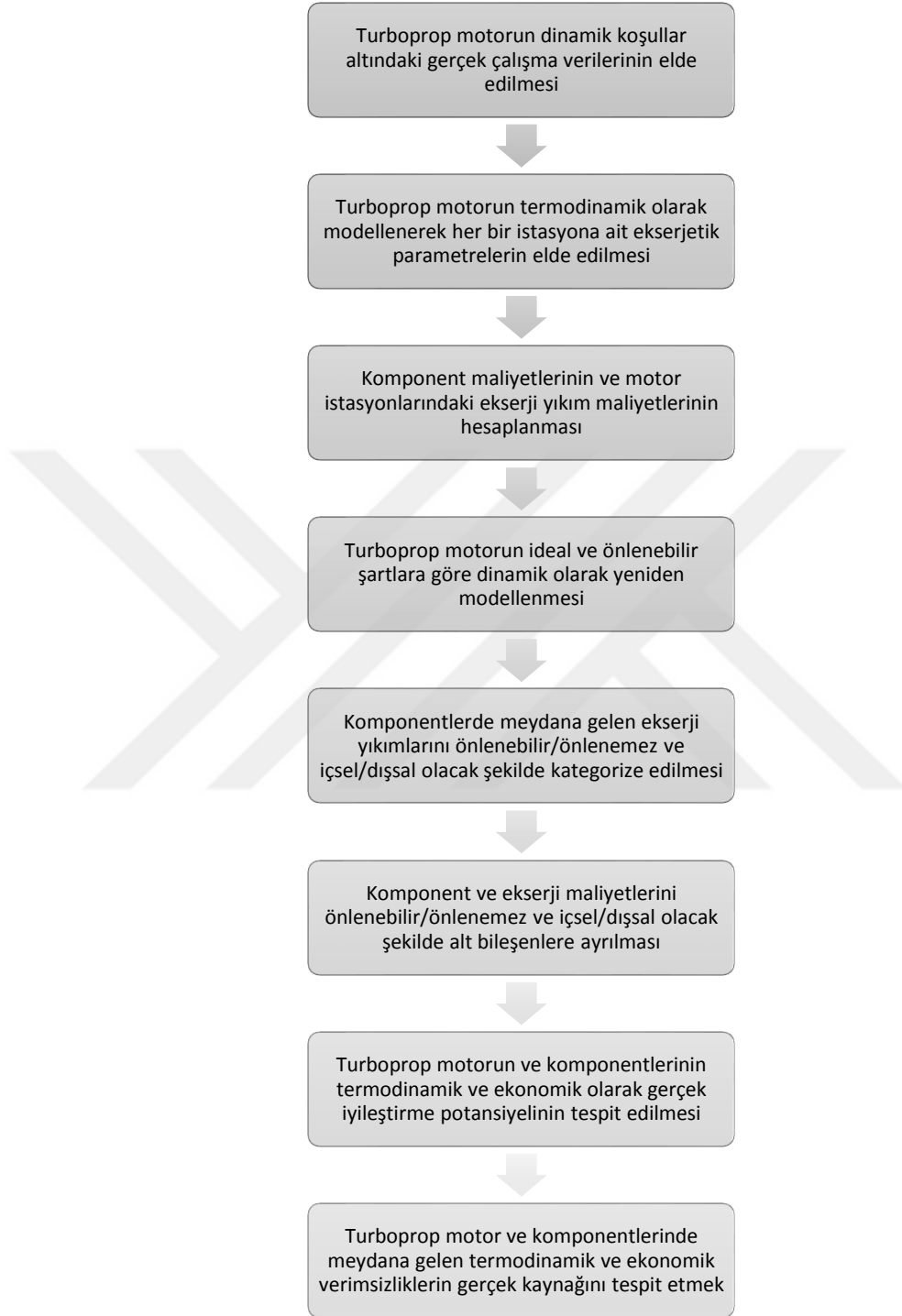


Şekil 3.5. Güç türbinine ait kontrol hacmi

4. YÖNTEM VE ANALİZ

Ekserji bazlı analizler enerji sistemlerinin performanslarını değerlendirmede önemli yöntemlerdendir. Bu analizler enerji dönüşüm sistemlerinin maksimum verimlilikte ve minimum olumsuz çevresel etki ile kullanılabilmesine olanak sağlar. Isıl sistemlerin performansları termodinamiğin I. Kanunu (enerji analizi) ve termodinamiğin II. Kanunu (ekserji analizi) yardımıyla incelenebilmektedir. Isıl sistemlerin verimi tasarım ve işletme sürecinde en önemli parametrelerden birisidir. Ekserji verimi bir sistemin ya da prosesin ideal şartlara ne kadar yakın olduğunun bir göstergesidir. Ekserji analizi ısı sistemlerinin termodinamik olarak değerlendirilmesine imkan tanır. Buradaki temel mantık, sistem içerisinde ve sistemi oluşturan komponentlerde meydana gelen verimsizliklerin, diğer bir ifadeyle tersinmezliklerin büyüklüklerinin nicel olarak ifade edilebilmesi ve oluşum yerlerinin ortaya konmasıdır. Böylelikle somut değerlendirmeler yapılabilmektedir. İleri ekserji analizi ise bu süreci bir ileri boyuta taşıyarak, tersinmezliklerin ‘gerçek iyileştirme potansiyellerini’ ve sistem içerisindeki etkileşimlerini belirlenmeye olanak sağlar [35].

Bu tez çalışmasında turboprop bir uçak motorunun termal ve ekonomik performansı ileri ekserji analizi yardımıyla incelenmiştir. Bunun gerçekleştirilebilmesi için gerekli aşamalar Şekil 4.1’de gösterilmiştir. İleri ekserji analizini uygulayabilmek için öncelikle sisteme ekserji analizi uygulanmıştır. Sonrasında ekonomik maliyet değerlendirmesi yapabilmek için eksergo-ekonomik analiz gerçekleştirilmiştir. Daha sonra geleneksel ekserji analizine göre daha isabetli sonuçlar verdiği literatürde belirtilmiş olan ileri ekserji analizi uygulanmıştır [36]. Son olarak ileri eksergo-ekonomik analiz sisteme uygulanarak çalışma tamamlanmıştır. Ayrıca çalışmada incelenen turboprop motorun dinamik koşullar altındaki performansı incelenerek kıyaslama yapma imkânı sağlanmıştır. Bu kapsamda 6 farklı tork değerindeki performans değerlendirmeleri ayrı ayrı yapılmıştır. Bu tork değerleri sırasıyla 240 Nm, 350 Nm, 485 Nm, 552 Nm, 580 Nm ve 630 Nm’dir.



Şekil 4.1. İleri eksergo-ekonomik analiz metodolojisinin uygulama akış şeması

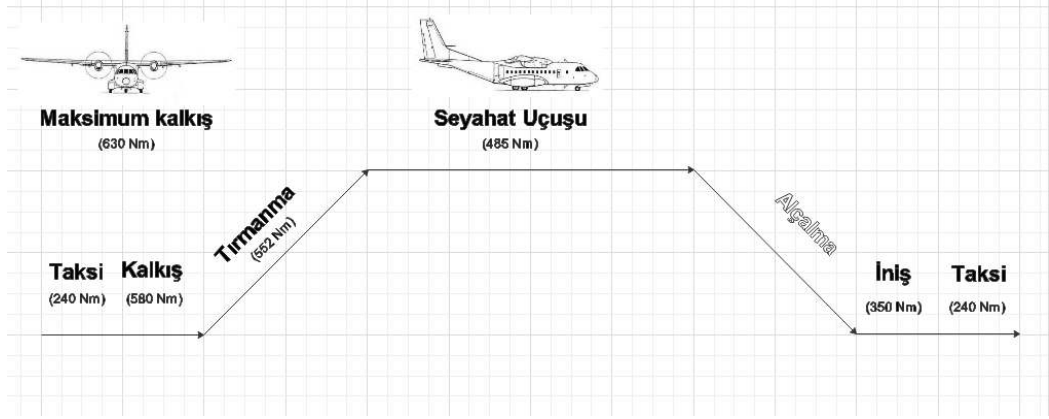
4.1. Uçuş Fazları

Uçuş fazlarını motor tork değerlerinin bir fonksiyonu olarak değerlendirirsek, 6 farklı tork değerine karşılık gelen uçuş fazları aşağıdaki gibi olacaktır [37].

- Taksi (Taxi) → 240 Nm
- İniş (Landing) → 350 Nm
- Seyahat uçuşu (Cruise) → 485 Nm
- Tırmanma (Climb) → 552 Nm
- Kalkış (Take-off) → 580 Nm
- Maksimum kalkış (Maximum take-off) → 630 Nm

Burada belirtilen taksi, uçağın uçuş öncesi/sonrası yerdeki hareketlerini kapsamaktadır. Motor çalıştırıldıktan, kalkış için pist başında uçağın hazır bulunduğu ana kadar geçen safha taksi olarak adlandırılmaktadır. Aynı şekilde uçağın piste teker koyduğu andan motoru kapatıncaya kadarki safha da taksi fazının bir parçasıdır. Diğer tork değerlerine göre motorun minimum güç seviyesinde çalıştırıldığı uçuş fazıdır.

Kalkış fazı uçağın pist başında koşturmaya başlayıp havalandığı uçuş fazıdır. Burada motor maksimum güç seviyesinde çalıştırılmaktadır. Tırmanma fazı ise, kalkıştan sonra uçağın yükseklik kazanmaya başladığı ve seyahat irtifasına ulaşıncaya kadar süren safhadır. Uçak seyahat irtifasına ulaştığı zaman seyahat uçuşu fazı başlamış olur. Alçalma safhasının başlamasına kadar süren ve uçuş fazları arasında en uzun uçuş fazı seyahat uçuşu fazıdır. İniş fazı, kalkış fazının tersi bir süreç olarak düşünülebilir. Bu safhada uçak piste teker koyarak yerle temas eder. Son olarak maksimum kalkış fazından bahsedilmektedir. Bu faz acil durumlarda kullanılmak üzere, motorun maksimum güç seviyesinin üzerinde çalıştırıldığı faz olarak tanımlanabilir. Buradaki amaç, örneğin kalkış esnasında bir motor kaybedildiğinde, kalan motorun 630 Nm tork değerine kadar çalıştırılması ve böylelikle güvenli bir şekilde kalkışı tamamlayıp iniş işleminin gerçekleşmesine yetecek kadar bir gücün uçağa sağlanmasıdır. Bu çalışmada incelenen en yüksek güç değeri bu faza aittir. Uçuş fazlarının motor torklarının fonksiyonu olarak gösterimi Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Uçuş profili boyunca motor tork değerleri

4.2. Kabuller

Tez çalışmasının konusu olan ekserjetik analizleri uygulayabilmek için her istasyona ait sıcaklık, basınç ve kütle debisi değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Turboprop motora ait bu veriler test ortamında elde edilmiştir. Ek olarak bazı verilerin test ortamında elde edilmesi mümkün olmadığı için bu veriler parametrik olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte bütün mühendislik çalışmalarında olduğu gibi bazı kabullerin yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada yapılan kabuller aşağıda listelenmiştir.

- Dış ortama ait olan ve analizlerde referans olarak kabul edilen çevre sıcaklığı 281 K, çevre basıncı ise 92,4 kPa olarak alınmıştır.
- Turboprop motor sistemin komponentleri adyabatik olarak kabul edilmiştir.
- Hava ve yanma sonrası sıcak gazların ideal gaz oldukları varsayılmıştır.
- Çalışmada kullanılan yakıt Jet-A1'dir ve kimyasal gösterimi $C_{12}H_{23}$ şeklindedir.
- Yanma odasında gerçekleşen yanma reaksiyonu tam yanma olarak kabul edilmiştir.
- Motor içerisindeki iş yapan akışkan yanma odasına kadar hava, yanma odasından sonra ise yanma ürünü sıcak gaz olarak değerlendirilmiştir.
- Motor içerisindeki akışın potansiyel ve kinetik ekserjileri ihmal edilmiştir.
- Pervane dişli kutusu, jeneratörler ve yağ/yakıt pompaları gibi aksesuarlar bu analizin dışında tutulmuştur.

- Kompresör kademelerinden geçen havanın %5 kadarının türbin kanatçıklarının soğutulması ve basınçlandırma amacıyla çekildiği kabul edilmiştir.
- Yanma odası haricinde kimyasal ekserji değerlendirmeye alınmamıştır.
- Turboprop motorun yılda 700 saatlik operasyon süresi olduğu varsayılmıştır.
- Motor ömrü 30 yıl olarak alınmıştır.

4.3. Ekserji Analizi

Herhangi bir sistemin toplam ekserjisi (Ex), o sisteme ait potansiyel ekserji ($\dot{Ex}_{pot}$), kinetik ekserji ($\dot{Ex}_{kin}$), fiziksel ekserji ($\dot{Ex}_{fiz}$) ve kimyasal ekserji ($\dot{Ex}_{kim}$) değerlerinin toplamına eşittir.

$$Ex = \dot{Ex}_{pot} + \dot{Ex}_{kin} + \dot{Ex}_{fiz} + \dot{Ex}_{kim} \quad (4.1)$$

Birim kütle için potansiyel ve kinetik ekserji aşağıdaki verildiği şekilde hesaplanabilmektedir:

$$ex_{pot} = gz \quad (4.2)$$

$$ex_{kin} = \frac{v^2}{2} \quad (4.3)$$

Burada g yerçekimi sabiti, z yükseklik, v ise hızı ifade etmektedir. Sıradaki denklem sabit özgül sıcaklıkta fiziksel ekserjinin nasıl hesaplanabileceğini göstermektedir.

$$ex_{fiz} = c_{p,(T)} \left[T - T_0 - T_0 \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] + RT_0 \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (4.4)$$

Bu denklemden de anlaşılabileceği gibi ex_{fiz} değerini hesaplayabilmek için öncelikle sabit sıcaklıktaki özgül ısı $c_{p,(T)}$ bulunması gerekmektedir.

Kimyasal yanma denklemleri

Turboprop sistemdeki iş yapan akışkan; kompresör girişinden yanma odasına kadar hava, yanma odasından türbin çıkışına kadar ise yanma ürünü sıcak gaz olarak kabul edilmiştir. Hava için sabit sıcaklıktaki özgül ısı değerini ($c_{p,hava(T)}$) bulmak nispeten daha kolaydır [38].

$$c_{p,hava(T)} = 1,04841 - 0,000383719T + \frac{9,45378T^2}{10^7} - \frac{5,49031T^3}{10^{10}} + \frac{7,92981T^4}{10^{14}} \quad (4.5)$$

Yanma sonrası oluşan sıcak gazların 4 ana maddeden oluştuğu kabul edilmiştir. Bunlar sırasıyla karbondioksit, oksijen, su buharı ve nitrojendir. Kimyasal yanma denklemleri hava/yakıt oranları kullanılarak her bir tork değeri için ayrı ayrı oluşturulmuştur. Yanma odasında kararlı bir yanma sağlamak için hava/yakıt oranı stokiometrik orandan fazla olmak zorundadır. Bunun sonucunda yanma sonrası oluşan sıcak egzoz gazlarında ihmal edilemeyecek miktarda oksijen görülmektedir. 6 farklı tork değerine ait hava/yakıt oranları (HYO) ve yanma denklemleri Tablo 4.1’de görülebilmektedir. Bu denklemler yardımıyla yanma sonrası sıcak gazlar için sabit sıcaklıktaki özgül ısı ($c_{p,gaz(T)}$) değerleri yeniden hesaplanmıştır ve Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. 6 farklı tork değeri için yanma denklemleri

Tork	Yanma Denklemleri
240 Nm (HYO=54,4)	$C_{12}H_{23} + 313,5(0,7748 N_2 + 0,2059 O_2 + 0,0003 CO_2 + 0,019 H_2O)$ $\rightarrow (12,09 CO_2 + 17,45 H_2O + 46,78 O_2 + 242,9 N_2)$
350 Nm (HYO=50,9)	$C_{12}H_{23} + 293,4(0,7748 N_2 + 0,2059 O_2 + 0,0003 CO_2 + 0,019 H_2O)$ $\rightarrow (12,08 CO_2 + 14,3 H_2O + 44,05 O_2 + 227,3 N_2)$
485 Nm (HYO=46,2)	$C_{12}H_{23} + 266,1(0,7748 N_2 + 0,2059 O_2 + 0,0003 CO_2 + 0,019 H_2O)$ $\rightarrow (12,08 CO_2 + 16,55 H_2O + 37,04 O_2 + 206 N_2)$
552 Nm (HYO=43,9)	$C_{12}H_{23} + 253,06(0,7748 N_2 + 0,2059 O_2 + 0,0003 CO_2 + 0,019 H_2O)$ $\rightarrow (12,07 CO_2 + 16,3 H_2O + 34,35 O_2 + 196,2 N_2)$
580 Nm (HYO=42,3)	$C_{12}H_{23} + 243,8(0,7748 N_2 + 0,2059 O_2 + 0,0003 CO_2 + 0,019 H_2O)$ $\rightarrow (12,07 CO_2 + 16,13 H_2O + 32,45 O_2 + 188,9 N_2)$
630 Nm (HYO=41,1)	$C_{12}H_{23} + 236,7(0,7748 N_2 + 0,2059 O_2 + 0,0003 CO_2 + 0,019 H_2O)$ $\rightarrow (12,07 CO_2 + 16 H_2O + 22,98 O_2 + 183,4 N_2)$

Tablo 4.2. 6 farklı tork değeri için yanma sonrası özgül ısı denklemleri

Tork	Yanma sonrası sıcak gazlar için özgül ısı denklemleri
240 Nm	$c_{p,sıcak\ gaz} = 0,9889 + 0,000033T + \frac{1,52T^2}{10^7} - \frac{6,7T^3}{10^{11}}$
350 Nm	$c_{p,sıcak\ gaz} = 0,9835 + 0,0000378T + \frac{1,46T^2}{10^7} - \frac{6,5T^3}{10^{11}}$
485 Nm	$c_{p,sıcak\ gaz} = 0,9893 + 0,000048T + \frac{1,48T^2}{10^7} - \frac{6,6T^3}{10^{11}}$
552 Nm	$c_{p,sıcak\ gaz} = 0,9895 + 0,0000528T + \frac{1,47T^2}{10^7} - \frac{6,6T^3}{10^{11}}$
580 Nm	$c_{p,sıcak\ gaz} = 0,9896 + 0,0000567T + \frac{1,46T^2}{10^7} - \frac{6,5T^3}{10^{11}}$
630 Nm	$c_{p,sıcak\ gaz} = 0,9897 + 0,0000599T + \frac{1,45T^2}{10^7} - \frac{6,7T^3}{10^{11}}$

Denklem (4.1)'de görüleceği üzere, toplam ekserji ifadesinin elde edilebilmesi için kimyasal ekserji (ex_{kim}) değerinin de hesaplanması gerekmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi kimyasal ekserji ($ex_{kim,y}$) sadece yanma odasında dikkate alınmış ve yakıt için hesaplanmıştır.

$$\frac{ex_{kim,y}}{AID} = \gamma_y \cong 1,0401 + 0,01728 \frac{H}{C} + 0,0432 \frac{O}{C} + 0,2196 \frac{S}{C} \left(1 - 2,0628 \frac{H}{C}\right) \quad (4.6)$$

Burada γ_y (exergy grade function) sıvı yakıtlar için, yakıtın kimyasal ekserjisi ile yakıtın alt ısı değeri arasındaki sabit oranı ifade etmektedir. Bu tez çalışmasında incelenen turboprop motorda yakıt olarak kerozen ($C_{12}H_{23}$) kullanılmaktadır. Kerozen için γ_y değeri 1,067893 olarak alınmıştır [38].

Ekserji analizinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olabilecek bazı parametreler de vardır. Bunlardan ikisi izafi tersinmezlik oranı (relative irreversibility) ve iyileştirme potansiyelidir (improvement potential). İzafi tersinmezlik oranı (χ) incelenen komponentin ekserji yıkımı değerinin, turboprop sistemin toplam ekserji yıkımı değerine bölünmesiyle elde edilir. İyileştirme potansiyeli (IP) ifadesi ise Denklem (4.8)'de gösterilmiştir.

$$\chi = \frac{\dot{Ex}_{yık}}{\sum \dot{Ex}_{yık}} \quad (4.7)$$

$$IP = (1 - \eta_{ex}) \dot{Ex}_{yık} \quad (4.8)$$

4.4. Eksergo-Ekonomik Analiz

Eksergo-ekonomik analiz, ekserji analizi ve ekonomi analizini birleştirerek, tasarımcılara ve işletmecilere uçak motorları gibi enerji dönüşüm sistemlerinin komponent düzeyinde maliyet çıktılarını değerlendirme imkanı verir. Söz konusu maliyet çıktıları her bir motor istasyonundaki ekserji akımına parasal bir değer atanarak elde edilir. Bu çıktılar enerji analizi, ekserji analizi ya da ekonomi analizini ayrı ayrı uygulayarak elde edilememektedir. Bu yüzden eksergo-ekonomik metodoloji geliştirilmiştir. Bu çalışmada eksergo-ekonomik analiz turboprop uçak motoruna 6 farklı tork değeri için uygulanmıştır. Eksergo-ekonomik metodolojiye ait temel denklemler aşağıda verilmiştir [38].

$$\sum_{gir} \dot{C}_k + \dot{Z}_k^{TOP} = \sum_{çık} \dot{C}_k + \dot{C}_w \quad (4.9)$$

$$\dot{C}_k = c \times \dot{E}x_k \quad (4.10)$$

$$\dot{C}_w = c \times \dot{W} \quad (4.11)$$

$$\dot{Z}_k^{TOP} = \dot{Z}_k^{CIC} + \dot{Z}_k^{OM} \quad (4.12)$$

Burada sırasıyla; $\dot{C}_k$ ve $\dot{C}_w$ ilgili istasyondaki akışa ve işe ait ekserji maliyet oranını, c_k ve c_w ilgili istasyondaki akışa ve işe ait birim ekserji maliyetini, $\dot{E}x_k$ ve $\dot{W}$ ilgili istasyondaki akışa ve işe ait ekserji oranını ifade etmektedir. $\dot{Z}_k^{CIC}$, $\dot{Z}_k^{OM}$ ve $\dot{Z}_k$ ise sırasıyla ilgili komponentin seviyelendirilmiş ilk yatırım maliyeti, ilgili komponentin seviyelendirilmiş işletme ve bakım maliyeti ve ilgili komponentin seviyelendirilmiş toplam ekipman maliyeti olarak ifade edilebilir. $\dot{Z}_k^{CIC}$ ve $\dot{Z}_k^{OM}$ aşağıda verilen denklemler yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$\dot{Z}_k^{CIC} = \dot{Z}_{TM}^{CIC} \left(\frac{PEC_k}{\sum PEC_{TM}} \right) \quad (4.13)$$

$$\dot{Z}_k^{OM} = \frac{\dot{Z}_{TM}^{OM}}{\tau} \left(\frac{PEC_k}{\sum PEC_{TM}} \right) \quad (4.14)$$

Burada PEC_{TM} ve PEC_k turboprop motorun ve ana komponentlerinin satın alma maliyetini Amerikan doları (USD) cinsinden ifade etmektedir. τ ise turboprop motorun bir yıldaki toplam operasyon süresini saat olarak belirtmektedir. Buradaki değerler tahmini değerlerdir ve motor ve komponentlerinin ortalama fiyatlarını göstermektedir.

Daha sonraki aşamada her bir motor komponentine ait maliyet denge denklemlerinin oluşturulması gerekmektedir. Bu denklemlerin oluşturulmasında kontrol hacimlerinden ve yukarıda verilen ana denklemlerden faydalanılır. Kompresör (KOMP), yanma odası (YO), gaz jeneratör türbin (GJT) ve güç türbini (GT) için maliyet denge denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\dot{C}_1 + \dot{C}_{w,komp} + \dot{Z}_{komp}^{TOP} = \dot{C}_3 + \dot{C}_{b12} \quad (4.15)$$

$$\dot{C}_3 + \dot{C}_{yakıt} + \dot{Z}_{yo}^{TOP} = \dot{C}_4 \quad (4.16)$$

$$\dot{C}_4 + \dot{C}_{b1} + \dot{Z}_{gjt}^{TOP} = \dot{C}_{w,gjt} + \dot{C}_{45} \quad (4.17)$$

$$\dot{C}_{45} + \dot{C}_{b2} + \dot{Z}_{gt}^{TOP} = \dot{C}_{w,gt} + \dot{C}_5 \quad (4.18)$$

Yukarıdaki denklem sisteminde $\dot{C}_{yakıt}$ (seviyelendirilmiş yakıt maliyeti) dışındaki bütün değerler daha önce verilen denklemler yardımıyla bulunabilmektedir. $\dot{C}_{yakıt}$ da aşağıda verilen yardımcı denklemler kullanılarak hesaplanabilir.

$$\dot{C}_{yakıt} = \frac{F\dot{C}_e}{\tau} \left(\frac{AID}{\dot{E}x_{kim}} \right) \quad (4.19)$$

$$F\dot{C}_e = \frac{Pr \dot{m}_{yakıt} 3600 \tau}{\rho} \quad (4.20)$$

Burada; Pr yakıtın dolar cinsinden ortalama satış fiyatını, $\dot{m}_{yakıt}$ yakıtın kg/s olarak yakıt debisini, ρ yakıtın yoğunluğunu ve AID yakıtın alt ısı değerini ifade etmektedir. Eksergo-ekonomik denge denklemleri bütün tork değerleri için oluşturulduktan sonra, 6 farklı güç durumu için 6 farklı lineer denklem sistemi elde edilmiş olur. Elde edilen bu denklemler matris sistemleri yardımıyla çözülmüştür.

4.5. İleri Ekserji Analizi

İleri ekserji analizinin uygulanabilmesi için öncelikle sisteme ekserji analizinin uygulanmış olması gerekmektedir. Ekserji analizi sonucunda elde edilen veriler ileri ekserji analizinde kullanılır. “Geleneksel” diye tabir edebileceğimiz ekserji analizinde elde edilen turboprop motor ana komponentlerine ait ekserji yıkımı ve ekserji verimi değerleri ileri ekserji analizinin temel girdilerini oluşturmaktadır. Zaten ileri ekserji

analizindeki esas mantık, söz konusu ekserji yıkımı değerlerinin kategorize edilmesinden ibarettir [39].

Bir komponentte meydana gelen ekserji yıkımları, sadece o komponentteki tersinmezliklerden kaynaklanmamaktadır. Komponentler birbirlerine mekanik olarak bağlıdır ve hep birlikte turboprop sistemini oluştururlar. Bu nedenle diğer komponentlerde meydana gelen verimsizlikler, incelenen herhangi bir komponentteki ekserji yıkımını etkileyebilmektedir. Geleneksel ekserji analizi komponentlerdeki tersinmezlikleri matematiksel olarak ifade etmeye yardımcı olmaktadır fakat kategorize edememektedir [40].

İleri ekserji analizi, bir komponentteki tersinmezlikleri iki şekilde kategorize ederek bu bakış açısını kazanmamıza yardımcı olur. Bunlardan ilki, komponentteki ekserji yıkımı değerinin gerçek iyileştirme potansiyeline göre kategorize edilmesidir. Buna göre her bir komponentteki ekserji yıkımı *önlenebilir* ve *önlenemez* olmak üzere iki bileşene ayrılır. Diğeri ise, komponentteki ekserji yıkımı değerinin yıkımın kaynağına göre kategorize edilmesidir. Buna göre her bir komponentteki ekserji yıkımı *içsel* ve *dışsal* olmak üzere iki parçaya bölünür.

4.5.1. Önlenebilir ve önlenemez ekserji yıkımı

Bir komponentteki önlenemez ekserji yıkımı ($\dot{E}x_{yık,k}^{UN}$), öngörülebilir gelecekte geliştirilebilecek en iyi teknoloji ve tasarım göz önüne alındığında dahi giderilemeyecek ekserji yıkımını ifade etmektedir. Önlenebilir ekserji yıkımı ($\dot{E}x_{yık,k}^{AV}$) ise ileri malzeme teknolojisi ya da tasarım iyileştirmesi gibi gelişmelerle ortadan kaldırılabilir ekserji yıkımını ifade etmektedir. Bir komponentteki ekserji yıkımı Denklem (4.21)'deki gibi bileşenlerine ayrılabilir.

$$\dot{E}x_{yık,k} = \dot{E}x_{yık,k}^{AV} + \dot{E}x_{yık,k}^{UN} \quad (4.21)$$

Önlenemez ekserji yıkımını hesaplayabilmek için bir öngörüle bulunmak gerekir. Burada analizi yapan kişinin tecrübesi ve değerlendirmesi çok önemlidir. Bu tez çalışmasında incelenen turboprop motor için *önlenemez şartlar* belirlenirken açık literatürde araştırma yapılmış ve turboprop motor konusunda uzmanlığa sahip tecrübeli araştırmacıların fikri alınmıştır. Herhangi bir komponentin verimliliğini artırmak, o komponentin enerji tüketimini ve ekserji yıkımını azaltmak anlamına gelmekle beraber,

bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirildiğinde sonuç değişebilmektedir. Kompresörü örnek alacak olursak, kompresörün iyileştirme amacıyla daha verimli yeni bir kompresör ile değiştirilmesi turboprop motor sistemin verimini artıracaktır ancak bu değişim yatırım maliyetinin de artmasına sebep olacaktır. Bu yüzden yapılacak iyileştirmeler, teknik ve ekonomik bazı kısıtlara tabidir. Gerçek şartlardan önlenemez şartlara kadar olan tersinmezliklere *önlenebilir ekserji yıkımı* denir ve analizi gerçekleştiren kişinin belirlediği önlenemez şartlara direkt olarak bağlıdır. Önlenemez şartlarla belirlenen üst sınırdan ideal şartlara (%100) kadar olan kısım ise *önlenemez ekserji yıkımına* karşılık gelir ve herhangi bir iyileştirme çalışmasıyla ortadan kaldırılamayacak tersinmezlikleri ifade eder [41]. Tüm bu değerlendirmeler sonucunda, öngörülebilir gelecekteki (10 yıl olarak düşünülebilir) maksimum iyileştirme potansiyelini bulabilmek için belirlenen önlenemez şartlar Bölüm 5.3’de verilmiştir.

Denklem (4.21)’den anlaşılacağı gibi, $\dot{E}x_{yık,k}$ değeri daha önce ekserji analizi sonucunda hesaplanmış olduğu için öncelikle $\dot{E}x_{yık,k}^{UN}$ değeri hesaplanmalıdır. Bu değer aşağıdaki denklem yardımıyla elde edilebilmektedir [42].

$$\dot{E}x_{yık,k}^{UN} = \dot{E}x_{P,k} (\dot{E}x_{yık,k} / \dot{E}x_P)_k^{UN} \quad (4.22)$$

4.5.2. İçsel ve dışsal ekserji yıkımı

Herhangi bir komponentte meydana gelen ekserji yıkımı, ekserji yıkımının kaynağı açısından da ikiye ayrılır. Sistemde bulunan diğer bütün komponentlerin ideal olarak çalıştıkları varsayılsa bile incelenen komponentte hala ekserji yıkımı olacaktır. Bu ekserji yıkımı içsel ekserji yıkımı ($\dot{E}x_{yık,k}^{EN}$) olarak ifade edilir. Önlenemez ekserji yıkımına göre hesaplanması daha karmaşıktır. Önlenemez ekserji yıkımında incelenen komponentin sistemden ayrı yani izole bir şekilde çalıştığı varsayılırken; içsel ekserji yıkımında her bir komponent sistemle bütün halinde değerlendirilmekte ve her birisi için ayrı ayrı çevrim oluşturulmaktadır [42].

$$\dot{E}x_{yık,k} = \dot{E}x_{yık,k}^{EN} + \dot{E}x_{yık,k}^{EX} \quad (4.23)$$

Burada $\dot{E}x_{yık,k}^{EX}$ dışsal ekserji yıkımını ifade etmektedir. Burada $\dot{E}x_{yık,k}^{EN}$ hesaplandıktan sonra $\dot{E}x_{yık,k}^{EX}$ rahatlıkla elde edilebilir. $\dot{E}x_{yık,k}^{EN}$ hesaplanırken k

komponentinin gerçek şartlarda, sistemdeki diğer bütün komponentlerin ise ideal şartlarda çalıştığı varsayılır. Hesaplamalar yapılırken sistemin güç çıkışı gerçek durumdaki ile aynı kabul edilir. Yani bütün komponentler $\dot{E}x_{yık,k}^{EN}$ için ayrı ayrı çevrimler kurularak incelenirken, sistemin güç çıkışı sabittir. İçsel ve dışsal ekserji yıkımlarının belirlenmesi, sistem komponentlerin birbirileri ile olan ilişkilerini anlamamıza yardımcı olmaktadır. Bu sayede, yapılacak olan iyileştirme çalışmalarının hangi komponente yoğunlaşacağı daha efektif bir şekilde tespit edilebilmektedir.

4.5.3. Önlenebilir/önlenebilir ve içsel/dışsal ekserji yıkımlarının birleştirilmesi

Komponentlere ait ekserji yıkımları yukarıda anlatıldığı gibi içsel, dışsal, önlenebilir ve önlenebilir şeklinde bileşenlerine ayrıldıktan sonra, daha anlamlı değerlendirmeler yapabilmek için bu bileşenler birleştirilebilmektedir. İleri ekserji analizinde öncelikli olarak önlenebilir ekserji yıkımının bulunmaya çalışıldığı ifade edilebilir. Çünkü ekserji yıkımına ait bu bileşen, gerçek iyileştirme potansiyelini ifade etmektedir. Bu bileşenin de kaynak noktasına göre iki alt bileşene ayrılması mümkündür. Bunlar sırasıyla önlenebilir içsel ekserji yıkımı ($\dot{E}x_{yık,k}^{AV,EN}$) ve önlenebilir dışsal ekserji yıkımıdır ($\dot{E}x_{yık,k}^{AV,EX}$). Önlenebilir ekserji yıkımı daha önce de bahsedildiği gibi teknolojik ve ekonomik kısıtlar sebebiyle ortadan kaldırılamayacak ve her türlü iyileştirme durumuna rağmen var olmaya devam edecek olan tersinmezlikleri ifade eder. Bu bileşenin de kaynak noktasına göre iki alt bileşene ayrılması söz konusudur. Bunlar sırasıyla önlenebilir içsel ekserji yıkımı ($\dot{E}x_{yık,k}^{UN,EN}$) ve önlenebilir dışsal ekserji yıkımıdır ($\dot{E}x_{yık,k}^{UN,EX}$). Denklemler (4.24) – (4.27) bu alt bileşenlerin nasıl hesaplandıklarını göstermektedir.

$$\dot{E}x_{yık,k}^{AV,EN} = \dot{E}x_{yık,k}^{EN} - \dot{E}x_{yık,k}^{UN,EN} \quad (4.24)$$

$$\dot{E}x_{yık,k}^{AV,EX} = \dot{E}x_{yık,k}^{EX} - \dot{E}x_{yık,k}^{UN,EX} \quad (4.25)$$

$$\dot{E}x_{yık,k}^{UN,EN} = \dot{E}x_{P,k}^{EN} (\dot{E}x_{yık} / \dot{E}x_P)^{UN} \quad (4.26)$$

$$\dot{E}x_{yık,k}^{UN,EX} = \dot{E}x_{yık,k}^{UN} - \dot{E}x_{yık,k}^{UN,EN} \quad (4.27)$$

4.6. İleri Eksergo-Ekonomik Analiz

İleri eksergo-ekonomik analizin uygulanabilmesi için öncelikle sisteme geleneksel ekserji analizi ve geleneksel eksergo-ekonomik analizin uygulanmış olması gerekmektedir. Geleneksel ekserji analizleri sonucunda elde edilen veriler ileri eksergo-ekonomik analizde kullanılır. İleri eksergo-ekonomik analizde de, ileri ekserji analizine benzer şekilde, maliyet değerleri içsel/dışsal ve önlenebilir/önlenebilir şekilde kategorize edilir.

$$\dot{C}_k = \dot{C}_k^{EN} + \dot{C}_k^{EX} \quad (4.28)$$

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_k^{EN} + \dot{Z}_k^{EX} \quad (4.29)$$

Burada; $\dot{C}_k^{EN}$, diğer komponentler ideal şartlarda çalıştığında k komponentinde oluşan ekserji maliyetini, $\dot{C}_k^{EX}$ k komponentinde diğer komponentler kaynaklı meydana gelen ekserji maliyetini, $\dot{Z}_k^{EN}$ k komponentinin içsel ekipman maliyetini ve $\dot{Z}_k^{EX}$ k komponentinin dışsal ekipman maliyetini ifade etmektedir. Yukarıda bahsedilen içsel ve dışsal maliyetler aşağıda verilen denklemler kullanılarak hesaplanır. Hesaplamalar sırasında sistemin güç çıkışı sabit tutulmuştur.

$$\dot{C}_k^{EN} = c_{f,k} \times \dot{E}x_k^{EN} \quad (4.30)$$

$$\dot{C}_k^{EX} = \dot{C}_k - \dot{C}_k^{EN} \quad (4.31)$$

$$\dot{Z}_k^{EN} = \dot{E}x_{P,k}^{EN} (\dot{Z} / \dot{E}x_P)^{gerçek} \quad (4.32)$$

$$\dot{Z}_k^{EX} = \dot{Z}_k - \dot{Z}_k^{EN} \quad (4.33)$$

Maliyetler içsel/dışsal bileşenlerine ayrıldıktan sonra önlenebilir/önlenebilir bileşenlerine de ayrılabilir. Bu şekilde sistem komponentlerinin ekonomik açıdan gerçekçi iyileştirme potansiyelleri tespit edilmiş olacaktır. Benzer şekilde, geleneksel eksergo-ekonomik analiz sonucu elde edilen ekserji maliyetleri ve ekipman maliyetleri aşağıdaki gibi alt bileşenlerine ayrılır.

$$\dot{C}_k = \dot{C}_k^{UN} + \dot{C}_k^{AV} \quad (4.34)$$

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_k^{UN} + \dot{Z}_k^{AV} \quad (4.35)$$

Bu alt bileşenler de aşağıda verilen denklemler yardımıyla hesaplanmaktadır. Görüleceği üzere, ilk önce önlenebilir maliyetlerin hesaplanması gerekli ve yeterlidir.

Daha sonra elde edilen sonuçlar gerçek ekserji ve komponent maliyetlerinden çıkarılarak önlenebilir maliyetlere ulaşılabilmektedir.

$$\dot{C}_k^{UN} = c_{f,k} \times \dot{E}x_k^{UN} \quad (4.36)$$

$$\dot{C}_k^{AV} = \dot{C}_k - \dot{C}_k^{UN} \quad (4.37)$$

$$\dot{Z}_k^{UN} = (PEC^{UN}/PEC)_k \times \dot{Z}_k \quad (4.38)$$

$$\dot{Z}_k^{AV} = \dot{Z}_k - \dot{Z}_k^{UN} \quad (4.39)$$

Komponentlere ait maliyet akımları yukarıda anlatıldığı şekilde içsel, dışsal, önlenebilir ve ölenemez olacak şekilde bileşenlerine ayrıldıktan sonra, daha anlamlı değerlendirmeler yapabilmek ve sistem içindeki etkileşimleri daha iyi anlayabilmek için yeniden alt bileşenlerine ayrılabilir. Böylelikle ölenemez-içsel, ölenemez-dışsal, önlenebilir-içsel ve önlenebilir-dışsal olmak üzere 4 farklı alt bileşen elde edilmiş olur. Bu 4 alt bileşenin toplamı her bir komponent için komponentin gerçek ekserji maliyeti ve gerçek ekipman maliyeti değerlerine eşit olmalıdır. Ekserji maliyeti ve ekipman maliyeti değerlerinin alt bileşenlere ayrılması, aşağıda verilen denklemler yardımıyla yapılmaktadır.

$$\dot{C}_k^{UN,EN} = c_{f,k} \times \dot{E}x_k^{UN,EN} \quad (4.40)$$

$$\dot{C}_k^{UN,EX} = \dot{C}_k^{UN} - \dot{C}_k^{UN,EN} \quad (4.41)$$

$$\dot{C}_k^{AV,EN} = \dot{C}_k^{EN} - \dot{C}_k^{UN,EN} \quad (4.42)$$

$$\dot{C}_k^{AV,EX} = \dot{C}_k^{EX} - \dot{C}_k^{UN,EN} \quad (4.43)$$

$$\dot{Z}_k^{UN,EN} = \dot{E}x_{P,k}^{EN} (\dot{Z}_k^{UN} / \dot{E}x_{P,k}^{gerçek}) \quad (4.44)$$

$$\dot{Z}_k^{UN,EX} = \dot{Z}_k^{UN} - \dot{Z}_k^{UN,EN} \quad (4.45)$$

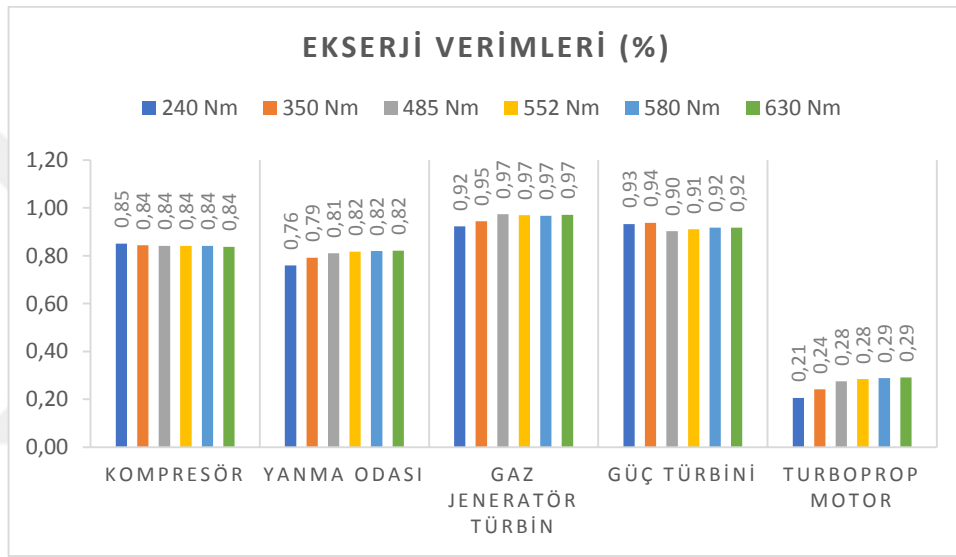
$$\dot{Z}_k^{AV,EN} = \dot{Z}_k^{EN} - \dot{Z}_k^{UN,EN} \quad (4.46)$$

$$\dot{Z}_k^{AV,EX} = \dot{Z}_k^{EX} - \dot{Z}_k^{EX,EN} \quad (4.47)$$

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Ekserji Analizi

İleri eksergo-ekonomik analizin ilk aşaması olarak ekserji analizi, her bir motor istasyonuna ait sıcaklık, basınç ve kütsel debi değeri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan ekserji analizi sonucunda 6 farklı tork değeri için elde edilen ekserji verimi değeri Şekil 5.1’de verilmiştir.

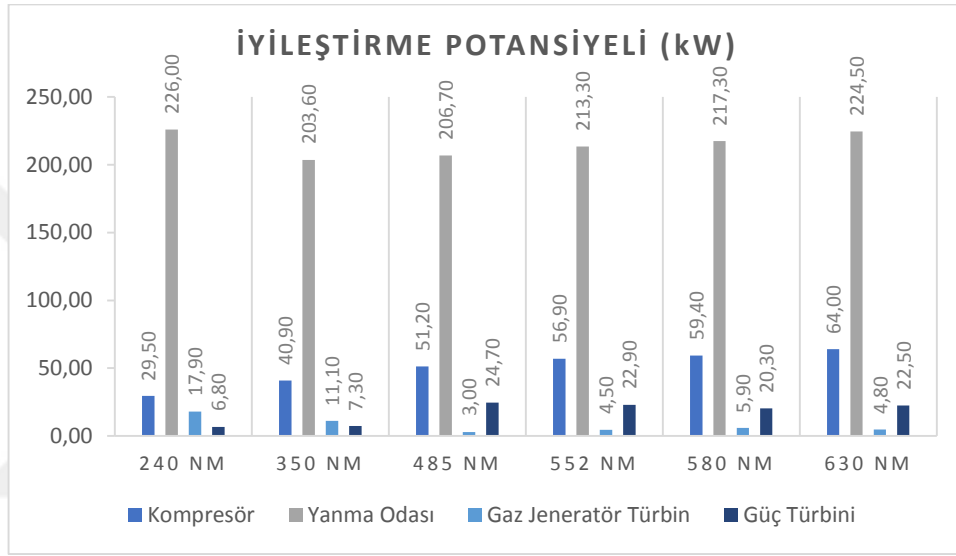


Şekil 5.1. Dinamik yükler altında turboprop motor komponentlerine ait ekserji verimleri

Sonuçlara göre, kompresör neredeyse bütün tork değeri için aynı ekserji verimi değerine sahiptir. Kompresör ekserji verimi 240 Nm tork değeri için 0,85, diğer bütün tork değeri için ise 0,84 olarak hesaplanmıştır. Yanma odası ekserji verimi 240 Nm için 0,76, 350 Nm için 0,79 ve 485 Nm için 0,81 olarak hesaplanmıştır. Kalan tork değeri için ekserji verimi 0,82 olarak tespit edilmiştir. Gaz jeneratör türbin ekserji verimi 240 Nm için 0,92 ve 350 Nm için 0,95 olarak hesaplanmıştır. 485 Nm, 552 Nm, 580 Nm ve 630 Nm tork değeri için ise ekserji verimi 0,97 olarak bulunmuştur. Güç türbini için ekserji verimi değeri ise 240 Nm, 350 Nm, 485 Nm, 552 Nm, 580 Nm ve 630 Nm tork değeri için sırasıyla 0,93, 0,94, 0,90, 0,91, 0,92 ve 0,92 olarak hesaplanmıştır. Turboprop motorun ekserji verimi ise 240 Nm için 0,21, 350 Nm için

0,24, 485 Nm için 0,28, 552 Nm için 0,28, 580 Nm için 0,29 ve 630 Nm için 0,29 olarak tespit edilmiştir.

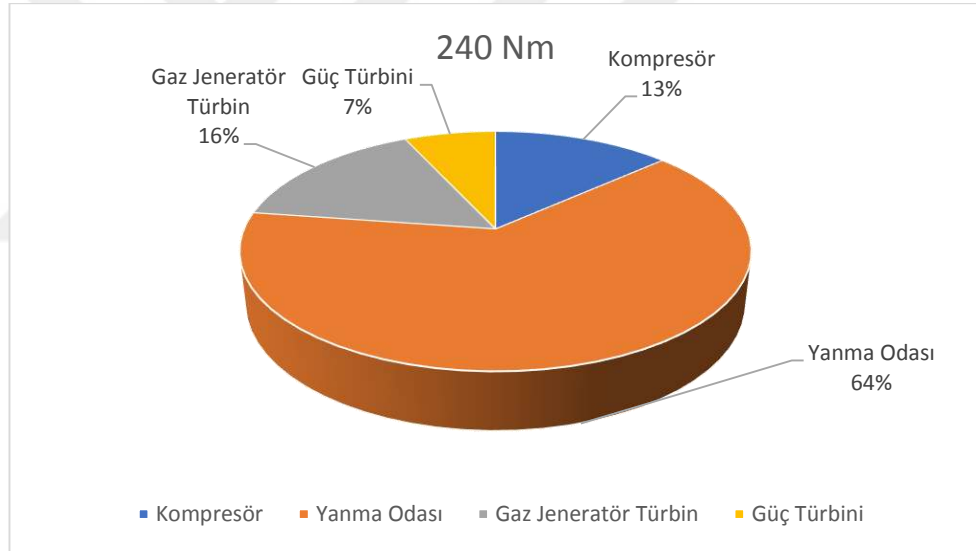
Sonuçlar göstermiştir ki, gaz jeneratör türbin bütün tork değerleri için en yüksek ekserji verimine sahip komponenttir. Yanma odası ise beklenildiği gibi tüm tork değerleri için en düşük ekserji verimine sahip komponenttir. Bunun sebebi yanma odası içerisinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonların büyük bir tersinmezlik kaynağı olmasıdır.



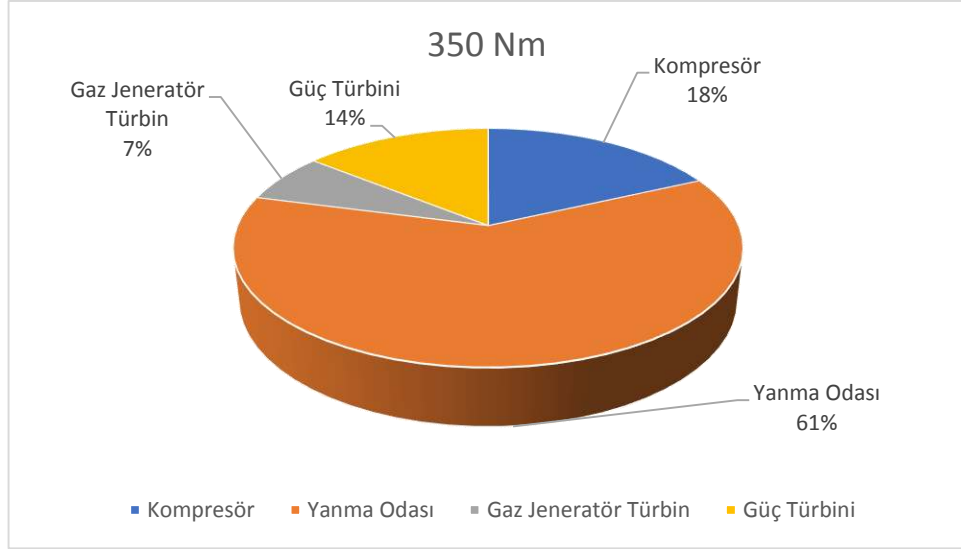
Şekil 5.2. Dinamik yükler altında turboprop motor komponentlerine ait iyileştirme potansiyelleri

İyileştirme potansiyeli, ekserji analizi sonucunda değerlendirme yapmamıza olanak sağlayan faydalı ekserjetik parametrelerden bir tanesidir. Denklem (4.8) yardımıyla her bir komponent için hesaplanan iyileştirme potansiyeli değerlerinin bütün torklar için dağılımı Şekil 5.2’de verilmiştir. Grafikten de anlaşılabacağı üzere, yanma odası bütün güç konfigürasyonları için en yüksek iyileştirme potansiyeline sahip komponenttir. Yanma odasına ait iyileştirme potansiyeli değerleri 240 Nm için 226,00 kW, 350 Nm için 203,60 kW, 485 Nm için 206,70 kW, 552 Nm için 213,30 kW, 580 Nm için 217,30 kW ve 630 Nm için 224,50 kW olarak hesaplanmıştır. Güç türbininin ise 240 Nm (6,80 kW) ve 350 Nm (7,30 kW) torkları için en düşük iyileştirme potansiyeline sahip komponent olduğu anlaşılmıştır. Kalan tork değerlerinde gaz jeneratör türbin en düşük iyileştirme potansiyeline sahip komponenttir: 485 Nm için 3,00 kW, 552 Nm için 4,50 kW, 580 Nm için 5,90 kW ve 630 Nm için 4,80 kW.

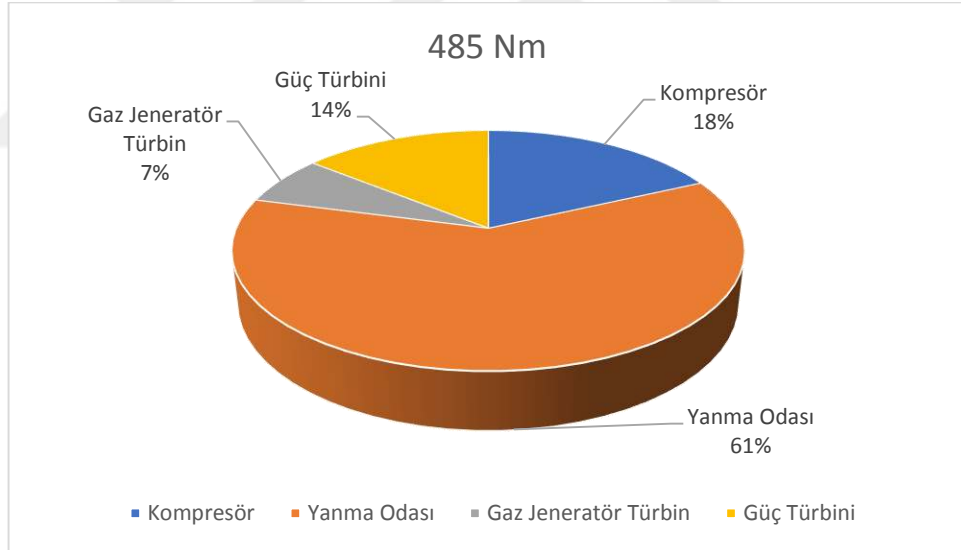
İzafi tersinmezlik oranı motor içerisindeki ekserji yıkımı dağılımını daha iyi anlamamıza yardımcı olmaktadır. Denklem (4.7) kullanılarak hesaplanan motor komponentlerine ait izafi tersinmezlik oranı değerleri her bir tork değeri için ayrı ayrı olmak üzere Şekil (5.3-5.8) arasında verilmiştir. Sonuçlara göre en yüksek izafi tersinmezlik oranına sahip komponent bütün tork değerleri için yanma odasıdır ve değeri 0,60-0,64 arasında değişmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi bunun temel sebebi, yanma odasının en yüksek ekserji yıkımına sahip komponent olmasıdır. Güç türbini 240 Nm (0,07) için en düşük izafi tersinmezlik oranına sahip komponenttir. Kalan diğer torklar için ise en düşük izafi tersinmezlik oranına sahip komponent olma ünvanını güç türbini yerine gaz jeneratör türbin almaktadır: 350 Nm için 0,07, 485 Nm için 0,07, 552 Nm için 0,08, 580 Nm için 0,09 ve 630 Nm için 0,08.



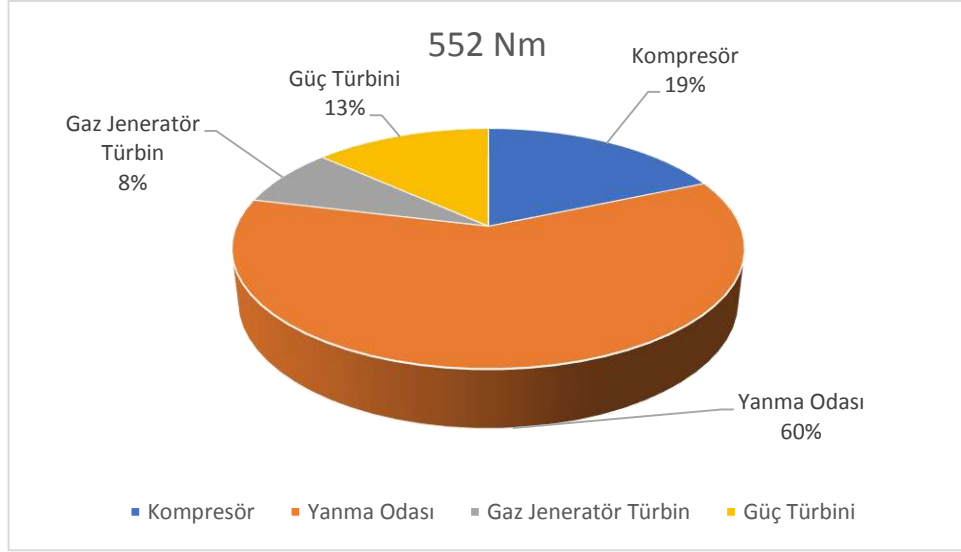
Şekil 5.3. 240 Nm için izafi tersinmezlik oranları



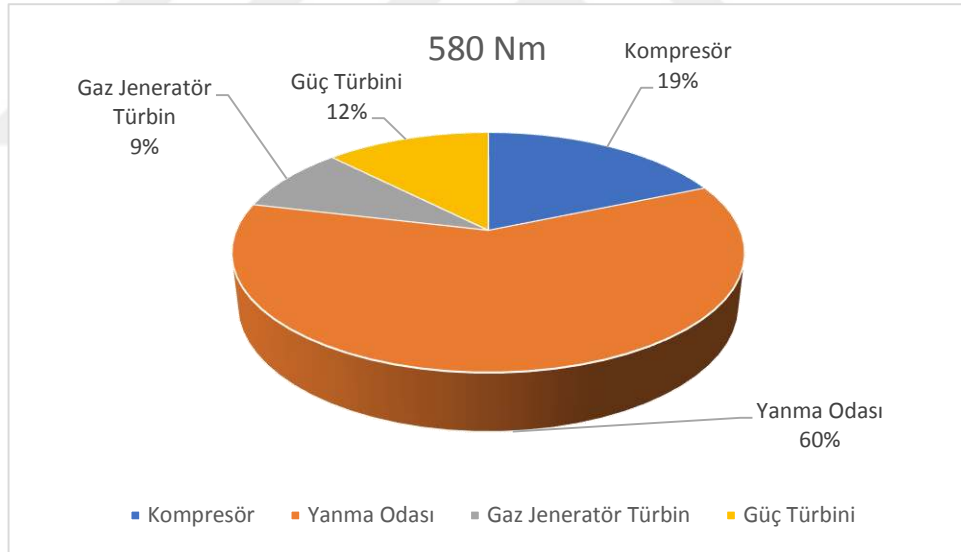
Şekil 5.4. 350 Nm için izafi tersinmezlik oranları



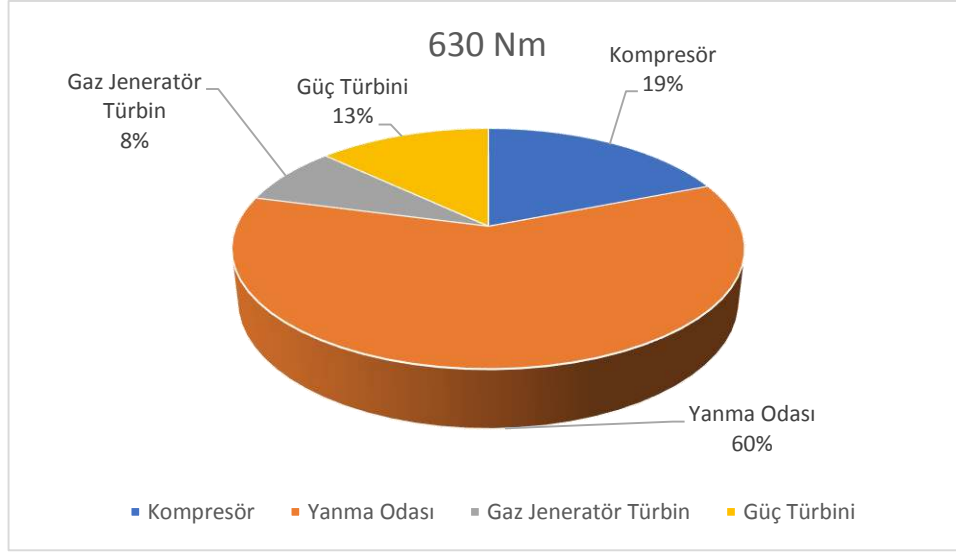
Şekil 5.5. 485 Nm için izafi tersinmezlik oranları



Şekil 5.6. 552 Nm için izaî tersinmezlik oranları



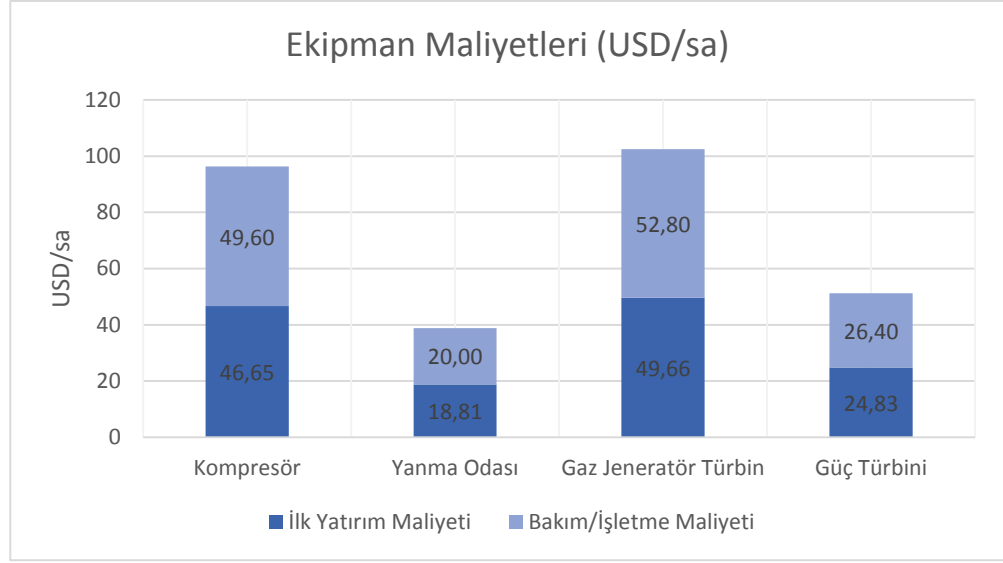
Şekil 5.7. 580 Nm için izaî tersinmezlik oranları



Şekil 5.8. 630 Nm için izafi tersinmezlik oranları

5.2. Eksergo-Ekonomik Analiz Sonuçları

Eksergo-ekonomik analiz, ekserji analizi sonucunda elde edilen her bir motor istasyonuna ait ekserji akımlarına parasal bir değer atanarak gerçekleştirilmektedir. Eksergo-ekonomik analizin iki temel çıktısı vardır: i) ekipman maliyetleri ($\dot{Z}_k$) ve ii) ekserji yıkımı maliyetleri ($\dot{C}_k$). Ekipman maliyetlerinin de iki temel bileşeni bulunmaktadır. Bunlar ilk yatırım maliyeti ($\dot{Z}_k^{CIC}$) ile işletme ve bakım maliyetidir ($\dot{Z}_k^{OM}$). Hesaplamalar yapılırken motorun ekonomik ömrü 30 yıl ve yıllık çalışma süresi 700 saat olarak alınmıştır. Eksergo-ekonomik parametreler ve Denklemler (4.12-4.14) kullanılarak elde edilen komponent maliyetleri ve bileşenleri Şekil 5.9’da gösterilmiştir. Burada gösterilen maliyetler tüm tork değerlerinde yapılan hesaplamalar için kullanılmıştır. Sonuçlara göre, en yüksek $\dot{Z}_k^{CIC}$ değerinin 49,66 USD/sa olarak gaz jeneratör türbinde gerçekleştiği gözlenmiştir. En düşük $\dot{Z}_k^{CIC}$ değeri ise, 18,81 USD/sa olarak yanma odasında tespit edilmiştir. Diğer komponentler için hesaplanan $\dot{Z}_k^{CIC}$ değerleri ise şu şekildedir: kompresör için 46,65 USD/sa, güç türbini için 24,83 USD/sa. $\dot{Z}_k^{OM}$ değeri ise en yüksek olarak yine gaz jeneratör türbinde (52,80 USD/sa), en düşük olarak ise yine yanma odasında (20,00 USD/sa) hesaplanmıştır. Bu durumda toplam ekipman maliyeti ($\dot{Z}_k$) olarak değerlendirecek olursak bulunan sonuçlar şu şekildedir: kompresör için 96,25 USD/sa, yanma odası için 38,81 USD/sa, gaz jeneratör türbin için 102,46 USD/sa ve son olarak güç türbini için 51,23 USD/sa.

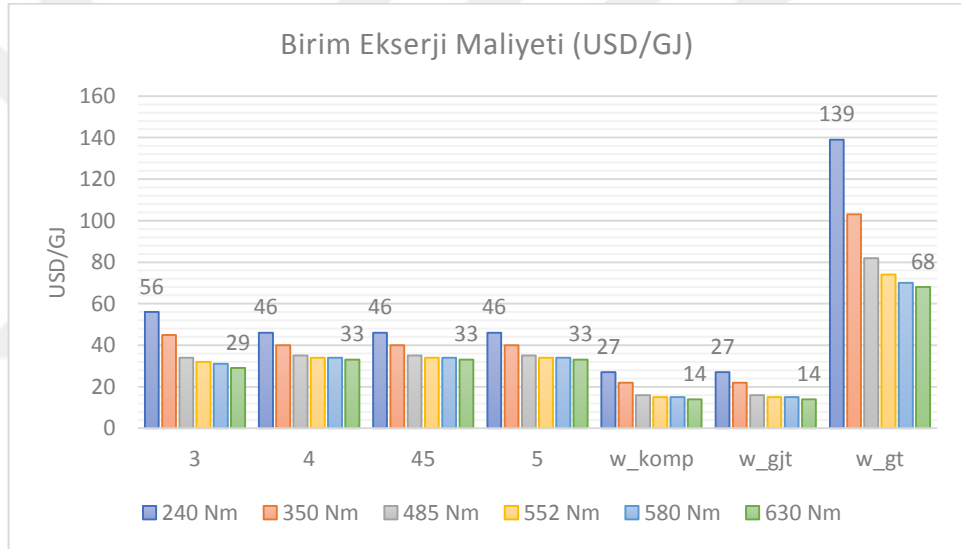


Şekil 5.9. Dinamik yükler altında turboprop motor bileşenlerine ait ekipman maliyetleri

Ekipman maliyetleri belirlendikten sonra eksergo-ekonomik analizin ikinci aşaması olarak ekserji akım maliyetlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için Denklemler (4.15–4.18) kullanılarak oluşturulan ekserji denge denklemleri çözümlenir ve her bir motor istasyonuna ait $\dot{C}_i$ ve c_i değerleri elde edilir. Eksergo-ekonomik analize ait sonuçlar Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de verilmiştir. Şekil 5.10, dinamik yükler altındaki turboprop motor istasyonlarına ait birim ekserji maliyetlerini göstermektedir. Sonuçlara göre;

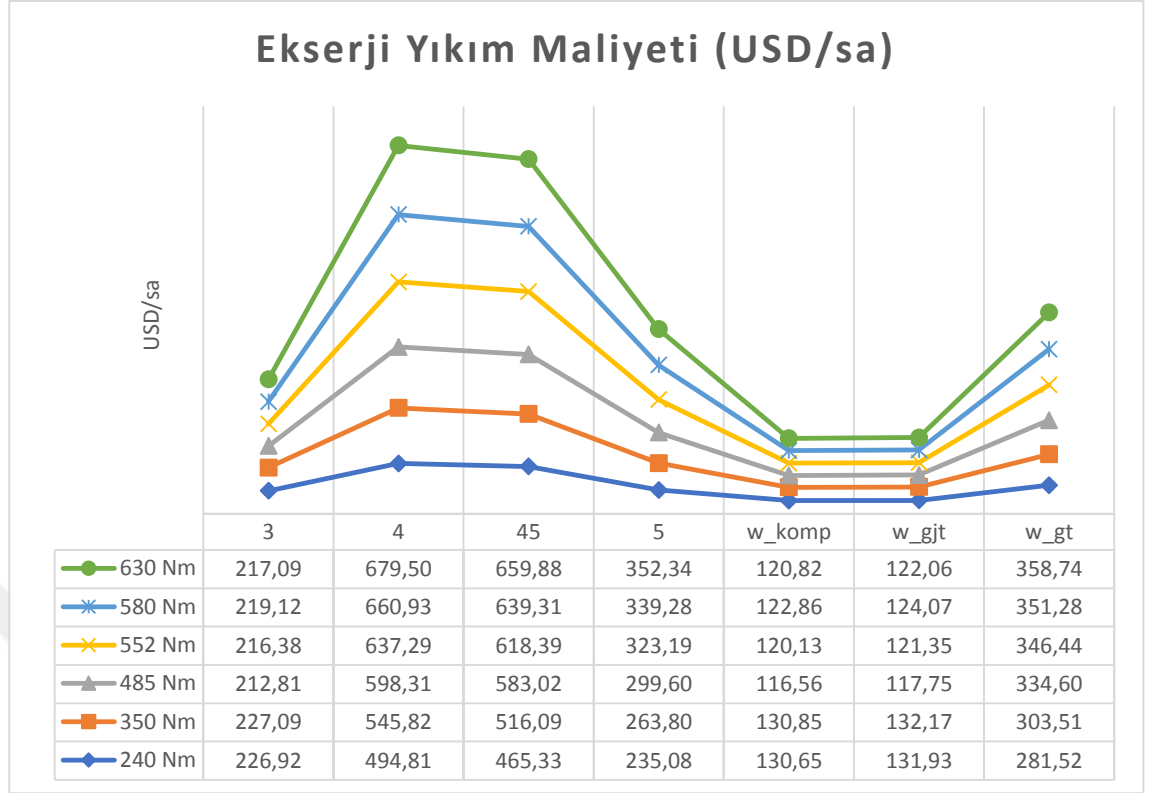
- 240 Nm için en yüksek birim ekserji maliyeti 139 USD/GJ değeri ile $c_{w,gt}$ ’de tespit edilmiştir. En düşük birim ekserji maliyeti ise 27 USD/GJ değeri ile $c_{w,komp}$ ve $c_{w,gjt}$ ’ye aittir.
- 350 Nm için en yüksek birim ekserji maliyeti 103 USD/GJ değeri ile $c_{w,gt}$ ’de tespit edilmiştir. En düşük birim ekserji maliyeti ise 22 USD/GJ değeri ile $c_{w,komp}$ ve $c_{w,gjt}$ ’ye aittir.
- 485 Nm için en yüksek birim ekserji maliyeti 82 USD/GJ değeri ile $c_{w,gt}$ ’de tespit edilmiştir. En düşük birim ekserji maliyeti ise 16 USD/GJ değeri ile $c_{w,komp}$ ve $c_{w,gjt}$ ’ye aittir.

- 552 Nm için en yüksek birim ekserji maliyeti 74 USD/GJ değeri ile $c_{w,gt}$ ’de tespit edilmiştir. En düşük birim ekserji maliyeti ise 15 USD/GJ değeri ile $c_{w,komp}$ ve $c_{w,gjt}$ ’ye aittir.
- 580 Nm için en yüksek birim ekserji maliyeti 70 USD/GJ değeri ile $c_{w,gt}$ ’de tespit edilmiştir. En düşük birim ekserji maliyeti ise 15 USD/GJ değeri ile $c_{w,komp}$ ve $c_{w,gjt}$ ’ye aittir.
- 630 Nm için en yüksek birim ekserji maliyeti 68 USD/GJ değeri ile $c_{w,gt}$ ’de tespit edilmiştir. En düşük birim ekserji maliyeti ise 14 USD/GJ değeri ile $c_{w,komp}$ ve $c_{w,gjt}$ ’ye aittir.



Şekil 5.10. Dinamik yükler altında turboprop motor istasyonlarına ait birim ekserji maliyetleri

Sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, güç türbini işinin bütün tork değerleri için en yüksek birim ekserji maliyetine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Gaz jeneratör türbin işinin ($c_{w,gjt} = c_{w,komp}$ olduğu için kompresör işi ile birlikte) ise en düşük birim ekserji maliyetine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca artan tork değerleri ile birlikte bütün birim ekserji maliyetlerinde düşüş olduğu gözlenmiştir. En düşük tork değeri olan 240 Nm’de bütün istasyonlar için maksimum birim ekserji maliyeti hesaplanmıştır.



Şekil 5.11. Dinamik yükler altında turboprop motor istasyonlarına ait ekserji yıkım maliyetleri

Şekil 5.11, dinamik yükler altındaki turboprop motor istasyonlarına ait ekserji yıkım maliyetlerini göstermektedir. Sonuçlara göre;

- 240 Nm için en yüksek ekserji yıkım maliyeti 494,81 USD/sa değeri ile $\dot{C}_4$ 'de tespit edilmiştir. En düşük ekserji yıkım maliyeti ise 130,65 USD/sa değeri ile $\dot{C}_{w,komp}$ 'e aittir.
- 350 Nm için en yüksek ekserji yıkım maliyeti 545,82 USD/sa değeri ile $\dot{C}_4$ 'de tespit edilmiştir. En düşük ekserji yıkım maliyeti ise 130,85 USD/sa değeri ile $\dot{C}_{w,komp}$ 'e aittir.
- 485 Nm için en yüksek ekserji yıkım maliyeti 598,31 USD/sa değeri ile $\dot{C}_4$ 'de tespit edilmiştir. En düşük ekserji yıkım maliyeti ise 116,56 USD/sa değeri ile $\dot{C}_{w,komp}$ 'e aittir.
- 552 Nm için en yüksek ekserji yıkım maliyeti 637,29 USD/sa değeri ile $\dot{C}_4$ 'de tespit edilmiştir. En düşük ekserji yıkım maliyeti ise 120,13 USD/sa değeri ile $\dot{C}_{w,komp}$ 'e aittir.

- 580 Nm için en yüksek ekserji yıkım maliyeti 660,93 USD/sa değeri ile $\dot{C}_4$ 'de tespit edilmiştir. En düşük ekserji yıkım maliyeti ise 122,86 USD/sa değeri ile $\dot{C}_{w,komp}$ 'e aittir.
- 630 Nm için en yüksek ekserji yıkım maliyeti 679,50 USD/sa değeri ile $\dot{C}_4$ 'de tespit edilmiştir. En düşük ekserji yıkım maliyeti ise 120,82 USD/sa değeri ile $\dot{C}_{w,komp}$ 'e aittir.

5.3. İleri Ekserji Analiz Sonuçları

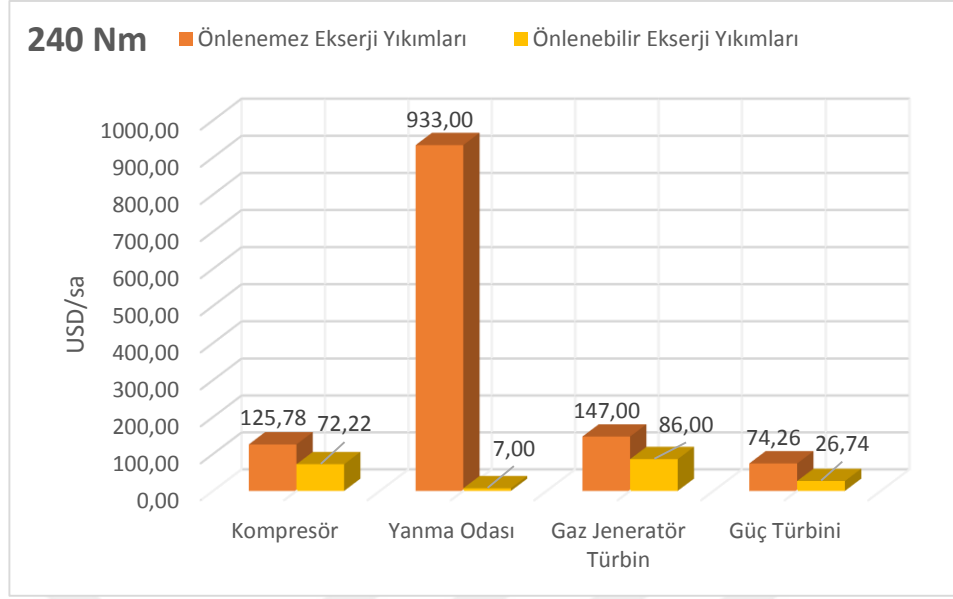
İleri ekserji analizinde amaçlanan, geleneksel ekserji analizi sonucu elde edilen ekserji yıkımı değerlerini kategorize etmektir. Bu kategorilerden ilki söz konusu ekserji yıkımlarının önlenabilir/önlenemez şeklinde kategorize edilmesidir.

5.3.1. Önlenabilir ve önlenemez ekserji yıkımına ait sonuçlar

Tablo 5.1. 240 Nm için belirlenen önlenemez ve ideal şartlar

240 Nm	Gerçek Şartlar	Önlenemez Şartlar	İdeal şartlar
Kompresör	$\eta_{komp} = 0,851$	$\eta_{komp} = 0,90$	$\eta_{komp} = 1$
Yanma Odası	$\Delta P = 0,0365$	$\Delta P = 0,01$	$\Delta P = 0$
Gaz Jeneratör Türbin	$\eta_{gjt} = 0,923$	$\eta_{gjt} = 0,95$	$\eta_{gjt} = 1$
Güç Türbini	$\eta_{gt} = 0,933$	$\eta_{gt} = 0,95$	$\eta_{gt} = 1$

Turboprop motor komponentlerine ait ekserji yıkım değerlerinin önlenabilir/önlenemez şeklinde kategorize edilebilmesi için öncelikle *önlenemez şartların* belirlenmesi gerektiği daha önce belirtilmişti. Turboprop motorun 240 Nm tork değeri için belirlenmiş olan önlenemez şartlar Tablo 5.1 'de verilmiştir. Buna göre, gerçek verimi %85,1 olan kompresör için önlenemez şartlar altındaki verim %90 olarak belirlenmiştir. Yanma odası için gerçekte %3,65 olan basınç değişiminin (ΔP), önlenemez şartlar altında %1 olduğu varsayılmıştır. Gaz jeneratör türbinin gerçekte olan %92,3 verimi, önlenemez durumda %95 olarak alınmıştır. Güç türbinine ait %93,3 olan gerçek verim, önlenemez ekserji yıkımı hesaplanırken %95 olarak hesaba katılmıştır.



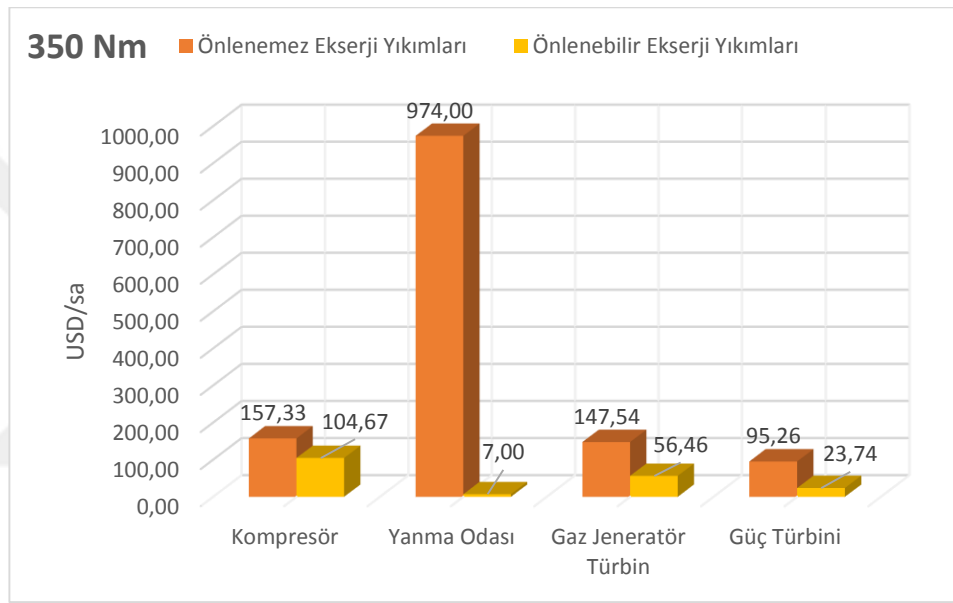
Şekil 5.12. 240 Nm için önlenebilir/önlenebilir ekserji yıkımı bileşenleri

Tablo 5.1’de verilen önlenebilir şartlar kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen 240 Nm tork değerine ait sonuçlar Şekil 5.12’de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, 240 Nm tork altındaki turboprop motora ait 1472 kW’lık toplam ekserji yıkımının %87 önlenebilir olduğu anlaşılmıştır. En yüksek önlenebilir ekserji yıkımı yanma odasında 933 kW olarak hesaplanmıştır. Yanma odasındaki ekserji yıkımının %99,26’sı önlenebilirdir. Kompresörde meydana gelen 198 kW’lık ekserji yıkımının %64’ünün önlenebilir olduğu belirlenmiştir. Gaz jeneratör türbinde oluşan 233 kW’lık ekserji yıkımının %63’ünün, güç türbinde meydana gelen 101 kW’lık ekserji yıkımının ise %74’ünün önlenebilir olduğu anlaşılmıştır. 240 Nm tork değeri için ekserji yıkımının büyük oranda önlenebilir olduğu, sadece %13’lük bir kısmın önlenebilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 5.2. 350 Nm için belirlenen önlenebilir ve ideal şartlar

350 Nm	Gerçek Şartlar	Önlenebilir Şartlar	İdeal şartlar
Kompresör	$\eta_{komp} = 0,844$	$\eta_{komp} = 0,90$	$\eta_{komp} = 1$
Yanma Odası	$\Delta P = 0,0327$	$\Delta P = 0,01$	$\Delta P = 0$
Gaz Jeneratör Türbin	$\eta_{gjt} = 0,945$	$\eta_{gjt} = 0,96$	$\eta_{gjt} = 1$
Güç Türbini	$\eta_{gt} = 0,933$	$\eta_{gt} = 0,95$	$\eta_{gt} = 1$

Turboprop motorun 350 Nm tork değeri için belirlenmiş olan önlenemez şartlar Tablo 5.2’de verilmiştir. Buna göre, gerçek verimi %84,4 olan kompresör için önlenemez şartlar altındaki verim %90 olarak belirlenmiştir. Yanma odası için gerçekte %3,27 olan basınç değişimi (ΔP), önlenemez şartlar altında %1 olarak varsayılmıştır. Gaz jeneratör türbinin gerçekte %94,5 olan verimi, önlenemez durumda %96 olarak alınmıştır. Güç türbinine ait olan %93,8 gerçek verim, önlenemez ekserji yıkımı hesaplanırken %95 olarak hesaba katılmıştır.



Şekil 5.13. 350 Nm için önlenebilir/önlenemez ekserji yıkımı bileşenleri

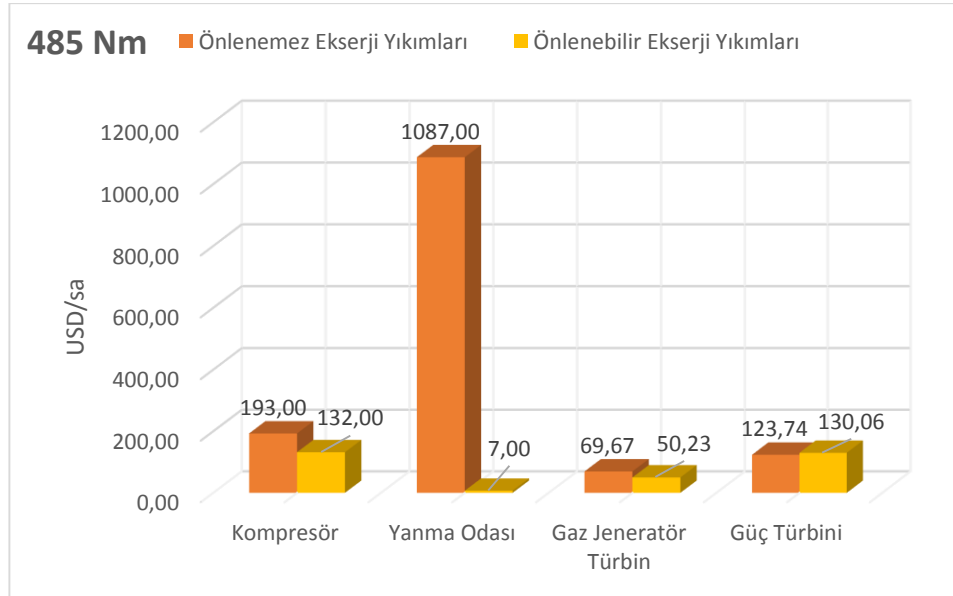
Tablo 5.2’de verilen önlenemez şartlar kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen 350 Nm tork değerine ait sonuçlar Şekil 5.13’te gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, 350 Nm tork altındaki turboprop motora ait 1566 kW’lık toplam ekserji yıkımının %88 önlenemez olduğu anlaşılmıştır. En yüksek önlenemez ekserji yıkımı yanma odasında 974 kW olarak hesaplanmıştır. Yanma odasındaki ekserji yıkımının %99,29’u önlenemezdir. Kompresörde meydana gelen 262 kW’lık ekserji yıkımının %60’ının önlenemez olduğu belirlenmiştir. Gaz jeneratör türbinde oluşan 204 kW’lık ekserji yıkımının %72’sinin, güç türbinde meydana gelen 119 kW’lık ekserji yıkımının ise %80’inin önlenemez olduğu anlaşılmıştır. 350 Nm tork değeri için ekserji yıkımının

büyük oranda önlenemez olduğu, sadece %12’lik bir kısmın önlenebilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 5.3. 485 Nm için belirlenen önlenemez ve ideal şartlar

485 Nm	Gerçek Şartlar	Önlenemez Şartlar	İdeal şartlar
Kompresör	$\eta_{komp} = 0,842$	$\eta_{komp} = 0,90$	$\eta_{komp} = 1$
Yanma Odası	$\Delta P = 0,0307$	$\Delta P = 0,01$	$\Delta P = 0$
Gaz Jeneratör Türbin	$\eta_{gjt} = 0,974$	$\eta_{gjt} = 0,985$	$\eta_{gjt} = 1$
Güç Türbini	$\eta_{gt} = 0,903$	$\eta_{gt} = 0,95$	$\eta_{gt} = 1$

Turboprop motorun 485 Nm tork değeri için belirlenmiş olan önlenemez şartlar Tablo 5.3’de verilmiştir. Buna göre, gerçek verimi %84,2 olan kompresör için önlenemez şartlar altındaki verim %90 olarak belirlenmiştir. Yanma odası için gerçekte %3,07 olan basınç değişimi (ΔP), önlenemez şartlar altında %1 olarak varsayılmıştır. Gaz jeneratör türbinin gerçekte %97,4 olan verimi, önlenemez durumda %98,5 olarak alınmıştır. Güç türbinine ait olan %90,3 verim, önlenemez ekserji yıkımı hesaplanırken %95 olarak hesaba katılmıştır.



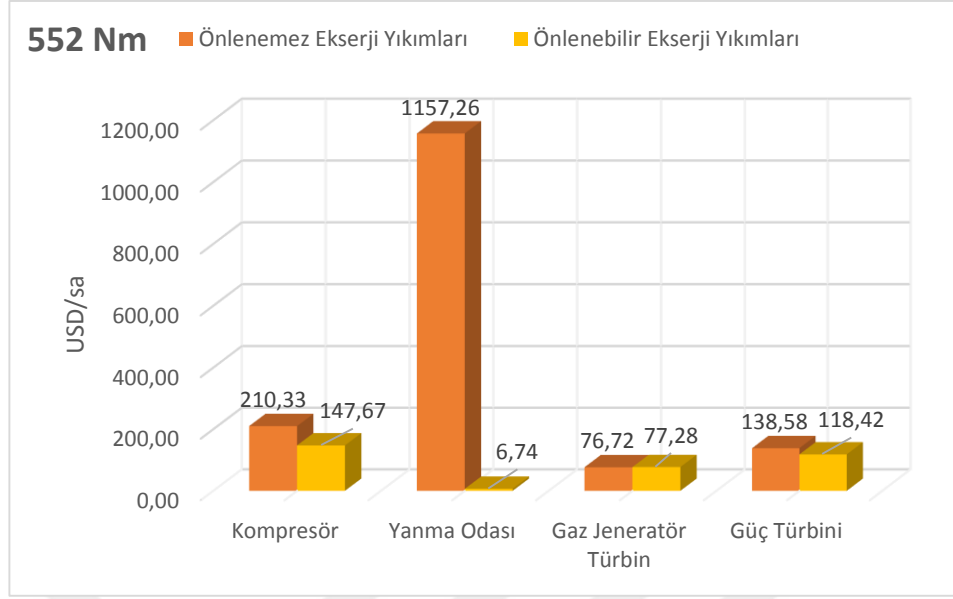
Şekil 5.14. 485 Nm için önlenebilir/önlenemez ekserji yıkımı bileşenleri

Tablo 5.3’de verilen önlenemez şartlar kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen 485 Nm tork değerine ait sonuçlar Şekil 5.14’de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, 485 Nm tork altındaki turboprop motora ait 1793 kW’lık toplam ekserji yıkımının %82 önlenemez olduğu anlaşılmıştır. En yüksek önlenemez ekserji yıkımı yanma odasında 1087 kW olarak hesaplanmıştır. Yanma odasındaki ekserji yıkımının %99,36’u önlenemezdir. Kompresörde meydana gelen 325 kW’lık ekserji yıkımının %59’unun önlenemez olduğu belirlenmiştir. Gaz jeneratör türbinde oluşan 120 kW’lık ekserji yıkımının %58’inin, güç türbinde meydana gelen 254 kW’lık ekserji yıkımının ise %49’unun önlenemez olduğu anlaşılmıştır. 485 Nm tork değeri için ekserji yıkımının büyük oranda önlenemez olduğu, sadece %18’lik bir kısmın önlenebilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 5.4. 552 Nm için belirlenen önlenemez ve ideal şartlar

552 Nm	<i>Gerçek Şartlar</i>	<i>Önlenemez Şartlar</i>	<i>İdeal şartlar</i>
Kompresör	$\eta_{komp} = 0,841$	$\eta_{komp} = 0,90$	$\eta_{komp} = 1$
Yanma Odası	$\Delta P = 0,0327$	$\Delta P = 0,01$	$\Delta P = 0$
Gaz Jeneratör Türbin	$\eta_{gjt} = 0,97$	$\eta_{gjt} = 0,985$	$\eta_{gjt} = 1$
Güç Türbini	$\eta_{gt} = 0,911$	$\eta_{gt} = 0,95$	$\eta_{gt} = 1$

Turboprop motorun 552 Nm tork değeri için belirlenmiş olan önlenemez şartlar Tablo 5.4’de verilmiştir. Buna göre, gerçek verimi %84,1 olan kompresör için önlenemez şartlar altındaki verim %90 olarak belirlenmiştir. Yanma odası için gerçekte %3,27 olan basınç değişimi (ΔP), önlenemez şartlar altında %1 olarak varsayılmıştır. Gaz jeneratör türbinin gerçekte %97 olan verimi, önlenemez durumda %98,5 olarak alınmıştır. Güç türbinine ait olan %91,1 verim, önlenemez ekserji yıkımı hesaplanırken %95 olarak hesaba katılmıştır.



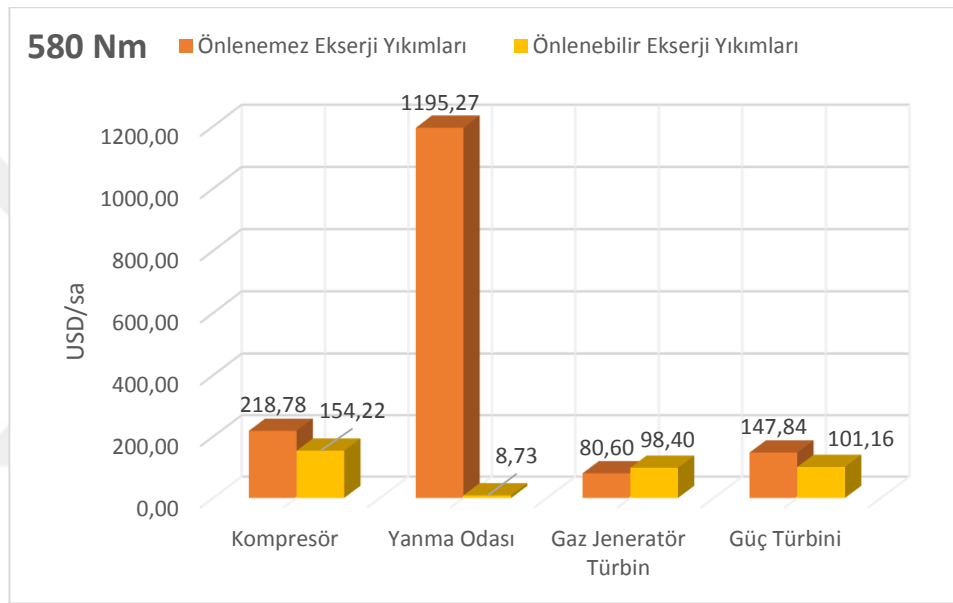
Şekil 5.15. 552 Nm için önlenebilir/önlenebilir ekserji yıkımı bileşenleri

Tablo 5.4’de verilen önlenebilir şartlar kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen 552 Nm tork değerine ait sonuçlar Şekil 5.15’de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, 552 Nm tork altındaki turboprop motora ait 1933 kW’lık toplam ekserji yıkımının %82 önlenebilir olduğu anlaşılmıştır. En yüksek önlenebilir ekserji yıkımı yanma odasında 1157 kW olarak hesaplanmıştır. Yanma odasındaki ekserji yıkımının %99,42’si önlenebilirdir. Kompresörde meydana gelen 358 kW’lık ekserji yıkımının %59’unun önlenebilir olduğu belirlenmiştir. Gaz jeneratör türbinde oluşan 154 kW’lık ekserji yıkımının %50’sinin, güç türbinde meydana gelen 257 kW’lık ekserji yıkımının ise %54’ünün önlenebilir olduğu anlaşılmıştır. 552 Nm tork değeri için ekserji yıkımının büyük oranda önlenebilir olduğu, sadece %18’lik bir kısmın önlenebilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 5.5. 580 Nm için belirlenen önlenebilir ve ideal şartlar

580 Nm	Gerçek Şartlar	Önlenebilir Şartlar	İdeal şartlar
Kompresör	$\eta_{komp} = 0,841$	$\eta_{komp} = 0,90$	$\eta_{komp} = 1$
Yanma Odası	$\Delta P = 0,0333$	$\Delta P = 0,01$	$\Delta P = 0$
Gaz Jeneratör Türbin	$\eta_{gjt} = 0,967$	$\eta_{gjt} = 0,985$	$\eta_{gjt} = 1$
Güç Türbini	$\eta_{gt} = 0,918$	$\eta_{gt} = 0,95$	$\eta_{gt} = 1$

Turboprop motorun 580 Nm tork değeri için belirlenmiş olan önlenemez şartlar Tablo 5.5’de verilmiştir. Buna göre, gerçek verimi %84,1 olan kompresör için önlenemez şartlar altındaki verim %90 olarak belirlenmiştir. Yanma odası için gerçekte %3,33 olan basınç değişimi (ΔP), önlenemez şartlar altında %1 olarak varsayılmıştır. Gaz jeneratör türbinin gerçekte %96,7 olan gerçek verimi, önlenemez durumda %98,5 olarak alınmıştır. Güç türbinine ait olan %91,8 gerçek verim, önlenemez ekserji yıkımı hesaplanırken %95 olarak hesaba katılmıştır.



Şekil 5.16. 580 Nm için önlenebilir/önlenemez ekserji yıkımı bileşenleri

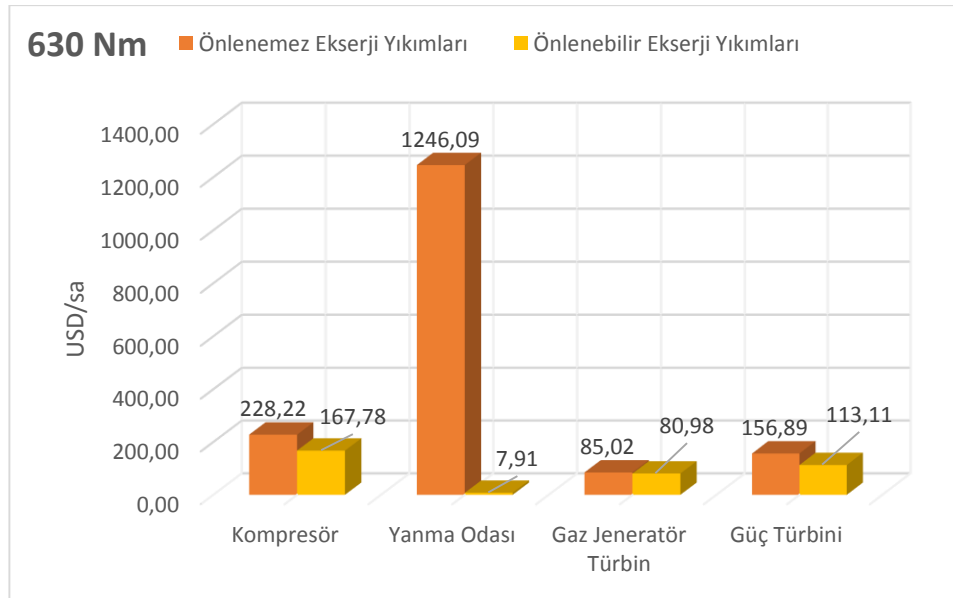
Tablo 5.5’de verilen önlenemez şartlar kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen 580 Nm tork değerine ait sonuçlar Şekil 5.16’da gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, 580 Nm tork altındaki turboprop motora ait 2005 kW’lık toplam ekserji yıkımının %82 önlenemez olduğu anlaşılmıştır. En yüksek önlenemez ekserji yıkımı yanma odasında 1195 kW olarak hesaplanmıştır. Yanma odasındaki ekserji yıkımının %99,27’si önlenemezdir. Kompresörde meydana gelen 373 kW’lık ekserji yıkımının %59’unun önlenemez olduğu belirlenmiştir. Gaz jeneratör türbinde oluşan 179 kW’lık ekserji yıkımının %45’inin, güç türbinde meydana gelen 249 kW’lık ekserji yıkımının ise %59’unun önlenemez olduğu anlaşılmıştır. 580 Nm tork değeri için ekserji yıkımının

büyük oranda önlenemez olduğu, sadece %18’lik bir kısmın önlenebilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 5.6. 630 Nm için belirlenen önlenemez ve ideal şartlar

630 Nm	Gerçek Şartlar	Önlenemez Şartlar	İdeal şartlar
Kompresör	$\eta_{komp} = 0,838$	$\eta_{komp} = 0,90$	$\eta_{komp} = 1$
Yanma Odası	$\Delta P = 0,0301$	$\Delta P = 0,01$	$\Delta P = 0$
Gaz Jeneratör Türbin	$\eta_{gjt} = 0,971$	$\eta_{gjt} = 0,985$	$\eta_{gjt} = 1$
Güç Türbini	$\eta_{gt} = 0,917$	$\eta_{gt} = 0,95$	$\eta_{gt} = 1$

Turboprop motorun 630 Nm tork değeri için belirlenmiş olan önlenemez şartlar Tablo 5.6’da verilmiştir. Buna göre, gerçek verimi %83,8 olan kompresör için önlenemez şartlar altındaki verim %90 olarak belirlenmiştir. Yanma odası için gerçekte %3,01 olan basınç değişimi (ΔP), önlenemez şartlar altında %1 olarak varsayılmıştır. Gaz jeneratör türbinin gerçekte %97,1 olan verimi, önlenemez durumda %98,5 olarak alınmıştır. Güç türbinine ait olan %91,7 gerçek verim, önlenemez ekserji yıkımı hesaplanırken %95 olarak hesaba katılmıştır.

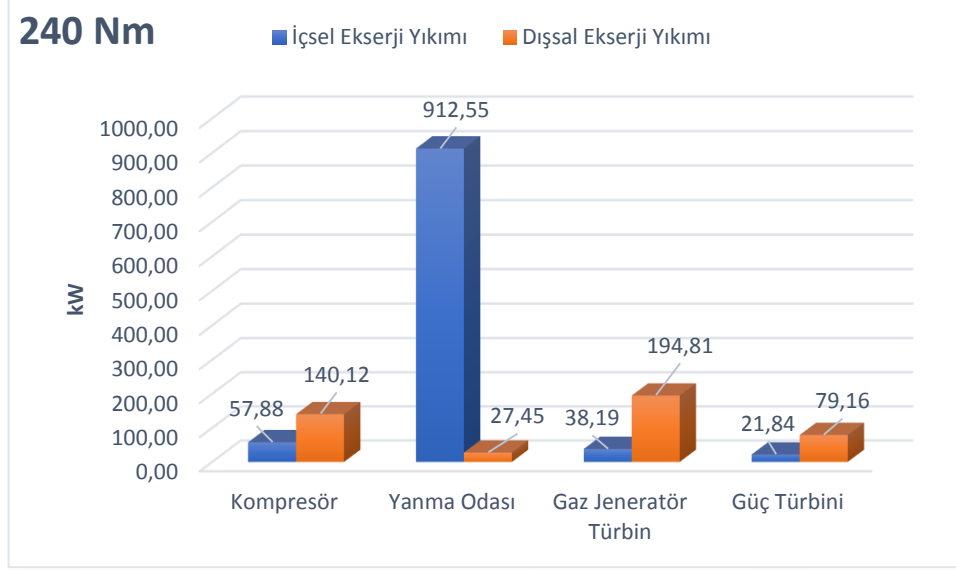


Şekil 5.17. 630 Nm için önlenebilir/önlenemez ekserji yıkımı bileşenleri

Tablo 5.6’da verilen önlenemez şartlar kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen 630 Nm tork değerine ait sonuçlar Şekil 5.17’de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, 630 Nm tork altındaki turboprop motora ait 2086 kW’lık toplam ekserji yıkımının %82 önlenemez olduğu anlaşılmıştır. En yüksek önlenemez ekserji yıkımı yanma odasında 1246 kW olarak hesaplanmıştır. Yanma odasındaki ekserji yıkımının %99,37’si önlenemezdir. Kompresörde meydana gelen 396 kW’lık ekserji yıkımının %58’inin önlenemez olduğu belirlenmiştir. Gaz jeneratör türbinde oluşan 166 kW’lık ekserji yıkımının %51’inin, güç türbinde meydana gelen 270 kW’lık ekserji yıkımının ise %58’inin önlenemez olduğu anlaşılmıştır. 630 Nm tork değeri için ekserji yıkımının büyük oranda önlenemez olduğu, sadece %18’lik bir kısmın önlenebilir olduğu sonucuna varılmıştır.

5.3.2. İçsel ve dışsal ekserji yıkımına ait sonuçlar

240 Nm tork altındaki turboprop motorun komponentlerine ait içsel ve dışsal ekserji yıkımlarının hesaplanması için belirlenmiş olan ideal şartlar Tablo 5.1’de verilmiştir. Buna göre, gerçek verimi %85,1 olan kompresör için ideal şartlar altındaki verim %100 olarak alınmıştır. Yanma odası için gerçekte %3,65 olan basınç değişiminin (ΔP), önlenemez şartlar altında $\Delta P=0$ olduğu varsayılmıştır. Gaz jeneratör türbinin ve güç türbininin gerçekte sırasıyla %92,3 ve %93,3 olan verimleri, ideal şartlar altında %100 olarak hesaba katılmıştır.

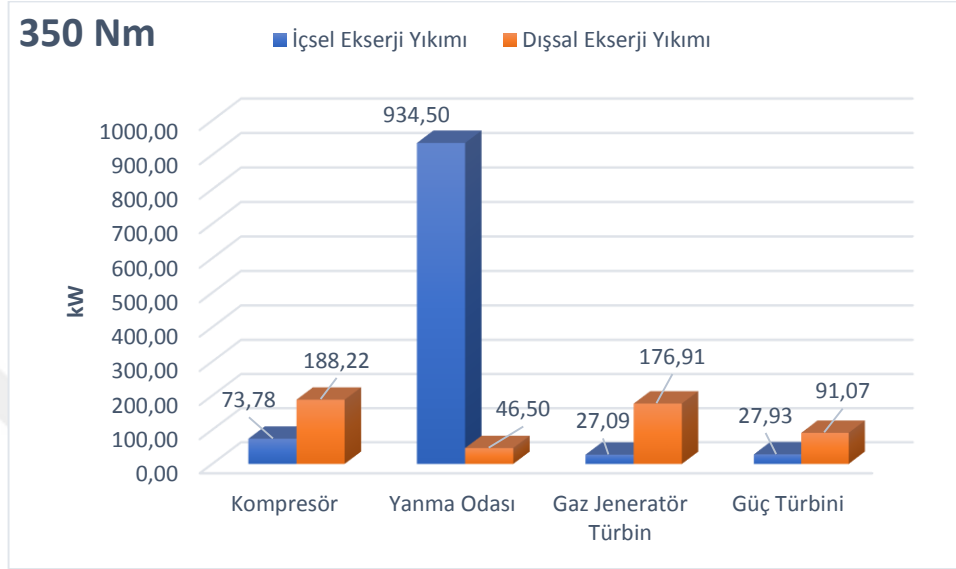


Şekil 5.18. 240 Nm için içsel/dışsal ekserji yıkımı bileşenleri

Tablo 5.1’de verilen ideal şartlar kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen 240 Nm tork değerine ait sonuçlar Şekil 5.18’de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, 240 Nm tork altındaki turboprop motora ait 1472 kW’lık toplam ekserji yıkımının %70 içsel olduğu anlaşılmıştır. En yüksek içsel ekserji yıkımı yanma odasında 913 kW olarak hesaplanmıştır. Yanma odasındaki ekserji yıkımının %97’si içseldir. Kompresörde meydana gelen 198 kW’lık ekserji yıkımının %29’unun içsel olduğu belirlenmiştir. Gaz jeneratör türbinde oluşan 233 kW’lık ekserji yıkımının %16’sının, güç türbinde meydana gelen 101 kW’lık ekserji yıkımının ise %22’sinin içsel olduğu anlaşılmıştır. Komponentler açısından bakıldığında yanma odası hariç diğer komponentlerin daha çok dışsal kaynaklı bir ekserji yıkımına sahip olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte 240 Nm tork değeri için turboprop motora ait toplam ekserji yıkımının büyük oranda içsel olduğu, sadece %30’luk bir kısmın dışsal olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun en önemli sebebi motor içerisindeki en yüksek tersinmezlik kaynağı komponent olan yanma odasına ait ekserji yıkımının çok büyük oranda içsel olmasıdır. 240 Nm için turboprop motor komponentlerine ait toplam içsel ekserji yıkımının %91’i tek başına yanma odasına aittir.

350 Nm tork altındaki turboprop motorun komponentlerine ait içsel ve dışsal ekserji yıkımlarının hesaplanması için belirlenmiş olan ideal şartlar Tablo 5.2’de verilmiştir. Buna göre, gerçek verimi %84,4 olan kompresör için ideal şartlar altındaki verim %100 olarak alınmıştır. Yanma odası için gerçekte %3,27 olan basınç değişiminin (ΔP),

önlenebilir şartlar altında $\Delta P=0$ olduğu varsayılmıştır. Gaz jeneratör türbinin ve güç türbininin gerçekte sırasıyla %94,5 ve %93,8 olan verimleri, ideal şartlar altında %100 olarak hesaba katılmıştır.

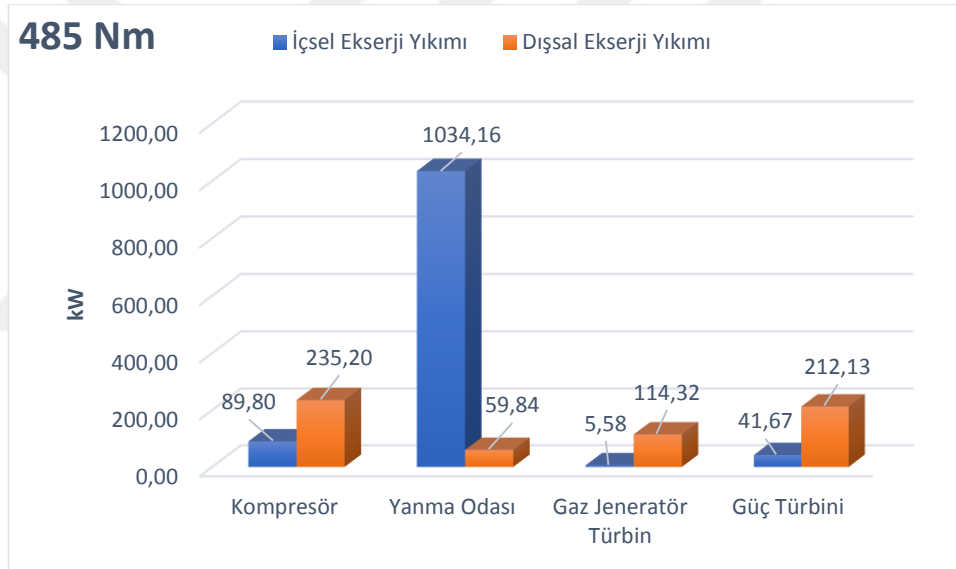


Şekil 5.19. 350 Nm için içsel/dışsal ekserji yıkımı bileşenleri

Tablo 5.2’de verilen ideal şartlar kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen 350 Nm yük değerine ait sonuçlar Şekil 5.19’da gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, 350 Nm tork altındaki turboprop motora ait 1566 kW’lık toplam ekserji yıkımının %68 içsel olduğu anlaşılmıştır. En yüksek içsel ekserji yıkımı yanma odasında 935 kW olarak hesaplanmıştır. Yanma odasındaki ekserji yıkımının %95’i içseldir. Kompresörde meydana gelen 262 kW’lık ekserji yıkımının %28’inin içsel olduğu belirlenmiştir. Gaz jeneratör türbinde oluşan 204 kW’lık ekserji yıkımının %13’ünün, güç türbinde meydana gelen 119 kW’lık ekserji yıkımının ise %23’ünün içsel olduğu anlaşılmıştır. Komponentler açısından bakıldığında yanma odası hariç diğer komponentlerin daha çok dışsal kaynaklı bir ekserji yıkımına sahip olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte 350 Nm tork değeri için turboprop motora ait toplam ekserji yıkımının büyük oranda içsel olduğu, sadece %32’lik bir kısmın dışsal olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun en önemli sebebi motor içerisindeki en yüksek tersinmezlik kaynağı komponent olan yanma odasına ait ekserji yıkımının çok büyük oranda içsel olmasıdır. 350 Nm için turboprop motor

komponentlerine ait toplam içsel ekserji yıkımının %92'si tek başına yanma odasına aittir.

485 Nm yük altındaki turboprop motorun komponentlerine ait içsel ve dışsal ekserji yıkımlarının hesaplanması için belirlenmiş olan ideal şartlar Tablo 5.3'te verilmiştir. Buna göre, gerçek verimi %84,2 olan kompresör için ideal şartlar altındaki verim %100 olarak alınmıştır. Yanma odası için gerçekte %3,07 olan basınç değişiminin (ΔP), önlenemez şartlar altında $\Delta P=0$ olduğu varsayılmıştır. Gaz jeneratör türbinin ve güç türbininin gerçekte sırasıyla %97,4 ve %90,3 olan verimleri, ideal şartlar altında %100 olarak hesaba katılmıştır.

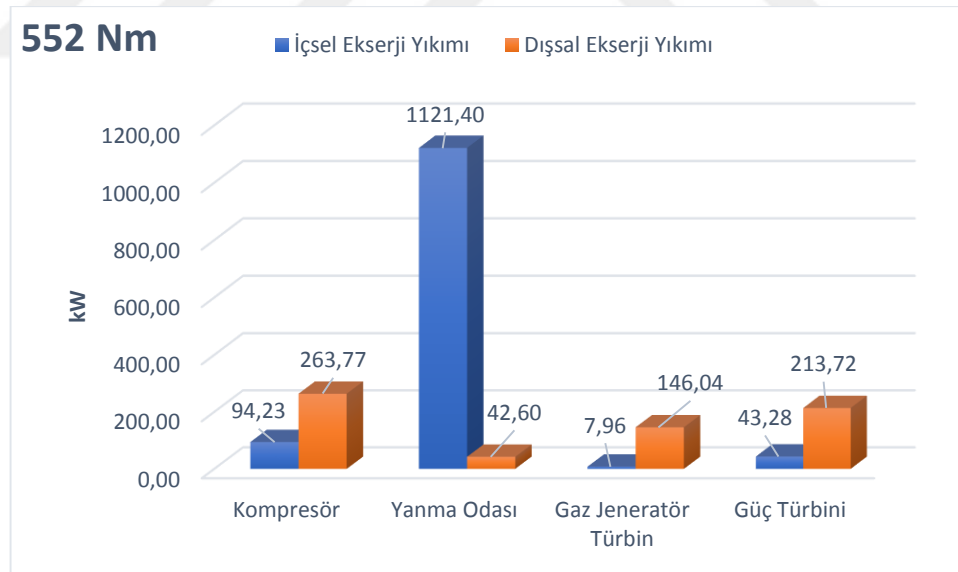


Şekil 5.20. 485 Nm için içsel/dışsal ekserji yıkımı bileşenleri

Tablo 5.3'te verilen ideal şartlar kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen 485 Nm tork değerine ait sonuçlar Şekil 5.20'de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, 485 Nm tork altındaki turboprop motora ait 1792 kW'lık toplam ekserji yıkımının %65 içsel olduğu anlaşılmıştır. En yüksek içsel ekserji yıkımı yanma odasında 1034 kW olarak hesaplanmıştır. Yanma odasındaki ekserji yıkımının %95'i içseldir. Kompresörde meydana gelen 325 kW'lık ekserji yıkımının %28'inin içsel olduğu belirlenmiştir. Gaz jeneratör türbinde oluşan 120 kW'lık ekserji yıkımının %5'inin, güç türbinde meydana gelen 254 kW'lık ekserji yıkımının ise %16'sının içsel olduğu anlaşılmıştır.

Komponentler açısından bakıldığında yanma odası hariç diğer komponentlerin daha çok dışsal kaynaklı bir ekserji yıkımına sahip olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte 485 Nm tork değeri için turboprop motora ait toplam ekserji yıkımının büyük oranda içsel olduğu, sadece %35’lik bir kısmın dışsal olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun en önemli sebebi motor içerisindeki en yüksek tersinmezlik kaynağı komponent olan yanma odasına ait ekserji yıkımının çok büyük oranda içsel olmasıdır. 485 Nm için turboprop motor komponentlerine ait toplam içsel ekserji yıkımının %93’ü tek başına yanma odasına aittir.

552 Nm yük altındaki turboprop motorun komponentlerine ait içsel ve dışsal ekserji yıkımlarının hesaplanması için belirlenmiş olan ideal şartlar Tablo 5.4’te verilmiştir. Buna göre, gerçek verimi %84,1 olan kompresör için ideal şartlar altındaki verim %100 olarak alınmıştır. Yanma odası için gerçekte %3,27 olan basınç değişiminin (ΔP), önlenemez şartlar altında $\Delta P=0$ olduğu varsayılmıştır. Gaz jeneratör türbinin ve güç türbininin gerçekte sırasıyla %97 ve %91,1 olan verimleri, ideal şartlar altında %100 olarak hesaba katılmıştır.

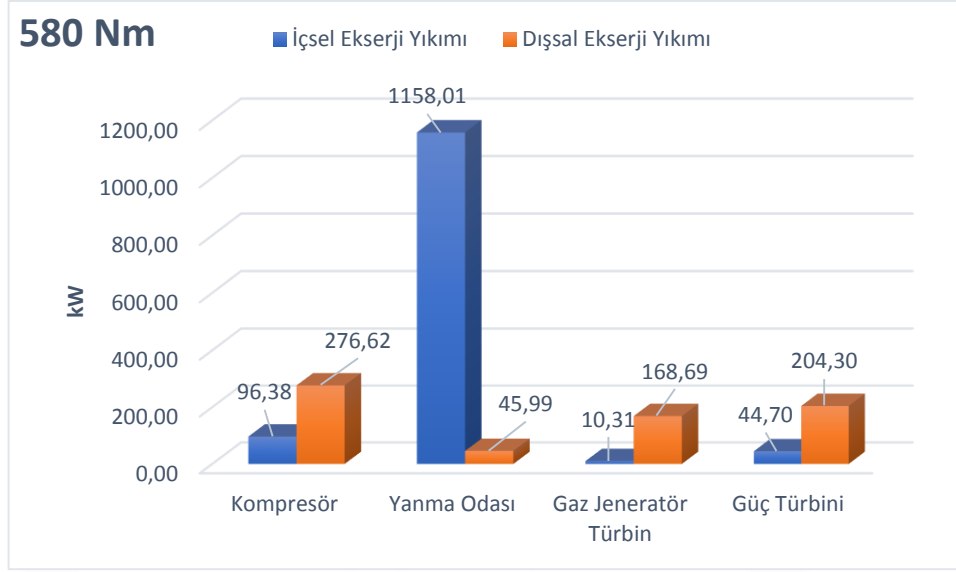


Şekil 5.21. 552 Nm için içsel/dışsal ekserji yıkımı bileşenleri

Tablo 5.4’te verilen ideal şartlar kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen 552 Nm tork değerine ait sonuçlar Şekil 5.21’de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, 552 Nm yük altındaki turboprop motora ait 1933 kW’lık toplam ekserji yıkımının %66

içsel olduğu anlaşılmıştır. En yüksek içsel ekserji yıkımı yanma odasında 1121 kW olarak hesaplanmıştır. Yanma odasındaki ekserji yıkımının %96'sı içseldir. Kompresörde meydana gelen 358 kW'lık ekserji yıkımının %26'sının içsel olduğu belirlenmiştir. Gaz jeneratör türbinde oluşan 154 kW'lık ekserji yıkımının %5'inin, güç türbinde meydana gelen 257 kW'lık ekserji yıkımının ise %17'sinin içsel olduğu anlaşılmıştır. Komponentler açısından bakıldığında yanma odası hariç diğer komponentlerin daha çok dışsal kaynaklı bir ekserji yıkımına sahip olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte 552 Nm tork değeri için turboprop motora ait toplam ekserji yıkımının büyük oranda içsel olduğu, sadece %34'lük bir kısmın dışsal olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun en önemli sebebi motor içerisindeki en yüksek tersinmezlik kaynağı komponent olan yanma odasına ait ekserji yıkımının çok büyük oranda içsel olmasıdır. 552 Nm için turboprop motor komponentlerine ait toplam içsel ekserji yıkımının %92'si tek başına yanma odasına aittir.

580 Nm yük altındaki turboprop motorun komponentlerine ait içsel ve dışsal ekserji yıkımlarının hesaplanması için belirlenmiş olan ideal şartlar Tablo 5.5'te verilmiştir. Buna göre, gerçek verimi %84,1 olan kompresör için ideal şartlar altındaki verim %100 olarak alınmıştır. Yanma odası için gerçekte %3,33 olan basınç değişiminin (ΔP), önlenemez şartlar altında $\Delta P=0$ olduğu varsayılmıştır. Gaz jeneratör türbinin ve güç türbininin gerçekte sırasıyla %96,7 ve %91,8 olan verimleri, ideal şartlar altında %100 olarak hesaba katılmıştır.

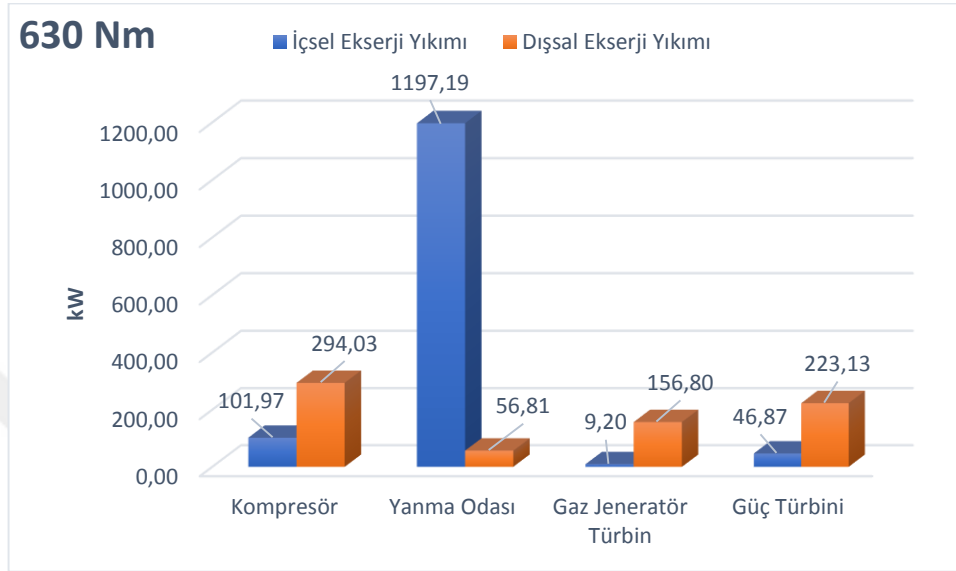


Şekil 5.22. 580 Nm için içsel/dışsal ekserji yıkımı bileşenleri

Tablo 5.5’te verilen ideal şartlar kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen 580 Nm tork değerine ait sonuçlar Şekil 5.22’de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, 580 Nm yük altındaki turboprop motora ait 2005 kW’lık toplam ekserji yıkımının %65 içsel olduğu anlaşılmıştır. En yüksek içsel ekserji yıkımı yanma odasında 1158 kW olarak hesaplanmıştır. Yanma odasındaki ekserji yıkımının %96’sı içseldir. Kompresörde meydana gelen 373 kW’lık ekserji yıkımının %26’sının içsel olduğu belirlenmiştir. Gaz jeneratör türbinde oluşan 179 kW’lık ekserji yıkımının %6’sının, güç türbinde meydana gelen 249 kW’lık ekserji yıkımının ise %18’inin içsel olduğu anlaşılmıştır. Komponentler açısından bakıldığında yanma odası hariç diğer komponentlerin daha çok dışsal kaynaklı bir ekserji yıkımına sahip olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte 580 Nm tork değeri için turboprop motora ait toplam ekserji yıkımının büyük oranda içsel olduğu, sadece %35’lik bir kısmın dışsal olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun en önemli sebebi motor içerisindeki en yüksek tersinmezlik kaynağı komponent olan yanma odasına ait ekserji yıkımının çok büyük oranda içsel olmasıdır. 580 Nm için turboprop motor komponentlerine ait toplam içsel ekserji yıkımının %92’ tek başına yanma odasına aittir.

630 Nm yük altındaki turboprop motorun komponentlerine ait içsel ve dışsal ekserji yıkımlarının hesaplanması için belirlenmiş olan ideal şartlar Tablo 5.6’da verilmiştir. Buna göre, gerçek verimi %83,8 olan kompresör için ideal şartlar altındaki verim %100 olarak alınmıştır. Yanma odası için gerçekte %3,01 olan basınç değişiminin (ΔP),

ölenemez şartlar altında $\Delta P=0$ olduğu varsayılmıştır. Gaz jeneratör türbinin ve güç türbininin gerçekte sırasıyla %97,1 ve %91,7 olan verimleri, ideal şartlar altında %100 olarak hesaba katılmıştır.



Şekil 5.23. 630 Nm için içsel/dışsal ekserji yıkımı bileşenleri

Tablo 5.6’da verilen ideal şartlar kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen 630 Nm tork değerine ait sonuçlar Şekil 5.23’te gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, 630 Nm yük altındaki turboprop motora ait 2086 kW’lık toplam ekserji yıkımının %65 içsel olduğu anlaşılmıştır. En yüksek içsel ekserji yıkımı yanma odasında 1197 kW olarak hesaplanmıştır. Yanma odasındaki ekserji yıkımının %95’i içseldir. Kompresörde meydana gelen 396 kW’lık ekserji yıkımının %26’sının içsel olduğu belirlenmiştir. Gaz jeneratör türbinde oluşan 166 kW’lık ekserji yıkımının %6’sının, güç türbinde meydana gelen 270 kW’lık ekserji yıkımının ise %17’sinin içsel olduğu anlaşılmıştır. Komponentler açısından bakıldığında yanma odası hariç diğer komponentlerin daha çok dışsal kaynaklı bir ekserji yıkımına sahip olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte 630 Nm tork değeri için turboprop motora ait toplam ekserji yıkımının büyük oranda içsel olduğu, sadece %35’lik bir kısmın dışsal olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun en önemli sebebi motor içerisindeki en yüksek tersinmezlik kaynağı komponent olan yanma odasına ait ekserji yıkımının çok büyük oranda içsel olmasıdır. 630 Nm için turboprop motor komponentlerine ait toplam içsel ekserji yıkımının %93’ü tek başına yanma odasına aittir.

5.3.3. Önlenebilir/önlenebilir ve içsel/dışsal ekserji yıkımlarının birleştirilme sonuçları

İleri ekserji analizi sonrasında elde edilen önlenebilir/önlenebilir ve içsel/dışsal ekserji yıkımı bileşenleri, daha detaylı analiz için eşleştirilebilmektedir. Denklemler (4.40-4.43) yardımıyla, her bir komponente ait ekserji yıkımı maliyetleri önlenebilir/içsel, önlenebilir/dışsal, önlenebilir/içsel ve önlenebilir/dışsal olacak şekilde alt birimlere ayrılmıştır. Aynı şekilde Denklemler (4.44-4.47) yardımıyla da, komponent maliyetleri önlenebilir/içsel, önlenebilir/dışsal, önlenebilir/içsel ve önlenebilir/dışsal olacak şekilde dört alt bileşene ayrılmıştır. 240 Nm tork değeri için elde edilen sonuçlar Tablo 5.7’de verilmiştir.

Tablo 5.7. 240 Nm için ileri ekserji analiz sonuçları

240 Nm	Kompresör	Yanma Odası	Gaz Jeneratör Türbin	Güç Türbini
$\dot{E}x_{yık,k}$ (kW)	198,00	940,00	233,00	101,00
$\dot{E}x_{yık,k}^{UN,EN}$ (kW)	36,76	905,76	24,09	16,06
$\dot{E}x_{yık,k}^{UN,EX}$ (kW)	89,01	27,24	122,91	58,21
$\dot{E}x_{yık,k}^{AV,EN}$ (kW)	21,11	6,80	14,10	5,78
$\dot{E}x_{yık,k}^{AV,EX}$ (kW)	51,11	0,20	71,90	20,96

240 Nm için kompresöre ait önlenebilir/içsel ekserji yıkımı 21,11 kW olarak hesaplanmıştır. Buna göre kompresördeki ekserji yıkımının %11’i önlenebilir/içseldir. Yanma odasında ise ekserji yıkımının 905,76 kW’lık değerle %96’sının önlenebilir/içsel olduğu anlaşılmaktadır. 240 Nm tork değeri için yanma odasına ait ekserji yıkımının sadece %1’inin önlenebilir/içsel olduğu belirlenmiştir. Gaz jeneratör türbinde ise, ekserji yıkımı %53’lük oranla büyük ölçüde önlenebilir/dışsal’dır. Buradaki önlenebilir/içsel ekserji yıkımı oranı sadece %6 olarak tespit edilmiştir. Güç türbinin ise motor içerisinde %58’lik oranla en yüksek önlenebilir/dışsal ekserji yıkımına sahip komponent olduğu anlaşılmıştır. Buradaki önlenebilir/içsel ekserji yıkımı oranı da %6 olarak saptanmıştır.

Tablo 5.8. 350 Nm için ileri ekserji analiz sonuçları

350 Nm	Kompresör	Yanma Odası	Gaz Jeneratör Türbin	Güç Türbini
$\dot{E}x_{yık,k}$ (kW)	262,00	981,00	204,00	119,00
$\dot{E}x_{yık,k}^{UN,EN}$ (kW)	44,31	927,83	19,59	22,36
$\dot{E}x_{yık,k}^{UN,EX}$ (kW)	113,03	46,17	127,95	72,90
$\dot{E}x_{yık,k}^{AV,EN}$ (kW)	29,47	6,67	7,50	5,57
$\dot{E}x_{yık,k}^{AV,EX}$ (kW)	75,19	0,33	48,96	18,17

350 Nm için elde edilen sonuçlar Tablo 5.8’de verilmiştir. Buna göre kompresöre ait önlenebilir/içsel ekserji yıkımı 29,47 kW olarak hesaplanmıştır. Diğer bir ifadeyle, kompresördeki ekserji yıkımının %11’i önlenebilir/içseldir. Yanma odasında ise ekserji yıkımı %95’lik oranla çok büyük ölçüde önlenemez/içseldir. Buradaki ekserji yıkımının sadece %1’i önlenebilir/içseldir. Gaz jeneratör türbinde ise, ekserji yıkımı %63’lük oranla büyük ölçüde önlenemez/dışsaldır. Buradaki önlenebilir/içsel ekserji yıkımı oranı ise %4 olarak belirlenmiştir. Güç türbinin ise, motor %61’lik önlenemez/dışsal ekserji yıkımı yüzdesine sahip olduğu anlaşılmıştır. Buradaki önlenebilir/içsel ekserji yıkımı da %5 olarak tespit edilmiştir.

Tablo 5.9. 485 Nm için ileri ekserji analiz sonuçları

485 Nm	Kompresör	Yanma Odası	Gaz Jeneratör Türbin	Güç Türbini
$\dot{E}x_{yık,k}$ (kW)	325,00	1094,00	119,90	253,80
$\dot{E}x_{yık,k}^{UN,EN}$ (kW)	53,33	1027,54	3,24	20,32
$\dot{E}x_{yık,k}^{UN,EX}$ (kW)	139,67	59,46	66,43	103,42
$\dot{E}x_{yık,k}^{AV,EN}$ (kW)	36,47	6,62	2,34	21,36
$\dot{E}x_{yık,k}^{AV,EX}$ (kW)	95,53	0,38	47,89	108,71

485 Nm için elde edilen sonuçlar Tablo 5.9'da verilmiştir. Sonuçlara göre kompresörde meydana gelen ekserji yıkımının %43'ü önlenemez/dışsaldır. Bu komponentteki önlenebilir/içsel ekserji yıkım oranı ise %11 olarak hesaplanmıştır. Yanma odasında meydana gelen ekserji yıkımının %94'ü önlenemez/içseldir. Buradaki önlenebilir/içsel ekserji yıkım oranı ise sadece %1 olarak tespit edilmiştir. Gaz jeneratör türbinde oluşan ekserji yıkımının %55'i önlenemez/dışsaldır. Bununla birlikte önlenebilir/içsel ekserji yıkım oranı ise %2 olarak belirlenmiştir. Güç türbinde meydana gelen ekserji yıkımının %43'ü önlenebilir/dışsaldır. Aynı zamanda bu komponentteki önlenebilir/içsel ekserji yıkım oranı ise %8 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.10. 552 Nm için ileri ekserji analiz sonuçları

552 Nm	Kompresör	Yanma Odası	Gaz Jeneratör Türbin	Güç Türbini
$\dot{E}x_{yık,k}$ (kW)	358	1164	154	257
$\dot{E}x_{yık,k}^{UN,EN}$ (kW)	55,36	1114,90	3,97	23,34
$\dot{E}x_{yık,k}^{UN,EX}$ (kW)	154,97	42,36	72,75	115,24
$\dot{E}x_{yık,k}^{AV,EN}$ (kW)	38,87	6,49	4,00	19,94
$\dot{E}x_{yık,k}^{AV,EX}$ (kW)	108,80	0,25	73,28	98,48

Tablo 5.10’da verilen 552 Nm için ileri ekserji analizi sonuçlarına göre kompresöre ait önlenebilir/içsel ekserji yıkımı 38,87 kW olarak hesaplanmıştır. Buna göre kompresördeki ekserji yıkımının %11’i önlenebilir/içseldir. Yanma odasında ise ekserji yıkımının 1114,90 kW’lık değerle %96’sının önlenebilir/içsel olduğu anlaşılmaktadır. 552 Nm tork değeri için yanma odasına ait ekserji yıkımının sadece %1’inin önlenebilir/içsel olduğu belirlenmiştir. Gaz jeneratör türbinde ise, ekserji yıkımının %48’i önlenebilir/dışsal ve %47’si önlenebilir/dışsaldır. Buradaki önlenebilir/içsel ekserji yıkımı oranı %3 olarak tespit edilmiştir. Güç türbinin ise, motor içerisinde %45 önlenebilir/dışsal ekserji yıkımına sahip olduğu anlaşılmıştır. Buradaki önlenebilir/içsel ekserji yıkımı oranı da %8 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.11. 580 Nm için ileri ekserji analiz sonuçları

580 Nm	Kompresör	Yanma Odası	Gaz Jeneratör Türbin	Güç Türbini
$\dot{E}x_{yık,k}$ (kW)	373	1204	179	249
$\dot{E}x_{yık,k}^{UN,EN}$ (kW)	56,53	1149,61	4,64	26,54
$\dot{E}x_{yık,k}^{UN,EX}$ (kW)	162,25	45,66	75,96	121,30
$\dot{E}x_{yık,k}^{AV,EN}$ (kW)	39,85	8,40	5,67	18,16
$\dot{E}x_{yık,k}^{AV,EX}$ (kW)	114,37	0,33	92,73	83,00

580 Nm için elde edilen sonuçlar Tablo 5.11’de verilmiştir. Buna göre kompresöre ait önlenebilir/içsel ekserji yıkımı 39,85 kW olarak hesaplanmıştır. Diğer bir ifadeyle, kompresördeki ekserji yıkımının %11’i önlenebilir/içseldir. Yanma odasında ise ekserji yıkımı %95’lik oranla çok büyük ölçüde önlenemez/içseldir. Buradaki ekserji yıkımının sadece %1’i önlenebilir/içseldir. Gaz jeneratör türbinde ise, ekserji yıkımı %52’lik oranla büyük ölçüde önlenebilir/dışsaldır. Buradaki önlenebilir/içsel ekserji yıkımı oranı ise %3 olarak belirlenmiştir. Güç türbinin ise, motor içerisinde %49’luk oranla en yüksek önlenemez/dışsal ekserji yıkımı yüzdesine sahip olan komponent olduğu anlaşılmıştır. Buradaki önlenebilir/içsel ekserji yıkımı da %7 olarak tespit edilmiştir.

Tablo 5.12. 630 Nm için ileri ekserji analiz sonuçları

630 Nm	Kompresör	Yanma Odası	Gaz Jeneratör Türbin	Güç Türbini
$\dot{E}x_{yık,k}$ (kW)	396	1254	166	270
$\dot{E}x_{yık,k}^{UN,EN}$ (kW)	58,77	1189,64	4,71	27,24
$\dot{E}x_{yık,k}^{UN,EX}$ (kW)	169,46	56,45	80,31	129,66
$\dot{E}x_{yık,k}^{AV,EN}$ (kW)	43,20	7,55	4,49	19,64
$\dot{E}x_{yık,k}^{AV,EX}$ (kW)	124,58	0,36	76,49	93,47

Tablo 5.12’de 630 Nm için ileri ekserji analiz sonuçları verilmiştir. Sonuçlara göre kompresörde meydana gelen ekserji yıkımının %43’ü önlenemez/dışsaldır. Bu komponentteki önlenebilir/içsel ekserji yıkım oranı ise %11 olarak hesaplanmıştır. Yanma odasında meydana gelen ekserji yıkımının %95’i önlenemez/içseldir. Buradaki önlenebilir/içsel ekserji yıkım oranı ise sadece %1 olarak tespit edilmiştir. Gaz jeneratör türbinde oluşan ekserji yıkımının %48’i önlenemez/dışsaldır. Bununla birlikte önlenebilir/içsel ekserji yıkım oranı ise %3 olarak belirlenmiştir. Güç türbinde meydana gelen ekserji yıkımının %48’i önlenemez/dışsaldır. Aynı zamanda bu komponentteki önlenebilir/içsel ekserji yıkım oranı ise %7 olarak hesaplanmıştır.

5.4. İleri Eksergo-Ekonomik Analiz Sonuçları

İleri eksergo-ekonomik metodoloji, ileri ekserji analizinde olduğu gibi çıktıların kategorize edilmesinden ibarettir. İleri ekserji analizinden farklı olarak, ekserji yıkımları yerine ekonomik maliyetler bileşenlerine ayrılır. Bunlar içsel/dışsal ve önlenebilir/önlenemez şeklinde alt kategorilere ayrıldıktan sonra, aralarındaki etkileşimi daha iyi anlayabilmek için önlenemez/içsel, önlenemez/dışsal, önlenebilir/içsel ve önlenebilir/dışsal olmak üzere 4 kısma ayrılabilirler. Komponentlerin gerçek iyileştirme potansiyelleri hakkında önlenebilir bileşenlerin (özellikle önlenebilir/içsel) en anlamlı bilgiyi verdikleri ifade edilebilir.

Tablo 5.13. 240 Nm için hesaplanan ekserji maliyeti sonuçları

240 Nm	Kompresör	Yanma Odası	Gaz Jeneratör Türbin	Güç Türbini
$\dot{C}_k$ (USD/sa)	19,45	78,86	38,82	16,83
$\dot{C}_k^{EN}$ (USD/sa)	5,69	76,55	6,36	3,64
$\dot{C}_k^{EX}$ (USD/sa)	13,77	2,30	32,46	13,19
$\dot{C}_k^{UN}$ (USD/sa)	12,36	78,27	24,49	12,37
$\dot{C}_k^{AV}$ (USD/sa)	7,09	0,59	14,33	4,45
$\dot{C}_k^{UN,EN}$ (USD/sa)	3,61	75,98	4,01	2,67
$\dot{C}_k^{UN,EX}$ (USD/sa)	8,74	2,29	20,48	9,70
$\dot{C}_k^{AV,EN}$ (USD/sa)	2,07	0,57	2,35	0,96
$\dot{C}_k^{AV,EX}$ (USD/sa)	5,02	0,02	11,98	3,49

240 Nm için, Denklemler (4.28)-(4.47) yardımıyla hesaplanan ekserji akımı maliyeti bileşenleri Tablo 5.13'te verilmiştir. Sonuçlara göre 240 Nm tork altında turboprop motor komponentlerine ait toplam $\dot{C}_k$ değeri %60 içsel, %40 dışsaldır. Aynı zamanda söz konusu toplam $\dot{C}_k$ değeri 240 Nm için %83 önlenemez, %17 önlenebilir olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçları komponent bazında inceleyecek olursak;

- Kompresör için 19,45 USD/sa olarak hesaplanan ekserji maliyetinin %29 içsel, %71 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekserji maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %64 önlenemez ve %36 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{C}_k$ değeri %45'lik oranla büyük ölçüde önlenemez/dışsaldır. Önlenebilir/içsel ekserji maliyeti ise 2,07 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve kompresör için toplam $\dot{C}_k$ 'ya oranının %11 olduğu anlaşılmıştır.

- Yanma odası için 78,86 USD/sa olarak hesaplanan ekserji maliyetinin %96 içsel, %4 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekserji maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %99'luk oranla büyük ölçüde önlenemez ve sadece %1 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{C}_k$ değeri %96 önlenemez/içseldir. Önlenebilir/içsel ekserji maliyeti ise 0,57 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve yanma odası için toplam $\dot{C}_k$ 'ya oranının %1 olduğu anlaşılmıştır.
- Gaz jeneratör türbin için 38,82 USD/sa olarak hesaplanan ekserji maliyetinin %16 içsel, %84 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekserji maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %63 önlenemez ve %37 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{C}_k$ değeri %53'lük oranla büyük ölçüde önlenemez/dışsaldır. Önlenebilir/içsel ekserji maliyeti ise 2,35 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve gaz jeneratör türbin için toplam $\dot{C}_k$ 'ya oranının %6 olduğu anlaşılmıştır.
- Güç türbini için 16,83 USD/sa olarak hesaplanan ekserji maliyetinin %22 içsel, %78 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekserji maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %74 önlenemez ve %26 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{C}_k$ değeri %58'lik oranla büyük ölçüde önlenemez/dışsaldır. Önlenebilir/içsel ekserji maliyeti ise 0,96 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve güç türbini için toplam $\dot{C}_k$ 'ya oranının %6 olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 5.14. 350 Nm için hesaplanan ekserji maliyeti sonuçları

350 Nm	Kompresör	Yanma Odası	Gaz Jeneratör Türbin	Güç Türbini
$\dot{C}_k$ (USD/sa)	20,43	81,24	29,73	17,34
$\dot{C}_k^{EN}$ (USD/sa)	5,75	77,39	3,95	4,07
$\dot{C}_k^{EX}$ (USD/sa)	14,68	3,85	25,78	13,27
$\dot{C}_k^{UN}$ (USD/sa)	12,27	80,66	21,50	13,88
$\dot{C}_k^{AV}$ (USD/sa)	8,16	0,58	8,23	3,46
$\dot{C}_k^{UN,EN}$ (USD/sa)	3,45	76,83	2,86	3,26
$\dot{C}_k^{UN,EX}$ (USD/sa)	8,81	3,82	18,65	10,63
$\dot{C}_k^{AV,EN}$ (USD/sa)	2,30	0,55	1,09	0,81
$\dot{C}_k^{AV,EX}$ (USD/sa)	5,86	0,03	7,14	2,65

350 Nm için, Denklemler (4.28)-(4.47) yardımıyla hesaplanan ekserji akımı maliyeti bileşenleri Tablo 5.14'te verilmiştir. Sonuçlara göre 350 Nm yük altında turboprop motor komponentlerine ait toplam $\dot{C}_k$ değeri %61 içsel, %39 dışsaldır. Aynı zamanda söz konusu toplam $\dot{C}_k$ değeri 350 Nm için %86 önlenemez, %14 önlenebilir olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçları komponent bazında inceleyecek olursak;

- Kompresör için 20,43 USD/sa olarak hesaplanan ekserji maliyetinin %28 içsel, %72 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekserji maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %60 önlenemez ve %40 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{C}_k$ değeri %43'lük oranla büyük ölçüde önlenemez/dışsaldır. Önlenebilir/içsel ekserji maliyeti ise 2,30 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve kompresör için toplam $\dot{C}_k$ 'ya oranının %11 olduğu anlaşılmıştır.

- Yanma odası için 81,24 USD/sa olarak hesaplanan ekserji maliyetinin %95 içsel, %5 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekserji maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %99'luk oranla büyük ölçüde önlenemez ve sadece %1 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{C}_k$ değeri %95 önlenemez/içseldir. Önlenebilir/içsel ekserji maliyeti ise 0,55 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve yanma odası için toplam $\dot{C}_k$ 'ya oranının %1 olduğu anlaşılmıştır.
- Gaz jeneratör türbin için 29,73 USD/sa olarak hesaplanan ekserji maliyetinin %13 içsel, %87 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekserji maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %72 önlenemez ve %28 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{C}_k$ değeri %63'lük oranla büyük ölçüde önlenemez/dışsaldır. Önlenebilir/içsel ekserji maliyeti ise 1,09 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve gaz jeneratör türbin için toplam $\dot{C}_k$ 'ya oranının %4 olduğu anlaşılmıştır.
- Güç türbini için 17,34 USD/sa olarak hesaplanan ekserji maliyetinin %23 içsel, %77 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekserji maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %80 önlenemez ve %20 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{C}_k$ değeri %61'lik oranla büyük ölçüde önlenemez/dışsaldır. Önlenebilir/içsel ekserji maliyeti ise 0,81 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve güç türbini için toplam $\dot{C}_k$ 'ya oranının %5 olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 5.15. 485 Nm için hesaplanan ekserji maliyeti sonuçları

485 Nm	Kompresör	Yanma Odası	Gaz Jeneratör Türbin	Güç Türbini
$\dot{C}_k$ (USD/sa)	18,37	91,70	15,28	32,34
$\dot{C}_k^{EN}$ (USD/sa)	5,08	86,69	0,71	5,31
$\dot{C}_k^{EX}$ (USD/sa)	13,30	5,02	14,57	27,03
$\dot{C}_k^{UN}$ (USD/sa)	10,91	91,12	8,88	15,77
$\dot{C}_k^{AV}$ (USD/sa)	7,46	0,59	6,40	16,57
$\dot{C}_k^{UN,EN}$ (USD/sa)	3,01	86,13	0,41	2,59
$\dot{C}_k^{UN,EX}$ (USD/sa)	7,90	4,98	8,47	13,18
$\dot{C}_k^{AV,EN}$ (USD/sa)	2,06	0,55	0,30	2,72
$\dot{C}_k^{AV,EX}$ (USD/sa)	5,40	0,03	6,10	13,85

485 Nm için, Denklemler (4.28)-(4.47) yardımıyla hesaplanan ekserji maliyeti bileşenleri Tablo 5.15’de verilmiştir. Sonuçlara göre 485 Nm yük altında turboprop motor komponentlerine ait toplam $\dot{C}_k$ değeri %62 içsel, %38 dışsaldır. Aynı zamanda söz konusu toplam $\dot{C}_k$ değeri 485 Nm için %80 önlenemez, %20 önlenebilir olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçları komponent bazında inceleyecek olursak;

- Kompresör için 18,37 USD/sa olarak hesaplanan ekserji maliyetinin %28 içsel, %72 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekserji maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %59 önlenemez ve %41 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{C}_k$ değeri %43’lük oranla büyük ölçüde önlenemez/dışsaldır. Önlenebilir/içsel ekserji maliyeti ise 2,06 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve kompresör için toplam $\dot{C}_k$ ’ya oranının %11 olduğu anlaşılmıştır.

- Yanma odası için 91,70 USD/sa olarak hesaplanan ekserji maliyetinin %95 içsel, %5 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekserji maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %99'luk oranla büyük ölçüde önlenemez ve sadece %1 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{C}_k$ değeri %94 önlenemez/içseldir. Önlenebilir/içsel ekserji maliyeti ise 0,55 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve yanma odası için toplam $\dot{C}_k$ 'ya oranının %1 olduğu anlaşılmıştır.
- Gaz jeneratör türbin için 15,28 USD/sa olarak hesaplanan ekserji maliyetinin %5 içsel, %95 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekserji maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %58 önlenemez ve %42 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{C}_k$ değeri %55'lik oranla büyük ölçüde önlenemez/dışsaldır. Önlenebilir/içsel ekserji maliyeti ise 0,30 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve gaz jeneratör türbin için toplam $\dot{C}_k$ 'ya oranının %2 olduğu anlaşılmıştır.
- Güç türbini için 32,34 USD/sa olarak hesaplanan ekserji maliyetinin %16 içsel, %84 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekserji maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %49 önlenemez ve %51 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{C}_k$ değeri %43'lük oranla büyük ölçüde önlenebilir/dışsaldır. Önlenebilir/içsel ekserji maliyeti ise 2,72 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve güç türbini için toplam $\dot{C}_k$ 'ya oranının %8 olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 5.16. 552 Nm için hesaplanan ekserji maliyeti sonuçları

552 Nm	Kompresör	Yanma Odası	Gaz Jeneratör Türbin	Güç Türbini
$\dot{C}_k$ (USD/sa)	19,11	97,64	18,90	31,55
$\dot{C}_k^{EN}$ (USD/sa)	5,03	94,07	0,98	5,31
$\dot{C}_k^{EX}$ (USD/sa)	14,08	3,57	17,93	26,23
$\dot{C}_k^{UN}$ (USD/sa)	11,22	97,08	9,42	17,01
$\dot{C}_k^{AV}$ (USD/sa)	7,88	0,57	9,49	14,54
$\dot{C}_k^{UN,EN}$ (USD/sa)	2,95	93,52	0,49	2,86
$\dot{C}_k^{UN,EX}$ (USD/sa)	8,27	3,55	8,93	14,15
$\dot{C}_k^{AV,EN}$ (USD/sa)	2,07	0,54	0,49	2,45
$\dot{C}_k^{AV,EX}$ (USD/sa)	5,81	0,02	9,00	12,09

552 Nm için, Denklemler (4.28)-(4.47) yardımıyla hesaplanan ekserji maliyeti bileşenleri Tablo 5.16’da verilmiştir. Sonuçlara göre 552 Nm yük altında turboprop motor komponentlerine ait toplam $\dot{C}_k$ değeri %63 içsel, %37 dışsaldır. Aynı zamanda söz konusu toplam $\dot{C}_k$ değeri 552 Nm için %81 önlenemez, %19 önlenebilir olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçları komponent bazında inceleyecek olursak;

- Kompresör için 19,11 USD/sa olarak hesaplanan ekserji maliyetinin %26 içsel, %74 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekserji maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %59 önlenemez ve %41 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{C}_k$ değeri %43’lük oranla büyük ölçüde önlenemez/dışsaldır. Önlenebilir/içsel ekserji maliyeti ise 2,07 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve kompresör için toplam $\dot{C}_k$ ’ya oranının %11 olduğu anlaşılmıştır.

- Yanma odası için 97,64 USD/sa olarak hesaplanan ekserji maliyetinin %96 içsel, %4 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekserji maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %99'luk oranla büyük ölçüde önlenemez ve sadece %1 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{C}_k$ değeri %96 önlenemez/içseldir. Önlenebilir/içsel ekserji maliyeti ise 0,54 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve yanma odası için toplam $\dot{C}_k$ 'ya oranının %1 olduğu anlaşılmıştır.
- Gaz jeneratör türbin için 18,90 USD/sa olarak hesaplanan ekserji maliyetinin %5 içsel, %95 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekserji maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %50 önlenemez ve %50 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{C}_k$ değeri %48'lik oranla ölçüde önlenebilir/dışsaldır. Önlenebilir/içsel ekserji maliyeti ise 0,49 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve gaz jeneratör türbin için toplam $\dot{C}_k$ 'ya oranının %3 olduğu anlaşılmıştır.
- Güç türbini için 31,55 USD/sa olarak hesaplanan ekserji maliyetinin %17 içsel, %83 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekserji maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %54 önlenemez ve %46 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{C}_k$ değeri %45'lik oranla büyük ölçüde önlenemez/dışsaldır. Önlenebilir/içsel ekserji maliyeti ise 2,45 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve güç türbini için toplam $\dot{C}_k$ 'ya oranının %8 olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 5.17. 580 Nm için hesaplanan ekserji maliyeti sonuçları

580 Nm	Kompresör	Yanma Odası	Gaz Jeneratör Türbin	Güç Türbini
$\dot{C}_k$ (USD/sa)	19,57	100,98	21,62	30,08
$\dot{C}_k^{EN}$ (USD/sa)	5,06	97,12	1,25	5,40
$\dot{C}_k^{EX}$ (USD/sa)	14,51	3,86	20,37	24,68
$\dot{C}_k^{UN}$ (USD/sa)	11,48	100,25	9,74	17,86
$\dot{C}_k^{AV}$ (USD/sa)	8,09	0,73	11,88	12,22
$\dot{C}_k^{UN,EN}$ (USD/sa)	2,97	96,42	0,56	3,21
$\dot{C}_k^{UN,EX}$ (USD/sa)	8,51	3,83	9,17	14,65
$\dot{C}_k^{AV,EN}$ (USD/sa)	2,09	0,70	0,68	2,19
$\dot{C}_k^{AV,EX}$ (USD/sa)	6,00	0,03	11,20	10,03

580 Nm için, Denklemler (4.28)-(4.47) yardımıyla hesaplanan ekserji maliyeti bileşenleri Tablo 5.17’de verilmiştir. Sonuçlara göre 580 Nm yük altında turboprop motor komponentlerine ait toplam $\dot{C}_k$ değeri %63 içsel, %37 dışsaldır. Aynı zamanda söz konusu toplam $\dot{C}_k$ değeri 580 Nm için %81 önlenemez, %19 önlenebilir olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçları komponent bazında inceleyecek olursak;

- Kompresör için 19,57 USD/sa olarak hesaplanan ekserji maliyetinin %26 içsel, %74 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekserji maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %59 önlenemez ve %41 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{C}_k$ değeri %43’lük oranla büyük ölçüde önlenemez/dışsaldır. Önlenebilir/içsel ekserji maliyeti ise 2,09 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve kompresör için toplam $\dot{C}_k$ ’ya oranının %11 olduğu anlaşılmıştır.

- Yanma odası için 100,98 USD/sa olarak hesaplanan ekserji maliyetinin %96 içsel, %4 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekserji maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %99'luk oranla büyük ölçüde önlenemez ve sadece %1 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{C}_k$ değeri %95 önlenemez/içseldir. Önlenebilir/içsel ekserji maliyeti ise 0,70 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve yanma odası için toplam $\dot{C}_k$ 'ya oranının %1 olduğu anlaşılmıştır.
- Gaz jeneratör türbin için 21,62 USD/sa olarak hesaplanan ekserji maliyetinin %6 içsel, %94 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekserji maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %45 önlenemez ve %55 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{C}_k$ değeri %52'lik oranla ölçüde önlenebilir/dışsaldır. Önlenebilir/içsel ekserji maliyeti ise 0,68 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve gaz jeneratör türbin için toplam $\dot{C}_k$ 'ya oranının %3 olduğu anlaşılmıştır.
- Güç türbini için 30,08 USD/sa olarak hesaplanan ekserji maliyetinin %18 içsel, %82 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekserji maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %59 önlenemez ve %41 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{C}_k$ değeri %49'luk oranla büyük ölçüde önlenemez/dışsaldır. Önlenebilir/içsel ekserji maliyeti ise 2,19 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve güç türbini için toplam $\dot{C}_k$ 'ya oranının %7 olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 5.18. 630 Nm için hesaplanan ekserji maliyeti sonuçları

630 Nm	Kompresör	Yanma Odası	Gaz Jeneratör Türbin	Güç Türbini
$\dot{C}_k$ (USD/sa)	19,53	105,17	19,62	31,91
$\dot{C}_k^{EN}$ (USD/sa)	5,03	100,40	1,09	5,54
$\dot{C}_k^{EX}$ (USD/sa)	14,50	4,76	18,53	26,37
$\dot{C}_k^{UN}$ (USD/sa)	11,26	104,50	10,05	18,54
$\dot{C}_k^{AV}$ (USD/sa)	8,27	0,66	9,57	13,37
$\dot{C}_k^{UN,EN}$ (USD/sa)	2,90	99,77	0,56	3,22
$\dot{C}_k^{UN,EX}$ (USD/sa)	8,36	4,73	9,49	15,32
$\dot{C}_k^{AV,EN}$ (USD/sa)	2,13	0,63	0,53	2,32
$\dot{C}_k^{AV,EX}$ (USD/sa)	6,14	0,03	9,04	11,05

630 Nm için, Denklemler (4.28)-(4.47) yardımıyla hesaplanan ekserji maliyeti bileşenleri Tablo 5.18’de verilmiştir. Sonuçlara göre 630 Nm yük altında turboprop motor komponentlerine ait toplam $\dot{C}_k$ değeri %64 içsel, %36 dışsaldır. Aynı zamanda söz konusu toplam $\dot{C}_k$ değeri 630 Nm için %82 önlenemez, %18 önlenebilir olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçları komponent bazında inceleyecek olursak;

- Kompresör için 19,53 USD/sa olarak hesaplanan ekserji maliyetinin %26 içsel, %74 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekserji maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %58 önlenemez ve %42 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{C}_k$ değeri %43’lük oranla önlenemez/dışsaldır. Önlenebilir/içsel ekserji maliyeti ise 2,13 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve kompresör için toplam $\dot{C}_k$ ’ya oranının %11 olduğu anlaşılmıştır.
- Yanma odası için 105,17 USD/sa olarak hesaplanan ekserji maliyetinin %95 içsel, %5 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekserji maliyeti gerçek iyileştirme

potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %99'luk oranla büyük ölçüde önlenemez ve sadece %1 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{C}_k$ değeri %95 önlenemez/içseldir. Önlenebilir/içsel ekserji maliyeti ise 0,63 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve yanma odası için toplam $\dot{C}_k$ 'ya oranının %1 olduğu anlaşılmıştır.

- Gaz jeneratör türbin için 19,62 USD/sa olarak hesaplanan ekserji maliyetinin %6 içsel, %94 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekserji maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %51 önlenemez ve %49 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{C}_k$ değeri %48'lik oranla önlenemez/dışsaldır. Önlenebilir/içsel ekserji maliyeti ise 0,53 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve gaz jeneratör türbin için toplam $\dot{C}_k$ 'ya oranının %3 olduğu anlaşılmıştır.
- Güç türbini için 31,91 USD/sa olarak hesaplanan ekserji maliyetinin %17 içsel, %83 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekserji maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %58 önlenemez ve %42 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{C}_k$ değeri %48'lik oranla büyük ölçüde önlenemez/dışsaldır. Önlenebilir/içsel ekserji maliyeti ise 2,32 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve güç türbini için toplam $\dot{C}_k$ 'ya oranının %7 olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 5.19. *Turboprop motora ait ekipman maliyeti sonuçları*

CT7-9C	Kompresör	Yanma Odası	Gaz Jeneratör Türbin	Güç Türbini
$\dot{Z}_k$ (USD/sa)	96,25	38,81	102,46	51,23
$\dot{Z}_k^{EN}$ (USD/sa)	85,89	33,65	89,60	45,32
$\dot{Z}_k^{EX}$ (USD/sa)	10,36	5,16	12,86	5,91
$\dot{Z}_k^{UN}$ (USD/sa)	86,63	34,93	92,21	46,11
$\dot{Z}_k^{AV}$ (USD/sa)	9,63	3,88	10,25	5,12
$\dot{Z}_k^{UN,EN}$ (USD/sa)	77,30	30,29	80,64	40,79
$\dot{Z}_k^{UN,EX}$ (USD/sa)	9,32	4,64	11,57	5,32
$\dot{Z}_k^{AV,EN}$ (USD/sa)	8,59	3,37	8,96	4,53
$\dot{Z}_k^{AV,EX}$ (USD/sa)	1,04	0,52	1,29	0,59

Denklemler (4.28)-(4.47) yardımıyla hesaplanan turboprop motora ait ekipman maliyeti bileşenleri Tablo 5.19’da verilmiştir. Sonuçlara göre turboprop motor komponentlerine ait toplam $\dot{Z}_k$ değeri %88 içsel, %12 dışsaldır. Aynı zamanda turboprop motor komponentlerine ait söz konusu toplam $\dot{Z}_k$ değeri %90 önlenemez, %10 önlenebilir olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçları komponent bazında inceleyecek olursak;

- Kompresör için 96,25 USD/sa olarak hesaplanan ekipman maliyetinin %89 içsel, %11 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekipman maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %90 önlenemez ve %10 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{Z}_k$ değeri %80’lik oranla büyük ölçüde önlenemez/içseldir. Önlenebilir/içsel ekipman maliyeti ise 8,59 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve kompresör için toplam $\dot{Z}_k$ ’ya oranının %9 olduğu anlaşılmıştır.
- Yanma odası için 38,81 USD/sa olarak hesaplanan ekipman maliyetinin %87 içsel, %13 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekipman maliyeti gerçek

iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %90'lık oranla büyük ölçüde önlenemez ve sadece %10 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{Z}_k$ değeri %78 önlenemez/içseldir. Önlenebilir/içsel ekipman maliyeti ise 3,37 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve yanma odası için toplam $\dot{Z}_k$ 'ya oranının %9 olduğu anlaşılmıştır.

- Gaz jeneratör türbin için 102,46 USD/sa olarak hesaplanan ekipman maliyetinin %87 içsel, %13 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekipman maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %90 önlenemez ve %10 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{Z}_k$ değeri %79'luk oranla büyük ölçüde önlenemez/içseldir. Önlenebilir/içsel ekipman maliyeti ise 8,96 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve gaz jeneratör türbin için toplam $\dot{Z}_k$ 'ya oranının %9 olduğu anlaşılmıştır.
- Güç türbini için 51,23 USD/sa olarak hesaplanan ekipman maliyetinin %88 içsel, %12 dışsal olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu ekipman maliyeti gerçek iyileştirme potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise, %90 önlenemez ve %10 önlenebilir olduğu tespit edilmiştir. Buradaki $\dot{Z}_k$ değeri %80'lik oranla büyük ölçüde önlenemez/içseldir. Önlenebilir/içsel ekipman maliyeti ise 4,53 USD/sa olarak hesaplanmıştır ve güç türbini için toplam $\dot{Z}_k$ 'ya oranının %9 olduğu anlaşılmıştır.

5.5. Geleneksel ve İleri Eksergo-Ekonomik Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

İleri eksergo-ekonomik analizin sonuçlarını daha iyi anlayabilmek için geleneksel analizdeki benzer sonuçlar ile kıyaslama yapılması oldukça faydalı bir bakış açısı sağlayacaktır. Bu amaçla belirlenen ve kıyaslaması amaçlanan parametreler sırasıyla şu şekildedir:

- İyileştirme potansiyeli (IP) vs önlenebilir/içsel ekserji yıkımı ($\dot{E}x_{yk,k}^{AV,EN}$),
- Komponentlere ait toplam maliyet değeri ($\dot{C}_k + \dot{Z}_k$) vs komponentlere ait toplam önlenebilir/içsel maliyet değeri ($\dot{C}_k^{AV,EN} + \dot{Z}_k^{AV,EN}$),
- Eksergo-ekonomik faktör (f_k) vs ileri eksergo-ekonomik faktör ($f_k^{AV,EN}$),

IP değerleri, turboprop motor sistemine daha önce uygulanmış olan geleneksel ekserji analizi sonucunda elde edilmişti. Bu değer, sistem komponentlerinde mevcut olan termodinamik verimsizliklere karşı yapılacak iyileştirme çalışmalarının olabilecek maksimum büyüklüğü olarak ifade edilmişti. İleri ekserji analizi sonucunda elde edilen $\dot{E}x_{y1k,k}^{AV,EN}$ değeri ise, sistem komponentlerinin ‘*gerçek iyileştirme potansiyellerini*’ ortaya çıkarmaktadır ve ileri ekserji analizinin en önemli çıktılarından bir tanesi olarak ifade edilebilir.

$\dot{C}_k + \dot{Z}_k$ değerleri turboprop motor sistemine daha önce uygulanmış olan geleneksel eksergo-ekonomik analiz sonucunda elde edilmişti. Bir komponentteki ekserji yıkımı kaynaklı maliyetler ($\dot{C}_k$) ile komponentin ilk yatırım ve bakım/işletme gibi maliyetlerinin ($\dot{Z}_k$) toplanmasıyla elde edilen bu değer, o komponente ait toplam maliyeti belirtmektedir. Yüksek $\dot{C}_k + \dot{Z}_k$ değerine sahip olan komponentlerin optimizasyon çalışmalarında önceliğe sahip olacağı ifade edilebilir. $\dot{C}_k^{AV,EN} + \dot{Z}_k^{AV,EN}$ değeri ise ileri eksergo-ekonomik analiz sonucunda elde edilmiştir ve yapılacak iyileştirme çalışmalarıyla ortadan kaldırılabilir, sadece komponentin kendinden kaynaklanan toplam maliyeti ifade etmektedir. Maliyetler bileşenlerine ayrılmış olduğu için daha anlamlı yorumlar yapılmasına yardımcı olmaktadır. Literatürde komponentlerin ekonomik iyileştirme açısından önemini belirtmesi açısından en iyi parametre olduğu ifade edilmiştir [43].

f_k ifadesi komponente ait toplam maliyetin ne kadarının ilk yatırım ve bakım/işletme gibi maliyetlerden kaynaklandığının bir göstergesidir. Yüksek f_k değeri toplam maliyetin daha çok $\dot{Z}_k$ kaynaklı, yani yatırım ve işletme maliyetleri kaynaklı olduğu; tersi bir durumun ise $\dot{C}_k$ kaynaklı, yani komponent içindeki termodinamik verimsizlikler kaynaklı olduğu anlamına gelmektedir. $f_k^{AV,EN}$ ise f_k ’ın bir anlamda modifiye edilmiş halidir ve ancak ileri eksergo-ekonomik analiz sonucu maliyetler bileşenlerine ayrıldıktan sonra elde edilebilmektedir. f_k ’ya göre daha anlamlı sonuçlar vermektedir ve ekonomik iyileştirme çalışmaları için bir göstergedir. Ayrıca benzer sistemlerin birbirleri ile ekonomik performans açısından kıyaslanmasına da imkan sağlamaktadır.

Tablo 5.20. 240 Nm için geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Geleneksel ekserji analizi parametreleri				
	<i>Kompresör</i>	<i>Yanma Odası</i>	<i>Gaz Jeneratör Türbin</i>	<i>Güç Türbini</i>
IP (kW)	29,50	226,00	17,90	6,80
$\dot{C}_k + \dot{Z}_k$ (USD/sa)	115,70	117,67	141,28	68,06
f_k (%)	0,83	0,33	0,73	0,75
İleri ekserji analizi parametreleri				
	<i>Kompresör</i>	<i>Yanma Odası</i>	<i>Gaz Jeneratör Türbin</i>	<i>Güç Türbini</i>
$\dot{E}x_{yık,k}^{AV,EN}$ (kW)	21,11	6,80	14,10	5,78
$\dot{C}_k^{AV,EN} + \dot{Z}_k^{AV,EN}$ (USD/sa)	10,66	3,94	11,31	5,49
$f_k^{AV,EN}$ (%)	0,81	0,86	0,79	0,82

240 Nm için geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analiz sonucu elde edilen parametreler Tablo 5.20’de verilmiştir. IP açısından bakıldığında en yüksek potansiyel 226 kW değeriyle açık ara farkla yanma odasında gözükmemektedir. Ancak ileri ekserji analiz sonucu elde edilen gerçek potansiyelin bu şekilde olmadığı açıkça görülmektedir. Buna göre yanma odası gerçek iyileştirme potansiyeli 226 kW değil, 6,80 kW’dır. IP değerleri göz önüne alınıp komponentler iyileştirme potansiyeli önceliklerine göre sıralandığında:

- I. Yanma odası (226 kW)
- II. Kompresör (29,50 kW)
- III. Gaz jeneratör türbin (17,90 kW)
- IV. Güç türbini (6,80 kW)

şeklinde olmaktadır. Ancak $\dot{E}x_{yık,k}^{AV,EN}$ değerleri göz önüne alınıp, gerçek iyileştirme potansiyellerine göre bir sıralama yapılırsa aşağıdaki şekilde değiştiği gözlenmiştir:

- I. Kompresör (21,11 kW)

II. Gaz jeneratör türbin (14,10 kW)

III. Yanma odası (6,80 kW)

IV. Güç türbini (5,78 kW)

Toplam maliyetler ($\dot{C}_k + \dot{Z}_k$) yönünden sonuçlar incelendiğinde en yüksek potansiyel 141,28 USD/sa değeriyle gaz jeneratör türbinde gözlenmektedir. Önlenebilir/içsel toplam maliyetler ($\dot{C}_k^{AV,EN} + \dot{Z}_k^{AV,EN}$) açısından bakıldığında ise gerçek potansiyellerin çok daha düşük olduğu ve en yüksek önlenebilir/içsel maliyetin 11,31 USD/sa değeriyle gaz jeneratör türbine ait olduğu anlaşılmaktadır. ($\dot{C}_k + \dot{Z}_k$) değerleri göz önüne alınıp komponentler iyileştirme potansiyelleri açısından önceliklerine göre sıralandığında:

I. Gaz jeneratör türbin (141,28 USD/sa)

II. Yanma odası (117,67 USD/sa)

III. Kompresör (115,70 USD/sa)

IV. Güç türbini (68,06 USD/sa)

şeklinde olmaktadır. Ancak ($\dot{C}_k^{AV,EN} + \dot{Z}_k^{AV,EN}$) değerleri göz önüne alınıp, gerçek iyileştirme potansiyellerine göre bir sıralama yapılırsa sıralamanın aşağıdaki şekilde değiştiği gözlenmiştir:

I. Gaz jeneratör türbin (11,31 USD/sa)

II. Kompresör (10,66 USD/sa)

III. Güç türbini (5,49 USD/sa)

IV. Yanma odası (3,94 USD/sa)

f_k ve $f_k^{AV,EN}$ değerleri açısından sonuçlar değerlendirildiğinde yanma odası hariç dramatik bir değişim gözlenmemektedir. Yanma odası için ise çok büyük bir değişim söz konusudur. Yanma odasına ait f_k değeri %33 olarak hesaplanmıştır. Bunun anlamı, buradaki maliyetlerin büyük ölçüde termodinamik verimsizliklere bağlı maliyetler, yani ekserji maliyetleri ($\dot{C}_k$) kaynaklı olduğudur. Ancak $f_k^{AV,EN}$ değerleri incelendiğinde bu oranın %86 olarak hesaplandığı görülmektedir. Bunun anlamı, iyileştirme yapılabilecek

maliyetlerin $\dot{C}_k$ kaynaklı değil de, daha çok $\dot{Z}_k$, yani yatırım ve işletme maliyetleri kaynaklı olduğudur. Yanma odasındaki ekserji yıkımının çok yüksek oranda önlenemez olduğu hatırlanırsa, bu sonucun tutarlı ve anlamlı olduğu anlaşılabacaktır.

Tablo 5.21. 350 Nm için geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Geleneksel ekserji analizi parametreleri				
	<i>Kompresör</i>	<i>Yanma Odası</i>	<i>Gaz Jeneratör Türbin</i>	<i>Güç Türbini</i>
IP (kW)	40,90	203,60	11,10	7,30
$\dot{C}_k + \dot{Z}_k$ (USD/sa)	116,68	120,05	132,19	68,57
f_k (%)	0,82	0,32	0,78	0,75
İleri ekserji analizi parametreleri				
	<i>Kompresör</i>	<i>Yanma Odası</i>	<i>Gaz Jeneratör Türbin</i>	<i>Güç Türbini</i>
$\dot{E}x_{yik,k}^{AV,EN}$ (kW)	29,47	6,67	7,50	5,57
$\dot{C}_k^{AV,EN} + \dot{Z}_k^{AV,EN}$ (USD/sa)	10,89	3,92	10,05	5,34
$f_k^{AV,EN}$ (%)	0,79	0,86	0,89	0,85

350 Nm için geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analiz sonucu elde edilen parametreler Tablo 5.21’de verilmiştir. IP açısından bakıldığında en yüksek potansiyel 203,60 kW değeriyle açık ara farkla yanma odasında gözükmemektedir. Ancak ileri ekserji analiz sonucu elde edilen gerçek potansiyelin bu şekilde olmadığı açıkça görülmektedir. Buna göre yanma odası gerçek iyileştirme potansiyeli 203,60 kW değil, 6,67 kW’dır. IP değerleri göz önüne alınıp komponentler iyileştirme potansiyeli önceliklerine göre sıralandığında:

- I. Yanma odası (203,60 kW)
- II. Kompresör (40,90 kW)
- III. Gaz jeneratör türbin (11,10 kW)

IV. Güç türbini (7,30 kW)

şeklinde olmaktadır. Ancak $\dot{E}_{x_{yık,k}}^{AV,EN}$ değerleri göz önüne alınıp, gerçek iyileştirme potansiyellerine göre bir sıralama yapılırsa sıralamanın aşağıdaki şekilde değiştiği gözlenmiştir:

- I. Kompresör (29,47 kW)
- II. Gaz jeneratör türbin (7,50 kW)
- III. Yanma odası (6,67 kW)
- IV. Güç türbini (5,57 kW)

Toplam maliyetler ($\dot{C}_k + \dot{Z}_k$) yönünden sonuçlar incelendiğinde en yüksek potansiyel 132,19 USD/sa değeriyle gaz jeneratör türbinde gözlenmektedir. Önlenebilir/içsel toplam maliyetler ($\dot{C}_k^{AV,EN} + \dot{Z}_k^{AV,EN}$) açısından bakıldığında ise gerçek potansiyellerin çok daha düşük olduğu ve en yüksek potansiyel önlenebilir maliyetin 10,89 USD/sa değeriyle kompresöre ait olduğu anlaşılmaktadır. ($\dot{C}_k + \dot{Z}_k$) değerleri göz önüne alınıp komponentler iyileştirme potansiyelleri açısından önceliklerine göre sıralandığında:

- I. Gaz jeneratör türbin (132,19 USD/sa)
- II. Yanma odası (120,05 USD/sa)
- III. Kompresör (116,68 USD/sa)
- IV. Güç türbini (68,57 USD/sa)

şeklinde olmaktadır. Ancak ($\dot{C}_k^{AV,EN} + \dot{Z}_k^{AV,EN}$) değerleri göz önüne alınıp, gerçek iyileştirme potansiyellerine göre bir sıralama yapılırsa sıralamanın aşağıdaki şekilde değiştiği gözlenmiştir:

- I. Kompresör (10,89 USD/sa)
- II. Gaz jeneratör türbin (10,05 USD/sa)
- III. Güç türbini (5,34 USD/sa)
- IV. Yanma odası (3,92 USD/sa)

f_k ve $f_k^{AV,EN}$ değerleri açısından sonuçlar değerlendirildiğinde yanma odası hariç dramatik bir değişim gözlenmemektedir. Yanma odası için ise çok büyük bir değişim söz konusudur. Yanma odasına ait f_k değeri %32 olarak hesaplanmıştır. Bunun anlamı, buradaki maliyetlerin büyük ölçüde termodinamik verimsizliklere bağlı maliyetler, yani ekserji maliyetleri ($\dot{C}_k$) kaynaklı olduğudur. Ancak $f_k^{AV,EN}$ değerleri incelendiğinde bu oranın %86 olarak hesaplandığı görülmektedir. Bunun anlamı, iyileştirme yapılabilecek maliyetlerin $\dot{C}_k$ kaynaklı değil de, daha çok $\dot{Z}_k$, yani yatırım ve işletme maliyetleri kaynaklı olduğudur. Yanma odasındaki ekserji yıkımının çok yüksek oranda önlenemez olduğu hatırlanırsa, bu sonucun tutarlı ve anlamlı olduğu anlaşılabacaktır.

Tablo 5.22. 485 Nm için geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Geleneksel ekserji analizi parametreleri				
	Kompresör	Yanma Odası	Gaz Jeneratör Türbin	Güç Türbini
IP (kW)	51,20	206,70	3,00	24,70
$\dot{C}_k + \dot{Z}_k$ (USD/sa)	114,62	130,51	117,74	83,57
f_k (%)	0,84	0,30	0,87	0,61
İleri ekserji analizi parametreleri				
	Kompresör	Yanma Odası	Gaz Jeneratör Türbin	Güç Türbini
$Ex_{yık,k}^{AV,EN}$ (kW)	36,47	6,62	2,34	21,36
$\dot{C}_k^{AV,EN} + \dot{Z}_k^{AV,EN}$ (USD/sa)	10,65	3,92	9,26	7,25
$f_k^{AV,EN}$ (%)	0,81	0,86	0,97	0,62

485 Nm için geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analiz sonucu elde edilen parametreler Tablo 5.22’de verilmiştir. IP açısından bakıldığında en yüksek potansiyel 206,70 kW değeriyle açık ara farkla yanma odasında gözükmemektedir. Ancak ileri ekserji analiz sonucu elde edilen gerçek potansiyelin bu şekilde olmadığı açıkça görülmektedir. Buna göre yanma odası gerçek iyileştirme potansiyeli 206,70 kW değil, 6,62 kW’dır. IP

değerleri göz önüne alınıp komponentler iyileştirme potansiyeli önceliklerine göre sıralandığında:

- I. Yanma odası (206,70 kW)
- II. Kompresör (51,20 kW)
- III. Güç türbini (24,70 kW)
- IV. Gaz jeneratör türbin (3,00 kW)

şeklinde olmaktadır. Ancak $\dot{E}_{yık,k}^{AV,EN}$ değerleri göz önüne alınıp, gerçek iyileştirme potansiyellerine göre bir sıralama yapılırsa sıralamanın aşağıdaki şekilde değiştiği gözlenmiştir:

- I. Kompresör (36,47 kW)
- II. Güç türbini (21,36 kW)
- III. Yanma odası (6,62 kW)
- IV. Gaz jeneratör türbin (2,34 kW)

Toplam maliyetler $(\dot{C}_k + \dot{Z}_k)$ yönünden sonuçlar incelendiğinde en yüksek potansiyel 130,51 USD/sa değeriyle yanma odasında gözlenmektedir. Önlenebilir/içsel toplam maliyetler $(\dot{C}_k^{AV,EN} + \dot{Z}_k^{AV,EN})$ açısından bakıldığında ise gerçek potansiyellerin çok daha düşük olduğu ve en yüksek potansiyel önlenebilir maliyetin 10,65 USD/sa değeriyle kompresöre ait olduğu anlaşılmaktadır. $(\dot{C}_k + \dot{Z}_k)$ değerleri göz önüne alınıp komponentler iyileştirme potansiyelleri açısından önceliklerine göre sıralandığında:

- I. Yanma odası (130,51 USD/sa)
- II. Gaz jeneratör türbin (117,74 USD/sa)
- III. Kompresör (114,62 USD/sa)
- IV. Güç türbini (83,57 USD/sa)

şeklinde olmaktadır. Ancak $(\dot{C}_k^{AV,EN} + \dot{Z}_k^{AV,EN})$ değerleri göz önüne alınıp, gerçek iyileştirme potansiyellerine göre bir sıralama yapılırsa sıralamanın aşağıdaki şekilde değiştiği gözlenmiştir:

- I. Kompresör (10,65 USD/sa)
- II. Gaz jeneratör türbin (9,26 USD/sa)
- III. Güç türbini (7,25 USD/sa)
- IV. Yanma odası (3,92 USD/sa)

f_k ve $f_k^{AV,EN}$ değerleri açısından sonuçlar değerlendirildiğinde yanma odası hariç dramatik bir değişim gözlenmemektedir. Yanma odası için ise çok büyük bir değişim söz konusudur. Yanma odasına ait f_k değeri %30 olarak hesaplanmıştır. Bunun anlamı, buradaki maliyetlerin büyük ölçüde termodinamik verimsizliklere bağlı maliyetler, yani ekserji maliyetleri ($\dot{C}_k$) kaynaklı olduğudur. Ancak $f_k^{AV,EN}$ değerleri incelendiğinde bu oranın %86 olarak hesaplandığı görülmektedir. Bunun anlamı, iyileştirme yapılabilecek maliyetlerin $\dot{C}_k$ kaynaklı değil de, daha çok $\dot{Z}_k$, yani yatırım ve işletme maliyetleri kaynaklı olduğudur. Yanma odasındaki ekserji yıkımının çok yüksek oranda önlenemez olduğu hatırlanırsa, bu sonucun tutarlı ve anlamlı olduğu anlaşılabacaktır.

Tablo 5.23. 552 Nm için geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Geleneksel ekserji analizi parametreleri				
	<i>Kompresör</i>	<i>Yanma Odası</i>	<i>Gaz Jeneratör Türbin</i>	<i>Güç Türbini</i>
IP (kW)	56,90	213,30	4,50	22,90
$\dot{C}_k + \dot{Z}_k$ (USD/sa)	115,36	136,45	121,36	82,78
f_k (%)	0,83	0,28	0,84	0,62
İleri ekserji analizi parametreleri				
	<i>Kompresör</i>	<i>Yanma Odası</i>	<i>Gaz Jeneratör Türbin</i>	<i>Güç Türbini</i>
$\dot{E}x_{yık,k}^{AV,EN}$ (kW)	38,87	6,49	4,00	19,94
$\dot{C}_k^{AV,EN} + \dot{Z}_k^{AV,EN}$ (USD/sa)	10,66	3,91	9,45	6,98
$f_k^{AV,EN}$ (%)	0,81	0,86	0,95	0,65

552 Nm için geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analiz sonucu elde edilen parametreler Tablo 5.23'te verilmiştir. IP açısından bakıldığında en yüksek potansiyel 213,30 kW değeriyle açık ara farkla yanma odasında gözükmektedir. Ancak ileri ekserji analiz sonucu elde edilen gerçek potansiyelin bu şekilde olmadığı açıkça görülmektedir. Buna göre yanma odası gerçek iyileştirme potansiyeli 213,30 kW değil, 6,49 kW'dır. IP değerleri göz önüne alınıp komponentler iyileştirme potansiyeli önceliklerine göre sıralandığında:

- I. Yanma odası (213,30 kW)
- II. Kompresör (56,90 kW)
- III. Güç türbini (22,90 kW)
- IV. Gaz jeneratör türbin (4,50 kW)

şeklinde olmaktadır. Ancak $\dot{E}x_{yık,k}^{AV,EN}$ değerleri göz önüne alınıp, gerçek iyileştirme potansiyellerine göre bir sıralama yapılırsa sıralamanın aşağıdaki şekilde değiştiği gözlenmiştir:

- I. Kompresör (38,87 kW)
- II. Güç türbini (19,94 kW)
- III. Yanma odası (6,49 kW)
- IV. Gaz jeneratör türbin (4,00 kW)

Toplam maliyetler ($\dot{C}_k + \dot{Z}_k$) yönünden sonuçlar incelendiğinde en yüksek potansiyel 136,45 USD/sa değeriyle yanma odasında gözlenmektedir. Önlenebilir/içsel toplam maliyetler ($\dot{C}_k^{AV,EN} + \dot{Z}_k^{AV,EN}$) açısından bakıldığında ise gerçek potansiyellerin çok daha düşük olduğu ve en yüksek potansiyel önlenebilir maliyetin 10,66 USD/sa değeriyle kompresöre ait olduğu anlaşılmaktadır. ($\dot{C}_k + \dot{Z}_k$) değerleri göz önüne alınıp komponentler iyileştirme potansiyelleri açısından önceliklerine göre sıralandığında:

- I. Yanma odası (136,45 USD/sa)
- II. Gaz jeneratör türbin (121,36 USD/sa)
- III. Kompresör (115,36 USD/sa)
- IV. Güç türbini (82,78 USD/sa)

şeklinde olmaktadır. Ancak ($\dot{C}_k^{AV,EN} + \dot{Z}_k^{AV,EN}$) değerleri göz önüne alınıp, gerçek iyileştirme potansiyellerine göre bir sıralama yapılırsa sıralamanın aşağıdaki şekilde değiştiği gözlenmiştir:

- I. Kompresör (10,66 USD/sa)
- II. Gaz jeneratör türbin (9,45 USD/sa)
- III. Güç türbini (6,98 USD/sa)
- IV. Yanma odası (3,91 USD/sa)

f_k ve $f_k^{AV,EN}$ değerleri açısından sonuçlar değerlendirildiğinde yanma odası hariç dramatik bir değişim gözlenmemektedir. Yanma odası için ise çok büyük bir değişim söz konusudur. Yanma odasına ait f_k değeri %28 olarak hesaplanmıştır. Bunun anlamı, buradaki maliyetlerin büyük ölçüde termodinamik verimsizliklere bağlı maliyetler, yani ekserji maliyetleri ($\dot{C}_k$) kaynaklı olduğudur. Ancak $f_k^{AV,EN}$ değerleri incelendiğinde bu oranın %86 olarak hesaplandığı görülmektedir. Bunun anlamı, iyileştirme yapılabilecek

maliyetlerin $\dot{C}_k$ kaynaklı değil de, daha çok $\dot{Z}_k$, yani yatırım ve işletme maliyetleri kaynaklı olduğudur. Yanma odasındaki ekserji yıkımının çok yüksek oranda önlenemez olduğu hatırlanırsa, bu sonucun tutarlı ve anlamlı olduğu anlaşılabacaktır.

Tablo 5.24. 580 Nm için geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Geleneksel ekserji analizi parametreleri				
	<i>Kompresör</i>	<i>Yanma Odası</i>	<i>Gaz Jeneratör Türbin</i>	<i>Güç Türbini</i>
IP (kW)	59,40	217,30	5,90	20,30
$\dot{C}_k + \dot{Z}_k$ (USD/sa)	115,82	139,79	124,08	81,31
f_k (%)	0,83	0,28	0,83	0,63
İleri ekserji analizi parametreleri				
	<i>Kompresör</i>	<i>Yanma Odası</i>	<i>Gaz Jeneratör Türbin</i>	<i>Güç Türbini</i>
$\dot{E}x_{yik,k}^{AV,EN}$ (kW)	39,85	8,40	5,67	18,16
$\dot{C}_k^{AV,EN} + \dot{Z}_k^{AV,EN}$ (USD/sa)	10,68	4,07	9,64	6,72
$f_k^{AV,EN}$ (%)	0,80	0,83	0,93	0,67

580 Nm için geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analiz sonucu elde edilen parametreler Tablo 5.24'te verilmiştir. IP açısından bakıldığında en yüksek potansiyel 217,30 kW değeriyle açık ara farkla yanma odasında gözükmemektedir. Ancak ileri ekserji analiz sonucu elde edilen gerçek potansiyelin bu şekilde olmadığı açıkça görülmektedir. Buna göre yanma odası gerçek iyileştirme potansiyeli 217,30 kW değil, 8,40 kW'dır. IP değerleri göz önüne alınıp komponentler iyileştirme potansiyeli önceliklerine göre sıralandığında:

- I. Yanma odası (217,30 kW)
- II. Kompresör (59,40 kW)
- III. Güç türbini (20,30 kW)

IV. Gaz jeneratör türbin (5,90 kW)

şeklinde olmaktadır. Ancak $Ex_{yık,k}^{AV,EN}$ değerleri göz önüne alınıp, gerçek iyileştirme potansiyellerine göre bir sıralama yapılırsa sıralamanın aşağıdaki şekilde değiştiği gözlenmiştir:

- I. Kompresör (39,85 kW)
- II. Güç türbini (18,16 kW)
- III. Yanma odası (8,40 kW)
- IV. Gaz jeneratör türbin (5,67 kW)

Toplam maliyetler ($\dot{C}_k + \dot{Z}_k$) yönünden sonuçlar incelendiğinde en yüksek potansiyel 139,79 USD/sa değeriyle yanma odasında gözlenmektedir. Önlenebilir/içsel toplam maliyetler ($\dot{C}_k^{AV,EN} + \dot{Z}_k^{AV,EN}$) açısından bakıldığında ise gerçek potansiyellerin çok daha düşük olduğu ve en yüksek potansiyel maliyetin 10,68 USD/sa değeriyle kompresöre ait olduğu anlaşılmaktadır. ($\dot{C}_k + \dot{Z}_k$) değerleri göz önüne alınıp komponentler iyileştirme potansiyelleri açısından önceliklerine göre sıralandığında:

- I. Yanma odası (139,79 USD/sa)
- II. Gaz jeneratör türbin (124,08 USD/sa)
- III. Kompresör (115,82 USD/sa)
- IV. Güç türbini (81,31 USD/sa)

şeklinde olmaktadır. Ancak ($\dot{C}_k^{AV,EN} + \dot{Z}_k^{AV,EN}$) değerleri göz önüne alınıp, gerçek iyileştirme potansiyellerine göre bir sıralama yapılırsa sıralamanın aşağıdaki şekilde değiştiği gözlenmiştir:

- I. Kompresör (10,68 USD/sa)
- II. Gaz jeneratör türbin (9,64 USD/sa)
- III. Güç türbini (6,72 USD/sa)
- IV. Yanma odası (4,07 USD/sa)

f_k ve $f_k^{AV,EN}$ değerleri açısından sonuçlar değerlendirildiğinde yanma odası hariç dramatik bir değişim gözlenmemektedir. Yanma odası için ise çok büyük bir değişim söz konusudur. Yanma odasına ait f_k değeri %28 olarak hesaplanmıştır. Bunun anlamı, buradaki maliyetlerin büyük ölçüde termodinamik verimsizliklere bağlı maliyetler, yani ekserji maliyetleri ($\dot{C}_k$) kaynaklı olduğudur. Ancak $f_k^{AV,EN}$ değerleri incelendiğinde bu oranın %86 olarak hesaplandığı görülmektedir. Bunun anlamı, iyileştirme yapılabilecek maliyetlerin $\dot{C}_k$ kaynaklı değil de, daha çok $\dot{Z}_k$, yani yatırım ve işletme maliyetleri kaynaklı olduğudur. Yanma odasındaki ekserji yıkımının çok yüksek oranda önlenemez olduğu hatırlanırsa, bu sonucun tutarlı ve anlamlı olduğu anlaşılabacaktır.

Tablo 5.25. 630 Nm için geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Geleneksel ekserji analizi parametreleri				
	Kompresör	Yanma Odası	Gaz Jeneratör Türbin	Güç Türbini
IP (kW)	64,00	224,50	4,80	22,50
$\dot{C}_k + \dot{Z}_k$ (USD/sa)	115,78	143,98	122,08	83,14
f_k (%)	0,83	0,27	0,84	0,62
İleri ekserji analizi parametreleri				
	Kompresör	Yanma Odası	Gaz Jeneratör Türbin	Güç Türbini
$\dot{Ex}_{yık,k}^{AV,EN}$ (kW)	43,20	7,55	4,49	19,64
$\dot{C}_k^{AV,EN} + \dot{Z}_k^{AV,EN}$ (USD/sa)	10,72	4,00	9,49	6,85
$f_k^{AV,EN}$ (%)	0,80	0,84	0,94	0,66

630 Nm için geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analiz sonucu elde edilen parametreler Tablo 5.25'te verilmiştir. IP açısından bakıldığında en yüksek potansiyel 224,50 kW değeriyle açık ara farkla yanma odasında gözükmemektedir. Ancak ileri ekserji analiz sonucu elde edilen gerçek potansiyelin bu şekilde olmadığı açıkça görülmektedir. Buna göre yanma odası gerçek iyileştirme potansiyeli 224,50 kW değil, 7,55 kW'dır. IP

değerleri göz önüne alınıp komponentler iyileştirme potansiyeli önceliklerine göre sıralandığında:

- I. Yanma odası (224,50 kW)
- II. Kompresör (64,00 kW)
- III. Güç türbini (22,50 kW)
- IV. Gaz jeneratör türbin (4,80 kW)

şeklinde olmaktadır. Ancak $\dot{E}_{yık,k}^{AV,EN}$ değerleri göz önüne alınıp, gerçek iyileştirme potansiyellerine göre bir sıralama yapılırsa sıralamanın aşağıdaki şekilde değiştiği gözlenmiştir:

- I. Kompresör (43,20 kW)
- II. Güç türbini (19,64 kW)
- III. Yanma odası (7,55 kW)
- IV. Gaz jeneratör türbin (4,49 kW)

Toplam maliyetler $(\dot{C}_k + \dot{Z}_k)$ yönünden sonuçlar incelendiğinde en yüksek potansiyel 143,98 USD/sa değeriyle yanma odasında gözlenmektedir. Önlenebilir/içsel toplam maliyetler $(\dot{C}_k^{AV,EN} + \dot{Z}_k^{AV,EN})$ açısından bakıldığında ise gerçek potansiyellerin çok daha düşük olduğu ve en yüksek potansiyel maliyetin 10,72 USD/sa değeriyle kompresöre ait olduğu anlaşılmaktadır. $(\dot{C}_k + \dot{Z}_k)$ değerleri göz önüne alınıp komponentler iyileştirme potansiyelleri açısından önceliklerine göre sıralandığında:

- I. Yanma odası (143,98 USD/sa)
- II. Gaz jeneratör türbin (122,08 USD/sa)
- III. Kompresör (115,78 USD/sa)
- IV. Güç türbini (83,14 USD/sa)

şeklinde olmaktadır. Ancak $(\dot{C}_k^{AV,EN} + \dot{Z}_k^{AV,EN})$ değerleri göz önüne alınıp, gerçek iyileştirme potansiyellerine göre bir sıralama yapılırsa sıralamanın aşağıdaki şekilde değiştiği gözlenmiştir:

- I. Kompresör (10,72 USD/sa)
- II. Gaz jeneratör türbin (9,49 USD/sa)
- III. Güç türbini (6,85 USD/sa)
- IV. Yanma odası (4,00 USD/sa)

f_k ve $f_k^{AV,EN}$ değerleri açısından sonuçlar değerlendirildiğinde yanma odası hariç dramatik bir değişim gözlenmemektedir. Yanma odası için ise çok büyük bir değişim söz konusudur. Yanma odasına ait f_k değeri %27 olarak hesaplanmıştır. Bunun anlamı, buradaki maliyetlerin büyük ölçüde termodinamik verimsizliklere bağlı maliyetler, yani ekserji maliyetleri ($\dot{C}_k$) kaynaklı olduğudur. Ancak $f_k^{AV,EN}$ değerleri incelendiğinde bu oranın %84 olarak hesaplandığı görülmektedir. Bunun anlamı, iyileştirme yapılabilecek maliyetlerin $\dot{C}_k$ kaynaklı değil de, daha çok $\dot{Z}_k$, yani yatırım ve işletme maliyetleri kaynaklı olduğudur. Yanma odasındaki ekserji yıkımının çok yüksek oranda önlenemez olduğu hatırlanırsa, bu sonucun tutarlı ve anlamlı olduğu anlaşılabacaktır.

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında ileri eksergo-ekonomik analiz ilk defa bir turboprop uçak motoruna uygulanmıştır. Öncelikle dinamik koşullar altında turboprop motorun ve ana komponentlerinin termodinamik performansı ekserjetik parametrelerle değerlendirilmiştir. Sonrasında komponent maliyetleri ve motor istasyonlarındaki ekserji yıkım maliyetleri hesaplanmıştır. Daha sonra elde edilen bütün ekserji yıkımı, komponent maliyeti ve ekserji yıkımı maliyeti değerleri ileri ekserji yardımıyla kategorize edilmiştir. Önlenebilir/önlenebilir ve içsel/dışsal şeklinde yapılan ayırma işlemi, turboprop motor komponentlerinin termal ve ekonomik olarak gerçek iyileştirme potansiyellerinin sayısal olarak ifade edilmesini ve verimsizliklerinin gerçek kaynaklarının anlaşılmasını sağlamıştır. Ayrıca analizin dinamik olarak, yani motorun 6 farklı tork değerindeki veriler kullanılarak gerçekleştirilmiş olması, farklı çalışma koşullarındaki sonuçların da değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen bazı bulgular aşağıda verilmiştir:

- 240 Nm için en yüksek iyileştirme potansiyeline sahip komponent 226 kW ile yanma odası iken, ileri ekserji analizi sonrasında yanma odası için önlenebilir/içsel ekserji yıkımı değeri sadece 6,80 kW olarak hesaplanmıştır. 240 Nm için en yüksek önlenebilir/içsel ekserji yıkımına sahip komponent ise 21,11 kW ile kompresördür.
- 240 Nm için en yüksek toplam maliyete sahip komponent 141,28 USD/sa ile gaz jeneratör türbin olarak tespit edilmiştir. Ancak ileri eksergo-ekonomik analiz sonrasında gaz jeneratör türbin için önlenebilir/içsel toplam maliyet çok daha düşük bir değer olarak hesaplanmıştır: 11,31 USD/sa.
- 350 Nm için en yüksek iyileştirme potansiyeline sahip komponent 203,60 kW ile yanma odası iken, ileri ekserji analizi sonrasında yanma odası için önlenebilir/içsel ekserji yıkımı değeri sadece 6,67 kW olarak hesaplanmıştır. 350 Nm için en yüksek önlenebilir/içsel ekserji yıkımına sahip komponent ise 29,47 kW ile kompresördür.
- 350 Nm için en yüksek toplam maliyete sahip komponent 132,19 USD/sa ile gaz jeneratör türbin olarak tespit edilmiştir. Ancak ileri eksergo-

ekonomik analiz sonrasında gaz jeneratör türbin için önlenebilir/içsel toplam maliyet çok daha düşük bir değer olarak hesaplanmıştır: 10,05 USD/sa. 350 Nm için en yüksek önlenebilir/içsel toplam maliyete sahip komponent ise 10,89 USD/sa ile kompresördür.

- 485 Nm için en yüksek iyileştirme potansiyeline sahip komponent 206,70 kW ile yanma odası iken, ileri ekserji analizi sonrasında yanma odası için önlenebilir/içsel ekserji yıkımı değeri sadece 6,62 kW olarak hesaplanmıştır. 485 Nm için en yüksek önlenebilir/içsel ekserji yıkımına sahip komponent ise 36,47 kW ile kompresördür.
- 485 Nm için en yüksek toplam maliyete sahip komponent 130,51 USD/sa ile yanma odası olarak tespit edilmiştir. Ancak ileri eksergo-ekonomik analiz sonrasında yanma odası için önlenebilir/içsel toplam maliyet komponentler arasında en düşük değer olan 3,92 USD/sa olarak hesaplanmıştır. 485 Nm için en yüksek önlenebilir/içsel toplam maliyete sahip komponent ise 10,65 USD/sa ile kompresördür.
- 552 Nm için en yüksek iyileştirme potansiyeline sahip komponent 213,30 kW ile yanma odası iken, ileri ekserji analizi sonrasında yanma odası için önlenebilir/içsel ekserji yıkımı değeri sadece 6,49 kW olarak hesaplanmıştır. 552 Nm için en yüksek önlenebilir/içsel ekserji yıkımına sahip komponent ise 38,87 kW ile kompresördür.
- 552 Nm için en yüksek toplam maliyete sahip komponent 136,45 USD/sa ile yanma odası olarak tespit edilmiştir. Ancak ileri eksergo-ekonomik analiz sonrasında yanma odası için önlenebilir/içsel toplam maliyet komponentler arasında en düşük değer olan 3,91 USD/sa olarak hesaplanmıştır. 552 Nm için en yüksek önlenebilir/içsel toplam maliyete sahip komponent ise 10,66 USD/sa ile kompresördür.
- 580 Nm için en yüksek iyileştirme potansiyeline sahip komponent 217,30 kW ile yanma odası iken, ileri ekserji analizi sonrasında yanma odası için önlenebilir/içsel ekserji yıkımı değeri sadece 8,40 kW olarak hesaplanmıştır.
- 580 Nm için en yüksek toplam maliyete sahip komponent 139,79 USD/sa ile yanma odası olarak tespit edilmiştir. Ancak ileri eksergo-ekonomik analiz sonrasında yanma odası için önlenebilir/içsel toplam maliyet

komponentler arasında en düşük değer olan 4,07 USD/sa olarak hesaplanmıştır. 580 Nm için en yüksek önlenebilir/içsel toplam maliyete sahip komponent ise 10,68 USD/sa ile kompresördür.

- 630 Nm için en yüksek iyileştirme potansiyeline sahip komponent 224,50 kW ile yanma odası iken, ileri ekserji analizi sonrasında yanma odası için önlenebilir/içsel ekserji yıkımı değeri sadece 7,55 kW olarak hesaplanmıştır. 630 Nm için en yüksek önlenebilir/içsel ekserji yıkımına sahip komponent ise 43,20 kW ile kompresördür.
- 630 Nm için en yüksek toplam maliyete sahip komponent 143,98 USD/sa ile yanma odası olarak tespit edilmiştir. Ancak ileri eksergo-ekonomik analiz sonrasında yanma odası için önlenebilir/içsel toplam maliyet komponentler arasında en düşük değer olan 4,00 USD/sa olarak hesaplanmıştır. 630 Nm için en yüksek önlenebilir/içsel toplam maliyete sahip komponent ise 10,72 USD/sa ile kompresördür.

Tez alışması sonucu elde edilen veriler ışığında, motor komponentlerinde meydana gelen tersinmezliklerin %65-%70 arasında değişen oranlarla içsel olduğu, ve bu nedenle de, komponentler arası etkileşimin zayıf olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca yapılan analizler sonucunda, söz konusu tersinmezliklerin %82-%87 arasında değişen oranlarla önlenemez olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda komponentlerin düşük iyileştirme potansiyeline sahip oldukları sonucuna varılmıştır. Bir diğer önemli bulgu da, tüm tork değerleri için en yüksek iyileştirme potansiyele sahip komponentin kompresör olduğudur. Bu nedenle yapılacak olan iyileştirme çalışmalarında bu komponente öncelik verilmelidir. Sonuç olarak ileri ekserji ve ileri eksergo-ekonomik analizlerin, geleneksel ekserjetik analizlere göre daha anlamlı sonuçlar verdiği ifade edilebilir. Sonuçlardan da anlaşılabileceği üzere, uçak motorları gibi enerji dönüşüm sistemlerinin performansını daha iyi anlayabilmek için ileri ekserji analizi uygulanmalıdır.

Turboprop motora uygulanmış olan ileri ekserji analizi ve ileri eksergo-ekonomi analizine ek olarak, ileri eksergo-çevresel analizin de sisteme uygulanması düşünülmektedir. Termal ve ekonomik verimliliğin iyileştirilmesi dolaylı olarak çevreye olan olumsuz etkinin azalması anlamına gelse de, ileri eksergo-çevresel analizin vereceği bakış açısıyla daha kapsamlı ve isabetli değerlendirmeler yapılabilecektir. Ayrıca ileri ekserjetik analizlerin benzer sistemlere uygulanmasıyla, bu sistemleri birbirleriyle

mukayese etme imkanı doğacaktır. Bu verilerin etiket değeri gibi kullanılmasıyla birlikte ise, tasarımcıların ve işletmecilerin motor seçiminden optimizasyon yapılacak nokta tayinine kadar birçok kritik karar verme süreci hızlanacak ve kolaylaşacaktır.



KAYNAKÇA

- [1] Bejan, A., Tsatsaronis G., Moran M. (1996). *Thermal design and optimization*. Canada: John Wiley & Sons.
- [2] Yakovlieva, A., Boichenko, S. ve Lejda, K (2019). “Evaluation of jet engine operation parameters using conventional and alternative jet fuels”, *International Journal of Sustainable Aviation*, 5(3), 230-248.
- [3] Atilgan, R., Turan, O., Aydin, H. (2019). “Dynamic exergo-environmental analysis of a turboprop aircraft engine at various torques”, *Energy*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115894>. (Erişim tarihi: 20.09.2020)
- [4] Aygun, H., ve Turan, O. (2020). “Exergetic sustainability off-design analysis of variable-cycle aero-engine in various bypass modes”, *Energy*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117008>. (Erişim tarihi: 25.10.2020)
- [5] Yilmaz, N. ve Atmanli A. (2017). “Sustainable alternative fuels in aviation”, *Energy*, 140(2), 1378-1386.
- [6] Baharozu, E., Soykan, G., Ozerdem, MB. (2017). “Future aircraft concept in terms of energy efficiency and environmental factors”, *Energy*, 140(2), 1368-1377.
- [7] Arntz, A., Atinault, A., Merlen, A. (2015). “Exergy-based formulation for aircraft aeropropulsive performance assessment: theoretical development”, *AIAA Journal*, 53(6), 1627-1639.
- [8] Atilgan, R., Turan, O., Altuntas, O., Aydın, H., Synylo, K. (2013). “Environmental impact assessment of a turboprop engine with the aid of exergy”, *Energy*, 58, 664-671.
- [9] Voskuijl, M., Bogaert, J., Rao, AG. (2018). “Analysis and design of hybrid electric regional turboprop aircraft”, *CEAS Aeronaut J*, 9, 15-25.
- [10] http-1: <https://www.atag.org/facts-figures.html>. (Erişim tarihi: 20.10.2020)
- [11] Hayes, D., Lone, M., Whitborne, J.F., Camberos, J., Coetzee, E. (2015). “Adopting exergy analysis for use in aerospace”, *Energy*, 93, 73-94.
- [12] Balli, O., Sohret, Y., Karakoc, T.H. (2018). “The effects of hydrogen fuel usage on the exergetic performance of a turbojet engine”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(23), 10848-10858.
- [13] Coban, K., Colpan, C.O., Karakoc, T.H. (2017). “Application of thermodynamic laws on a military helicopter engine”, *Energy*, 140(2), 1427-1436.

- [14] Zhang, J., Wang, Z., Qinglian, L. (2017). "Thermodynamic efficiency analysis and cycle optimization of deeply precooled combined cycle engine in the air-breathing mode", *Acta Astronautica*, 138, 394-406.
- [15] Reddy, B.S. ve Poondla, A. (2017). "Performance analysis of solar powered Unmanned Aerial Vehicle", *Renewable Energy*, 104, 20-29.
- [16] Bender, D. (2017). "Integration of exergy analysis into model-based design and evaluation of aircraft environmental control systems", *Energy*, 137, 739-751.
- [17] Balli, O. (2017). "Exergy modeling for evaluating sustainability level of a high bypass turbofan engine used on commercial aircrafts", *Applied Thermal Engineering*, 123, 138-155.
- [18] Sohret, Y., Ekici, S., Karakoc, T.H. (2018). "Using exergy for performance evaluation of a conceptual ramjet engine burning hydrogen fuel", *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(23), 10842-10847.
- [19] Balli, O. ve Hepbasli, A. (2014). "Exergoeconomic, sustainability and environmental damage cost analyses of T56 turboprop engine", *Energy*, 64, 582-600.
- [20] Turan, O. ve Aydin, H. (2014). "Exergetic and exergo-economic analyses of an aero-derivative gas turbine engine", *Energy*, 74, 638-650.
- [21] Aygun, H. ve Turan, O. (2020). "Exergo-economic cost analysis for a long-range transport aircraft propulsion system at non-linear power loads", *Energy*, 204. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117991>. (Erişim tarihi: 22.10.2020)
- [22] Turgut, E.T., Karakoc, T.H., Hepbasli, A. (2009). "Exergoeconomic analysis of an aircraft turbofan engine", *International Journal of Exergy*, 6(3), 277-294.
- [23] Ballı, O., Aras, H., Hepbaslı, A. (2008). "Exergetic and exergoeconomic analysis of an aircraft jet engine (AJE)", *Int J Exergy*, 5, 567-581.
- [24] Sahu, M.K., Choudhary, T., Kumari, A., and Sanjay, R., (2018). "Thermoeconomic, Sustainability and Environmental Damage Cost Analysis of Air Cooled CT7-7A Turboprop Engine," *SAE Technical Paper*, <https://doi.org/10.4271/2018-01-0774>. (Erişim Tarihi: 21.10.2020)
- [25] Coban, K., Sohret, Y., Colpan, C.O., Karakoc, T.H. (2017). "Exergetic and exergoeconomic assessment of a small-scale turbojet fuelled with biodiesel", *Energy*, 140(2), 1358-1367.

- [26] Sohret, Y., Açikkalp, E., Hepbasli, A., Karakoc, T.H. (2015). “Advanced exergy analysis of an aircraft gas turbine engine: Splitting exergy destructions into parts”, *Energy*, 90(2), 1219-1228.
- [27] Balli, O. (2017). “Advanced exergy analyses to evaluate the performance of a military aircraft turbojet engine (TJE) with afterburner system: Splitting exergy destruction into unavoidable/avoidable and endogenous/exogenous”, *Applied Thermal Engineering*, 111, 152-169.
- [28] Balli, O. (2017). “Advanced Exergy Analysis of a Turbofan Engine (TFE): Splitting Exergy Destruction into Unavoidable/Avoidable and Endogenous/Exogenous”, *International Journal of Turbo & Jet-Engines*. <https://doi.org/10.1515/tjj-2016-0074>. (Erişim tarihi: 19.09.2020)
- [29] Balli, O. (2017). “Advanced exergy analyses of an aircraft turboprop engine (TPE)”, *Energy*, 124, 599-612.
- [30] Yuksel, B., Balli, O., Gunerhan, H., Hepbasli, A. (2020). “Comparative Performance Metric Assessment of A Military Turbojet Engine Utilizing Hydrogen And Kerosene Fuels Through Advanced Exergy Analysis Method”, *Energies*, 13(5), 1205. <https://doi.org/10.3390/en13051205>. (Erişim tarihi: 18.10.2020)
- [31] http-2: <https://www.geaviation.com/commercial/engines/ct7-engine>. (Erişim tarihi: 12.11.2020)
- [32] El-Sayed, A.F. (2008). *Aircraft propulsion and gas turbine engines*. USA: CRC Press.
- [33] Aydın, H., Turan, O., Midilli, A., Karakoc, T.H. (2012). “Exergetic and exergo-economic analysis of a turboprop engine: a case study for CT7-9C”, *Int J Exergy*, 11, 69- 88.
- [34] Aydın, H., Turan, O., Midilli, A., Karakoc, T.H. (2012). “Component-based exergetic measures of an experimental turboprop/turboshaft engine for propeller aircrafts and helicopters”, *Int J Exergy*, 11(3), 322-348.
- [35] Turan, O. (2012). “Exergetic effects of some design parameters on the small turbojet engine for unmanned air vehicle applications”, *Energy*, 46, 51-61.
- [36] Mehrpooya, M., ve Ansarinassab, H. (2015). “Advanced exergoeconomic analysis of the multistage mixed refrigerant systems”, *Energy Conversion Management*, 103, 705-716.

- [37] Aydın, H., Turan, O., Karakoc, T.H., Midilli, A. (2013). “Exergo-sustainability indicators of a turboprop aircraft for the phases of a flight”, *Energy*, 58, 550-560.
- [38] Atılğan, R. ve Turan, O. (2020). “Economy and exergy of aircraft turboprop engine at dynamic loads”, *Energy*, 213. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118827>. (Erişim tarihi:15.11.2020)
- [39] Keçebaş, A. ve Hepbaşlı, A. (2014). “Conventional and advanced exergoeconomic analyses of geothermal district heating systems”, *Energy and Buildings*, 69, 434-441.
- [40] Vuckovic, G.D., Stojiljkovic, M.M., Mukic, M.V., Stefanovic, G.M., Dedeic, E. (2014). “Advanced exergy analysis and exergoeconomic performance evaluation of thermal processes in an existing industrial plant”, *Energy Conversion Management*, 85, 655-662.
- [41] Açıklalp, E., Aras, H., Hepbaşlı, A. (2014). “Advanced exergoeconomic analysis of an electricity-generating facility that operates with natural gas”, *Energy Conversion Management*, 78, 452-460.
- [42] Anvari, S., Saray, R.K., Bahlouli, K. (2015). “Conventional and advanced exergetic and exergoeconomic analyses applied to a tri-generation cycle for heat, cold and power production”, *Energy*, 91, 925-939.
- [43] Liu, Z., Liu, Z., Cao, X., Luo, T., Yang, X. (2020). “Advanced exergoeconomic evaluation on supercritical carbon dioxide recompression Brayton cycle”, *Journal of Cleaner Production*, 256. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120537>. (Erişim tarihi: 15.11.2020)

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000-0001-9900-1326

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ramazan ATILGAN

Doğum Yeri : Antalya

Doğum Tarihi : 08/08/1987

EĞİTİM BİLGİLERİ

Doktora

(2014-2021)

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı

Yüksek Lisans

(2011-2014)

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı

Lisans

(2007-2011)

Anadolu Üniversitesi

Sivil Havacılık Yüksekokulu

Havacılık Elektrik Elektroniği

Lisans

(2005-2010)

Anadolu Üniversitesi

Sivil Havacılık Yüksekokulu

Uçak Gövde Motor Bakım

MESLEKİ DENEYİM

Araştırma Görevlisi Anadolu Üniversitesi
(Nisan 2012-Nisan 2017) Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi
Uçak Gövde Motor Bakım Bölümü

Araştırma Görevlisi İstanbul Medeniyet Üniversitesi
(Eylül 2011-Nisan 2012) Sivil Havacılık Yüksekokulu
Uçak Gövde Motor Bakım Bölümü

Kaza Kırım Uzmanı Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü
(Mart 2011-Nisan 2011) Uçuş Standartları Daire Başkanlığı
Uçuşa Elverişlilik Müdürlüğü

MAKALELER

1. Atilgan, R. ve Turan, O. (2020). “Economy and exergy of aircraft turboprop engine at dynamic loads”, *Energy*, **213**.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118827>
2. Atilgan, R., Turan, O., Aydın, H. (2019). “Dynamic exergo-environmental analysis of a turboprop aircraft engine at various torques”, *Energy*, **186**.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115894>
3. Atilgan, R. ve Turan, O. (2014). “Mitigation Alternatives for Environmental Impacts of Aircraft Auxiliary Power Units”, *International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering*, **66**, 179-183.
4. Atilgan, R., Turan, O., Altuntas, O., Aydın, H., Synylo, K. (2013). “Environmental impact assessment of a turboprop engine with the aid of exergy”, *Energy*, **58**, 664-671.

BİLDİRİLER

1. Atilgan, R. ve Turan, O. (2019). “Economy and exergy of aircraft turboprop engine at dynamic loads”, *International Symposium on Electric Aviation and Autonomous Systems (ISEAS-2019)*, Budapeşte, Macaristan. Etkinlik Tarihi: 26.05.2019 - 29.05.2019.
2. Atilgan, R., Turan, O., Aydın, H. (2018). “Exergo-environmental analysis of a turboprop aircraft engine at dynamic torques”, *International Symposium on Aircraft Technology, MRO Operations (ISATECH 2018)*, İstanbul, Türkiye. Etkinlik Tarihi: 25.11.2018 - 28.11.2018.
3. Atilgan, R., Söğüt, MZ, Turan, O. (2016). “Effect of air exchange rate on the economic outputs of aircraft environmental control systems”, *8th International Exergy, Energy and Environment Symposium (IEEES-8)*, Antalya, Türkiye. Etkinlik Tarihi: 04.05.2016 - 06.05.2016.
4. Atilgan, R., Turan, O., Söğüt MZ. (2015). “Economic benefits of cabin recirculation air share for transport aircrafts”, *3rd International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials (ENEFM-2015)*, Fethiye, Türkiye. Etkinlik Tarihi: 19.10.2015 - 23.10.2015.
5. Atilgan, R., Atilgan, M., Turan, O. (2015). “Energy and performance analysis of a turbofan aircraft engine at steady-state condition”, *International Conference on Advanced Technology and Sciences (ICAT'15)*, Antalya, Türkiye. Etkinlik Tarihi: 04.08.2015 - 06.08.2015.
6. Atilgan, R., Söğüt, Z., Turan, O., Karakoç, TH. (2015). “Exergetic inventory for the jet engines used in business aircrafts for sustainable aviation”, *The International Symposium on Sustainable Aviation (ISSA 2015)*, İstanbul, Türkiye. Etkinlik Tarihi: 02.06.2015 - 05.06.2015.
7. Atilgan, R., ve Turan, O. (2014). “Relationship between cost and thermodynamic laws for a propeller aero-engine”, *Research Symposium on Energy, Environment*

and Business (RSEEB – 2014), Dubai, BAE. Etkinlik Tarihi: 16.11.2014 - 18.11.2014.

8. Atilgan, R., Atilgan, M., Turan, O. (2014). “Mitigation alternatives for environmental impacts of aircraft auxiliary power units”, *The 3rd International Conference on Informatics, Environment, Energy and Applications (IEEA 2014)*, Shanghai, Çin. Etkinlik Tarihi: 28.03.2014 - 30.03.2014.
9. Atilgan, R., Turan, O., Aydın, H. (2013). “Exergo-economic analysis of an experimental aircraft turboprop engine under low torque condition”, *International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials (ENEFM)*, Kemer, Antalya, Türkiye. Etkinlik Tarihi: 10.09.2013 - 12.09.2013.
10. Atilgan, R., ve Turan, O. (2013). “Exergo-environmental definitions of an aircraft turboprop engine”, *The 8th International Green Energy Conference (IGEC-VIII)*, Kiev, Ukrayna. Etkinlik Tarihi: 17.06.2013-19.06.2013.

KİTAP BÖLÜMLERİ

1. Atilgan, R., Turan, O., Aydın, H. (2014). “Exergo-economic analysis of an experimental aircraft turboprop engine under low torque condition”, *Springer Proceedings in Physics*, Vol. 155, ISBN: 978-3-319-05521-3. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05521-3_42.