



**BİR HELİKOPTER MOTORUNUN
TERMODİNAMİK VE TERMOEKONOMİK
İNCELEMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Cengizhan GÖK

Eskişehir 2025

**BİR HELİKOPTER MOTORUNUN TERMODİNAMİK VE
TERMOEKONOMİK İNCELEMESİ**

CENGİZHAN GÖK

Yüksek Lisans Tezi

Sivil Havacılık Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Tahir Hikmet KARAKOÇ

(İkinci Danışman: Doç. Dr. Özgür BALLI)

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ocak 2025

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Cengizhan GÖK'ün BİR HELİKOPTER MOTORUNUN TERMODİNAMİK VE TERMOEKONOMİK İNCELEMESİ başlıklı çalışması 02/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Sivil Havacılık Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye	:	Prof. Dr. Tahir Hikmet KARAKOÇ
Üye	:	Doç. Dr. Selçuk EKİCİ
Üye	:	Dr. Öğr. Üyesi Elif KORUYUCU

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi Cengizhan GÖK, BİR HELİKOPTER MOTORUNUN TERMODİNAMİK VE TERMOEKONOMİK İNCELEMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Prof. Dr. Tahir Hikmet KARAKOÇ

ÖZET

BİR HELİKOPTER MOTORUNUN TERMODİNAMİK VE TERMOEKONOMİK İNCELEMESİ

Cengizhan GÖK

Sivil Havacılık Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2025

Danışman: Prof. Dr. Tahir Hikmet KARAKOÇ

(İkinci Danışman: Doç. Dr. Özgür BALLI)

Bu çalışma helikopterlerde kullanılan bir turboşaft motorunun (TSE) performansını değerlendirmek için termodinamik, sürdürülebilirlik, çevresel ve ekonomik analizler sunmaktadır. Dört farklı motor çalışma seviyesi (%50 Güç, %75 Güç, %100 Güç ve Maksimum Güç) için gerçekleştirilen analiz sonucunda; TSE'nin enerji verimleri %22.22 (%50 Güç), %25.09 (%75 Güç), %27.32 (%100 Güç) ve %28.14 (Maksimum Güç) olarak hesaplanırken, ekserji verimleri sırasıyla %50 Güç için %20.93, %75 Güç için %23.64, %100 Güç için %25.73 ve Maksimum Güç için %26.51 olarak bulunmuştur. Ekserji Maliyet Enerji Kütle (EXCEM) yöntemi kullanılarak yapılan termoeconomik inceleme sonucunda ise; motorun maliyet akışının 4.26 kWh/\$ (%50 Güç), 5.39 kWh/\$ (%75 Güç), 6.72 kWh/\$ (%100 Güç) ve 7.68 kWh/\$ (Maksimum Güç) olarak hesaplanmıştır. Motor komponentleri seviyesinde yapılan analiz sonucunda ise; en yüksek ekserji yıkımına sahip kısım olması nedeni ile yanma odasının motor performansını olumsuz olarak etkilediği görülmüştür. Yanma odasının maksimum ekserji yıkımı motorun değişen performans test aşamaları için 1142.13 kW ile 2051.50 kW arasında değişmektedir. Bu çalışmada ayrıca motorun ve alt bileşenlerinin ekserji yıkım oranı, ekserji kayıp oranı, atık ekserji oranı, ekserjetik iyileştirme potansiyeli, ürün kayıp oranı, yakıt ekserji kayıp oranı, çevresel etki faktörü, ekolojik etki faktörü, sürdürülebilirlik verim faktörü, ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi, ekolojik objektif fonksiyonu ve ekolojik sürdürülebilirlik indeksi hesaplanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Turboşaft motor, Termodinamik analiz, Termoeconomik analiz, Sürdürülebilirlik.

ABSTRACT

THERMODYNAMIC AND THERMOECONOMIC STUDY OF A HELICOPTER ENGINE

Cengizhan GÖK

Department of Civil Aviation

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, January 2025

Supervisor: Prof. Dr. Tahir Hikmet KARAKOÇ

(Co-Supervisor: Assoc. Dr. Özgür BALLI)

This study presents thermodynamic, sustainability, environmental and economic analyses to evaluate the performance of a turboshaft engine (TSE) used in helicopters. Based on the analyses conducted for four different engine operating levels (50% Power, 75% Power, 100% Power, and Maximum Power), the energy efficiencies of the TSE were calculated as 22.22% (50% Power), 25.09% (75% Power), 27.32% (100% Power), and 28.14% (Maximum Power), respectively. The exergy efficiencies were found to be 20.93% for 50% Power, 23.64% for 75% Power, 25.73% for 100% Power, and 26.51% for Maximum Power. Through a thermoeconomic analysis using the Exergy Cost Energy Mass (EXCEM) method, the cost flow of the engine was determined to be 4.26 kWh/\$ (50% Power), 5.39 kWh/\$ (75% Power), 6.72 kWh/\$ (100% Power), and 7.68 kWh/\$ (Maximum Power). An analysis at the engine component level revealed that the combustion chamber negatively impacts engine performance due to having the highest exergy destruction. The maximum exergy destruction of the combustion chamber ranged from 1142.13 kW to 2051.50 kW across the varying performance test stages of the engine. Additionally, this study calculated the exergy destruction rate, exergy loss rate, waste exergy rate, exergetic improvement potential, product loss rate, fuel exergy loss rate, environmental impact factor, ecological impact factor, sustainability efficiency factor, exergetic sustainability index, ecological objective function, and ecological sustainability index for the engine and its components.

Keywords: Turboshaft engine, Thermodynamic analysis, Thermoeconomic analysis, Sustainability.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında rehberliği ve tecrübesi ile yanımda olan danışmanım Sayın Prof. Dr. Tahir Hikmet KARAKOÇ'a; ilgili ve özverili yaklaşımıyla desteğini esirgemeyen danışmanım Sayın Doç. Dr. Özgür BALLI'ya; yapıcı eleştirileriyle katkı sağlayan Sayın Doç. Dr. Selçuk EKİCİ'ye; değerli destekleri için Sayın Dr. Öğr. Elif KORUYUCU'ya; aynı ortamda bulunmaktan ve tanışmaktan onur duyduğum, hocaların hocası Sayın Prof. Dr. Arif HEPBAŞLI'ya; az zamanda çok şey öğrendiğim, kıymetli gönül insanı Sayın Prof. Dr. Yunus Ali ÇENGEL'e; bilim dünyasına değerli katkılar sağlayan Sayın Prof. Dr. İbrahim DİNÇER'e; test verilerinin paylaşılmasına izin veren 1. HBFM eski müdürü Sayın Gürhan ERGÜRHAN'a; desteğini eksik etmeyen arkadaşım Sayın Umut ÇİÇEK'e ve katkı sunan tüm kişi ve kurumlara en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, varlıklarıyla her zaman yanımda olan sevgili anneme ve babama ayrı bir teşekkürü borç bilirim.

Cengizhan GÖK

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.

Cengizhan GÖK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XIV
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Önemi.....	2
1.2. Tezin Endüstriyel ve Ekonomik Yararları	3
1.3. Tezin Sosyal ve Çevresel Yararları	3
2. LİTARATÜR TARAMASI.....	4
2.1. Literatür Özeti.....	4
2.2. Turboşaft/Turboprop Motor Literatür Taraması	4
2.3. Diğer Gaz Türbinli Motorların Literatür Taraması	8
3.TURBOŞAFT MOTOR TERMODİNAMİK VE TERMOEKONOMİK ANALİZİ İÇİN DENKLEMLER VE GAZ TÜRBİNLİ MOTOR.....	13
3.1. Termodinamik Analiz Bağlıntıları	13
3.1.1. Enerji terimleri.....	14
3.1.2. Ekserji terimleri	16
3.2. Kontrol Hacimleri için Bağlıntılar.....	20
3.2.1. Bir kontrol hacmi için kütle denge denklemi.....	20

3.2.2. Bir kontrol hacmi için enerji denge denklemi	21
3.2.3. Bir kontrol hacmi için entropi dengesi	22
3.2.4. Bir kontrol hacmi için ekserji denge denklemi.....	23
3.2.5. Referans çevre tanımlaması	24
3.3. Ekserji Performans Parametreleri	25
3.3.1. Ekserji verimi	25
3.3.2. Tersinmezlik oranı	26
3.3.3. Atık ekserji oranı.....	26
3.3.4. Ürün kayıp oranı	27
3.3.5. Ekserji iyileştirme potansiyeli	27
3.3.6. İyileştirilmiş verim	27
3.3.7. Özgül yakıt tüketimi.....	27
3.3.8. Yakıt ekserjisi kayıp oranı.....	28
3.3.9. Çevresel etki faktörü	28
3.3.10. Ekolojik etki faktörü	28
3.3.11. Ekolojik objektif fonksiyonu	28
3.3.12. Ekolojik objektif fonksiyon indeksi	29
3.3.13. Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi	29
3.3.14. Sürdürülebilirlik verimlilik faktörü	29
3.4. Termoekonomik Analiz Bağlılıkları.....	29
3.4.1. Ekserji maliyet enerji kütle akışı yöntemi	30
3.5. Gaz Türbinli Motorlar.....	30
3.5.1. Brayton çevrimi	30
3.5.2. T700-701C Turboşaft motoru	35
4. TURBOŞAFT MOTORU EKSERJİ ANALİZİ	37
4.1. T700-701C Turboşaft Motoru Termodinamik Analizi.....	37
4.1.1. Kompresör (AC)	40
4.1.2. Yanma odası (CC)	41
4.1.3. Gaz generatör türbini (GGT).....	42
4.1.4. Güç türbini (PT)	43
4.1.5. Egzoz duct nozul (EDN).....	44
4.1.6. Gaz generatör türbini mekanik şaftı (GGMS)	45

4.1.7. Güç türbini mekanik şaftı (PTMS).....	45
4.2. Turboşaft Motorun Enerji Verimleri ve Özgül Yakıt Tüketimi Değerleri.....	46
4.3. Turboşaft Motoru Test Parametreleri	46
4.3.1. Turboşaft motor testlerine ait kimyasal yanma denklemleri.....	49
4.3.2. Turboşaft motor istasyonları fiziksel ekserji akışları	53
4.3.3. Yakıt kimyasal ekserji hesabı.....	53
4.3.4. Motor elemanlarının giren ve çıkan toplam ekserji akımları	54
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	60
KAYNAKÇA.....	73
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLER DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1. Sıcaklığın fonksiyonuyla bazı maddelerin sabit basınçtaki özgül ısıları	15
Tablo 3.2. Standart molar kimyasal ekserji değerleri	18
Tablo 3.3. Bazı mükemmel gazların kimyasal ekserji değerleri	19
Tablo 3.4. Hidrokarbon bazlı yakıtların kimyasal ekserji formülleri.....	20
Tablo 3.5. Referans çevre modeli	25
Tablo 4.1. Ekserji analizi ve sürdürülebilirlik parametrelerinin hesaplanma şekli.....	38
Tablo 4.2. T700-701C motor genel özellikleri.....	39
Tablo 4.3. Turboşaft motor enerji verimleri ve özgül yakıt tüketimleri	46
Tablo 4.4. Turboşaft motor test verileri	47
Tablo 4.5. Turboşaft motor istasyonları fiziksel ekserji akışları.....	49
Tablo 4.6. Yanmış gazların kütleli dağılımları (%50 Güç)	51
Tablo 4.7. Yanmış gazların kütleli dağılımları (%75 Güç)	52
Tablo 4.8. Yanmış gazların kütleli dağılımları (%100 Güç)	52
Tablo 4.9. Yanmış gazların kütleli dağılımları (Maksimum Güç)	53
Tablo 4.10. Turboşaft motor termodinamik parametreleri (%50 Güç).....	54
Tablo 4.11. Turboşaft motor termodinamik parametreleri (%75 Güç).....	55
Tablo 4.12. Turboşaft motor termodinamik parametreleri (%100 Güç).....	55
Tablo 4.13. Turboşaft motor termodinamik parametreleri (Maksimum Güç)	55
Tablo 4.14. Dört çalıştırma modu için ekserji parametreleri 1	56
Tablo 4.15. Dört çalıştırma modu için ekserji parametreleri 2	57
Tablo 4.16. Dört çalıştırma modu için çevresel ekserji parametreleri	58
Tablo 4.17. Dört çalıştırma modu için sürdürülebilirlik ve ekonomik ekserji parametreleri	59
Tablo 5.1. CT7-9C Turboprop motoru ile T700-701C Turboşaft motorunun maksimum güç modunda iken ekserji verimlerinin karşılaştırması	71

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Motor komponentlerinin ekserji verimlerinin yükseklik ile değişimi.....	9
Şekil 3.1. Brayton çevrim	31
Şekil 3.2. Sol tarafta F35 savaş uçağı ve ona ait bir F135 motorunu, sağ tarafta ise UH60 helikopteri ve ona ait T700 motorunu görmektesiniz.	33
Şekil 3.3. Genel bir gaztürbinli motorunun kısımları	34
Şekil 3.4. Genel bir turboprop motorunun görüntüsü.....	34
Şekil 3.5. Genel bir turboşaft motorunun kısımları	35
Şekil 3.6. Sikorsky S-70B-2 Seahawk.....	36
Şekil 4.1. T700-701C Motorunun ana kısımlarının gösterimi.....	40
Şekil 4.2. Turboşaft motorun şematik gösterimi	40
Şekil 4.3. Kompresör kontrol hacmi.....	41
Şekil 4.4. Yanma odası kontrol hacmi.....	42
Şekil 4.5. Gaz generatör türbini kontrol hacmi	43
Şekil 4.6. Güç türbini kontrol hacmi	44
Şekil 4.7. Egzoz duct nozul kontrol hacmi	44
Şekil 4.8. Gaz generatör türbini mekanik şaftı	45
Şekil 4.9. Güç türbini mekanik şaftı	45
Şekil 4.10. TSE alt sistemlerinin sıcaklık değerleri.....	47
Şekil 4.11. TSE alt sistemlerinin basınç değerleri.....	48
Şekil 5.1. Ekserji yıkımı	60
Şekil 5.2. Ekserji yıkım oranı	60
Şekil 5.3. Atık ekserji akımı	62
Şekil 5.4. Atık ekserji oranı	62
Şekil 5.5. Ekserji verimleri	63
Şekil 5.6. İyileştirme potansiyeli	63
Şekil 5.7. İyileştirilmiş ekserji verimleri	64
Şekil 5.8. Ürün kayıp oranı.....	64
Şekil 5.9. Yakıt ekserji kayıp oranı	65
Şekil 5.10. Çevresel etki faktörü	65
Şekil 5.11. Ekolojik etki faktörü.....	66
Şekil 5.12. Ekolojik objektif fonksiyonu.....	67

Şekil 5.13. Ekolojik objektif fonksiyon indeksi	67
Şekil 5.14. Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi	68
Şekil 5.15. Sürdürülebilirlik verimlilik faktörü	69
Şekil 5.16. Ekserji maliyet enerji kütle analizi	69



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AC	: Hava kompresörü
c	: Özgöl ısı kapasitesi (kJ/kgK)
CC	: Yanma odası
e	: Birim enerji
$\dot{E}$	: Enerji akımı (kW)
$\dot{E}_x$	: Ekserji akımı (kW)
ε	: Birim ekserji
$\bar{\varepsilon}$	: Molar ekserji
$EXCEM$	: Ekserji maliyet enerji kütleli akış
$EcoEF$	: Ekolojik etki faktörü
EDN	: Egzoz duct nozul
EEF	: Çevresel etki faktörü
$ExSI$	: Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi
$ExDR$	: Ekserji yıkım oranı (%)
$\dot{E}xIP$	: Ekserjetik iyileştirme potansiyeli (kW)
$\dot{E}x_{WE}$	: Atık ekserji akışı (kW)
$WExR$	: Atık ekserji oranı (%)
EOF	: Ekolojik objektif fonksiyonu
$FExWR$	: Yakıt ekserji kayıp oranı (%)
h	: Entalpi (kJ/kg)
$\bar{h}$	: Molar entalpi (kJ/kmol)
$LHV (Ha)$	: Alt ısı değeri (kJ/kg)
M	: Molar ağırlık (kg/kmol)
$\dot{m}$	: Kütleli debi (kg/s)
p	: Basınç (kPa)
PLR	: Ürün ekserji kayıp oranı
PEC	: TSE maliyeti

GGT	: Gaz Genaretör Türbin
$GGMS$	: Gaz Generatör Mekanik Şaft
Q	: Isıl enerji (kJ)
q	: Birim kütle için ısı enerji (kJ/kg)
R_g	: Gaz sabiti (kJ/kgK)
$\bar{R}$	: Evrensel gaz sabiti (kJ/kmolK)
R_{ex}	: Maliyet oluşum oranı (kWh/USAS\$)
s	: Entropi (kJ/kgK)
$\bar{s}$	: Molar entropi (kJ/kmolK)
SEF	: Sürdürülebilir verim faktörü
SFC	: Özgül yakıt tüketimi (kg/kWh)
ppm	: Milyondaki oran (Parts per million)
T	: Sıcaklık (K)
TSE	: T700-707C Turboşaft motor
ν	: Özgül hacim (m^3/kg)
γ_F	: Yakıt kalitesi
U	: İç enerji (kJ)
$\dot{W}$	: İş oranı (kJ)
η_e	: Enerji verimi (%)
η_{ex}	: Ekserji verimi (%)
$\eta_{ex,imp}$	: Ekserji verimi iyileştirilmiş (%)
rpm	: Dakikadaki devir sayısı (Revolutions per minute)
PT	: Güç türbini
$PTMS$	: Güç türbini mekanik şaft
O	: Çevre koşulları
h	: Hava
g	: Giriş
ζ	: Çıkış

<i>D</i>	: Yıkım
<i>k</i>	: Komponent (kısım)
<i>y</i>	: Yakıt
<i>ch</i>	: Kimyasal
<i>ph</i>	: Fiziksel
<i>kn</i>	: Kinetik
<i>pt</i>	: Potansiyel
<i>tot</i>	: Toplam
<i>1,2,3,4,5,6,7,8,9,</i> <i>10,11,12,13,14,</i> <i>15</i>	: İstasyon numaraları

1. GİRİŞ

Enerji, evrenin varoluşundan günümüze kadar geçen süre içinde yaşamın sürdürülebilmesi için vazgeçilmez bir rol oynamıştır. Başlangıçta, enerji yaşamın devamı için kullanılmışken, teknolojinin ilerlemesiyle birlikte bu kaynak, insanların bilinçli bir şekilde kullandığı kritik bir unsur haline gelmiştir. Günümüzde ise enerji, uluslararası ekonomik ve siyasi gelişmeleri belirleyen, dünya gündeminde ele alınan konuları şekillendiren ve yönlendiren temel bir unsurdur. Hızlı nüfus artışı ve sürekli gelişen üretim teknikleri, küresel enerji talebini her geçen gün artırmaktadır. Ülkelerin çözmek zorunda olduğu temel sorunların başında ise enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği gelmektedir. Bu sorunların en önemli nedeni, geleneksel enerji kaynaklarının belirli bir süre sonra tükenmesiyle karşı karşıya kalmamızdır. Bir diğer önemli faktör ise, fosil kaynakların yanması sonucu ortaya çıkan sera gazlarının, küresel ısınma ve çevresel kirliliğin başlıca sebepleri arasında yer almasıdır. Ayrıca, geleneksel enerji kaynaklarının rezerv kısıtları nedeniyle artan enerji talebini karşılamada gelişen teknoloji ve hızla çoğalan nüfusun etkisiyle, bu kaynakların giderek yetersiz kalacağı öngörülmektedir (Bayraç, Çelikay ve Çildir, 2018; Dinçer ve Rosen, 2005).

Uygun maliyetle, minimum çevresel ve sosyal etkiyle sürekli olarak ihtiyaç duyulan enerjiyi sağlamak amacıyla sürdürülebilir enerji politikaları geliştirilmektedir. Sürdürülebilir enerji politikası, öncelikle gelecek kuşaklara temiz ve yaşanabilir bir çevre bırakma amacını taşıdığı için büyük önem taşımaktadır. Günümüzde, gelişmişlik anlayışı enerji bolluğu ve sınırsız tüketim yerine, enerjinin daha tasarruflu ve ekonomik bir şekilde elde edilebileceği teknoloji ve kaynak kullanımı yaklaşımına yönelmektedir. Küresel ısınma ve iklim değişikliği etkilerinin azaltılması, bu yeni stratejilerin temelini oluşturmaktadır. Enerjinin etkili kullanımı, enerji arzının güvenliğinin sağlanması, çevreyi daha az kirleten ve güvenilir enerji kaynaklarına erişim, sürdürülebilir kalkınma için temel unsurlar arasında yer almaktadır (Öymen ve Ömeroğlu, 2020; Dinçer, 2007).

Sürdürülebilirlik, kelime anlamı olarak mevcut bir dengeyi bozmadan devamlılığını ve kalıcılığını sürdürmeyi ifade eder. Sürdürülebilirlik, ekonomik, sosyal, kültürel, bilimsel, doğal ve beşerî kaynakların dengeli ve ihtiyatlı bir şekilde kullanılmasını amaçlayan bir katılımcı süreç olarak tanımlanabilir. Küresel enerji talebinin büyük bir kısmı hala petrol, doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıtlarla karşılanmaktadır (Bayraç, Çelikay ve Çildir, 2018). Son yıllarda fosil yakıt üretim teknolojilerinin gelişmesi, bu yakıtların tüketimini ciddi şekilde artırmıştır. Havacılık

sektörünün çevreye verdiği zararlar, özellikle egzoz gazları göz önüne alındığında, her geçen gün daha fazla hissedilir hale gelmiştir. Ayrıca, havacılık sektörünün ekonomik olarak da olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu nedenle, negatif etkinin azaltılması veya ortadan kaldırılması için yeni araştırmalar ve analizler yapılması gerekmektedir. Bu bağlamda, özellikle termodinamik ve termoekonomik analizler büyük önem taşımaktadır. Ekserji analizi, sistemin içindeki tersinmezliklerin büyüklüğünü ve konumunu belirlemek için kullanılan bir termodinamik yöntemdir. Ekserjoekonomik analiz ise, termodinamik dışındaki ekonomik değişkenleri de içeren kapsamlı bir analizdir (Turgut vd., 2007; Bejan, Tsatsaronis ve Moran, 1996).

Termodinamiğin birinci yasası, enerjinin miktarıyla ilgili olup, enerjinin ne yaratılabileceğini ne de yok edilebileceğini belirtir. Bu yasa, bir sistemdeki enerji değişimlerini hesaplamak için önemlidir. İkinci yasa ise enerjinin niteliğiyle ilgilidir; yani bir sistemdeki enerjinin niteliğinin azalması, entropi üretimi ve iş yapma yeteneğinin değerlendirilmesi ile alakalıdır. Bu yasa, sistemlerin geliştirilmesi için fırsatlar sunar. Ekserji analizi, sistemlerin verimliliği ve performansı hakkında enerji analizinden daha kullanışlı ve anlamlı veriler sağlar. Ekserjoekonomik analiz ise süreç iyileştirmeye yönelik olarak geliştirilmesi daha olası görünen potansiyel konumları belirleyerek maliyete dayalı bilgiler önerir. Bu analiz türü, enerji kaynaklarının etkili kullanımını ve ekonomik açıdan sürdürülebilir çözümleri belirlemede önemli bir araçtır (Aydın vd., 2012; Çengel ve Boles, 2019).

1.1. Tezin Amacı ve Önemi

Bu tezde döner kanatlı hava araçlarında kullanılan gaz türbinli motor ailesine mensup turboşaft motoru; termodinamiğin birinci ve ikinci yasa prensipleri doğrultusunda enerji, ekserji ve termoekonomik açılarından incelenmiştir. Deneysel olarak incelenen çevrim parametreleri ve değerleri ölçülmüş olup bununla birlikte daha önce belirtilmiş olan analizlerin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Günümüzde enerji kaynaklarının hızla tüketilmesi ve emisyon oranlarının giderek artması küresel ısınma ve benzeri çevresel sorunların sürekli gündemde kalmasına neden olmuştur buna bağlı olarak incelenen turboşaft motorun performansın ve sürdürülebilirliğinin en iyilenmesi önem arz etmektedir.

1.2.Tezin Endüstriyel ve Ekonomik Yararları

Bu tez çalışması kapsamında incelenmekte olan turboşaft motor yaygın olarak döner kanatlı hava araçlarında kullanılmaktadır. Ülkemizde son yıllarda ivme kazanan yerli ve milli hava ve uzay araçları ile bunlara güç sağlayacak sistemlerin geliştirilme çalışmaları için temel nitelikte olan bu çalışma ile ülkemizin endüstriyel ve ekonomik gelişimine katkı sunmayı amaçlamaktadır.

1.3.Tezin Sosyal ve Çevresel Yararları

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilecek olan analizler ile söz konusu motorun ekserji performans sınırları çizilecek ve iyileştirme potansiyelleri belirlenecektir. Böylelikle, incelenen turboşaft motorun yakıt tüketimi ve buna bağlı olarak emisyonlarının azaltılması ya da eniyilemesi amaçlanmaktadır.

2. LİTARATÜR TARAMASI

2.1. Literatür Özeti

Tez kapsamında gerçekleştirilen literatür taraması, açık kaynak literatüründe ve aşağıda belirtilen anahtar kelimeler aracılığıyla yapılmıştır.

- Gaz türbinli motor (gas turbine engine)
- Turboshift, Turbojet, Turboprop, Turbofan
- Termodinamik Analiz (thermodynamic analysis)
- Birinci yasa, ikinci yasa (first law, second law)
- Sürdürülebilirlik, sürdürülebilirlik göstergeleri (sustainability, sustainability indicators)
- Enerji, ekserji, enerjetik, exerjetik, enerjetik verim, exerjetik verim (energy, exergy, energetic, exergetic, energetic efficiency, exergetic efficiency)

Literatür özeti Turboşift/Turboprop ve Diğer gaz türbinli motorlar için iki başlık altında toplanmıştır.

2.2.Turboşift/Turboprop Motor Literatür Taraması

Aydın vd., (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, bir turboprop motorunun ekserjetik ve ekserjoekonomik analizi, Casa CN235, SAAB 340, Sukhoi Su-80 uçaklarında kullanılan CT7/T700 turboprop/turboşift ailesine mensup CT7-9C turboprop motoru seçilerek gerçekleştirilmiştir. Turboprop motorunun ekserjetik verimi %30 olarak hesaplanmıştır. En yüksek ekserji kaybı oranı %63.90 ile %62.10 arasında yanma odasında gözlenmiştir. Ekserji verimleri kompresör %90.6, yanma odası %79.9, gaz generatörü %96.2, güç türbini %95.2 ve egzoz duct nozul %98.1 olarak hesaplanmıştır. CT7-9C, pervaneyi tahrik etmek için şaft beygir gücü üretmektedir. Power türbinin ekserji maliyeti saatte 396 ABD doları ve birim ekserji maliyeti ise 78.5 ABD doları/GW olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, turboprop motoru ve bileşenlerinin ekserji verimliliğini anlamaya yardımcı olmakta ve iyileştirme potansiyeline dikkat çekmektedir.

Aydın vd., (2013) tarafından Türk Hava Kuvvetlerinin envanterinde bulunan Casa CN 235 nakliye uçaklarında kullanılan bir turboprop motorunun belirli uçuş aşamalarında ekserji-sürdürülebilirlik göstergeleri hesaplanmıştır. Sürdürülebilir

havacılık için önemli zorluklardan biri, küresel ve çevresel etkilerin azaltılmasıdır. Bu çalışmanın amacı, bir turboprop motorunun sürdürülebilir performansını daha iyi anlayarak detaylı bir şekilde tartışmak ve analiz etmektir. Sekiz uçuş aşaması için turboprop motorunun ekserjetik sürdürülebilirlik göstergeleri sunulmuştur. Bu aşamalar; taksi (uçacağı pist üzerinde ilerletmek), iniş, tırmanış, maksimum seyir, maksimum süreklilik, normal kalkış, maksimum kalkış, otomatik ters güçtür. Motor için kullanılan ekserjo-sürdürülebilirlik göstergeleri şunlardır: ekserji verimliliği, atık ekserji oranı, iyileştirilebilir ekserji oranı, ekserji kaybı oranı, çevresel etki faktörü ve ekserjetik sürdürülebilirlik indeksidir. Sonuçlar ise şunlardır: maksimum ekserji verimi %29.2, atık ekserji oranı %70.8, ekserjetik kayıp oranı 0.41 ve çevresel etki faktörü 2.43 olarak hesaplanmıştır. Taksi ve iniş aşamalarında minimum ekserji verimi %20.6, minimum ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi ise 0.26 olarak bulunmuştur. Tırmanış ve maksimum sürüş aşamalarında atık ekserji oranı sırasıyla %75.80 ve %79.40 olarak tespit edilmiştir. Ekserji potansiyel bir emisyonun çevreye olan etkisinin etkili bir göstergesidir. Sürdürülebilir havacılıkta enerji verimliliğinin önemi, küresel ısınma, gürültü ve atmosferik kirlilik gibi çevresel problemlere de bağlıdır.

Ballı ve Hepbaşlı (2013) tarafından yapılan bir çalışmada, dünyada en yaygın kullanılan turboprop motoru olan T56 turboprop motorunun enerjetik ve ekserjetik analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, çeşitli güç yükleme operasyon modlarında T56 motorunun enerjetik ve ekserjetik analiz sonuçları sunulmuştur (%75, %100, Askeri ve Kalkış modları). Enerjetik ve ekserjetik performans, hem şaft gücü (Case A) hem de şaft gücüne egzoz gazlarının kinetik enerjisinin eklenmiş hali (Case B) için değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın başlıca hedefi, ekserji tüketiminin ve turboprop motor bileşenlerinin dışarıya attığı ekserjinin belirlenmesidir. Maksimum şaft gücü için, tek sabit şaftlı T56 turboprop motorunun ekserjetik verimi ve serbest güç türbinli CT7-9C turboprop motorların verimleri karşılaştırılmıştır. T56 turboprop motorunun ekserji verimi %23.8 olarak hesaplanmıştır. T56 motoru 1960'ların teknolojisiyle tasarlanırken, CT7-9C motoru 1988'de kullanılan nispeten yeni bir teknoloji ve daha verimli bir yanma odası tasarımıyla üretilmiştir ve daha yüksek verime sahiptir.

Ballı ve Hepbaşlı (2014) tarafından T56 turboprop motorunun ekserjoekonomik, sürdürülebilirlik ve hasar maliyet analizini gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın başlıca hedefi farklı güç yüklerinde ekserjoekonomik, sürdürülebilirlik ve çevresel hasar

maliyet analiz methodlarını kullanarak T56 turboprop motorunun performansını değerlendirmektedir. Şaft gücünün birim ekserji maliyeti artan şaft gücünden dolayı %75 güç çalışmasında 76.34 \$/GJ den, maksimum kalkış gücü modunda 58.32 \$/GJ'ye düşmüştür. Yakıt akışında artış ile egzoz gazlarının birim ekserji maliyeti arttığı için kinetik enerjinin birim ekserji maliyeti %75 modun da 599.43 \$/GJ, kalkış modun da 666.76 \$/GJ olmuştur. Yakıt akış oranı arttıkça çevresel kirleticiler ve çevresel hasar maliyet oranı yükselmektedir. Motorun çevresel maliyet oranı %75 mod da 423.94 \$/h, %100 modda 576.97 \$/h, askeri modda 634.93 \$/h ve kalkış modunda 665.85 \$/h olarak hesaplanmıştır. Toplam maliyet oranı; yakıt maliyeti, sermaye yatırım maliyeti, operasyon ve bakım maliyeti ve çevresel hasar maliyetinin toplamından oluşmuştur. Motorun toplam maliyet oranı %75 modda 1702.59 \$/h, %100 modda 2100.26 \$/h, askeri modda 2220.42 \$/h ve kalkış modunda 2284.50 \$/h olarak belirlenmiştir.

Turan ve Aydın (2016) tarafından helikopterlerde güç üretimi için kullanılan bir turboşaft motorunun enerji ve ekserji akışlarının sayısal hesaplamaları yapılmıştır. Çalışmalarında SA 330 PUMA, AS332/532 Super puma, EC225/725 döner kanatlı hava araçlarında kullanılan Turbomeca/SAFRAN Makila turboşaft motorunun termodinamik incelemesini literatüre kazandırmışlardır. Bileşenler içinde en büyük ekserji verimi gaz generatörü türbininde %91.4 olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda turboşaft motorun ekserjetik verimi %27.5 olarak hesaplanmıştır. Eksenel, santrifüj kompresörlerin ve güç türbininin ekserji verimliliği ise %83.8 ile %88.6 arasında bulunurken, yanma odası için karşılık gelen değer %80.60 olarak bulunmuştur.

Çoban, Çolpan ve Karakoç (2017) tarafından bir askeri helikopter üzerinde termodinamik kanunların uygulanması adlı çalışmada 1984 yılında üretime başlayan ve çeşitli helikopterlerde kullanılan 1820 şaft beygir gücü (shp) üretebilen Turbomeca/SAFRAN Makila 1A1 turboşaft motorunun analizi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, her istasyondaki bileşenin giriş ve çıkışında sıcaklık, basınç, özgül entalpi ve özgül entropi gibi termodinamik özellikleri bulmak için bir enerji analizi gerçekleştirilmiştir. Sonra Deneysel testlerden alınan veriler dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Bilinmeyen termodinamik özellikleri bulmak için ölçülen veriler kullanılarak HPT, PT ve ED çıkışındaki termodinamik özellikler ile kompresör yanma odası ve türbin (HPT ve PT) modüllerinin izentropik verimlerinin hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplamalar, farklı yük değerlerinin alındığı dört farklı test çalışması için

tekrarlanmıştır ve bunlar sırasıyla 247 Nm, 436 Nm, 547 Nm ve 579 Nm olarak kaydedilmiştir. Türbin giriş sıcaklığı, motor için daha yüksek yük değerlerine çıkılmasına olanak sağlayan kritik bir tasarım parametresidir ancak, malzeme sınırlamaları nedeniyle türbin paleleri belirli bir değerden daha yüksek sıcaklıklara dayanamazlar diğer yandan, yüksek sıcaklık seviyeleri aynı zamanda yüksek $[\text{NO}]_x$ seviyelerine neden olur. Bu çıktılar, motor üreticileri ve araştırmacıların önünde duran kritik bir optimizasyon sorunudur. Burada gerçekleştirilen bileşen tabanlı ekserji analizinin turboshaft motoru üzerindeki sonuçları, yanma odası kısmının çeşitli yüklerdeki ekserji yıkımı bakımından en önde gelen komponent olduğu anlaşılmıştır. Yanma odası, yüksek tersinmezliklerden dolayı ekserji verimliliği düşük değerlere sahiptir. Ayrıca, turboshaft motoru için en yüksek ekserji verimliliği değeri %31 olarak bulunmuştur.

Ballı (2017) tarafından bir turboprop motorunun ileri ekserji analiz adlı çalışmada KT-1, KO 1 ve Plautus Turbo Trainer PC-9 askeri uçaklarında kullanılan PT6-62 turboprop motoru incelenmiştir. Klasik ve ileri ekserji analizinin sunulduğu çalışmada, gerçek durumdaki ekserji yıkım oranları iç kaynaklı, dış kaynaklı, kaçınılabılır ve kaçınılamaz olarak ayrılarak tersinmezlik ve verimsizlikler çeşitli kombinasyonlar kullanılarak detaylı olarak incelenmiştir. Motorun ekserji verimliliği gerçek durum için %16.63, kaçınılamaz durum için %17.13 olarak bulunmuştur. Ayrıca klasik ekserji sonuçlarına göre maksimum ekserji gelişme potansiyeli yanma odasında yüksektir fakat ileri ekserji analizi sonuçları göz önüne alındığında maksimum ekserjetik gelişme potansiyeli kompresör ve güç (power) türbin kısımlarında yüksek çıktığı hesaplanmıştır. Gelişme potansiyelleri çoğunlukla komponentlerin kendileri ile ilgilidir. Çünkü kaçınılamayan iç kaynaklı ekserji yıkım oranları kaçınılamayan dış kaynaklı ekserji yıkım oranlarından daha büyüktür.

Aygün (2022) tarafından kavramsal bir turboshaft motorun çeşitli güç çıktıları altında termodinamik, çevresel ve sürdürülebilirlik hesaplamaları adlı çalışmada Mi-17 ve Ka-50 helikopterlerinde kullanılan TV3-117 turboshaft motoruna benzer bir kavramsal motoru incelenmiştir. Turboshaft motorlar son zamanlarda artan kullanım alanlarından dolayı dikkat çekmeyi başarmıştır. Bu yüzden turboshaft motorların performanslarının termodinamik olarak doğru ve anlaşılır bir şekilde değerlendirilmesi çok önemlidir. Bu çalışma serbest türbinli bir kavramsal turboshaft motorunun on farklı

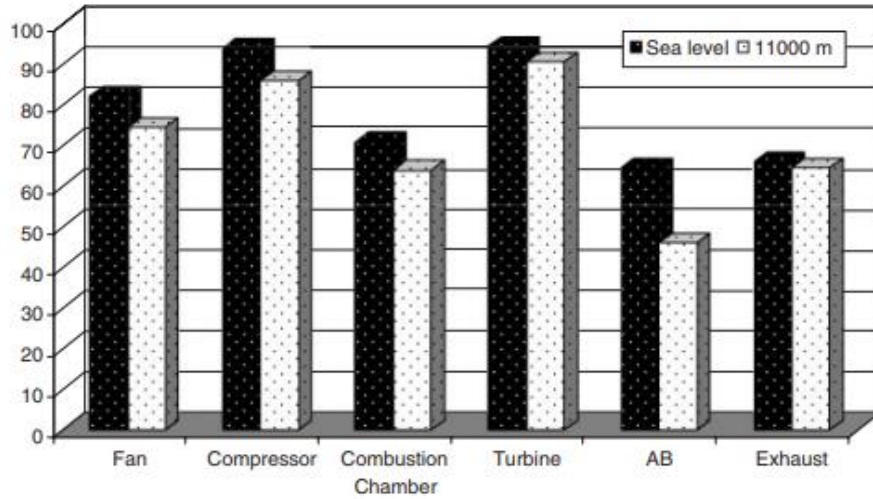
güç aşamasında performans, enerji, ekserjetik ve çevresel parametreler kullanarak incelemiştir. Bu bağlamda farklı operasyon noktalarının termodinamik davranışa etkisi, motorun çevresel etkisi ve sürdürülebilirlik açısından motorun termodinamik davranışlarını değerlendirir. Motorun ekserjetik parametreleri ve RPM değerleri arasında doğrusal olmayan bir ilişkinin olduğu görülmüştür. Artan RPM çevresel etki faktörünün azalmasına yol açarken yanma odasının ekserjetik sürdürülebilirlik indeksini artırır. En yüksek ekserji verimi, güç (power) türbininde tespit edilmiştir. Onun ekserji verimliliği %89.37 ile %93.63 arasında değişirken; En düşük ekserji verimliliği yanma odasına aittir ve %71.34 ile %74.04 arasında değişmektedir. Artan RPM nedeniyle komponentlerin ekserji yıkımı artma eğilimindedir.

Ballı (2023) tarafından helikopterde kullanılan bir turboşaft motorunun ekserjiye dayalı çevresel, sürdürülebilirlik, çevresel etki ve turboşaft motorunun çevresel zarar maliyet oluşumlarının değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışmasında enerji verimliliğini %25.18 bulunmasına rağmen, ekserji verimliliği %23.72 olarak elde edilmiştir. İyileştirilmiş ekserji verimliliği ise %37.35 olarak bulunmuştur. Ekserjetik iyileştirme potansiyeli 2073.24 kW olarak kayıt edilirken, yakıt ve ürünlerin atık ekserji oranı %76.28 ve % 321.61'dir. Komponentler arasında, yanma odasının minimum ekserjetik verimi %58.09 ve maksimum ekserji yıkımı 2380.53 kW olarak hesap edilmiştir. Çevresel hasar maliyet indeksi 36.156 €/GJ hesaplanırken çevresel hasar maliyet oluşumu 175.377 €/h olarak bulunmuştur. Sonra komponent temelli ekserji analizinin sonucu gösterilerek yanma reaksiyonu ve yanan gazlar ve çalışma sıvısı arasında büyük sıcaklık farkları sebebi ile T56 motorunda en önemli ekserji tüketiminin yanma odasında gerçekleştiği bulgusuna ulaşılmıştır.

2.3.Diğer Gaz Türbinli Motorların Literatür Taraması

Turgut, Karakoç ve Hepbaşlı (2007) tarafından F15 ve F16 askeri uçakları için geliştirilen F100-PW-100 model düşük by-passlı turbofan motorunun ekserjetik incelemesi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada yakıt olarak JET A1 kerosen kullanılmıştır. Ekserji analizi, sadece deniz seviyesinde değil, aynı zamanda 11.000 metre yükseklikteki çalışma koşulları için de yapılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, afterburner (AB) bulunan bir turbofan motorunda başlıca tersinmezlik kaynakları afterburner, egzoz ve yanma odası olarak belirlenmiştir. Ekserji çıktısı/ekserji girdisi ve ekserjetik ürün/ekserjetik yakıt olmak üzere iki farklı ekserji verim hesabı yapılmıştır.

Kullanılan bu tanımlamaya göre, ekserji verimlilik değerleri birbirinden farklılık göstermektedir. Ürün/yakıt temelli ekserji verimliliği deniz seviyesinde fan için %80.6, kompresör için %70.4, yanma odası için %66.7 ve türbin için %88.5 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, en yüksek ekserji yıkımı deniz seviyesinde AB kısmında 95.46 MW, egzoz kısmında 58.93 MW ve yanma odasında 34.09 MW olarak hesaplanmıştır. Deniz seviyesinde elde edilen ekserji verimlilik değerlerinin, 11.000 metre yükseklikteki hesaplanan değerlerden daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, ekserji tanımının kendisinden kaynaklanmaktadır. Yüksek irtifalarda çevre sıcaklığının çok düşük olması, benzer kayıp değerlerinin çok daha yüksek ekserji kayıplarına yol açmasına neden olmaktadır.



Şekil 2.1. Motor komponentlerinin ekserji verimlerinin yükseklik ile değişimi
Turgut, Karakoç ve Hepbaşlı (2007)

Turgut (2007) tarafından yapılan "Uçaklarda Kullanılan Gaz Türbinli Motorların Ekserji Ekonomik Analizi" başlıklı çalışmada, 1970'lerde üretimine başlanan ve Airbus A300/310/330 ile Boeing B767/747 gibi geniş gövdeli uçaklarda kullanılan CF6 turbofan motoru analiz edilmiştir. Bu motor, özellikle geniş gövdeli uçaklar için tasarlanmış olup, yaklaşık 4.5 düzeyinde yüksek bir by-pass oranına sahiptir. Çalışmada, alçak basınç kompresörü (LPC) ve egzoz lülesinin ekserji verimleri %99 gibi yüksek bir değerde bulunurken, yanma odasında ekserji verimi %76.42 olarak hesaplanmıştır. Bu sistemde, en büyük tersinmezlik kaynakları sırasıyla fan egzozu (47.31 MW), core motor egzozu (35.91 MW) ve yanma odası (31.54 MW) olarak belirlenmiştir. Ayrıca, fan ve core motor egzozu sırasıyla en yüksek ekserjetik

iyileştirme potansiyeline sahip olup, bunlar 41.19 MW ve 31.35 MW olarak hesaplanmıştır. Ekserji verimleri ise fan, LP ve HP kompresörleri ile HP ve LP türbinler için sırasıyla %94.11, %83.41, %95.17, %96.69 ve %96.91 olarak bulunmuştur.

Ballı, Aras ve Hepbaşlı (2008) tarafından bir jet motorunun ekserjetik ve ekserjoekonomik analizinin gerçekleştirildiği bu çalışmada, T37 uçaklarında kullanılan J69-T-25A serisi turbojet tipi motor incelenmiştir ve komponentlerin giriş ve çıkışlarındaki ekserji değerleri hesaplanmıştır. Ekserji verimleri kompresör, yanma odası, gaz türbini ve egzoz duct mekanik şaft ve tüm motor için sırasıyla %81.33, %55.13, %96.05, %88.41, %97.00 ve %34.84 olarak hesaplanmıştır. Komponentler arasında en çok ekserji yıkımı 3691.06 kW ile yanma odasında meydana gelmiştir. Uçak jet motorunun, itme kuvvetini egzoz kısmının sonundan ayrılan yanma gazları ile üretir. Bu nedenle ürünün ekserji maliyeti ile birim ekserji maliyeti, egzoz gazlarının ekserji maliyetini ve birim ekserji maliyetiyetlerini hesaplamak için bulunur. Egzoz gazlarının ekserji maliyeti ve birim ekserji maliyeti sırasıyla 618.643 ABD doları/saat ve 70.956 ABD doları/GW olarak elde edilmiştir.

Aydın vd., (2015) tarafından bir turbofan motorunun ekserjetik analizinin yapıldığı bu çalışmayı daha önce yapılan çalışmalardan ayıran yönleri; dünyanın en yaygın motoru olan CFM56-7B seçilmiş olmasıdır. Bu motor hakkında daha önce çalışma yapılmamıştır. Böylece bu motor üzerinde ekserji ve sürdürülebilirlik analizi yeni bir çalışma olarak sunulmuştur. Ayrıca uçak motoru için ekserji temelli sürdürülebilirlik indikatörleri üzerine de bir ilktir. Thrust aralığı 86.7-121 kN olan yüksek bypasslı uçak motoru ailesine mensup olan turbofan motorun 6 tane ekserji temelli sürdürülebilirlik parametresi teorik olarak hesaplanmıştır. Bu parametreler; ekserji verimi, atık ekserji oranı, ekserji yıkım faktörü, çevresel etki faktörü, ekserjetik sürdürülebilirlik indeksidir. Bu sistemde en tersinmez birim yanma odası olarak bulunmuştur. Yanma odası HPC ve fan, ekserji yıkım oranları sırasıyla %58, %17.7 ve %10.4 hesaplanmıştır. Sonuç olarak yanma odası 2 MW ile en yüksek ekserjik gelişme potansiyeline sahiptir.

Ekici, Şöhret ve Karakoç (2017) tarafından turbojet motorlar için performans değerlendirme parametreleri ele alınmıştır. Son yıllarda havacılık sanayi ve havayolu ulaşımı her geçen gün hızla büyüme göstermekte ve ilerlemektedir. Bu durum hem hava araçlarındaki enerji tüketiminin hem de çevresel etkilerinin artışına yol açmaktadır.

Dolayısıyla, başta uçaklar olmak üzere pek çok hava aracında kullanılan turbojet motorların performansları irdelenmesi gereken bir konudur. Turbojet motorunun özgül yakıt tüketimi $3.916 \cdot 10^{-5} kg/Ns$ olarak bulunmuştur. Diğer yandan motora ait diğer performans parametreleri olan itki verimi, ısı verimi toplam verimi ve ekserji verimi sırasıyla %57, %45 ve %25 olarak hesaplanmıştır. Yaygın olarak uçaklarda kullanılan gaz türbin motorlarının performans değerlendirmesi işletim süreçlerinde büyük önem arz etmektedir. Motorlardan alınan verilerin işlenmesi sonucunda elde edilecek performans parametreleri motorun bakım ve revizyon gereksinimi hakkında fikir vermektedir.

Şöhret ve Karakoç (2017) tarafından gaz türbinli uçak motorunun termodinamik incelemesi adlı çalışmada, uçak motorlarında kullanılmakta olan bir gaz türbinli motorun termodinamik bağıntılar yardımıyla modellenmesi ve irdelenmesinde kullanılacak yöntemler açıklamıştır. Gaz türbinli motor, bileşenlere ayrılmış ve her bir bileşen termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarıyla değerlendirilmiştir. Bu çalışmada ortaya konulan yöntem; ileride yapılabilecek turbojet, turboprop ve turbofan tipi gaz türbinli uçak motorlarının termodinamik analiz çalışmalarına temel oluşturacak ve ulusal literatürü ileri taşıyacak niteliktedir. Yöntemin daha iyi anlaşılması için, basit bir gaz türbinli uçak motorunun termodinamik analizi yapılarak; kompresör, yanma odası ve türbinin ekserji verimleri sırasıyla %89.72, %70.85 ve %93.01 olarak bulunmuştur.

Ballı vd., (2021) tarafından hidrojen ve kerosen kullanan bir turbofan motorunun karşılaştırmalı termodinamik incelemesinin gerçekleştirildiği bu çalışma sivil/askeri hava araçlarında yaygın olarak kullanılan özellikle B-52 bombardıman uçağı ve E-3 NATO AWACS uçaklarına güç sağlayan Pratt & Whitney firması tarafından piyasaya sürülen TF33 turbofan gaz türbinli motorunun, termodinamik analiz metodolojisi kullanılarak performans, çevresel ve sürdürülebilirlik değerlendirmelerini içerir. Bu motor 72 milyon uçuş saatinden daha fazla uçuş saatine sahiptir ve hala dünya çapında binlerce uçakla hizmet etmeye devam etmektedir. TF33 motoru 8 ana kısma bölünmüştür bu kısımlar; S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7 ve S8 olarak belirlenmiştir ve sırasıyla fan, alçak basınç kompresörü (LPC), yüksek basınç kompresörü (HPC), yanma odası (CC), yüksek basınç türbini (HPT), alçak basınç türbini (LPT), egzoz duct nozul (EDN) ve fan duct nozul (FDN)'dur. Gaz türbin motorunun termodinamik analizi deniz seviyesi koşulları için ve kalkış pozisyonu için gerçekleştirilmiştir. Gaz türbininde

kullanılan iki tip yakıt olan kerosen ve hidrojen birbiri ile karıştırılmamıştır. Motor operasyonları sırasında en yüksek sıcaklık deniz seviyesinde kalkış modunda yanma odasının çıkışında meydana gelmektedir. Bu yüksek sıcaklıklar türbin giriş kısmında kerosen için 1144.00 K ve hidrojen için 1098.42 K olarak hesaplanmıştır. Bir yakıt olarak motorda hidrojeni kullanmak yanma ürünlerinde nitrojen miktarının artmasına sebep olmuştur. Her iki yakıt ayrı şekilde termodinamik analiz kullanılarak motorun performans ölçevleri $C_{12}H_{23}$ ve H_2 sırasıyla enerji verimliliği (%37.01, %36.73), özgül yakıt tüketimi SFC (0.015 kg/kNs, 0.006 kg/kNs)özgül trust ST (0.444 kNs/kg, 0.441 kNs/kg), yakıt maliyet oranı FCR (0.66 \$/s, 2.58 \$/s) olarak hesaplanmıştır. Hidrojenin alt ısı değeri kerosenden çok daha yüksektir.

3.TURBOŞAFT MOTOR TERMODİNAMİK VE TERMOEKONOMİK ANALİZİ İÇİN DENKLEMLER VE GAZ TÜRBİNLİ MOTOR

3.1. Termodinamik Analiz Bağıntıları

Termodinamik analiz bir sistemin, motorun, makinenin verimini iyileştirecek hesaplamaları yapmak için kullanılabildiği gibi aynı zamanda bir besin maddesinin, bir kimyasal maddenin veya insan vücut ve organlarının analizlerini yapmak içinde kullanılan oldukça geniş bir alana sahip olan bir yöntemdir. Ayrıca termodinamik analiz herhangi bir süreci daha iyi anlamak, tasarım ve kontrolü kolaylaştırmak, proses gelişimi için gerekli noktaları belirlemek, nihai iyileştirmeyi sağlamak. Belirli komponentlerin, kısımların veya parçaların enerji kullanımının mükemmellik derecesini belirlemek ve verimliliğini hesaplamak için kullanılabilir (Ballı vd., 2021; Aydın vd., 2012; Dinçer ve Rosen, 2005).

Bir sisteme giren toplam enerjinin bir bölümü; sistemdeki sürtünme, yanma reaksiyonu, entropi oluşumu vb. tersinmezliklerden dolayı yok olur ve giren enerjinin niteliği, yani iş yapabilme yeteneğinde azalma olur. Bundan dolayı, birçok kaynakça da termodinamiğin ikinci yasasına kullanılabılır enerji, kullanılabılırlik, yararlı enerji veya ekserji analizi ismi verilmiştir (Çengel ve Boles, 2019).

Termodinamiğin birinci yasası enerji korunumunu savunur. Enerji analizi sistemin geneli hakkında bilgi verir, sistem içerisindeki tersinmezliklerden (entropi üretimi) meydana gelen kayıpları hesaba katmaz. Termodinamiğin ikinci yasası, bir hal değişimi sırasında enerjinin niteliğinin azalması, entropi üretimi ve iş yapabilme olanağını inceler. Tersinir sistemlerin dışında ekserji enerji gibi korunmaz. Ekserjinin bir bölümü sistem içerisindeki tersinmezliklerden dolayı yok olur (ekserji yıkımı), bir bölümü ise sistem sınırlarından çevreye atılır (ekserji kaybı) (Aydın, 2012; Rahman, Ibrahim ve Abdalla, 2011).

Uçaklarda kullanılan gaz türbinli uçak motorlarının performansını değerlendirmek için termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarından faydalanılmaktadır. Yapılan birinci yasa analizleri ile motorun verimi incelenirken, ikinci yasa ile motorun iyileştirme oranı ve ulaşabileceği en üst kapasitesi belirlenir. Ekserji analizi, enerji ve malzemenin kalitesi hakkında açıklayıcı ve anlamlı bilgiler verir. Bu tür analiz, geleneksel enerji analizinin ötesine geçerek enerji ve malzemenin kalitesini değerlendirir. Ekserji analizi, kütle korunumu ve enerji korunumu prensiplerini,

termodinamiğin ikinci yasası ile birlikte enerji sistemlerinin tasarımı ve analizi için kullanan bir yöntemdir (Rosen ve Dinçer, 1999). Enerji, termodinamiğin birinci yasasına göre asla yok edilemez ancak, ekserji (kullanılabilirlik) yok edilebilir ve bu ekserji yok olması (geri döndürülemezlik), sürdürülebilir gelişme elde etmek için uygun bir şekilde en aza indirilebilir (Ekici, Şöhret ve Karakoç, 2017).

3.1.1. Enerji terimleri

Toplam enerji miktarı elektrik, manyetik alan, yüzey gerilimi ve nükleer reaksiyonun bulunmadığı ısı sistemlerinde; kinetik, potansiyel, fiziksel (iç enerji+akış enerjisi) ve kimyasal enerjinin toplamından oluşur (Ballı, 2008; Dinçer ve Rosen, 2005).

$$e = e_{kn} + e_{pt} + e_{ph} + e_{ch} \quad (3.1)$$

e_{kn} , e_{pt} , e_{ph} ve e_{ch} terimleri, sırasıyla birim kütle için kinetik, potansiyel, fiziksel (iç enerji + akış enerjisi) ve kimyasal enerjiyi simgelemektedir.

- Maddenin hızı nedeniyle sahip olduğu enerji kinetik enerji olarak tanımlanır.

$$e_{kn} = \frac{V^2}{2} \quad (3.2)$$

- Maddenin yüksekliğinden ve yerçekiminden dolayı sahip olduğu enerji potansiyel enerji olarak tanımlanır.

$$e_{pt} = gz \quad (3.3)$$

- İç enerji ile sistem sınırından yapılan işten dolayı sahip olunan, diğer bir ifade ile akımın entalpisinden kaynaklanan enerjiye fiziksel enerji denir.

$$e_{ph} = u + Pv = c_{P(T)}T = h_{(T)} \quad (3.4)$$

Değişken özgül ısılar ile entalpi iç enerji;

$$h_{(T_2)} - h_{(T_1)} = \int_{T_1}^{T_2} c_P(T) dT \quad (3.5)$$

$$u_{(T_2)} - u_{(T_1)} = \int_{T_1}^{T_2} c_v(T) dT \quad (3.6)$$

Sabit özgül ısılar ile entalpi ve iç enerji;

$$h_{(T_2)} - h_{(T_1)} = c_p(T_2 - T_1) \quad (3.7)$$

$$u_{(T_2)} - u_{(T_1)} = c_v(T_2 - T_1) \quad (3.8)$$

Tablo 3.1. Sıcaklığın fonksiyonuyla bazı maddelerin sabit basınçtaki özgül ısıları
($\bar{c}_p = a + bT + cT^2 + dT^3$) (Çengel ve Boles, 2019)

Madde	Formülü	a	$b (10^{-2})$	$c (10^{-5})$	$d (10^{-9})$
Hava		28.11	0.1967	0.4802	-1.966
Hidrojen	H ₂ (g)	29.11	-0.1916	0.4003	-0.8704
Nitrojen	N ₂ (g)	28.90	-0.1571	0.8081	-2.873
Oksijen	O ₂ (g)	25.48	1.520	-0.7155	1.312
K.oksit	CO ₂ (g)	22.2	5.981	-3.501	7.469
Su	H ₂ O(g)	32.24	0.1923	1.055	-3.595
Metan	CH ₄ (g)	19.89	5.024	1.269	-11.01

Kimyasal enerji;

Yakıtlar için, yakıtın alt ve üst ısı değeri (H_a, H_u) ile fiziksel enerjisinin toplamına eşittir.

$$e_{ch} = H_a - h_{(T)} = H_a + c_{p,F,i}T_i - c_{p,F,o}T_o \quad (3.9)$$

$$e_{ch} = H_u - h_{(T)} = H_u + c_{p,F,i}T_i - c_{p,F,o}T_o \quad (3.10)$$

Yanmış gazlar için; gazın oluşum entalpisi ile fiziksel enerjisinin toplamına eşittir ve şu şekilde gösterilir (Moran, 1999).

$$e_{ch} = h_F^o + h_{(T,P)} - h_{(T_o,P_o)} = h_F^o + \Delta h \quad (3.11)$$

$$\bar{e}_{ch} = \bar{h}_F^o + \bar{h}_{(T,P)} - \bar{h}_{(T_o,P_o)} = \bar{h}_F^o + \Delta \bar{h} \quad (3.12)$$

Enerji verimi;

$$\eta_e = \frac{\dot{E}_c}{\dot{E}_g} \quad (3.13)$$

Formülü ile hesaplanır.

3.1.2. Ekserji terimleri

Manyetik alanın, elektriksel etkilerin, yüzey geriliminin ve nükleer reaksiyonların bulunmadığı ya da ihmal edilebilecek düzeyde olduğu termal sistemlerde toplam ekserji; kinetik enerji, potansiyel enerji, fiziksel ekserji (iç ekserji ve akış ekserjisinin toplamı) ile kimyasal ekserjinin toplamından oluşur. (Dinçer ve Rosen, 2005).

$$\varepsilon = \varepsilon_{kn} + \varepsilon_{pt} + \varepsilon_{ph} + \varepsilon_{ch} \quad (3.14)$$

Yukarıdaki denklemdeki ε_{kn} , ε_{pt} , ε_{ph} ve ε_{ch} terimleri, sırasıyla birim kütle için kinetik, potansiyel, fiziksel ve kimyasal ekserjiyi göstermektedir.

Birim kütle için kinetik enerji, mekanik enerjinin bir türüdür ve tamamı işe dönüştürülebilir. Bu nedenle bir sistemin kinetik enerjisinin iş potansiyeli (ekserjisi), basınç, sıcaklık veya çevre koşullarından bağımsız olarak kinetik enerjisine eşittir. Ancak hesaplamalarda kinetik ve potansiyel ekserji bileşenleri genellikle ihmal edilir. Bunun sebebi, birinci yasa analizinde olduğu gibi sürekli akışlı sistemlerde (örneğin kompresörler ve türbinler) kinetik ve potansiyel ekserjilerin, entalpi ile karşılaştırıldığında oldukça düşük değerlere sahip olmasıdır. (Turgut, Karakoç ve Hepbaşlı, 2007).

Kinetik ekserji;

$$\varepsilon_{kn} = \frac{V^2}{2} \quad (3.15)$$

Aynı şekilde, potansiyel enerji de mekanik enerjinin bir formudur ve tamamen işe dönüştürülebilir. Bu nedenle bir sistemin potansiyel enerjisinin iş potansiyeli (ekserjisi), basınç, sıcaklık veya çevre koşullarından bağımsız olarak potansiyel enerjisine eşittir (Ballı, 2008).

Potansiyel ekserji;

$$\varepsilon_{pt} = g \cdot z \quad (3.16)$$

Fiziksel ekserji, bir maddenin belirli bir andaki durumu ile çevresi arasındaki ekserji farkının sıcaklık ve basınç temelinde değerlendirilmesidir. h ve s terimleri, birim kütle için fiziksel ekserjiyi tanımlarken sırasıyla entalpi ve entropiyi ifade eder (Turgut, 2007; Bejan, Tsatsaronis ve Moran, 1996).

Fiziksel ekserji;

$$\varepsilon_{ph} = [(h - h_o) - T_o(s - s_o)] \quad (3.17)$$

Değişken özgül ısılar yardımıyla;

$$s_{(T,P)} - s_{(T_o,P_o)} = \int_{T_o}^T \frac{c_p(T)}{T} dT - R \ln \frac{P}{P_o} \quad (3.18)$$

$$s_{(T,P)} - s_{(T_o,P_o)} = \int_{T_o}^T \frac{c_v(T)}{T} dT + R \ln \ln \frac{v}{v_o} \quad (3.19)$$

Sabit özgül ısılar yardımıyla;

$$s - s_o = c_p \ln \frac{T}{T_o} - R \ln \ln \frac{P}{P_o} \quad (3.20)$$

$$s - s_o = c_v \ln \frac{T}{T_o} + R \ln \frac{v}{v_o} \quad (3.21)$$

Bağıntılarıyla bulunabilir (Çengel ve Boles, 2019).

Hava ve yanmış gazlar sabit basınçta özgül ısıları varsa ve ideal prensiplere uyuyorsa, birim kütle başına fiziksel ekserji;

$$\varepsilon_{ph} = c_{p(T)} \left[T - T_o - T_o \ln \left(\frac{T}{T_o} \right) \right] + R T_o \ln \left(\frac{P}{P_o} \right) \quad (3.22)$$

Eşitliğinden hesaplanabilir (Ebadi ve Gorji-Bandpy, 2005).

Bu denklemdeki c_p , R , T ve P sırasıyla sabit basınçta özgül ısı, ideal gaz sabiti, sıcaklık ve basınçtır.

Kimyasal ekserji, bir sistemin kontrol hacmi içinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonucunda giriş ve çıkış gazlarının mol oranlarının farklı olması durumunda ortaya çıkar. Bu durum, çevre ile sistem arasında kimyasal farklılıklara yol

açar. Bir gazın, sistemin sıcaklık ve basıncındaki kimyasal yapısı ile aynı gazın çevrenin sıcaklık ve basıncındaki kimyasal yapısı arasındaki fark, kimyasal ekserji olarak tanımlanır (Aydın, 2012).

İdeal gaz karışımlarında, kimyasal ekserji birim mol başına kimyasal ekserji;

$$\bar{\epsilon}_{ch} = -\bar{R}T_o \sum x_k \ln \frac{x_{o,k}}{x_k} \quad (3.23)$$

Veya;

$$\bar{\epsilon}_{ch} = \sum x_k \bar{\epsilon}_{ch,k} + \bar{R}T_o \sum x_k \ln x_k \quad (3.24)$$

Bağıntılarından hesaplanır (Bejan, Tsatsaronis ve Moran, 1996). Bu denklemlerdeki $\bar{R}$ evrensel gaz sabiti (kJ/kmol/K), x_k , toplam gaz içerisindeki k'nıncı gazın mol oranını, $\bar{\epsilon}_{ch,k}$ k'nıncı gazın mol cinsinden standart kimyasal ekserjisini ifade eder. Literatürde standart kimyasal ekserjiler ile ilgili mevcut iki tane yaklaşım vardır (Moran ve Shapiro, 2000).

Bunlardan birincisi Ahrendts (1980) tarafından ortaya atılan bu modele göre çevre basıncı 1.019 atm olarak kabul edilmiştir. İkinci model ise Szargut, Morris ve Steward (1988) tarafından geliştirilmiş olup çevre basıncı 1 atm olarak alınmıştır. Birçok farklı maddenin her iki modele göre standart kimyasal ekserjileri farklı termodinamik kitaplarında bulunmakla birlikte, hesaplamalarda sıklıkla kullanılan bazı maddelerin standart ekserji değerleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Standart molar kimyasal ekserji değerleri
 $\bar{\epsilon}_{ch}$ (kJ / kmol) (Russel ve Adebıy, 1993; Moran, 1999)

Madde	Formülü	Model I (Ahrendts 1980)	Model II (Szargut, Morrris ve Steward 1988)
Hidrojen	$H_2(g)$	235250	236100
Nitrojen	$N_2(g)$	640	720
Oksijen	$O_2(g)$	3950	3970
Karbondiyoksit	$CO_2(g)$	14175	19870
Su	$H_2O(g)$	8635	9500
	$H_2O(s)$	45	900
Metan	$CH_4(g)$	824350	831650
Etan	$C_2H_6O(g)$	1482035	1495840

Yakıtların kimyasal ekserjilerinin hesaplanması, reaktif olmayan maddelerin kimyasal ekserjilerinin hesaplanmasından biraz farklıdır. Giren ve çıkan maddelerin ekserjileri;

$$\bar{\epsilon}_{ch,g} = \bar{g}_{g,o} - \bar{g}_o \quad (3.25)$$

$$\bar{\epsilon}_{ch} = \bar{g}_{c,o} - \bar{g}_o \quad (3.26)$$

Kimyasal reaksiyon sonucunda elde edebilecek maksimum iş kJ/kmol cinsinden;

$$\bar{w}_{max} = \bar{g}_{g,o} - \bar{g}_{c,o} \quad (3.27)$$

$$\bar{w}_{max} = \bar{\epsilon}_{ch,g} - \bar{\epsilon}_{ch,c} \quad (3.28)$$

$$\bar{w}_{max} = (\bar{h}_{g,o} - \bar{h}_{c,o}) - T_o(\bar{s}_{g,o} - \bar{s}_{c,o}) \quad (3.29)$$

Tablo 3.3. Bazı mükemmel gazların kimyasal ekserji değerleri
(Russel ve Adebıy, 1993)

Maddeler	$\bar{\epsilon}_{ch} \left(\frac{kJ}{kmol} \right)$
Karbondioksit	$2478.907 \ln x_{CO_2} + 20108$
Karbonmonoksit	$2478.907 \ln x_{CO} + 275224$
Etan	$2478.907 \ln x_{C_2H_6} + 1484952$
Hidrojen	$2478.907 \ln x_{CO_2} + 235153$
Metan	$2478.907 \ln x_{CH_4} + 830212$
Nitrojen	$2478.907 \ln x_{N_2} + 693$
Oksijen	$2478.907 \ln x_{O_2} + 3948$
Su buharı	$2478.907 \ln x_{H_2O} + 8595$

$C_a H_b$ Şeklindeki kimyasal formüle sahip hidrokarbon yakıtların kimyasal ekserjisi aşağıda verilen bağıntıdan daha doğru olarak hesaplanabilir (Moran ve Shapiro, 2000).

$$\bar{\epsilon}_{ch,f} = \left[\bar{h}_F + \left(a + \frac{b}{4} \right) \bar{h}_{O_2} - a \bar{h}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{h}_{H_2O(g)} \right] (T_o, P_o) - T_o \left[\bar{s}_F + \left(a + \frac{b}{4} \right) \bar{s}_{O_2} - a \bar{s}_{CO_2} + \frac{b}{2} \bar{s}_{H_2O(g)} \right] (T_o, P_o) + \bar{R} T_o \ln \left[\frac{(x_{o,O_2})^{a+\frac{b}{4}}}{(x_{o,CO_2})^a + (x_{o,H_2O(g)})^{\frac{b}{2}}} \right] \quad (3.30)$$

Tablo 3.4. Hidrokarbon bazlı yakıtların kimyasal ekserji formülleri
(Ballı, 2008; Moran, 1982); ($C_c H_H O_O S_S N_N$)

Madde	Mükemmel gazların kimyasal ekserji değerleri $\bar{\mathcal{E}}_{ch} \left(\frac{kJ}{kmol} \right)$
Katı	$\frac{O}{C} \leq 0.5$ için,
	$\frac{\mathcal{E}_{ch,F}}{LHV} = \gamma_F \cong 1.0438 + 0.0158 \frac{H}{C} + 0.0813 \frac{O}{C} + 0.0471 \frac{N}{C}$ (3.31)
	$\frac{O}{C} \geq 0.5$ için,
	$\frac{\mathcal{E}_{ch,F}}{LHV} = \gamma_F \cong 1.0438 + 0.0158 \frac{H}{C} - 0.3343 \frac{O}{C} \left(1 + 0.0609 \frac{H}{C} \right) + 0.0447 \frac{N}{C}$ (3.32)
Sıvı	$\frac{\mathcal{E}_{ch,F}}{LHV} = \gamma_F \cong 1.0374 + 0.0159 \frac{H}{C} + 0.0567 \frac{O}{C} + 0.05985 \frac{S}{C} \left(1 - 0.1737 \frac{H}{C} \right)$ (3.33)
	$\frac{\mathcal{E}_{ch,F}}{LHV} = \gamma_F \cong 1.04224 + 0.011925 \frac{H}{C} - 0.042 \frac{1}{C}$ (3.34)
	$\frac{\mathcal{E}_{ch,F}}{LHV} = \gamma_F \cong 1.0401 + 0.01728 \frac{H}{C} + 0.0432 \frac{O}{C} + 0.2196 \frac{S}{C} \left(1 - 2.0628 \frac{H}{C} \right)$ (3.35)
	$\frac{\mathcal{E}_{ch,F}}{LHV} = \gamma_F \cong 1.0334 + 0.0183 \frac{H}{C} + 0.0694 \frac{1}{C}$ (3.36)
Gaz	$\frac{\mathcal{E}_{ch,F}}{LHV} = \gamma_F \cong 1.033 + 0.0169 \frac{H}{C} - 0.0698 \frac{1}{C}$ (3.37)

3.2. Kontrol Hacimleri için Bağıntılar

Bu çalışmada, sürekli akışlı açık sistemler olarak değerlendirilen gaz türbin sistemleri incelenecektir. Termodinamik analiz kapsamında ele alınan sürekli akışlı açık sistemler (SASA), akım kontrol hacminde kesintisiz bir akışa sahiptir. Kontrol hacminin herhangi bir noktasında akış özellikleri zamana bağlı olarak değişiklik göstermez.

3.2.1. Bir kontrol hacmi için kütle denge denklemi

Kontrol hacmindeki kütle birikiminin zamanla değişimi, kontrol hacmine giren ve kontrol hacminden çıkan kütle akımları arasındaki farka eşittir ve;

$$\frac{dm_{cv}}{dt} = \sum_g \dot{m} - \sum_{\varsigma} \dot{m} \quad (3.38)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Diğer yandan birçok mühendislik sistemi sürekli akımlı sistemler olarak kabul edilmektedir (Çengel ve Boles 2008; Moran ve Shapiro 2000).

Sürekli akımlı sürekli açık sistemlerde (SASA) kütle birikimi olmayacağından $dm/dt=0$ olur. Denklem (3.38)'de verilen kütle denge denklemi SASA sistemler için;

$$\sum_g \dot{m} = \sum_{\varsigma} \dot{m} \quad (3.39)$$

şeklinde yazılabilir. Deniz seviyesinde veya belirli bir irtifada çalışan gaz türbinli motorlarda, kütleli debinin zamanla sabit kaldığı ve hesaplama kolaylığı açısından girişteki kütleli debinin çıkıştaki kütleli debiye eşit olduğu varsayılır.

Ancak, kompresör boyunca akan havanın bir kısmı farklı amaçlar için sistemden çekilebilir. Bu hava; havalandırma ve basınçlandırma, yanma odası ve türbin bölgelerinin soğutulması, özellikle yüksek basınç türbini olmak üzere türbin ve kompresör pal uç açıklıklarının kontrolü ile yataklardaki sızdırmazlığın sağlanması gibi görevlerde kullanılır. Dolayısıyla, motorun girişindeki hava miktarı her zaman egzozdan çıkan hava miktarına eşit olmayabilir (Aydın, 2012).

3.2.2. Bir kontrol hacmi için enerji denge denklemi

Kontrol hacmindeki enerji birikiminin zamanla değişimi, kontrol hacmine enerji transferiyle giren ve kontrol hacminden enerji transferiyle çıkan enerji akımları arasındaki farka eşittir. Kontrol hacmine enerji iş veya ısı transferiyle girebilir veya çıkabilir. Bu durumda en genel enerji denge denklemi (Ballı 2008; Moran, 1999)

$$\frac{dE_T}{dt} = \dot{Q}_{KH} - \dot{W}_{KH} + \sum_g \dot{m}_g \left(u_g + \frac{V_g^2}{2} + gz_g \right) - \sum_{\varsigma} \dot{m}_{\varsigma} \left(u_{\varsigma} + \frac{V_{\varsigma}^2}{2} + gz_{\varsigma} \right) \quad (3.40)$$

Şeklinde yazılır. Bu denklemdeki iş ifadesi, kontrol hacminde yapılan iş ile akım işinin toplamı olduğundan $\dot{W}$;

$$\dot{W} = \dot{W}_{KH} + \dot{m}_{\varsigma}(P_{\varsigma}v_{\varsigma}) - \dot{m}_g(P_gv_g) \quad (3.41)$$

Eşittir. Bu durumda denklem,

$$\frac{dE_T}{dt} = \dot{Q}_{KH} - \dot{W}_{KH} + \sum_g \dot{m}_g \left(h_g + \frac{V_g^2}{2} + gz_g \right) - \sum_{\varsigma} \dot{m}_{\varsigma} \left(h_{\varsigma} + \frac{V_{\varsigma}^2}{2} + gz_{\varsigma} \right) \quad (3.42)$$

Şeklinde tekrar yazılabilir.

Sürekli akımlı sürekli açık sistemlerde (SASA) enerji birikimi olmayacağından $\frac{dE_T}{dt} = 0$ olur. Denklem (3.42)'de verilen enerji denge denklemi SASA sistemler için;

$$0 = \dot{Q}_{KH} - \dot{W}_{KH} + \sum_g \dot{m}_g \left(h_g + \frac{V_g^2}{2} + gz_g \right) - \sum_{\zeta} \dot{m}_{\zeta} \left(h_{\zeta} + \frac{V_{\zeta}^2}{2} + gz_{\zeta} \right) \quad (3.43)$$

haline gelir (Moran, 1999; Aydın, 2012).

3.2.3. Bir kontrol hacmi için entropi dengesi

Kontrol hacminin birim zamandaki entropi değişimi; kontrol hacmi yüzeylerinden ısı geçişi sonucu birim zamanda geçen entropi, kütleyle birim zamanda kontrol hacmine taşınan net entropi ve kontrol içinde tersinmezlikler sonucu birim zamanda üretilen entropinin toplamına eşittir (Çengel ve Boles, 2019; Moran, 1999)

Buna göre *entropi dengesi*;

$$\frac{dS_{KH}}{dt} = \sum_k \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \sum_g \dot{m}_g s_g - \sum_{\zeta} \dot{m}_{\zeta} s_{\zeta} + \dot{S}_{\text{üretilen},KH} \quad (3.44)$$

Şeklinde yazılabilir. Entropinin korunmadığı gözlemlenmektedir. Gerçek sistemlerde, çıkıştaki entropi her zaman giriştekinden daha büyük olmaktadır. Bu fark, sistem içindeki tersinmezliklerden veya sistem ile çevresi arasındaki ısı transferlerinden kaynaklanır. Sistem sınırları içerisinde ısı transferinin olduğu sürekli akımlı sürekli açık sistemlerde $\frac{dS_{KH}}{dt} = 0$ olduğundan entropi dengesi;

$$\dot{S}_{\text{üretilen},KH} = \sum_{\zeta} \dot{m}_{\zeta} s_{\zeta} - \sum_g \dot{m}_g s_g + \sum_k \frac{\dot{Q}_k}{T_k} \geq 0 \quad (3.45)$$

Olarak yazılabilir.

$$\dot{S}_{\text{üretilen},KH} = \dot{m}(s_{\zeta} - s_g) + \sum_k \frac{\dot{Q}_k}{T_k} \geq 0 \quad (3.46)$$

haline indirgenir.

Akımın birim kütlesi için entropi değişimleri (kJ/kgK);

Katı ve sıkıştırılamaz sıvılar;

$$s_{\zeta} - s_g = c_{ort} \ln \frac{T_{\zeta}}{T_g} \quad (3.47)$$

Mükemmel gazlar için:

3.20 ve 3.21 denklemleriyle sabit özgül ısılar kullanılarak;

Değişken özgül ısılar kullanılarak;

$$s_{\zeta} - s_g = (s_{\zeta}^o - s_g^o) - R \ln \frac{P_{\zeta}}{P_g} \quad (3.48)$$

İzentropik hal değişimi için;

$$s_{\zeta}^o = s_g^o - R \ln \frac{P_{\zeta}}{P_g} \quad (3.49)$$

Bağıntılarından hesaplanabilir (Ballı, 2008; Çengel ve Boles, 2019). Bağıntılardaki s^o fonksiyonu sadece sıcaklığa bağlıdır.

SASA için tersinmezlik ifadesi Gouy Stadda teoremine göre;

$$\dot{I}_{\text{üretilen},KH} = \dot{T}_o \dot{S}_{\text{üretilen},KH} = T_o \left(\sum_{\zeta} \dot{m}_{\zeta} s_{\zeta} - \sum_g \dot{m}_g s_g + \sum_k \frac{\dot{Q}_k}{T_k} \right) \quad (3.50)$$

Denklemlerinden hesaplanabilir.

3.2.4. Bir kontrol hacmi için ekserji denge denklemi

Belirli bir kontrol hacmi için, entropi gibi ekserjinin korunumu da söz konusu değildir. Tersinmez süreçlerde ekserji her zaman azalır. Buna göre, söz konusu kontrol hacmi için genel anlamda ekserji dengesi şu şekilde ifade edilebilir (Moran ve Shipora 2000; Turgut E. T., 2007).

$$\frac{dEx_{KH}}{dt} = \sum_k \left(1 - \frac{T_o}{T_k} \right) \dot{Q}_k - \left(\dot{W}_{KH} - P_o \frac{dV_{KH}}{dt} \right) + \sum_g \dot{m}_g \varepsilon_g - \sum_{\zeta} \dot{m}_{\zeta} \varepsilon_{\zeta} - \dot{Ex}_D \quad (3.51)$$

Bu denklemdeki $\frac{dEx_{KH}}{dt}$ ve $\frac{dV_{KH}}{dt}$ terimleri sırasıyla kontrol hacminin ekserji ve hacim değişimi şeklinde tanımlanır. Ex_D terimi ise kontrol hacmi içerisindeki ekserji

yıkımını (exergy destruction) göstermektedir. Sistemin sürekli akımlı sürekli açık bir sistem olduğu kabul edildiğinde $\frac{dEx_{KH}}{dt}=0$ ve $\frac{dVx_{KH}}{dt}=0$ olacağından;

$$0 = \sum_k \left(1 - \frac{T_o}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \dot{W}_{KH} + \sum_g \dot{m}_g \mathcal{E}_g - \sum_{\zeta} \dot{m}_{\zeta} \mathcal{E}_{\zeta} - \dot{Ex}_D \quad (3.52)$$

şekline dönüşür. Bu denklemdeki ilk terim ısı geçişinden kaynaklanan ekserji girişini veya çıkışını, ikincisi ise kontrol hacminde yapılan işi ifade etmektedir. İş, ısı, kütle ve akım ile transfer edilen ekserjiler bir bütün olarak düşünüldüğünde, bir sistem için birim zamandaki ekserji dengesi şu şekildedir;

$$\dot{Ex}_F = \dot{Ex}_{Pr} + \dot{Ex}_D + \dot{Ex}_{loss} \quad (3.53)$$

Bu denklemdeki $\dot{Ex}_D$, sistem içerisindeki tersinmezliklerden ve entropi üretiminden dolayı meydana gelen ekserji yıkımını; $\dot{Ex}_{loss}$ ise, bir daha kullanılamayacak şekilde sistem sınırlarından veya kontrol hacminden çevreye atılan ekserji kaybını ifade eder. Bir sistemdeki ekserji yıkımı ve ekserji kayıplarının toplamına atık ekserji denir ve $\dot{Ex}_{WE}$ ile gösterilir.

$$\dot{Ex}_{WE} = \dot{Ex}_D + \dot{Ex}_{loss} \quad (3.54)$$

İdeal ve tersinir olmayan tüm hal değişimlerinde sisteme veya kontrol hacmine giren toplam ekserji miktarı, sistemden veya kontrol hacminden çıkan ekserji miktarından her zaman büyüktür.

3.2.5. Referans çevre tanımlaması

Ekserji; bir sistem, bir madde akımı veya enerji akımının referans bir çevreyle dengeye gelinceye kadar üretilebileceği maksimum iş olarak tanımlanabilir. Bu açıdan ekserji değer hesaplanması ve analizinde öncelikle referans çevrenin belirlenmesi gerekmektedir (Ballı, 2008).

Doğal çevre alt sistem modelleri

Referans madde modelleri; Bu modelde referans maddeler doğal çevrede bol miktarda bulunan maddelerden seçilir. Referans madde olarak seçilme kriteri doğal çevreyi taklit edebilen tasarımdan oluşmasıdır. Bu çevre N_2 , O_2 , CO_2 ve H_2O içeren nemli hava kompozisyonu ile sülfür için alçı taşı (gypsum) ve kalsiyum için kireç taşından oluşur. Bu model doğal çevre ile benzer değildir. Sonuç olarak, bu model ile

doğrulanmış mutlak ekserji değerleri doğal çevreyle bağlantılı değildir ve verimliliği veya çevresel etkiyi doğrulamada gerçekçi olarak kullanılamaz. 1 atm basınca ve 298.15 K sıcaklığa sahip atmosferik şartlar için referans çevre modeli Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.5. Referans çevre modeli
(Dinçer ve Çengel, 2001)

Atmosferik şartlar: $T_o = 25\text{ }^{\circ}\text{C} = 298.15\text{ K}$, $P_o = 1\text{ atm}$		
(i) T_o ve P_o' da suyla doyurulmuş hava		
Kompozisyon	Maddeler	Mol oranları
	Nitrojen (N_2)	0.7567
	Oksijen (O_2)	0.2035
	Su (H_2O)	0.0303
	Argon (Ar)	0.0091
	Karbondioksit (CO_2)	0.0003
	Helyum (He)	0.0001
(ii) T_o ve P_o' da aşağıdaki doymuş fazlar		
	Su (H_2O)	
	Kireç taşı ($CaCO_3$)	
	Alçıtaşı (Gypsum) ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)	

3.3. Ekserji Performans Parametreleri

Ekserji analizinin popüler olmasıyla bu analiz sonuçlarının ölçümlendirmesine çok yararlı olacak bazı termodinamik parametreler oluşturulmuştur. Bunlar arasında en önemli iki parametre ekserji verimi ve ekserji yıkımıdır. Aynı sistem elemanı içinde giren ve çıkan ekserjiler arasındaki fark kaybolan ekserjiyi göstermektedir. Bununla birlikte kaybedilen ekserjinin tamamının yeniden kazanımı çoğunlukla mümkün olmamaktadır. Bu yüzden kayıp ekserji, kaçınılabılır ve kaçınılamaz olmak üzere iki grup altında incelenebilir. Sistem içinde tersinmezliğin en fazla olduğu ünite olan yanma odasında meydana gelen ekserji kaybının büyük bir kısmı kaçınılamaz ekserjidir (Çengel ve Boles, 2019).

3.3.1. Ekserji verimi

$$\eta_{ex,k} = \frac{\dot{E}x_{Pr,k}}{\dot{E}x_{F,k}} = \frac{\dot{E}x_{F,k} - \dot{E}x_{D,k}}{\dot{E}x_{F,k}} \quad (3.55)$$

Fan veya kompresör gibi sistem bileşenlerinin ekserji verimi;

$$\eta_{ex,AC} = \frac{\dot{E}x_{Pr,k} - \dot{E}x_{F,k}}{\dot{W}_{AC}} \quad (3.56)$$

Türbin veya genleştirici gibi sistem bileşenlerinin ekserji verimi eşitliğinden hesaplanabilir (Bejan, Tsatsaronis ve Moran, 1996; Ballı ve Aras, 2008).

$$\eta_{ex,türbin} = \frac{\dot{W}_{türbin}}{\dot{E}x_{F,k} - \dot{E}x_{Pr,k}} \quad (3.57)$$

3.3.2. Tersinmezlik oranı

Her bir sistem elemanında meydana gelen tersinmezliğin ya da diğer bir deyişle ekserji yıkımının toplam ekserji yıkımına oranıdır ($ExDR_k$),

$$ExDR_k = \frac{\dot{E}x_{D,k}}{\dot{E}x_{D,tot}} \quad (3.58)$$

Denklemleri ile ifade edilir. Denklemlerde kullanılan $\dot{E}x_{D,k}$ ve $\dot{E}x_{D,tot}$ terimleri k'nıncı elemanın ekserji yıkımı ile sistemin toplam ekserji yıkımını tanımlamaktadır. Tersinmezlik oranı, ekserji kayıplarının hangi elemanlarda hangi derecede olduğunu göstermesi açısından faydalıdır (Turgut, 2007).

3.3.3. Atık ekserji oranı

Atık ekserji oranı, bir sistemin termodinamik performansını ve çevresel etkilerini değerlendiren ekserji bazlı bir parametredir, bir sistemdeki üretilen toplam ekserjiye kıyasla atık olarak çevreye salınan ekserji miktarını ifade eder.

$$WExR_k = \frac{\dot{E}x_{WE,k}}{\dot{E}x_{WE,tot}} \quad (3.59)$$

Düşük bir WExR, daha verimli bir enerji süreci ve çevre üzerinde daha az olumsuz etki anlamına gelmektedir. Atık ekserji sistemden geri kazanılamayan veya faydalı iş yapamayan, çevreye salınan ekserji miktarıdır. WExR sıfır ise sistemde hiç ekserji kaybı yoktur, yani tüm enerji dönüşümü tamamen verimlidir (ideal durumda mümkün değildir). WExR 0 ile 1 arasında ise Sistemde bazı enerji kayıpları vardır, ancak sistem bir miktar faydalı iş üretebilmektedir. Daha düşük bir WExR, sistemin daha verimli olduğunu gösterir. WExR 1'e eşit ise sistemdeki tüm ekserji kaybolmaktadır ve faydalı enerji üretilmemektedir, tamamen verimsiz sistemdir (Akdeniz ve Ballı, 2021).

3.3.4. Ürün kayıp oranı

Her bir elemanda meydana gelen ekserji yıkımlarının toplam ürün ekserjisi içerisindeki oranıdır (Aydın, 2012).

$$PLR = \frac{\dot{E}x_{WE,k}}{\dot{E}x_{Pr,tot}} \quad (3.60)$$

Bu denklemde PLR , $\dot{E}x_{WE,k}$ ve Pr_{tot} ürün kayıp oranını, atık ekserjiyi ve toplam ürün ekserjisini göstermektedir.

3.3.5. Ekserji iyileştirme potansiyeli

Bir prosesin veya ısıl sistemin ekserji verimliliğindeki maksimum iyileştirme, ekserji kayıplarının veya yıkımlarının minimuma indirilmesiyle başarılabilir. Bu durumda her bir sistem bileşeninde meydana gelen ekserji tüketiminin belli bir miktarı yapılan iyileştirmelerle kazanılabilmektedir. Kazanılan bu ekserji tüketim akımı miktarına ekserji iyileştirme potansiyeli akımı denir ve k'nıncı sistem bileşeni için ekserji iyileştirme potansiyeli akımı ($\dot{E}xIP_k$);

$$\dot{E}xIP_k = (1 - \eta_{ex,k})x(\dot{E}x_{F,k} - \dot{E}x_{Pr,k}) \quad (3.61)$$

Denklemlerinden hesaplanabilir. Bu parametre, hangi sistem bileşeni üzerinde yapılacak iyileştirme çalışmasının daha çok verimli olacağını göstermesi açısından faydalıdır (Akdeniz ve Ballı, 2021).

3.3.6. İyileştirilmiş verim

Biri sistemin enerji dönüşümlerinde ne kadar etkili olduğunu belirten ve enerji kayıplarını minimize etmek için yapılan bir ölçüttür (Ballı, 2022).

$$\eta_{ex.imp,k} = \frac{\dot{E}x_{Pr,k}}{(\dot{E}x_{F,k} - \dot{E}xIP_k)} \quad (3.62)$$

3.3.7. Özgül yakıt tüketimi

Gaz türbinli motorların performansını değerlendirmede kullanılan önemli bir parametredir. Specific fuel consumption olarakta bilinir. Bu terim bir motorun ürettiği birim güç veya itki başına ne kadar yakıt tükettiğini ifade eder (Ballı ve Hepbaşlı, 2013).

$$SFC = \frac{\dot{m}_F}{P_{shaft}} \quad (3.63)$$

Burada $\dot{m}_F$ yakıt debisini P_{shaft} ise motordan elde edilen trust ya da güçtür.

3.3.8. Yakıt ekserjisi kayıp oranı

Yakıt ekserji kayıp oranı, enerji sistemlerinde kullanılan yakıtın ekserji kaybını analiz etmek için kullanılan bir parametredir. Bu oran, yakıtın kullanılabilir ekserjisinin ne kadarının kaybolduğunu veya işe yaramaz hale geldiğini ifade eder (Ballı vd., 2021).

$$FExWR = \frac{\dot{E}x_{WE,k}}{\dot{E}x_{F,tot}} \quad (3.64)$$

3.3.9. Çevresel etki faktörü

Çevresel etki faktörü (EEF) sistemin çevre üzerindeki etkilerini değerlendirmek için türetilmiş bir parametredir. Düşük EEF sistem çevre dostudur. Ekserji kayıpları azdır ve kaynaklar etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Yüksek EEF ise sistem çevreye daha fazla zarar vermektedir. Tersinmezlikler, enerji kayıpları ve atık miktarları yüksektir. Sistem tasarımında iyileştirme yapılması gerektiğini işaret eder (Ballı, Ekici ve Karakoç, 2020).

$$EEF = \frac{FExWR_k}{\eta_{ex.k}} \quad (3.65)$$

3.3.10. Ekolojik etki faktörü

Ekolojik etki faktörü, Sistemin çevresel ve ekolojik etkilerini değerlendirmek için kullanılan bir parametredir. Çevre üzerindeki olumsuz etkileri niceliksel olarak ifade eder. Düşük EcoEF sistem, çevreye daha az zarar vermektedir ve kaynakların daha verimli kullanıldığını göstermektedir. Yüksek EcoEF sistem çevresel etkiler açısından büyük enerji kayıpları ve çevreye zarar veren emisyonlar söz konusudur (Ballı, Ekici ve Karakoç, 2020).

$$EcoEF = \frac{\dot{E}x_{F,k}}{\dot{E}x_{Pr,k}} \quad (3.66)$$

3.3.11. Ekolojik objektif fonksiyonu

Bir sistemi veya sürecinin ekserji kayıplarını ve çevresel etkilerini değerlendirerek, çevre üzerindeki etkilerin sayısal olarak ifade eden parametrelerden biridir. Ekolojik objektif fonksiyonunun (EOF) amacı çevresel etkileri minimize

etmektedir. EOF değeri ne kadar düşükse, sistemin çevresel sürdürülebilirliği o kadar yüksek demektir (Ballı, 2022).

$$EOF = \dot{E}x_{Pr,k} - \dot{E}x_{WE,k} \quad (3.67)$$

3.3.12. Ekolojik objektif fonksiyon indeksi

Çevresel etkileri değerlendirmek için bir diğer parametre olan EOFI her komponentin ekolojik objektif faktörünün toplam ürün ekserjine oranıdır (Ballı, 2022).

$$EOFI = \frac{EOF_k}{\dot{E}x_{Pr,k}} \quad (3.68)$$

3.3.13. Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi

Sistemlerinin sürdürülebilirlik performansını termodinamik bir perspektiften değerlendirmek için kullanılan bir göstergedir. Bu indeks, bir sistemin enerji dönüşüm süreçlerindeki ekserji (yararlı enerji) kullanımını ve yok edilen ekserji miktarını dikkate alarak, sistemin hem enerji verimliliğini hem de çevresel etkilerini ölçer. Yüksek ExSI Sistem verimlidir ve ekserji kayıpları azdır. Bu durum, sistemin çevresel etkilerinin düşük ve sürdürülebilirliğinin yüksek olduğunu gösterir. Düşük ExSI: Sistem verimsizdir, ekserji kayıpları yüksektir ve çevresel etkiler artmıştır (Aydın vd., 2015).

$$ExSI = \frac{1}{EEF} \quad (3.69)$$

3.3.14. Sürdürülebilirlik verimlilik faktörü

Sistemlerin termodinamik incelemesinde sürdürülebilirliğini değerlendirmek için kullanılan bir metriktir. Bu nedenle sürekli ve bir defalık harcamaların aynı tür altında sınıflandırılması için farklı düzenlemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Maliyet analizini anlamlı kılmak için bu gereklidir (Ballı, Dalkıran ve Karakoç, 2021).

$$SEF_k = \frac{1}{1 - \eta_{ex,k}} \quad (3.70)$$

3.4. Termoekonomik Analiz Bağlılıları

Termodinamik analiz enerji verimi ve ekserji verimi gibi bir sistemin enerji dönüşüm süreçlerini değerlendirmek için kullanılan önemli bir kavramdır. Termoekonomik analiz ise enerji ve ekonomi disiplinlerini birleştirerek enerji sistemlerinin termodinamik verimliliğinin yanında ekonomik performansında

değerlendiren bir analiz biçimidir. Temel olarak ele alınan sistemin enerji ve ekserji kayıplarını belirleyerek bu kayıpların etkilerinin incelenmesine dayanır.

Bu çalışmada, termoekonomik bir yöntem olarak Rosen ve Dinçer tarafından geliştirilen EXCEM (Exergy Cost Energy Mass) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, incelenen sistemin ekserji, maliyet, enerji ve kütle akışları arasındaki ilişkileri hesaplayarak, termodinamik açıdan değerlendirilen sistemin performansını ekonomik boyutuyla analiz etmeyi amaçlamaktadır. Özellikle ekserji kayıplarının ekonomik etkilerini ve atık ekserji maliyetlerini belirlemek için kullanılmaktadır. Yöntem, dört temel bileşeni esas alarak değerlendirme yapmaktadır (Rosen ve Dinçer, 2002).

3.4.1. Ekserji maliyet enerji kütle akışı yöntemi

Bu oran sistemin verimliliği ile ekonomik sürdürülebilirliği ile ilişkilendirir. Daha düşük değer sistemin hem daha verimli hem de daha ekonomik olduğunu veya yatırımın daha iyi bir şekilde kullanıldığını göstermektedir (Ballı ve Çalışkan, 2022).

$$Rex_k = \frac{(\dot{E}_F - \dot{E}_{Pr})}{PEC_{TSE,tot}} \quad (3.71)$$

Rex_k ilgili komponentteki ekserji maliyet oluşum oranı, $PEC_{TSE,tot}$ TSE'nin maliyetini göstermektedir ve 1100000 US\$ olarak alınmıştır (http-2).

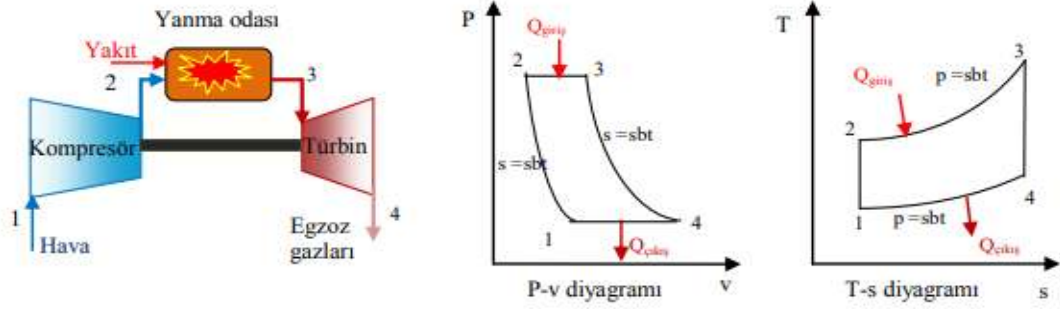
3.5. Gaz Türbinli Motorlar

Motorlar en genel tabiriyle bir enerji formunu (elektrik, kimyasal enerji, benzin, kerosen vb.) mekanik enerjiye dönüştüren makinelerdir. Günümüzde kullanılmakta olan çok farklı motor türleri vardır. Otomobillerden trenlere, trenlerden gemilere, gemilerden uzay mekiklerine varıncaya kadar sayısız kullanım alanı ve çeşidi vardır. Gaz türbinli motorlar ise çeşitli kaynaklarda farklı şekilde gruplansada genel olarak; turbojet, turbofan, turboprop, turboşaft, ramjet vb. şeklinde sınıflandırılabilir. Brayton çevrimine göre çalışan gaz türbinli motorlar başlangıçta pistonlu motorların yer verildiği hava araçlarında yerini almış ve kullanım kolaylığı ve yüksek itki kuvveti sayesinde hızla yaygınlaşmıştır. Şekil 3.3 genel bir gaz türbinli motorun kısımlarını göstermektedir (Karakoç ve Turgut, 2008).

3.5.1. Brayton çevrimi

Çalışma prensibi havanın motorun içerisine emilerek başlayan çevrim, kompresör ile sıkıştırılması ve sonrasında sıkıştırılmış havanın yakıt püskürtülerek yakılması

sonucu ortaya çıkan çok yüksek basınç ve sıcaklıktaki gazların enerjisinin türbinler vasıtasıyla mekanik güce dönüştürülmesi ve en son yanmış gazların dışarı atılarak son bulunduğu bir çevrimden ibarettir. Şekil 3.1 brayton çevrimini göstermektedir (El-Sayed, 2006).



Şekil 3.1. Brayton çevrim
(Aydın, 2012)

$$\frac{T_{2S}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (3.73)$$

$$\eta_{AC} = \frac{\text{Kompresör izentropik işi}}{\text{Kompresör gerçek işi}} \quad (3.74)$$

$$\eta_{AC} = \frac{T_{2S} - T_1}{T_2 - T_1} \quad (3.75)$$

İzentropik sıkıştırma için kompresör çıkışındaki hava sıcaklık ve basınç oranı (3.73) denklemi ile ifade edilir (Çengel ve Boles, 2008).

Burada k , özgül ısı oranını ifade etmektedir ve hava için 1.4 olarak alınmıştır. Daha sonra T_{2S} ideal şartlardaki kompresör çıkış sıcaklığı ile gerçek T_2 değerleri kullanılarak kompresörün izentropik verimi (3.75) ile hesaplanır.

$$\frac{T_3}{T_{4S}} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (3.76)$$

$$\eta_{Türbin} = \frac{\text{Türbin gerçek işi}}{\text{Türbin izentropik işi}} \quad (3.77)$$

$$\eta_{Türbin} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4S}} \quad (3.78)$$

Türbin verimide, kompresör gibi izentropik verimle ölçülür burada T_3, T_{4S}, T_4 değerleri sırası ile türbin giriş sıcaklığı, izentropik türbin çıkış sıcaklığı ve gerçek türbin çıkış sıcaklığını ifade etmektedir.

Pistonlu bir motordan elde edilenden çok daha büyük bir güç, gaz türbinli bir motordan üretilir. Gaz türbinli motor kavramsal olarak basit bir makine olmasına rağmen, motorun core kısmında karşılaşılan aşırı sıcaklıklar ve gerilimler sebebiyle parçaları dikkatli bir şekilde tasarlanmalı ve pahalı malzemelerden üretilmelidir. Bu nedenle, gaz türbinli motor kurulumları genellikle büyük ünitelerle sınırlıdır ve bu sayede uygun maliyetli hale gelirler (Landis, 2023).

Bir jet motorunda türbin, kompresörü ve yardımcı komponentleri çalıştırmaya yetecek çıktıyı sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Gaz akışı daha sonra türbini yerel atmosferik basıncın üzerindeki bir basınç değerinde itme kuvveti oluşturarak egzoz nozul kısmından terk eder. Türbin giriş sıcaklığı (TIT) yükseltilerek verimlilik ve güç çıkışı artırılabilir. Ancak aşırı yüksek sıcaklıklarda malzemeler mukavemetini kaybeder ve türbin bladeleri çok yüksek hızlarda hareket ettiğinden ve ciddi merkezkaç gerilimlerine maruz kaldığından, türbin giriş sıcaklıkları özel blade soğutmasına ihtiyaç duyar (Rahman, Ibrahim ve Abdalla, 2011).

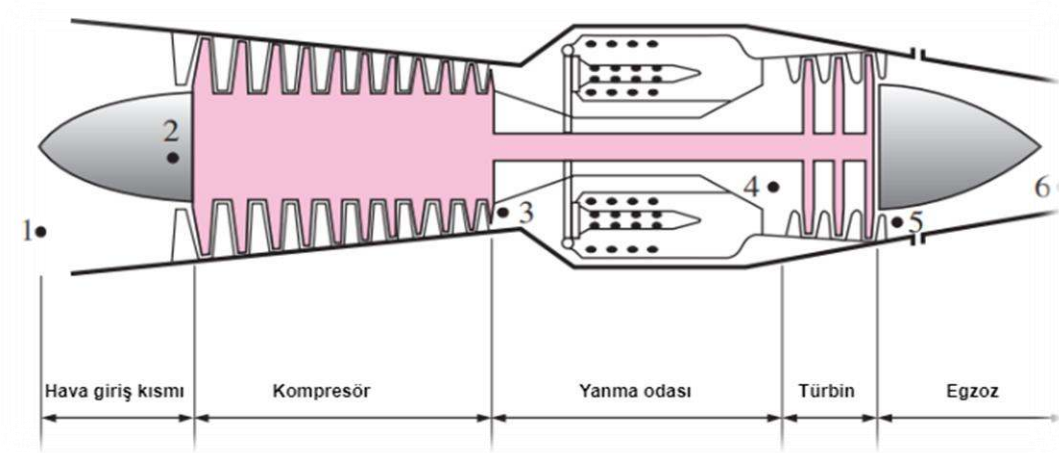


Şekil 3.2. Sol tarafta F35 savaş uçağı ve ona ait bir F135 motorunu, sağ tarafta ise UH60 helikopteri ve ona ait T700 motorunu görmekteyiz. (htpt-2)

F35, F16, F4 gibi uçaklarda kullanılan turbojet ve turbofan benzeri motorlar itme (trust) üretirken; UH60, CN235 gibi helikopter ve pervaneli nakliye uçaklarında kullanılan turboşaft ve turboprop motorlar pervane için şaft beygir gücü üretir. Şekil 3.2 Turbofan motorlu bir savaş uçağını ve turboşaft motorlu bir helikopteri göstermektedir.

Gaz türbinli motor genel olarak şu kısımlardan oluşur:

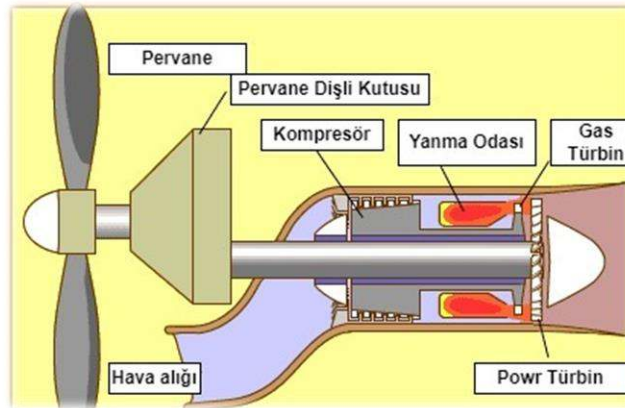
- Hava alığı/Giriş kısmı (Air inlet)
- Kompresör (Compressor)
- Yanma odası (Combustion chamber)
- Türbin (Turbine)
- Egzoz nozul duct (Egzoz nozzle duct)



Şekil 3.3. Genel bir gaz türbinli motorunun kısımları
(Yunus çengel Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik 9.bölüm)

Uçak motorlarını araştırırken turboprop ve turboşaft ile karşılaşılır. Bunlar pervane tabanlı motorların iki yaygın türüdür. Bazı uçaklar, turbojet motorları gibi geleneksel jet motorlarıyla çalıştırılırken bazıları ise turboprop veya turboşaft gibi pervaneli motorlarla çalıştırılır (Karakoç ve Turgut, 2008).

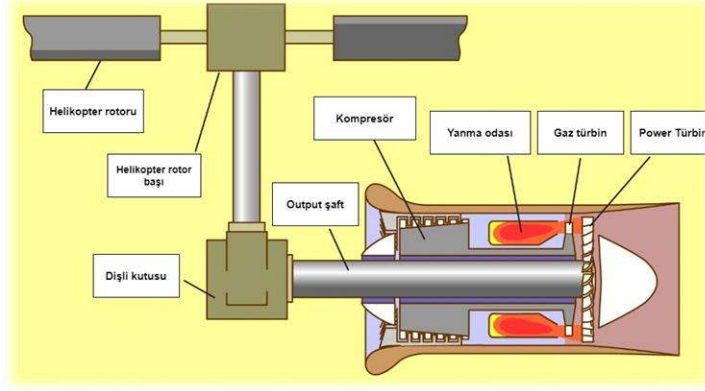
Motor genellikle pervaneye bir dişli kutusu aracılığıyla bağlanır. Sonuç olarak bu tip motorların egzozunda çok az enerji bulunur ve itki ya hiç üretilmez yada çok az üretilir üretilir.



Şekil 3.4. Genel bir turboprop motorunun görüntüsü
(Britannica scine and tech)

Turboprop ve turboşaft motor Şekil 3.4 ve 3.5 de görüldüğü gibi güç üretiminin sağlandığı kısım genel olarak aynıdır fakat itme kuvveti (thrust) yerine şaft beygir gücü ürettikleri için, üretilen mekanik gücün pervaneye ulaştırılması gerekmektedir bu sebeple bir güç aktarım (transmisyon) sistemine ihtiyaç duymaktadırlar. Bu güç aktarım

sisteminin diğerk bir görevi pervaneye mekanik güç iletirken devri düşürüp torku artırmaktır (El-Sayed, 2006).



Şekil 3.5. Genel bir turboşaft motorunun kısımları
(Britannica science and tech)

Bir pervane ve turboprop motor düşük hızlı bir nakliye uçağına güç sağlayabilir. Bunun tersine, bir turbojet veya turbofan, süpersonik uçuş yapabilen bir savaş uçağına güç sağlayabilir. Bir pistonlu motor ve pervane kombinasyonu muhtemelen daha küçük genel havacılık uçaklarına güç sağlayacaktır. Turboşaft motorlar genel olarak helikopterlere güç sağlamak için kullanılır. Hava araçları uçuş sürelerinin çoğunu seyir halindeyken tek bir hızda ve neredeyse sabit motor itiş gücüyle çalışarak geçirirler.

3.5.2. T700-701C Turboşaft motoru

T700 turboşaft motoru General Electric firması tarafından geliştirilmiş ve Bell AH-1 Super Cobra, Bell AH-1Z Viper, Bell UH-1Y Venom, Boeing AH-64 Apache, Sikorsky UH-1 Surion, Sikorsky UH-60 Black Hawk, Sikorsky SH-60 Seahawk gibi döner kanatlı hava araçlarında kullanılmaktadır. Şekil 3.6 T700 motorunun kullanıldığı bir helikopteri göstermektedir.



Şekil 3.6. *Sikorsky S-70B-2 Seahawk*
(Özdemir, 2023)

CT7 turboprop motoru, bu motorun bir türevidir ve İsveç Saab 340 yolcu uçağı, Endonezya-İspanya ortak yapımı CN-235 kargo uçağı ve Çek Let L-610G yolcu uçaklarında kullanılmaktadır. CT7/T700 gaz türbinli motor ailesinin sabit kanatlı ve döner kanatlı hava araçlarında kullanılan birçok varyasyonu mevcuttur. Türk Hava Kuvvetleri envanterinde yer alan Sikorsky S-70 orta sınıf/genel maksat helikopterinde, 1800-2000 SHP güç üreten T700-701C modeli bulunmaktadır.

4. TURBOŞAFT MOTORU EKSERJİ ANALİZİ

4.1. T700-701C Turboşaft Motoru Termodinamik Analizi

Bu bölümde farklı güç seviyelerinde çalıştırılan T700-701C motorunun ekserji analizleri ve ekserji tabanlı sürdürülebilirlik indikatörlerinin hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Motor bremzede, %50 Güç, %75 Güç, %100 Güç ve Maksimum Güç aşamalarında çalıştırılmış ve ölçülen motor parametreleri ekserji denklemlerinde kullanılarak motorun ana elemanları olan kompresör, yanma odası, gaz türbini, güç türbini, gaz generatör mekanik şaftı, power türbin mekanik şaftı ile motorun kendisinin ekserji ve ekserjoekonomik parametreleri hesaplanmıştır. Hesaplanan parametrelerden yola çıkılarak 5. bölümde ekserji tabanlı sürdürülebilirlik indikatörleri hesaplanmıştır. Bu çalışmayla ekserji parametreleri ve ekserji tabanlı sürdürülebilirlik indikatörlerinin farklı çalışma koşullarındaki değişimi net bir şekilde elde edilerek karşılaştırmalar yapılmıştır.

Ekserji analizleri, giriş ve kompresör bölümünde akışkan olarak havanın, yanma odası, gaz türbini, güç türbini ve egzozda yanmış gazlar dikkate alınarak yapılmıştır. Bu analizlerde incelenecek sistem unsurları şunlardır:

- Kompresör (AC)
- Yanma Odası (CC)
- Gaz Generatör Türbini (GGT)
- Gaz Generatör Türbin Mekanik Şaftı (GGMS)
- Güç (Power) Türbini (PT)
- Güç Türbini Mekanik Şaftı (PTMS)
- Egzoz Duct Nozul (EDN)

Ekserji analizi, sistem elemanlarının giriş ve çıkışlarındaki ekserji değerlerini kullanır. Buradan incelenecek ana elemanların giriş ve çıkışlarındaki akış debi, sıcaklık ve basınç değerlerinden bu istasyonlardaki ekserji akışları hesaplanacaktır. Aşağıda bu analizde kullanılan kabuller listelenmiştir.

- Dış ortam sıcaklığı olarak yerel koşullar 300.5 K ve dış basınç 93.29 kPa olarak alınmıştır.
- Motor içindeki akışkan, yanma odasına kadar hava, yanma odasından sonra yanmış gaz olarak kabul edilmiştir.

- İdeal gaz karışımı prensibine dayalı denklemler kullanılmıştır.
- Referans çevre mol oranları % 77.48 N₂, %20.59 O₂, %0.03 CO₂, %1.9 H₂O olarak kabul edilmiştir.
- Yanma odası hariç kimyasal ekserjiler hesaplara dahil edilmemiştir.
- Yanma odasında tam yanmanın olduğu kabul edilmiştir.
- Yakıt olarak JP-8 kullanılmıştır ve kimyasal formülü C₁₂H₂₃ olarak kabul edilmiştir.
- Kinetik enerji ve ekserji, potansiyel enerji ve ekserji değişimleri ihmal edilebilir düzeydedir.
- Sistem, sürekli akışlı sürekli açıktır.
- Tam yanma gerçekleştiği kabul edilmiştir.
- Sistem elemanları adyabatiktir.
- Motora giren havanın hızı statik şartlarda çalışıldığı için sıfır olarak kabul edilmiştir.

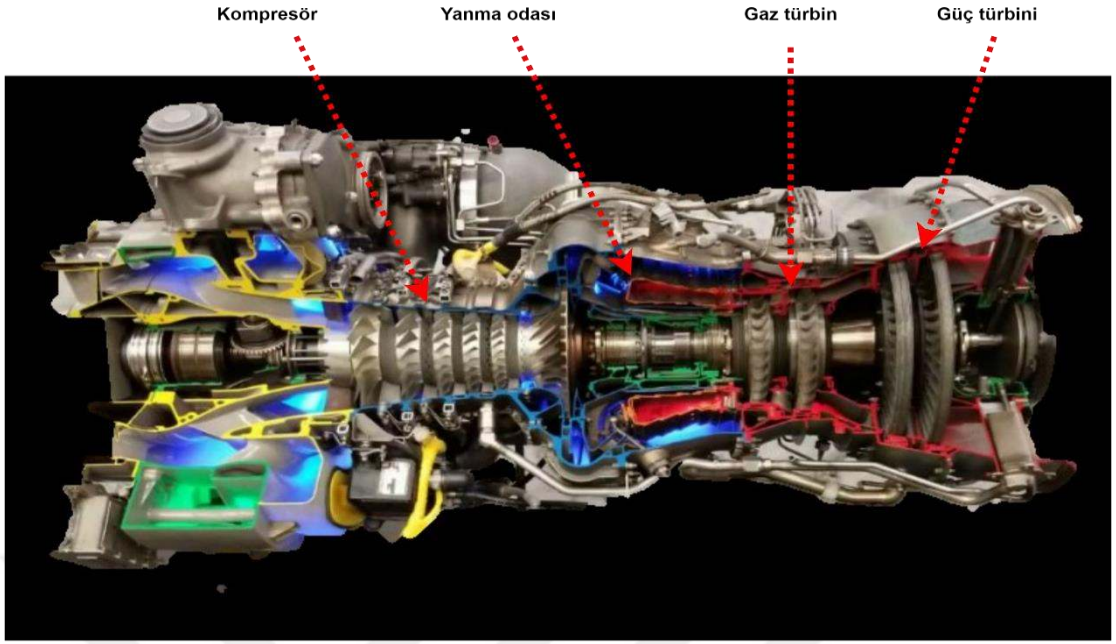
Tablo 4.1. Ekserji analizi ve sürdürülebilirlik parametrelerinin hesaplanma şekli

T700-701C turboşaft motorunun bremzede farklı güçlerde çalıştırılması (% 50 Güç, % 75 Güç, %100 Güç, MaxP) motor parametrelerinin elde edilmesi (P_o, T_o, P_2, T_2 , hava debisi vs).
Ölçülmeyen akış parametrelerinin bremze test yazılımı tarafından hesaplanması.
Kimyasal yanma denklemlerinin her bir test çalıştırması için ayrı ayrı hesaplanması.
Sabit basıttaki yanmış gazların özgül ısı (c_p) değerlerinin emisyon çıktılarının kütle oranlarından kimyasal yanma denklemleri kullanılarak hesaplanması.
T700-701C motorunun ana parçalarının enerji ve ekserji akışları ve ekserjetik parametrelerinin hesaplanması ve sonuçların karşılaştırılması.

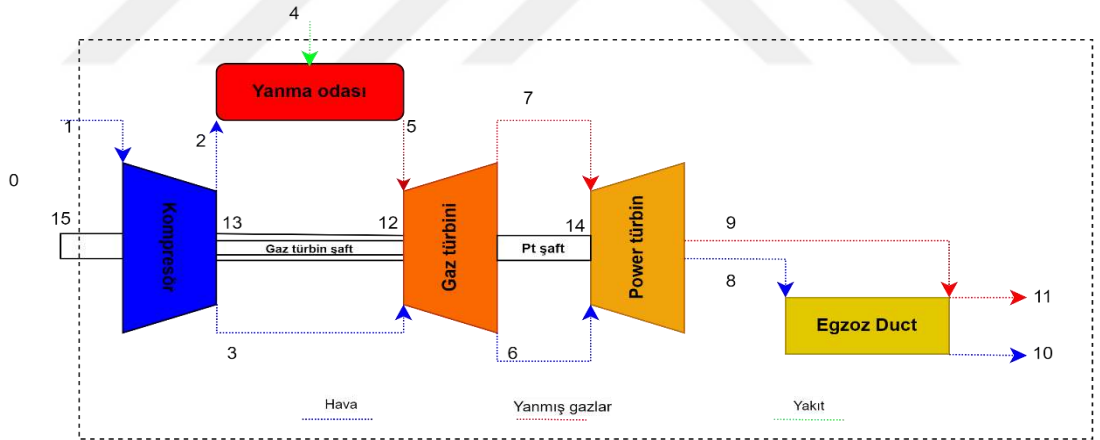
Ekserji tabanlı sürdürülebilirlik indikatörlerinin hesaplanması ve sonuçların yorumlanması.

Tablo 4.2. T700-701C motor genel özellikleri
(Training Guide SEI-761)

Özellik	Değer
ÜRETİCİ:	GE Aircraft Engines, Lynn, MA.
MODEL:	T700-GE-701C
MOTOR TÜRÜ:	Turboshaft
MOTOR AĞIRLIĞI (KURU):	456 lbs. max. (207 Kg)
MOTOR UZUNLUĞU:	46.12 inches (117 Cm)
MAX. MOTOR ÇAPI:	25 inches (63 Cm)
ŞAFT BEYGİR GÜCÜ: (Sea Level, Standart Day Contions)	1890 Max (10 min limit) 1940 Contingency (2.5 min limit)
KOMPRESÖR TÜRÜ:	Axial/ centrifugal birleşik 6 kademedan oluşan ,5 axial and 1 centrifugal
DEĞİŞKEN GEOMETRİ:	İnlet guide vanes, stage 1 and 2 stator vanes
YANMA ODASI:	Yekpare annular chamber axial akışlı
GAZ GENERATÖR TÜRBİN KADEME SAYISI:	2 (soğutmalı)
POWER TÜRBİNE KADEME SAYISI:	2 (soğutmasız)
YAKIT:	JP-4, JP-5, JP-8, NATO Codes F-34, F-40, F-44 JET A, JETA-1, JET B
YAĞLAMA YAĞI:	MIL-L-23699 or MIL-L-7808, NATO Code O-156 or NATO Code 0-148
GAZ TÜRBİN DEVRİ (RPM) %100:	44700
POWER TÜRBİN DEVRİ (RPM)%100:	22000
REVİZYON ZAMAN ARALIĞI:	None (On-Condition O/H Only)



Şekil 4.1. T700-701C Motorunun ana kısımlarının gösterimi
(http-9)



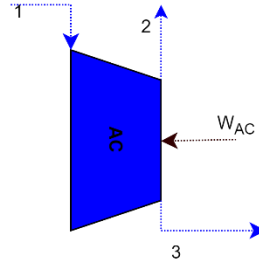
Şekil 4.2. Turboşaft motorun şematik gösterimi

4.1.1. Kompresör (AC)

T700 motor kompresörü 5 kademe aksenal ve 1 kademe santrifüj olmak üzere toplamda 6 kademedan oluşmaktadır. Sıcak kısım parçalarının soğutulması ve seallerin basınçlandırılması amacıyla kompresör çıkışından havanın bir kısmı hava borularıyla çekilerek kullanılacak yerlere iletilir. Hesaplamalarda kompresör havasının yaklaşık %5'i soğutma ve diğer görevler amacıyla kullanıldığı kabul edilmiştir Kompresör

kontrol hacmi Şekil 4.3’de görülmektedir. Kompresör, gaz türbini tarafından döndürülür.

Yakıt-ürün yöntemine göre yapılan eşitlikler aşağıdadır. Sisteme giren ekserji, çıkan ve yıkım ekserjilerin toplamına eşittir.



Şekil 4.3. Kompresör kontrol hacmi

Kompresör için kütle denklemi şu şekildedir,

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (4.1)$$

Kompresör için enerji denklemi şu şekildedir,

$$\dot{E}_{L_{AC}} = \dot{W}_{AC} + \dot{E}_1 - \dot{E}_3 - \dot{E}_2 \quad (4.2)$$

Kompresöre ait ekserji denklemi,

$$\dot{E}x_{D_{AC}} = \dot{W}_{AC} + \dot{E}x_1 - \dot{E}x_2 - \dot{E}x_3 \quad (4.3)$$

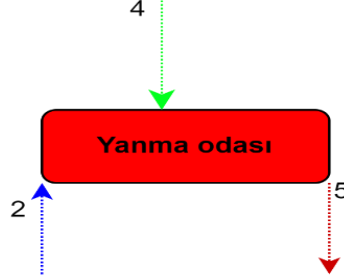
Kompresörün çektiği iş,

$$\dot{W}_{AC} = \dot{m}_2(c_{P_2}T_2 - c_{P_o}T_o) + \dot{m}_3(c_{P_3}T_3 - c_{P_o}T_o) - \dot{m}_1(c_{P_1}T_1 - c_{P_o}T_o) \quad (4.4)$$

4.1.2. Yanma odası (CC)

Kompresörden gönderilen havanın yaklaşık %5'i soğutma, basınçlandırma için geri kalan kısmı ise yanma işleminde kullanılır. Kompresörden çıkan yüksek basınçlı hava, yanma odasında yakıtla karışarak yakılır. Hava miktarı olarak normal gerekli olan havadan daha fazla hava yanmanın yüzde yüze yakın gerçekleşebilmesi için yanma odasına sokulmalıdır ancak çok fazla havanın ortama girmesi gereksiz olarak ısıtılıp egzozdan atılacağı için verim kaybına neden olur. Kararlı bir yanma sağlamak için yakıt-hava karışımının uygun oranda olması gerekir. Kompresörden çekilen ve yanma

sürecine katılmadan motor sistemlerinde kullanılan hava, motorun itiş gücünü ve ısıl verimini azaltır.



Şekil 4.4. Yanma odası kontrol hacmi

Yanma odası için kütle denklemi şu şekildedir,

$$\dot{m}_2 + \dot{m}_4 = \dot{m}_5 \quad (4.5)$$

Yanma odası için enerji denklemi şu şekildedir,

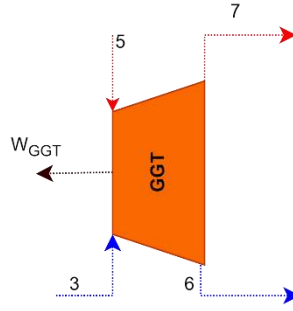
$$\dot{E}_{LCC} = \dot{E}_4 - \dot{E}_5 + \dot{E}_2 \quad (4.6)$$

Yanma odası için ekserji denklemleri şu şekildedir,

$$\dot{E}x_{DCC} = \dot{E}x_4 - \dot{E}x_5 + \dot{E}x_2 \quad (4.7)$$

4.1.3. Gaz generatör türbini (GGT)

T700-701C turboşaft motorun gaz türbini iki kademedan oluşmakta olup, kompresör ve aksesuar ünitesine dönü hareketi sağlar. Yanma odasından çıkan sıcak gazlar, başlangıçta 1.kdm sabit nozul segment kanatçıkları aracılığıyla yönlendirilir. Hem nozul segmentlerin hem de türbin kanatçıklarının sıcaklık dayanımının ve ömür limitlerinin iyileştirilmesi için hava ile soğutma gerçekleştirilmekte ve kanat yüzeyleri özel kaplamalarla güçlendirilmiştir. Kompresörün ara ve arka kademelerinden gaz türbini soğutma ve sızdırmazlık parçaları için basınçlandırılmış hava çekilir.



Şekil 4.5. Gaz generatör türbini kontrol hacmi

Gaz generatör türbini için kütle denklemi şu şekildedir,

$$\dot{m}_3 + \dot{m}_5 = \dot{m}_6 + \dot{m}_7 \quad (4.8)$$

Gaz generatör türbini için enerji denklemi şu şekildedir,

$$\dot{E}_{L_{GGT}} = \dot{E}_3 + \dot{E}_5 - \dot{E}_6 - \dot{E}_7 - \dot{W}_{GGT} \quad (4.9)$$

Gaz generatör türbini için ekserji denklemi şu şekildedir,

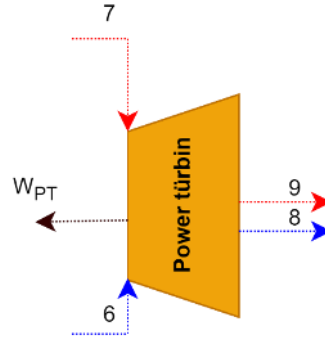
$$\dot{E}x_{D_{GGT}} = \dot{E}x_3 + \dot{E}x_5 - \dot{E}x_6 - \dot{E}x_7 - \dot{W}_{GGT} \quad (4.10)$$

Gaz generatör türbininin ürettiği iş şu şekildedir,

$$\begin{aligned} \dot{W}_{GGT} = \dot{m}_3(c_{P_3}T_3 - c_{P_o}T_o) + \dot{m}_5(c_{P_5}T_5 - c_{P_o}T_o) - \dot{m}_6(c_{P_6}T_6 - c_{P_o}T_o) \\ - \dot{m}_7(c_{P_7}T_7 - c_{P_o}T_o) \end{aligned} \quad (4.11)$$

4.1.4. Güç türbini (PT)

Pervaneyi döndüren türbindir serbest türbin ya da güç türbini'de denir. Gaz türbinin den bağımsızdır. Hareketini gaz türbininden iletilen gazların tahrikinden alır. Gaz generatör türbini gibi 2 kademedir.



Şekil 4.6. Güç türbini kontrol hacmi

Güç türbini kütle denklemi şu şekildedir,

$$\dot{m}_6 + \dot{m}_7 = \dot{m}_8 + \dot{m}_9 \quad (4.12)$$

Güç türbini enerji denklemi şu şekildedir,

$$\dot{E}_{LPT} = \dot{E}_6 + \dot{E}_7 - \dot{E}_8 - \dot{E}_9 - \dot{W}_{PT out} \quad (4.13)$$

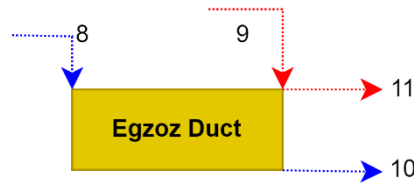
Güç türbini ekserji denklemi şu şekildedir,

$$\dot{E}x_{DPT} = \dot{E}x_6 + \dot{E}x_7 - \dot{E}x_8 + \dot{E}x_9 - \dot{W}_{PT out} \quad (4.14)$$

Güç türbini ürettiği iş,

$$\begin{aligned} \dot{W}_{PT out} = & \dot{m}_6(c_{P6}T_6 - c_{Po}T_o) + \dot{m}_7(c_{P7}T_7 - c_{Po}T_o) - \dot{m}_8(c_{P8}T_8 - c_{Po}T_o) \\ & - \dot{m}_9(c_{P9}T_9 - c_{Po}T_o) \end{aligned} \quad (4.15)$$

4.1.5. Egzoz duct nozul (EDN)



Şekil 4.7. Egzoz duct nozul kontrol hacmi

Egzoz duct için kütle denklemi şu şekildedir,

$$\dot{m}_8 + \dot{m}_9 = \dot{m}_{10} + \dot{m}_{11} \quad (4.16)$$

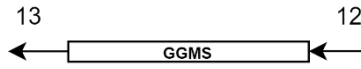
Egzoz duct için enerji denklemi şu şekildedir,

$$\dot{E}_{LEDN} = \dot{E}_8 + \dot{E}_9 - \dot{E}_{10} - \dot{E}_{11} \quad (4.17)$$

Egzoz duct için ekserji denklemi şu şekildedir,

$$\dot{E}x_{DEDN} = \dot{E}x_8 + \dot{E}x_9 - \dot{E}x_{10} - \dot{E}x_{11} \quad (4.18)$$

4.1.6. Gaz generatör türbini mekanik şaftı (GGMS)



Şekil 4.8. Gaz generatör türbini mekanik şaftı

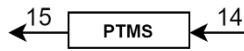
GGMS enerji denklemi şu şekildedir,

$$\dot{E}_{LGGMS} = \dot{W}_{12} - \dot{W}_{13} \quad (4.19)$$

GGMS ekserji denklemi şu şekildedir,

$$\dot{E}x_{DGGMS} = \dot{W}_{12} - \dot{W}_{13} \quad (4.20)$$

4.1.7. Güç türbini mekanik şaftı (PTMS)



Şekil 4.9. Güç türbini mekanik şaftı

PTMS enerji denklemi şu şekildedir,

$$\dot{E}_{LPTMS} = \dot{W}_{14} - \dot{W}_{15} \quad (4.21)$$

PTMS ekserji denklemi şu şekildedir,

$$\dot{E}x_{DPTMS} = \dot{W}_{14} - \dot{W}_{16} \quad (4.22)$$

4.2. Turboşaft Motorun Enerji Verimleri ve Özgöl Yakıt Tüketimi Değerleri

$$\eta_e = \frac{\dot{E}_c}{\dot{E}_g} \quad (4.23)$$

$$SFC = \frac{\dot{m}_F}{P_{shaft}} \quad (4.24)$$

Turboşaft motorun enerji verimleri ve özgöl yakıt tüketim değerleri yukardaki formüller kullanılarak excelde hesaplanmıştır.

Tablo 4.3. Turboşaft motor enerji verimleri ve özgöl yakıt tüketimleri

Test Modu	η_e (%)	SFC (kg/h/kW)
%50 güç	22.22	37.57
%75 güç	25.09	33.27
%100 güç	27.31	30.56
MaxP	28.14	29.66

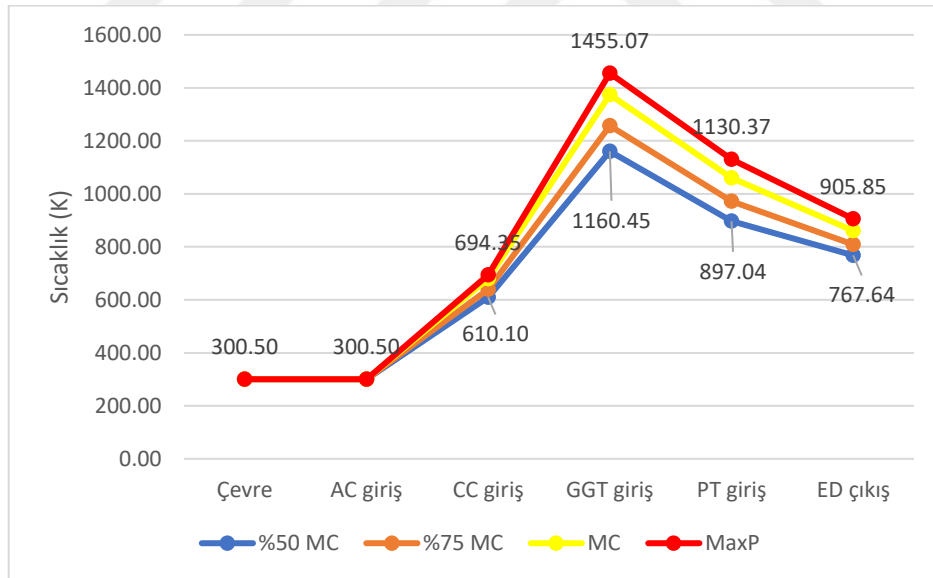
4.3. Turboşaft Motoru Test Parametreleri

Bir turboşaft motorunun testi sırasında ölçülen motor parametreleri, motorun çalışması sırasında bir test odasında motor test standına bağlı olarak kaydedilmiştir. Motorun ilk montajından sonra veya revizyon atölyesinde kapsamlı bir bakım sürecinin ardından, tüm çalışma aralıklarını kapsayan çeşitli testler gerçekleştirilir. Bu testler, alıştırma, performans değerlendirmesi, titreşim analizi, sistem çalışmaları, yağ sızıntısı testleri ve diğer çeşitli değerlendirmeleri içerir. Bu testlerin başarıyla geçilmesinin ardından motor, faal olarak işleme alınır. Test odasındaki tüm ölçüm ekipmanları, ölçümlerin doğruluğunu teyit etmek amacıyla periyodik kalibrasyon kontrollerinden geçirilir.

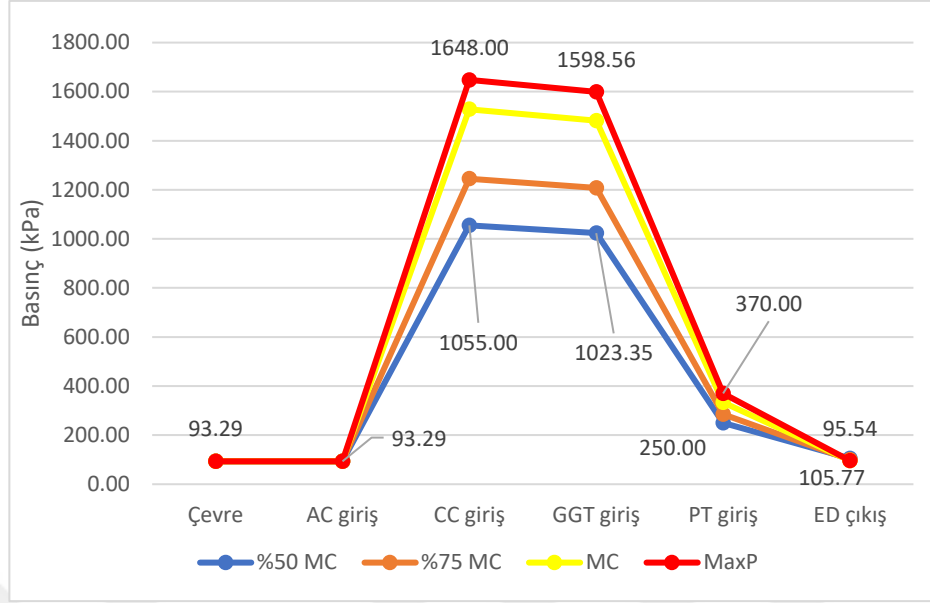
Ekserji analizi yapabilmek için, her bir bileşenin giriş ve çıkışındaki sıcaklık, basınç ve kütleli akış değerlerinin bilinmesi önemlidir. Bremze koşullarında ölçülen parametreler, sıcaklık, basınç ve akış sensörleri ile yalnızca belirli lokasyonlarda elde edilir ve tüm istasyonlarda ölçüm yapılmaz. Ölçülen motor parametreleri kullanılarak Excel üzerinde parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu işlem, gerekli istasyonlardaki akış parametrelerinin belirlenmesini sağlamış ve bu değerler kullanılarak her bir motor bileşeninin giriş ve çıkışlarındaki ekserji akışları hesaplanmıştır.

Tablo 4.4. Turboşaft motor test verileri
(1HBFM E-94182731-799-3789835 sayılı yazı 1 Ağustos 2024)

Parametre	%50 Güç	%75 Güç	%100 Güç	MaxP
Motor torku (Nm)	242	360	480	620
Şaft Gücü (kW)	531.76	789.92	1123.84	1359.2
Giriş hava basıncı (kPa)	93.29	93.29	93.29	93.29
Giriş hava sıcaklığı (K)	300.5	300.5	300.5	300.5
Kompresör çıkış sıcaklığı (K)	610.10	640.15	679.30	694.35
Kompresör çıkış basıncı (kPa)	1055	1245	1528	1648
Gaz generatör türbini giriş sıcaklığı (K)	1160.45	1256.9	1374.16	1455.07
Gaz generatörtürbini çıkış sıcaklığı (K)	897.04	972.04	1060.3	1130.37
Güç türbini giriş sıcaklığı (K)	897.04	972.04	1060.30	1130.37
Güç türbini çıkış sıcaklığı (K)	771.5	812.6	864.85	910.40
Hava debisi (kg/s)	3.14	3.58	4.04	4.25
Yakıt alt ısı değeri (kJ/kg)	43124	43124	43124	43124
Yakıt akış debisi (kg/s)	0.0555	0.073	0.0954	0.112
Hava-yakıt oranı	53.747	46.589	40.230	36.049



Şekil 4.10. TSE alt sistemlerinin sıcaklık değerleri



Şekil 4.11. TSE alt sistemlerinin basınç değerleri

Referans entalpi hesaplamaları

Bu tezde, özellikle 300.5 K sıcaklık ve 93.29 kPa basınç koşullarında yanma öncesi ve sonrasındaki entalpi ile entropi ilişkileri detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu analizlerde, referans ortamın entalpi ve entropisinin doğru bir şekilde hesaplanması, elde edilen sonuçların hassasiyeti açısından kritik bir öneme sahiptir.

Yanma öncesi ve sonrasındaki referans durumların belirlenmesi, motor performansının anlaşılması ve optimize edilmesi için temel bir adımdır. Bu bağlamda, standart çalışma koşullarında belirlenen referans şartlar altında, yanma öncesi ve sonrasındaki entalpi ve entropi değerleri titizlikle hesaplanmıştır. Yapılan bu hesaplamalar, motorun çalışma koşullarının daha iyi anlaşılmasına ve geliştirilmesine yönelik önemli bilgiler sunmaktadır. Bu tez, termal sistemlerin analizi ve motor performansının iyileştirilmesi üzerine çalışan araştırmacılara değerli bir katkı sağlamaktadır. Yanma öncesindeki gazların mol oranları (Ballı, 2012; Aydın, 2012).

$$X_{N_2} = \% 77.48$$

$$X_{O_2} = \% 20.59$$

$$X_{CO_2} = \% 0.03$$

$$X_{H_2O} = \% 1.9$$

Fiziksel ekserjinin hesaplanmasına geçilmeden önce bu hesaplama için gerekli olan referans çevre için entalpi ve entropi değerlerinin bulunması gerekmektedir.

Tablo 4.5. *Turboşaft motor istasyonları fiziksel ekserji akışları*

İstasyon no	Açıklama
0	Hava
0	Gaz
1	Hava
2	Hava
3	Hava
4	Yakıt
5	Yanmış gaz
6	Soğutma havası
7	Yanmış gaz
8	Soğutma havası
9	Yanmış gaz
10	Soğutma havası
11	Yanmış gaz
12	Mekanik iş (GGMS out)
13	Mekanik iş (AC in)
14	Mekanik iş (PTMS out)
15	Mekanik iş (PTMS net)

4.3.1. Turboşaft motor testlerine ait kimyasal yanma denklemleri

Turboşaft motoru girişinden yanma odasına kadar olan akışkan, hava olarak kabul edilir ve havanın sıcaklığa bağlı sabit basınçtaki özgül ısısı $c_{p,hava}$ (4.25) denklemini kullanılarak hesaplanacaktır. Burada sıcaklık kelvindir (Moran ve Shapiro, 1995).

$$c_{p,hava}(T) = 1.04841 - \left(\frac{3.83719T}{10^4}\right) + \left(\frac{9.45378T^2}{10^7}\right) - \left(\frac{5.49031T^3}{10^{10}}\right) + \left(\frac{7.92981T^4}{10^{14}}\right) \quad (4.25)$$

Giriş havası mol oranları. 1 mol havanın %77.48'ini nitrojen (N_2), %20.59'unu oksijen (O_2), %0.03'ünü karbondioksit (CO_2) ve %1.90'nını su buharı (H_2O) gaz

oluşturmaktadır. Ar ve CO gibi diğer gazların miktarları çok düşük olduğu için göz ardı edilmiştir (Bejan, Tsatsaronis ve Moran, 1996; Balli, 2023).

Kompresör çıkışındaki basınçlı hava yanma odasına girer ve jet yakıtı ile birlikte karışır. Jet yakıtı olarak kimyasal formülü $C_{12}H_{23}$ olan JP-8 yakıtı alınmıştır. Havacılıkta kullanılan bir tür damıtılmış petrol olan kerosen, belirli özellikleri değiştirilerek farklı işletme koşulları için farklı isimler alabilir. Özellikle ticari havacılıkta yaygın olarak kullanılan kerosen yakıt tipleri Jet A ve Jet A-1'dir. Bu çalışmada JP-8 seçilmiştir (*Training Guide SEI-761*). Literatürde kerosenin kimyasal formülü konusunda herhangi bir anlaşma olmamasına rağmen, uygulama kolaylığı açısından küçük bir hata göz ardı edilmiş ve $C_{12}H_{23}$ olarak kullanılmıştır (Dagaut ve Cathonnet, 2006; Sochet ve Gillard, 2002; Karakoç, 2008).

JP-8 (Jet Propellant 8) özellikle askeri hava araçlarında kullanılır ve NATO tarafından F-34 kodu ile tanımlanmaktadır. Helikopter ve uçaklarda kullanılan JP-8 ayrıca kara araçları, denizaltılar ve bazı roket sistemlerinde de kullanılmaktadır. Yüksek irtifalarda uçan jetlerin performansını koruyan katkılar içerdiği için, askeri operasyonlarda kritik bir öneme sahiptir.

Fiziksel Özelliklerinden bahsetmek gerekirse Donma Noktası düşük sıcaklıklara dayanıklı olup, -47°C civarında bir donma noktasına sahiptir, bu da onu soğuk iklim koşullarında kullanım için uygun hale getirir. Düşük sıcaklıkta buharlaşma özelliği, motorun verimli çalışması için önemlidir. JP-8, içerdiği katkı maddeleri sayesinde yüksek güvenlik ve motor verimliliği sunan bir yakıttır. Kerosenin tam olarak sabit bir kimyasal bileşime sahip olmaması sebebi ile JP-8 yakıtının kimyasal formülü literatürde genellikle $C_{11}H_{21}$ veya $C_{12}H_{23}$ olarak belirtilir. Bunun sebebi. Kerozen, hidrokarbonların bir karışımıdır ve bu karışımındaki bileşenlerin oranları değişebilir. Bu tez hesaplamalarında kimyasal formül olarak $C_{12}H_{23}$ alınmıştır (Edwards, Bill ve Maurice, 2001; Ekici, 2015).

Hava- yakıt, ateşleyici tarafından ateşlenir ve yanma odasında yanma başlar. Kararlı bir yanma için hava-yakıt oranı uygun seviyede olmalıdır. Yanma odasındaki hava-yakıt oranı, yakıtın yanması için stokiometrik oranın üzerinde olmalıdır. Yüksek yanma sıcaklığı, özellikle ilk kademe türbin bladelerinin servis ömrünü olumsuz olarak etkiler. Bu, türbin bladelerinin daha erken arızalanmasına neden olabilir, ayrıca

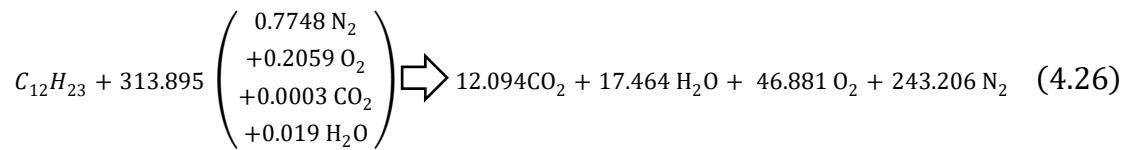
bladelerin aşınmasından kaynaklanan uç açıklıklarının gerektiğinden daha fazla olması ve koruyucu kaplamalarını kaybetmeleri vb. sonuçları doğurabilir. Yüksek sıcaklık bladelerin ömrünü kısaltmaktadır. Dayanıklılık kaplamaları, bu yüksek sıcaklıkların etkilerini azaltmaya yardımcı olur. Ayrıca bladelerin ve vanelerin yeterli seviyede soğutulması gerekmektedir. Ancak, soğutma amacıyla ana hava akışının bir kısmının kullanılması, itiş gücünü azaltır. Yüksek yanma sıcaklıklarının ikinci olumsuz etkisinde NO_x üretimidir. Bu nedenle, nispeten düşük egzoz gazı sıcaklıklarına ulaşmak için her zaman yanma odasına stokiyometrik hava/yakıt oranından daha fazla hava sağlanır (Turgut, Karakoç ve Hepbaşı, 2007).

Yanma reaksiyonunun ardından sıcak gazların dört madde içerdiği kabul edilmiştir. Bu dört madde ise karbondioksit, oksijen, su buharı ve azottur. Bununla beraber yanma işleminden sonra bu dört maddenin dışında bazı emisyonlarda çıkmaktadır. Her bir test çalıştırması için hava/yakıt oranlarından türetilerek oluşturulan kimyasal yanma denklemi ve kimyasal yanma denklemlerindeki emisyonların kütleli oranları kullanılarak elde edilen sıcak gazların özgül ısıları (c_p) aşağıda verilmektedir. Hesaplamalar excel’de oluşturulan kodlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

%50 Güç çalışması için:

Hava-yakıt oranı 53.74 için,

Sabit basınçtaki özgül ısı değeri ve kimyasal yanma denklemi,



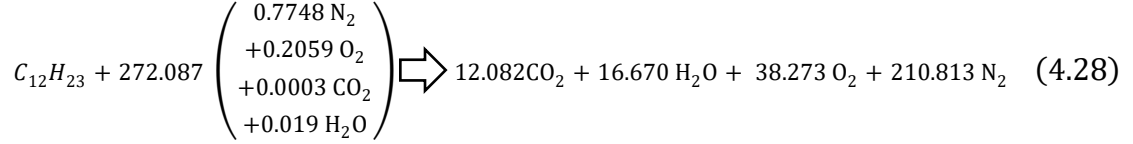
$$c_{p,gaz}(T) = 0.98858 + \left(\frac{0.01187}{10^2} T\right) + \left(\frac{0.01518}{10^5} T^2\right) - \left(\frac{0.06656}{10^9} T^3\right) \quad (4.27)$$

Tablo 4.6. Yanmış gazların kütleli dağılımları (%50 Güç)

Molekül	Kütle (%)	R gaz	Debi (kg/s)
CO ₂	5.81	0.010976	0.177
H ₂ O	3.43	0.015851	0.104
O ₂	16.38	0.042547	0.498
N ₂	74.38	0.220752	2.260
Toplam	100	0.290127	3.039

%75 Güç çalışması için:

Hava-yakıt oranı 46.589 için,



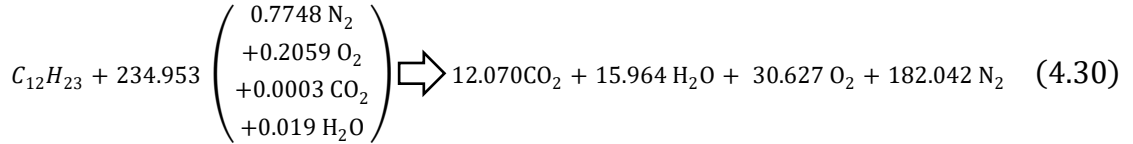
$$c_{p,gaz}(T) = 0.98892 + \left(\frac{0.01262}{10^2} T \right) + \left(\frac{0.01485}{10^5} T^2 \right) - \left(\frac{0.06595}{10^9} T^3 \right) \quad (4.29)$$

Tablo 4.7. Yanmış gazların kütleel dağılımları (%75 Güç)

Molekül	Kütle (%)	R gaz	Debi (kg/s)
CO2	6.68	0.012614	0.232
H2O	3.77	0.017406	0.131
O2	15.38	0.03996	0.534
N2	74.17	0.220135	2.577
Toplam	100	0.290115	3.474

%100 Güç çalışması için:

Hava-yakıt oranı 40.2306 için,



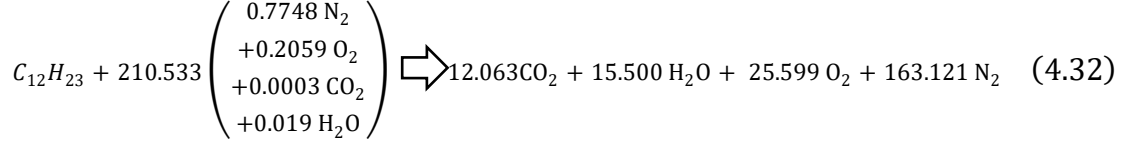
$$c_{p,gaz}(T) = 0.98932 + \left(\frac{0.01351}{10^2} T \right) + \left(\frac{0.01446}{10^5} T^2 \right) - \left(\frac{0.06524}{10^9} T^3 \right) \quad (4.31)$$

Tablo 4.8. Yanmış gazların kütleel dağılımları (%100 Güç)

Molekül	Kütle (%)	R gaz	Debi (kg/s)
CO2	7.70	0.014546	0.303
H2O	4.17	0.01924	0.164
O2	14.21	0.036908	0.559
N2	73.92	0.219406	2.908
Toplam	100	0.290101	3.933

Maksimum Güç

Hava-yakıt oranı 36.0491 için,



$$c_{p,gaz}(T) = 0.98965 + \left(\frac{0.01426}{10^2} T \right) + \left(\frac{0.01414}{10^5} T^2 \right) - \left(\frac{0.06464}{10^9} T^3 \right) \quad (4.33)$$

Tablo 4.9. Yanmış gazların kütleli dağılımları (Maksimum Güç)

Molekül	Kütle (%)	R gaz	Debi (kg/s)
CO ₂	8.56	0.016178	0.355
H ₂ O	4.50	0.020789	0.187
O ₂	13.21	0.034331	0.548
N ₂	73.72	0.218791	3.059
Toplam	100	0.290089	4.150

4.3.2. Turboşaft motor istasyonları fiziksel ekserji akışları

Turboşaft motoru fiziksel ekserji hesaplamaları her bir ana motor bileşeninin giriş ve çıkışındaki ekserji değerleri, ölçülen ve hesaplanan termodinamik parametreler kullanılarak elde edilmiştir. Fiziksel ekserjiler denklem (3.22) kullanılarak hesaplanmıştır. Motor elemanlarının giriş ve çıkışındaki istasyonlardaki sıcaklık, basınç ve hava debileri her bir çalıştırma modu için Tablo 4.10-4.13 arasında verilmiştir. Havanın sabit basınçta yanma odasına kadar olan özgül ısısı c_p , denklem (4.25) kullanılarak sıcaklığın bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır ve yanma odasından itibaren, denklem (4.26-4.33) kullanılarak sıcaklığın bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Sıcak gazlar için gaz sabiti benzer şekilde gazların kütle kesirleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu parametrelerin (3.22) denkleminde yerine konulmasıyla, her birimin giriş ve çıkışındaki fiziksel ekserji akışları bulunmuştur.

4.3.3. Yakıt kimyasal ekserji hesabı

Yanma odasına püskürtülen yakıtın kimyasal ekserjisi yakıt kimyasal denklemi $C_{12}H_{23}$ olarak kabul edilerek (3.34) ile hesaplanmıştır.

$$\frac{\mathcal{E}_{ch,F}}{LHV} = \gamma_F \cong 1.04224 + 0.011925 \frac{H}{C} - 0.042 \frac{1}{C} \quad (3.34)$$

Kerosenin kalori değeri LHV 43124 kJ/kg olarak alınmıştır (Aydın, 2012). γ_F değeri 1.0616 olarak hesaplanmıştır. Yakıtın kimyasal ekserjisi ($\dot{E}x_{y_{ch}}$)

$$\dot{E}x_{y_{ch}} = \dot{m}_{4f} * 43124 * \gamma_F \quad (4.35)$$

ile hesaplanmıştır. Havanın kimyasal ekserjisi ihmal edilmiştir.

Tablo 4.10-4.13’de motor ana elemanlarının giriş ve çıkışlarında istasyon bazında debi, basınç, sıcaklık, özgül ısı ve akış kütlelerinin fonksiyonuyla hesaplanan enerji ve ekserji akımları sunulmaktadır. Hesaplamalar her bir motor elemanı için excel programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4.3.4. Motor elemanlarının giren ve çıkan toplam ekserji akımları

Denklem 4.1’den 4.35’e kadar verilen denklemler kullanılarak motorun incelenecek ana ünitelerine giren ve çıkan toplam fiziksel ekserji değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 4.10. Turboşaft motor termodinamik parametreleri (%50 Güç)

	İstasyon	Akışkan	m (kg/s)	P (kPa)	T (K)	Cp (kJ/kgK)	E (kW)	Ex (kW)
	0	Hava	0	93.29	300.5	1.00422	0.00	0.00
	0	Gaz	0	93.29	300.5	1.03616	0.00	0.00
	1	Hava	3.140	93.29	300.5	1.00422	0.00	0.00
	2	Hava	2.983	1055.00	610.1	1.05250	1015.30	927.91
	3	Hava	0.157	1055.00	610.1	1.05250	53.44	48.84
	4	Yakıt	0.056	227.53	300.5	-	2393.38	2540.81
	5	Yanmış gaz	3.039	1023.35	1160.45	1.22679	3379.61	2326.59
%50 Güç	6	Soğutma havası	0.157	250.00	897.04	1.11997	110.35	60.45
	7	Yanmış gaz	3.039	250.00	897.04	1.16920	2240.76	1212.87
	8	Soğutma havası	0.157	106.84	771.5	1.09105	84.82	33.98
	9	Yanmış gaz	3.039	106.84	771.5	1.13998	1726.25	685.95
	10	Soğutma havası	0.157	105.77	767.64	1.09012	84.00	33.42
	11	Yanmış gaz	3.039	105.77	767.64	1.13907	1710.78	674.63
	12	Mekanik iş (GGMS out)					1081.94	1081.94
	13	Mekanik iş (AC in)					1068.74	1068.74
	14	Mekanik iş (PTMS out)					540.05	540.05
	15	Mekanik iş (PTMS net)					531.76	531.76

Tablo 4.11. Turboşaft motor termodinamik parametreleri (%75 Güç)

	İstasyon	Akışkan	m (kg/s)	P (kPa)	T (K)	Cp (kJ/kgK)	E (kW)	Ex (kW)
%75 Güç	0	Hava	0	93.29	300.5	1.00422	0.00	0.00
	0	Gaz	0	93.29	300.5	1.03848	0.00	0.00
	1	Hava	3.580	93.29	300.5	1.00422	0.00	0.00
	2	Hava	3.401	1245.00	640.15	1.05947	1280.31	1165.02
	3	Hava	0.179	1245.00	640.15	1.05947	67.38	61.32
	4	Yakıt	0.073	227.53	300.5	-	3148.05	3341.97
	5	Yanmış gaz	3.474	1207.65	1256.9	1.25128	4379.58	3063.77
	6	Soğutma havası	0.179	285.00	972.04	1.13521	143.50	82.01
	7	Yanmış gaz	3.474	285.00	972.04	1.19140	2939.09	1657.59
	8	Soğutma havası	0.179	100.35	812.6	1.10083	106.15	43.13
	9	Yanmış gaz	3.474	100.35	812.6	1.15419	2174.15	876.82
	10	Soğutma havası	0.179	99.35	808.54	1.09987	105.17	42.44
	11	Yanmış gaz	3.474	99.35	808.54	1.15323	2155.15	862.82
	12	Mekanik iş (GGMS out)					1364.37	1364.37
	13	Mekanik iş (AC in)					1347.70	1347.70
	14	Mekanik iş (PTMS out)					802.29	802.29
	15	Mekanik iş (PTMS net)					789.92	789.92

Tablo 4.12. Turboşaft motor termodinamik parametreleri (%100 Güç)

	İstasyon	Akışkan	m (kg/s)	P (kPa)	T (K)	Cp (kJ/kgK)	E (kW)	Ex (kW)
%100 Güç	0	Hava	0	93.29	300.5	1.00422	0.00	0.00
	0	Gaz	0	93.29	300.5	1.04121	0.00	0.00
	1	Hava	4.040	93.29	300.5	1.00422	0.00	0.00
	2	Hava	3.838	1528.00	679.3	1.06878	1628.28	1473.95
	3	Hava	0.202	1528.00	679.3	1.06878	85.70	77.58
	4	Yakıt	0.095	227.53	300.5	-	4114.03	4367.45
	5	Yanmış gaz	3.933	1482.16	1374.16	1.27884	5681.57	4051.18
	6	Soğutma havası	0.202	334.00	1060.3	1.15015	185.38	110.72
	7	Yanmış gaz	3.933	334.00	1060.3	1.21743	3846.70	2261.39
	8	Soğutma havası	0.202	97.60	864.85	1.11287	133.51	56.24
	9	Yanmış gaz	3.933	97.60	864.85	1.17216	2756.77	1152.87
	10	Soğutma havası	0.202	96.62	860.53	1.11189	132.32	55.39
	11	Yanmış gaz	3.933	96.62	860.53	1.17113	2733.33	1135.44
	12	Mekanik iş (GGMS out)					1735.18	1735.18
	13	Mekanik iş (AC in)					1713.98	1713.98
	14	Mekanik iş (PTMS out)					1141.80	1141.80
	15	Mekanik iş (PTMS net)					1123.84	1123.84

Tablo 4.13. Turboşaft motor termodinamik parametreleri (Maksimum Güç)

	İstasyon	Akışkan	m (kg/s)	P (kPa)	T (K)	Cp (kJ/kgK)	E (kW)	Ex (kW)
MaxP	0	Hava	0	93.29	300.5	1.00422	0.00	0.00
	0	Gaz	0	93.29	300.5	1.04352	0.00	0.00
	1	Hava	4.250	93.29	300.5	1.00422	0.00	0.00
	2	Hava	4.038	1648.00	694.35	1.07240	1788.02	1615.50
	3	Hava	0.213	1648.00	694.35	1.07240	94.11	85.03
	4	Yakıt	0.112	227.53	300.5	-	4829.89	5127.41
	5	Yanmış gaz	4.150	1598.56	1455.07	1.29733	6531.85	4691.41
	6	Soğutma havası	0.213	370.00	1130.37	1.15910	214.29	131.59
	7	Yanmış gaz	4.150	370.00	1130.37	1.23813	4506.22	2716.55
	8	Soğutma havası	0.213	96.50	910.40	1.12282	153.15	66.67
	9	Yanmış gaz	4.150	96.50	910.40	1.18789	3186.29	1376.70
	10	Soğutma havası	0.213	95.54	905.85	1.12186	151.82	65.70
	11	Yanmış gaz	4.150	95.54	905.85	1.18680	3159.75	1356.81
	12	Mekanik iş (GGMS out)					1905.44	1905.44
	13	Mekanik iş (AC in)					1882.13	1882.13
	14	Mekanik iş (PTMS out)					1381.07	1381.07
	15	Mekanik iş (PTMS net)					1359.20	1359.20

Tablo 4.14. Dört çalıştırma modu için ekserji parametreleri 1

	Motor kısmı	Yakıt ekserji akımı (kW)	Ürün ekserji akımı (kW)	Ekserji yıkım akımı (kW)	Ekserji kayıp akımı (kW)	Atık ekserji (kW)
		Fuel Ex	Product Ex	ExD	Exloss	Wex
%50 Güç	AC	1068.74	976.75	91.99	0.00	91.99
	CC	2540.81	1398.68	1142.13	0.00	1142.13
	GGT	1102.11	1081.94	20.17	0.00	20.17
	GGMS	1081.94	1068.74	13.20	0.00	13.20
	PT	553.39	540.05	13.35	0.00	13.35
	PTMS	540.05	531.76	8.29	0.00	8.29
	EDN	719.93	708.05	11.88	0.00	11.88
	TSE	2540.81	531.76	1301.01	708.05	2009.05
%75 Güç		Fuel Ex	Product Ex	ExD	Exloss	Wex
	AC	1347.70	1226.34	121.36	0.00	121.36
	CC	3341.97	1898.75	1443.22	0.00	1443.22
	GGT	1385.49	1364.37	21.12	0.00	21.12
	GGMS	1364.37	1347.70	16.67	0.00	16.67
	PT	819.65	802.29	17.35	0.00	17.35
	PTMS	802.29	789.92	12.37	0.00	12.37
	EDN	919.95	905.26	14.70	0.00	14.70
	TSE	3341.97	789.92	1646.79	905.26	2552.05
%100 Güç		Fuel Ex	Product Ex	ExD	Exloss	Wex
	AC	1713.98	1551.52	162.46	0.00	162.46
	CC	4367.45	2577.23	1790.22	0.00	1790.22
	GGT	1756.65	1735.18	21.47	0.00	21.47
	GGMS	1735.18	1713.98	21.20	0.00	21.20
	PT	1163.00	1141.80	21.19	0.00	21.19
	PTMS	1141.80	1123.84	17.96	0.00	17.96
	EDN	1209.11	1190.82	18.29	0.00	18.29
	TSE	4367.45	1123.84	2052.79	1190.82	3243.61
MaxP		Fuel Ex	Product Ex	ExD	Exloss	Wex
	AC	1882.13	1700.52	181.60	0.00	181.60
	CC	5127.41	3075.91	2051.50	0.00	2051.50
	GGT	1928.29	1905.44	22.85	0.00	22.85
	GGMS	1905.44	1882.13	23.32	0.00	23.32
	PT	1404.78	1381.07	23.71	0.00	23.71
	PTMS	1381.07	1359.20	21.87	0.00	21.87
	EDN	1443.36	1422.51	20.85	0.00	20.85
	TSE	5127.41	1359.20	2345.70	1422.51	3768.21

Tablo 4.15. Dört çalıştırma modu için ekserji parametreleri 2

	Motor kısmı	Ekserji verimi (%)	Ekserji yıkım oranı (%)	Ekserji kayıp oranı (%)	Atık ekserji oranı (%)	Ürün kayıp oranı (%)	Ekserji iyileştirme potansiyeli (kW)	İyileştirilmiş verim (%)	Yakıt ekserji kayıp oranı (%)
		N2	ExDR	ExLR	WExR	PLR	ExIP	N2, modified	FExWR
%50 Güç	AC	91.39	7.07	0.00	4.58	17.30	7.92	92.07	0.04
	CC	55.05	87.79	0.00	56.85	214.78	513.40	68.99	0.45
	GGT	98.17	1.55	0.00	1.00	3.79	0.37	98.20	0.01
	GGMS	98.78	1.01	0.00	0.66	2.48	0.16	98.79	0.01
	PT	97.59	1.03	0.00	0.66	2.51	0.32	97.64	0.01
	PTMS	98.47	0.64	0.00	0.41	1.56	0.13	98.49	0.00
	EDN	98.35	0.91	0.00	0.59	2.23	0.20	98.38	0.00
	TSE	20.93	100.00	100.00	100.00	377.81	1028.72	35.17	0.79
%75 Güç		N2	ExDR	ExLR	WExR	PLR	ExIP	N2, modified	FExWR
	AC	90.99	7.37	0.00	4.76	15.36	10.93	91.74	0.04
	CC	56.82	87.64	0.00	56.55	182.70	623.25	69.84	0.43
	GGT	98.48	1.28	0.00	0.83	2.67	0.32	98.50	0.01
	GGMS	98.78	1.01	0.00	0.65	2.11	0.20	98.79	0.00
	PT	97.88	1.05	0.00	0.68	2.20	0.37	97.93	0.01
	PTMS	98.46	0.75	0.00	0.48	1.57	0.19	98.48	0.00
	EDN	98.40	0.89	0.00	0.58	1.86	0.23	98.43	0.00
	TSE	23.64	100.00	100.00	100.00	323.08	1257.55	37.90	0.76
%100 Güç		N2	ExDR	ExLR	WExR	PLR	ExIP	N2, modified	FExWR
	AC	90.52	7.91	0.00	5.01	14.46	15.40	91.34	0.04
	CC	59.01	87.21	0.00	55.19	159.29	733.81	70.93	0.41
	GGT	98.78	1.05	0.00	0.66	1.91	0.26	98.79	0.00
	GGMS	98.78	1.03	0.00	0.65	1.89	0.26	98.79	0.00
	PT	98.18	1.03	0.00	0.65	1.89	0.39	98.21	0.00
	PTMS	98.43	0.87	0.00	0.55	1.60	0.28	98.45	0.00
	EDN	98.49	0.89	0.00	0.56	1.63	0.28	98.51	0.00
	TSE	25.73	100.00	100.00	100.00	288.62	1524.56	39.53	0.74
MaxP		N2	ExDR	ExLR	WExR	PLR	ExIP	N2, modified	FExWR
	AC	90.35	7.74	0.00	4.82	13.36	17.52	91.20	0.04
	CC	59.99	87.46	0.00	54.44	150.93	820.81	71.42	0.40
	GGT	98.82	0.97	0.00	0.61	1.68	0.27	98.83	0.00
	GGMS	98.78	0.99	0.00	0.62	1.72	0.29	98.79	0.00
	PT	98.31	1.01	0.00	0.63	1.74	0.40	98.34	0.00
	PTMS	98.42	0.93	0.00	0.58	1.61	0.35	98.44	0.00
	EDN	98.56	0.89	0.00	0.55	1.53	0.30	98.58	0.00
	TSE	26.51	100.00	100.00	100.00	277.24	1723.89	39.94	0.73

Tablo 4.16. Dört çalıştırma modu için çevresel ekserji parametreleri

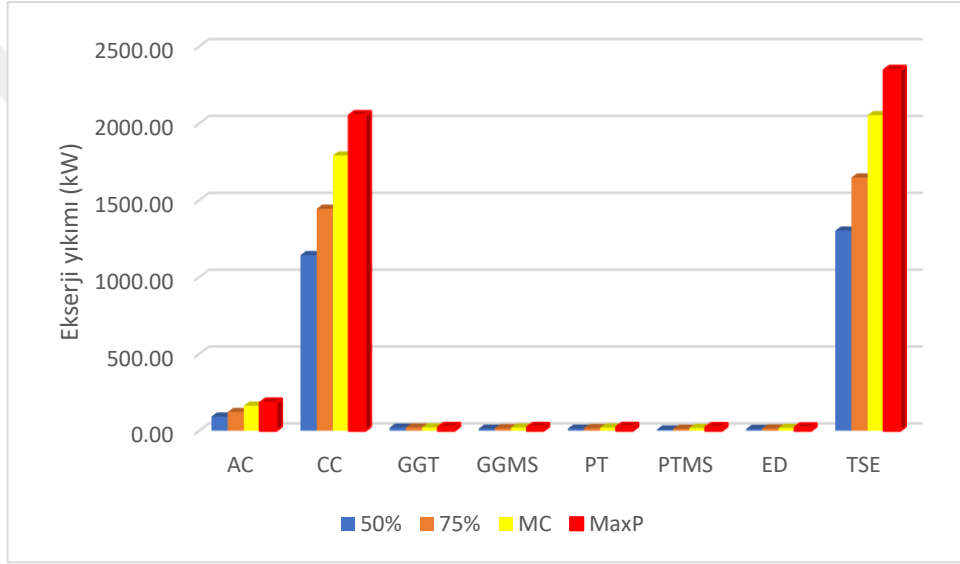
	Motor kısmı	Çevresel etki faktörü	Ekolojik etki faktörü	Ekolojik objektif fonksiyonu	Ekolojik objektif fonksiyon indeksi
		EEF	EcoEF	EOF	EOFİ
%50 Güç	AC	0.04	1.09	884.76	0.91
	CC	0.82	1.82	256.55	0.18
	GGT	0.01	1.02	1061.77	0.98
	GGMS	0.01	1.01	1055.54	0.99
	PT	0.01	1.02	526.70	0.98
	PTMS	0.00	1.02	523.47	0.98
	EDN	0.00	1.02	696.17	0.98
	TSE	3.78	4.78	-1477.29	-2.78
%75 Güç		EEF	EcoEF	EOF	EOFİ
	AC	0.04	1.10	1104.97	0.90
	CC	0.76	1.76	455.53	0.24
	GGT	0.01	1.02	1343.25	0.98
	GGMS	0.01	1.01	1331.03	0.99
	PT	0.01	1.02	784.94	0.98
	PTMS	0.00	1.02	777.55	0.98
	EDN	0.00	1.02	890.56	0.98
	TSE	3.23	4.23	-1762.13	-2.23
%100 Güç		EEF	EcoEF	EOF	EOFİ
	AC	0.04	1.10	1389.07	0.90
	CC	0.69	1.69	787.01	0.31
	GGT	0.00	1.01	1713.72	0.99
	GGMS	0.00	1.01	1692.78	0.99
	PT	0.00	1.02	1120.61	0.98
	PTMS	0.00	1.02	1105.88	0.98
	EDN	0.00	1.02	1172.54	0.98
	TSE	2.89	3.89	-2119.77	-1.89
MaxP		EEF	EcoEF	EOF	EOFİ
	AC	0.04	1.11	1518.92	0.89
	CC	0.67	1.67	1024.41	0.33
	GGT	0.00	1.01	1882.60	0.99
	GGMS	0.00	1.01	1858.81	0.99
	PT	0.00	1.02	1357.36	0.98
	PTMS	0.00	1.02	1337.33	0.98
	EDN	0.00	1.01	1401.66	0.99
	TSE	2.77	3.77	-2409.01	-1.77

Tablo 4.17. Dört çalıştırma modu için sürdürülebilirlik ve ekonomik ekserji parametreleri

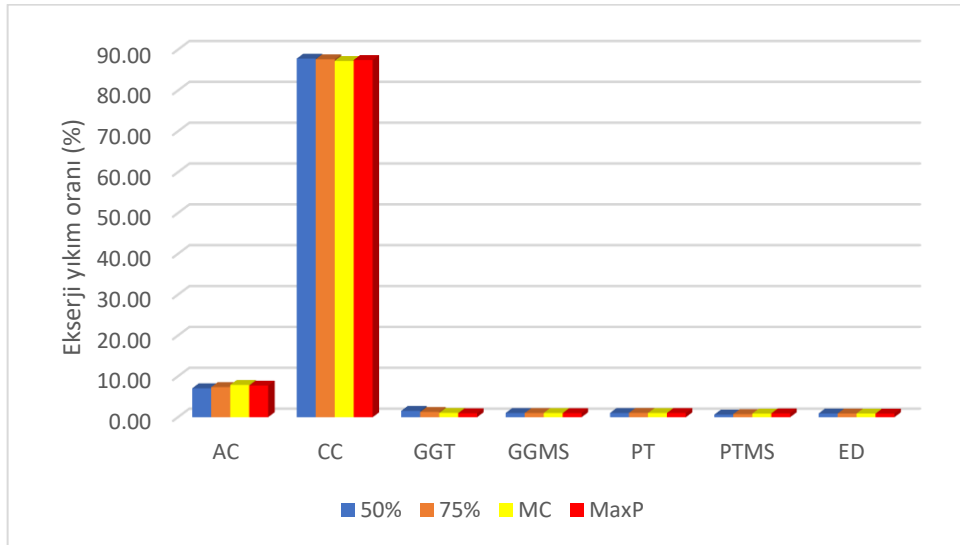
	Motor kısmı	Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi	Sürdürülebilir verimlilik faktörü	EXCEM (kWh/\$)
		ExSI	SEF	Rex
%50 Güç	AC	25.24	11.62	0.30
	CC	1.22	2.22	3.74
	GGT	123.67	54.64	0.07
	GGMS	190.12	81.96	0.04
	PT	185.76	41.46	0.04
	PTMS	301.95	65.18	0.03
	EDN	210.33	60.59	0.04
	TSE	0.26	1.26	4.26
%75 Güç		ExSI	SEF	Rex
	AC	25.06	11.10	0.40
	CC	1.32	2.32	4.72
	GGT	155.84	65.61	0.07
	GGMS	198.03	81.85	0.05
	PT	188.49	47.23	0.06
	PTMS	265.92	64.84	0.04
	EDN	223.79	62.60	0.05
	TSE	0.31	1.31	5.39
%100 Güç		ExSI	SEF	Rex
	AC	24.34	10.55	0.53
	CC	1.44	2.44	5.86
	GGT	200.96	81.83	0.07
	GGMS	203.47	81.84	0.07
	PT	202.31	54.87	0.07
	PTMS	239.33	63.57	0.06
	EDN	235.22	66.12	0.06
	TSE	0.35	1.35	6.72
MaxP		ExSI	SEF	Rex
	AC	25.51	10.36	0.59
	CC	1.50	2.50	6.71
	GGT	221.77	84.40	0.07
	GGMS	217.20	81.72	0.08
	PT	212.60	59.25	0.08
	PTMS	230.71	63.14	0.07
	EDN	242.32	69.21	0.07
	TSE	0.36	1.36	7.68

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Bu tezde, kompresör, yanma odası, gaz generatör türbini, güç türbini, egzoz nozul duct, gaz generatör mekanik şaftı ve power türbin mekanik şaft kısımlarının termodinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada dört farklı çalışma modu (%50 Güç, %75 Güç, %100 Güç ve Maksimum Güç) kullanılarak şaft gücü sırasıyla 531.76 kW, 789.92 kW, 1123.84 kW ve 1359.2 kW'a çıkarılmıştır. Bu süreçte yakıt akış debisi 0.0555 kg/s, 0.073 kg/s, 0.0954 kg/s ve 0.112 kg/s'ye yükselmiştir. Yakıt akışındaki bu değişime bağlı olarak ortaya çıkan termodinamik, sürdürülebilirlik, çevresel ve ekonomik parametreler, Tablo 4.14-4.17'de gösterildiği gibi her bir alt sistem ve motor için ayrı ayrı hesaplanmıştır.



Şekil 5.1. Ekserji yıkımı



Şekil 5.2. Ekserji yıkım oranı

Bu sonuçlara göre, TSE'nin enerji verimliliği dört test modu için sırasıyla %22.22, %25.09, %27.32 ve %28.14 olarak hesaplanmıştır. TSE'nin ekserji verimliliği ise sırasıyla %20.93, %23.64, %25.73 ve %26.51 olarak bulunmuştur.

Yapılan literatür taramasında, önceki çalışmalarda General Electric CT7 Turboprop motorunun ekserji verimi en yüksek %30 olarak, bir başka çalışmada CT7 Turboprop motorunun ekserji verimi %29.2 olarak, Rolls-Royce/Allison T56 Turboprop motorunun ekserji verimi %23.8 olarak, Turbomeca/Safran Makila Turboşaft motorunun ekserji verimi %27.5 olarak rapor edilmiştir. Başka bir çalışmada Makila motorunun ekserji verimi %31, diğer bir çalışmada ise %23.72 olarak bulunmuştur. Ayrıca, Pratt Whitney PT-62 Turboprop motorunun ekserji verimi %16.63 olarak belirlenmiştir (Aydın vd., 2012; Aydın vd., 2013; Ballı ve Hepbaşlı, 2013; Turan ve Aydın, 2016; Coban, Colpan, ve Karakoc, 2017; Ballı, 2023; Ballı, 2017).

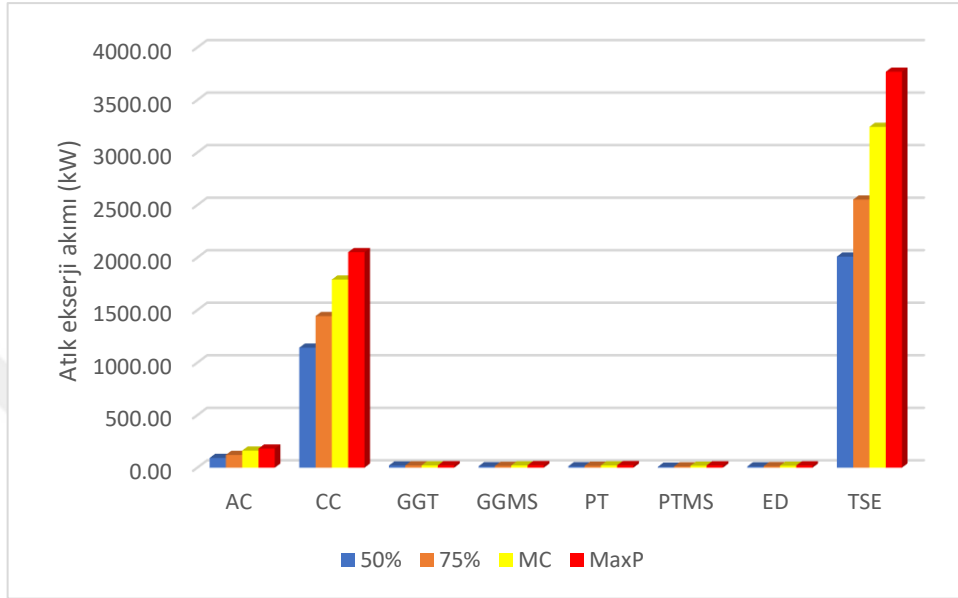
Bu çalışma ile elde edilen ekserji verimlerinin, genel olarak diğer turboprop/turboşaft grubu gaz türbin motorlarının ekserji verimlerine yakın olduğu söylenebilir. Ayrıntılı bilgi için Şekil 5.5'e bakabilirsiniz.

Özgül yakıt tüketimi değerleri Tablo 4.3'de görüldüğü gibi dört test modu için 37.57 kg/kW, 33.27 kg/kW, 30.55 kg/kW ve 29.66 kg/kW olarak hesaplanmıştır.

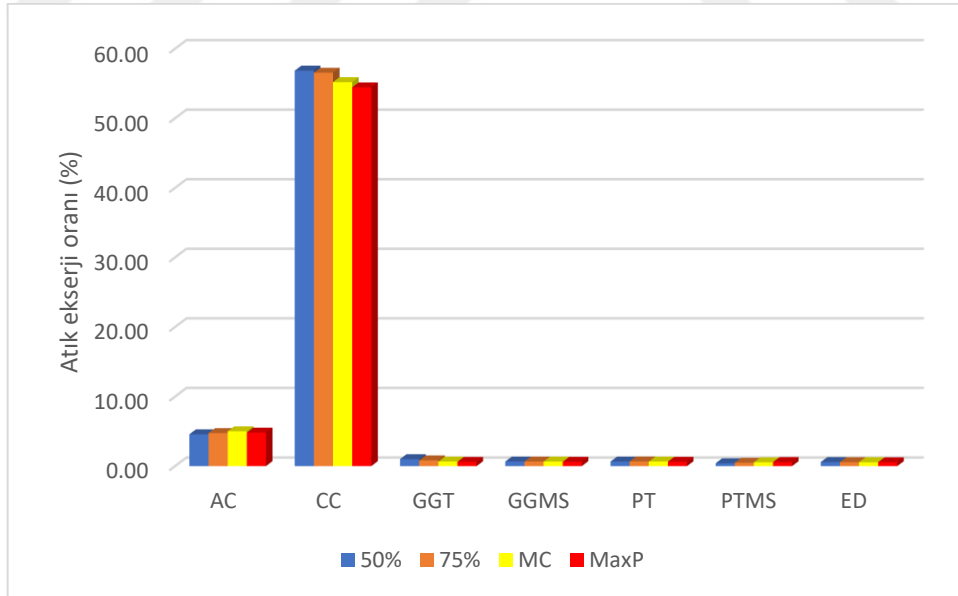
Ekserji yıkımı oranı (Exergy destruction rate) termodinamik ve enerji hesaplamalarında kullanılan bu oran ekserji yakıt ile ekserji ürün arasındaki fark yada sıcaklık ile entropi üretiminin çarpımından türetilmiştir. Termodinamik alanında kullanılan bu terim sistemdeki ekserji kayıplarını (bir enerji formunun maksimum yararlı iş üretebilme potansiyelinin kaybını) ifade eder. Geri döndürülemeyen süreçlerin sonucu olan ekserji yıkımı genel olarak entropi artışıyla ilişkilendirilir. Geri döndürülemez süreçler deyince ise sürtünme, ısı transferi sırasında meydana gelen sıcaklık farkları, sistemle çevre arasındaki uyumsuzluklar söylenebilir.

Bu çalışmada en büyük ekserji yıkımı yanma odasında tespit edilmiştir. Motor gücü artarken TSE ekserji yıkımı 1142.13 kW, 1443.22 kW, 1790.22 kW ve 2051.50 kW olarak hesaplanmıştır. Yanma odasının, en yüksek ekserji yıkımına sahip olduğu ve ekserji yıkım oranı %87.79, %87.64, %87.21 ve %87.46 olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 ekserji yıkımını ve ekserji yıkım oranları detaylı şekilde göstermektedir.

Atık ekserji akımı TSE için güç arttıkça sırasıyla 2009.05 kW, 2552.05 kW, 3243.61 kW ve 3768.21 kW olarak hesaplanmıştır. Atık ekserji oranı ise motor gücü arttıkça %56.85, %56.55, %55.19 ve %54.44 olarak en yüksek yanma odasında hesaplanmıştır. Ayrıntılı bilgi için Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'e bakabilirsiniz.



Şekil 5.3. Atık ekserji akımı

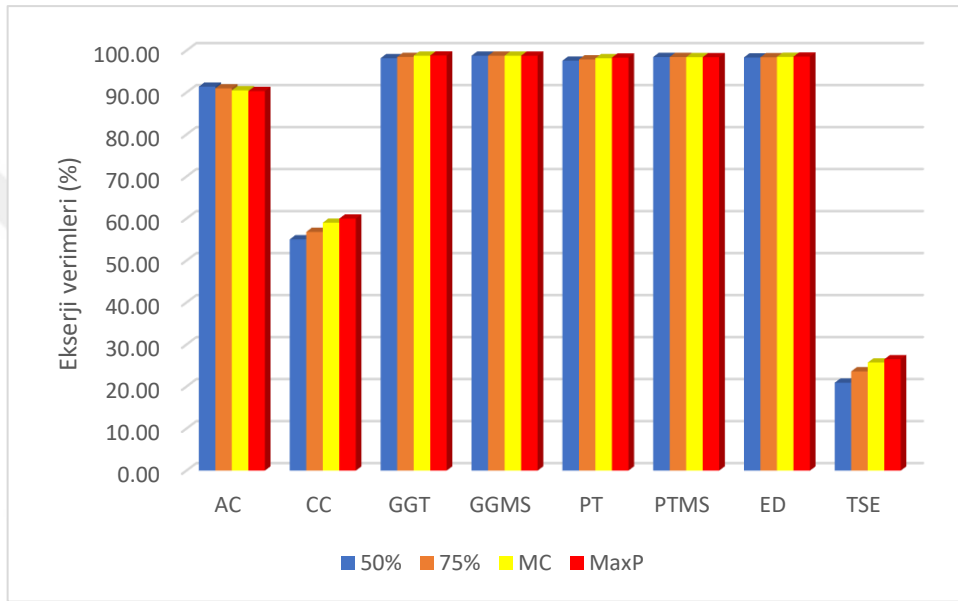


Şekil 5.4. Atık ekserji oranı

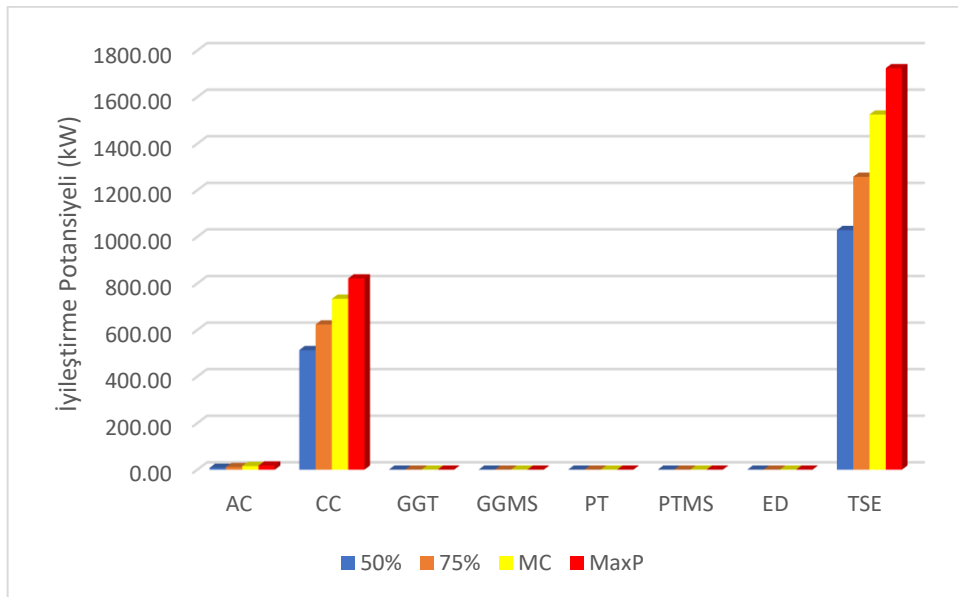
Alt bileşenlerin ekserji verimliliği ve ekserji yıkımı ayrıntılı olarak incelendiğinde, ekserji iyileştirme potansiyeli (Exergy improvement potential) hesaplanabilir. Bu kavram, sistemin mevcut enerji ve ekserji verimliliği seviyelerine bağlı olarak ne kadar iyileştirilebileceğini gösterir. Ekserji iyileştirme potansiyeli, enerji

dönüşüm süreçlerindeki kayıpları azaltma ve sistem performansını artırma potansiyelini değerlendirmek için kullanılır.

TSE için bu değer motor gücünün artmasıyla 1028.72 kW, 1257.55 kW, 1524.56 kW ve 1723.89 kW olarak hesaplanmıştır. Alt bileşenlerde ise en yüksek iyileştirme potansiyeli yanma odası ve kompresör kısmında tespit edilmiştir bu değerler yanma odası için 513.40 kW ile 820.81 kW arasında kompresör için 7.92 kW ile 17.52 kW arasında bulunmuştur. Ayrıntılı bilgi için Şekil 5.6'ya bakabilirsiniz.

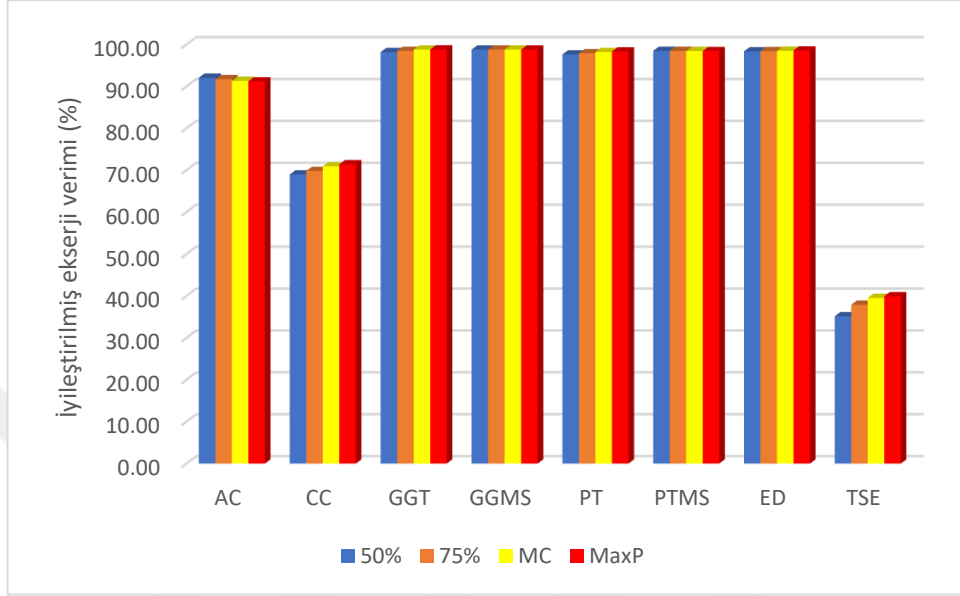


Şekil 5.5. Ekserji verimleri

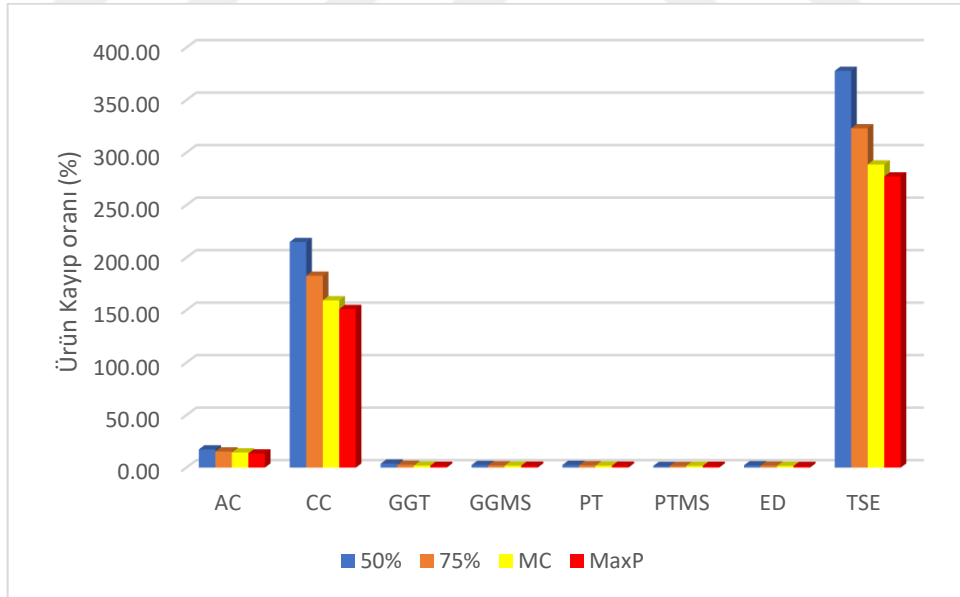


Şekil 5.6. İyileştirme potansiyeli

İyileştirilmiş ekserji verim değerleri TSE için sırasıyla %35.17, %37.90, %39.53 ve %39.94 olarak hesaplanmıştır. Ayrıntılı bilgi için Şekil 5.7'ye bakabilirsiniz.



Şekil 5.7. İyileştirilmiş ekserji verimleri

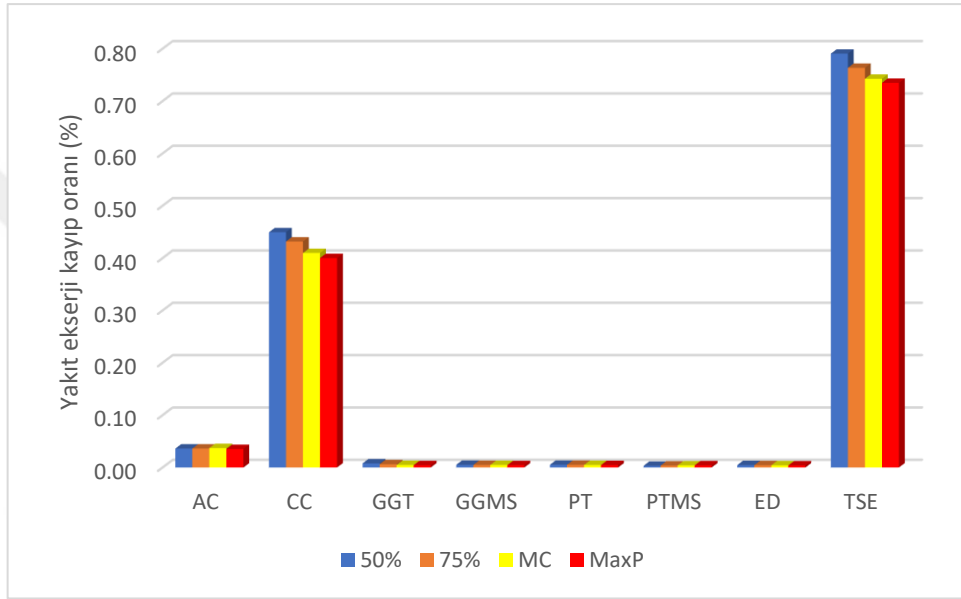


Şekil 5.8. Ürün kayıp oranı

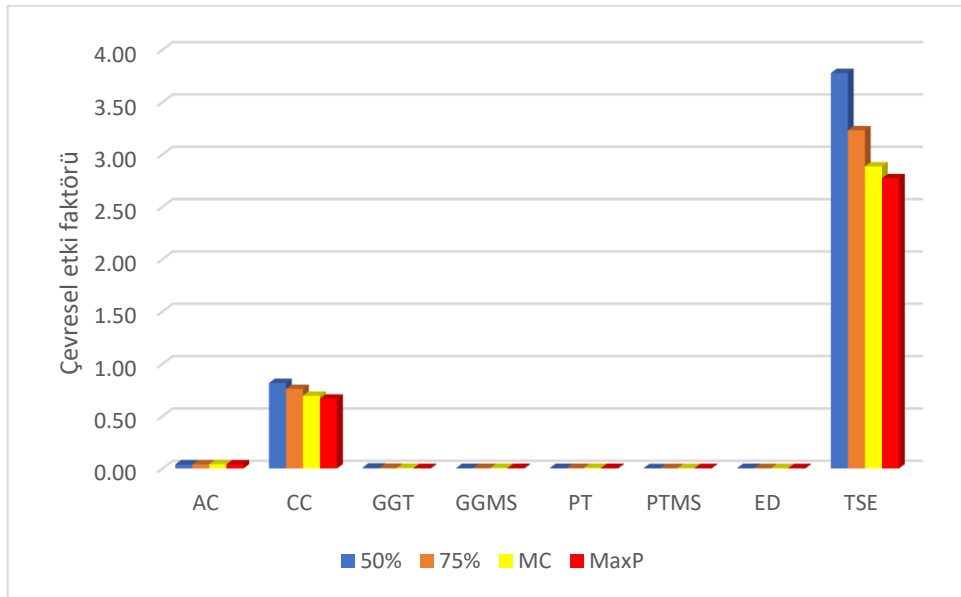
Bir diğer ekserji ölçüm değeri, ürün kayıp oranı olarak adlandırılır. Ürün kayıp oranı, sistemdeki toplam ekserji yıkımları ve kayıplarının, ürün ekserjisiyle kıyaslanmasıdır. TSE motoru için bu değer, motorun güç çıktısının artmasıyla ters orantılı olarak değişim göstermektedir. Bu oran, sırasıyla %377.81, %323.08, %288.62

ve %277.24 olarak hesaplanmıştır. Yanma odasında ise ürün kayıp oranının %214.78'den %150.93'e düştüğü tespit edilmiştir.

Bir diğer ekserji parametresi olan yakıt ekserji kayıp oranı, yakıt ekserjisinin ne kadarının atık ekserjiye dönüştüğünü ifade etmektedir. Yanma odası için bu oran %45 ile %40 arasında değişmektedir. TSE motoru genelinde ise yakıt ekserji kayıp oranı sırasıyla %79, %76, %74 ve %73 olarak hesaplanmıştır. Ayrıntılı bilgi için Şekil 5.9'a bakabilirsiniz.



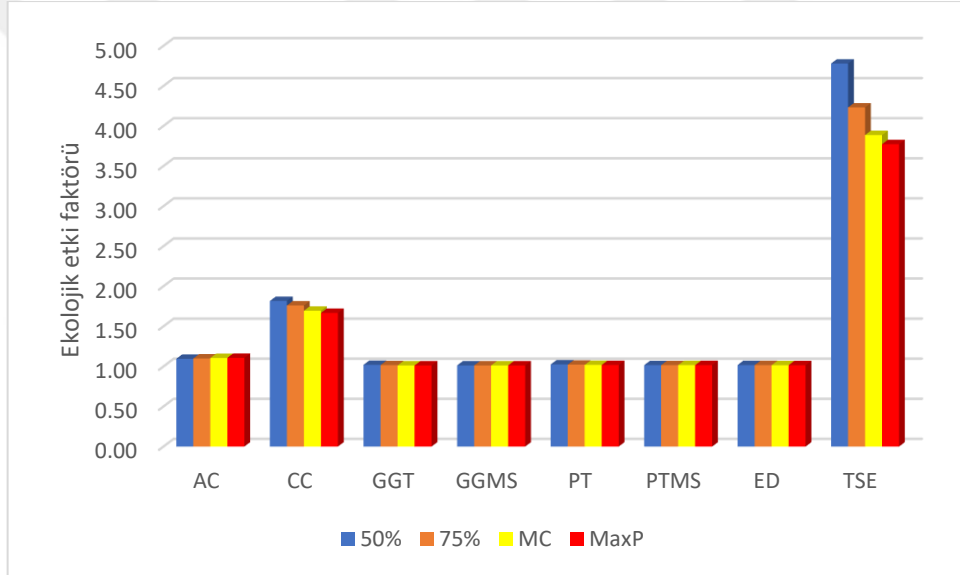
Şekil 5.9. Yakıt ekserji kayıp oranı



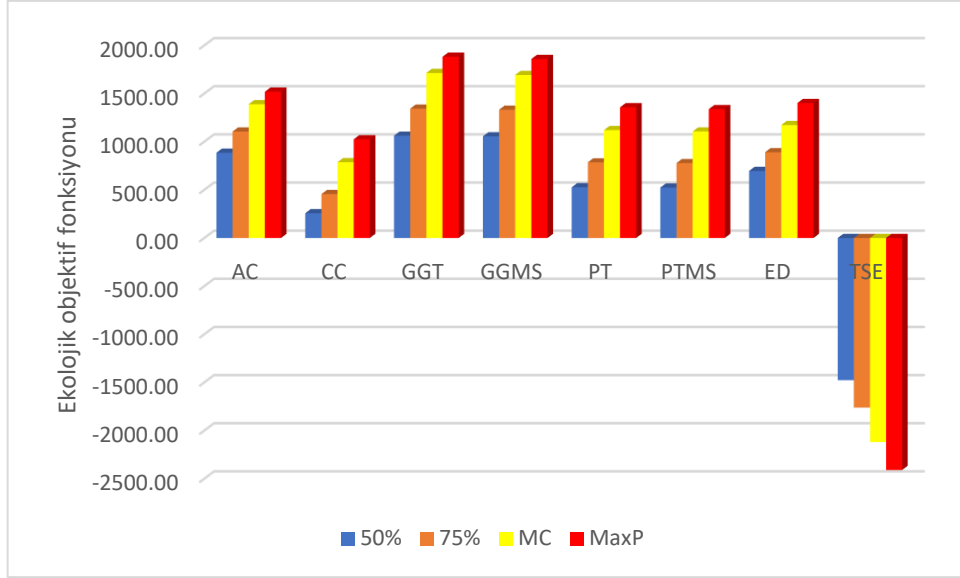
Şekil 5.10. Çevresel etki faktörü

Çevresel etki faktörü ve ekolojik etki faktörü değerleri, motor RPM’i arttıkça değişim göstermektedir. Yanma odası için çevresel etki faktörünün 0.82’den 0.67’ye gerilediği görülmektedir. Benzer şekilde, yanma odası için ekolojik etki faktörü de 1.82’den 1.67’ye düşmüştür.

TSE motoru için çevresel etki faktörü, dört test modu (%50 Güç, %75 Güç, %100 Güç ve Maksimum Güç) için sırasıyla 3.78, 3.23, 2.89 ve 2.77 olarak hesaplanmıştır. TSE’nin ekolojik etki faktörü ise aynı test modları için sırasıyla 4.78, 4.23, 3.89 ve 3.77 olarak bulunmuştur. Diğer alt bileşenlerin çevresel ve ekolojik etki faktörleriyle ilgili detaylı bilgi için Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’e bakabilirsiniz.



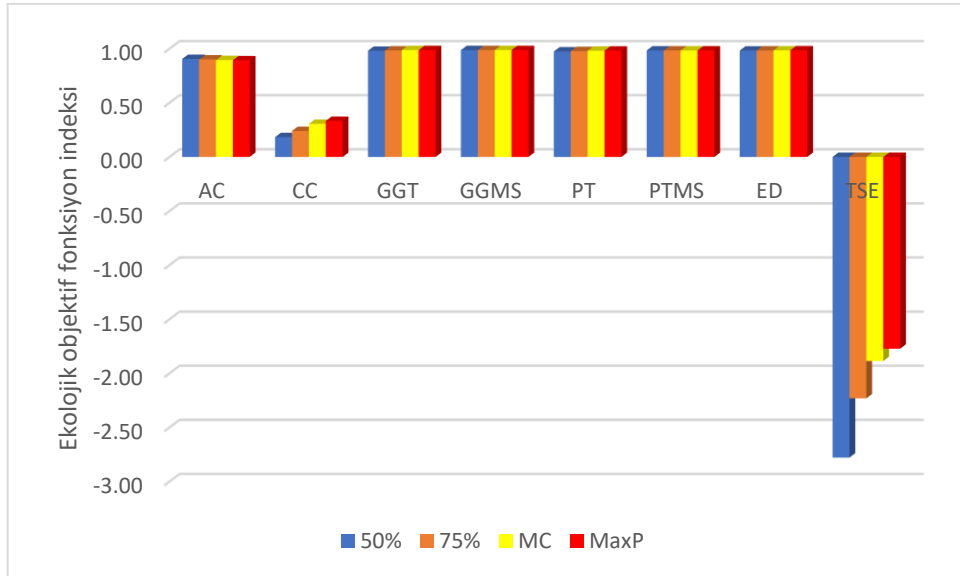
Şekil 5.11. Ekolojik etki faktörü



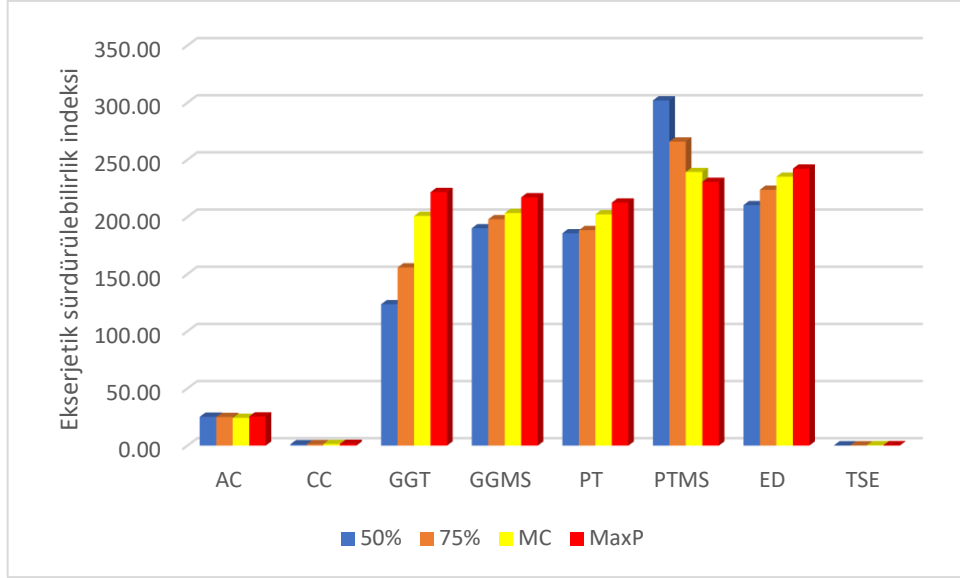
Şekil 5.12. Ekolojik objektif fonksiyonu

Ekolojik objektif fonksiyonu (EOF) değerleri TSE'nin değişen RPM değerlerine göre sırasıyla -1477.29, -1762.13, -2119.77 ve -2409.01 olarak hesaplanmıştır. Ayrıntılı bilgi için Şekil 5.12'ye bakabilirsiniz.

Ekolojik objektif fonksiyon indeksi (EOFI) TSE'nin değişen RPM değerlerine göre sırasıyla -2.78, -2.23, -1.89 ve -1.77 olarak hesaplanmıştır. Ayrıntılı bilgi için Şekil 5.13'e bakabilirsiniz.



Şekil 5.13. Ekolojik objektif fonksiyon indeksi



Şekil 5.14. Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi

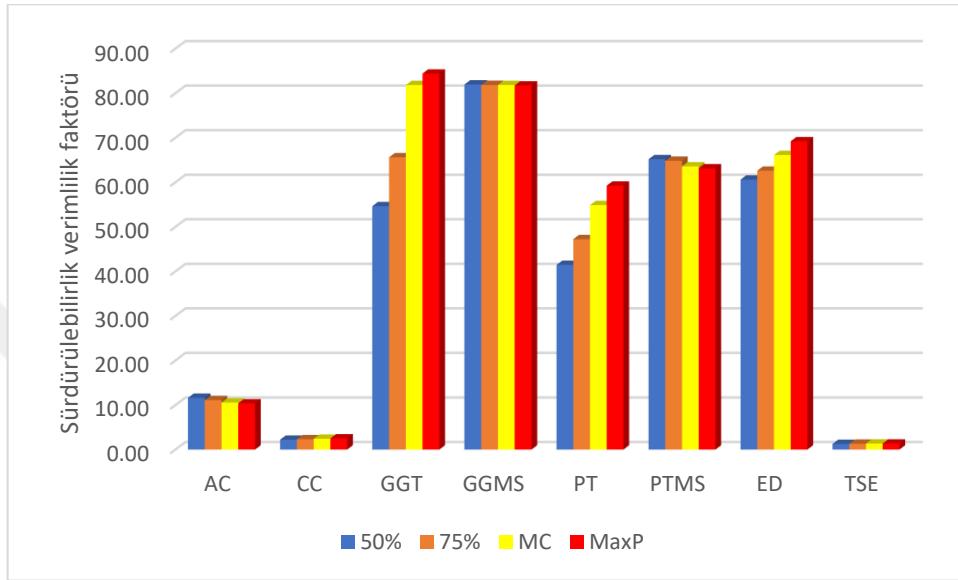
Sürdürülebilirlik değerleri olan Ekserjetik Sürdürülebilirlik İndeksi (ESI) ve Sürdürülebilirlik Verimlilik Faktörü (SEF), enerji ve ekserji verimliliği kavramlarını sürdürülebilirlik çerçevesinde değerlendiren parametrelerdir.

ESI, bir sistemin ekserji tüketimini ve çevre üzerindeki etkisini ölçerek sistemin enerji dönüşüm süreçlerinin sürdürülebilirliğini analiz etmek için kullanılır. Bu değer, ekserji verimliliğinin yakıt atık ekserji oranı ile ilişkisinden hesaplanır. Yüksek bir ESI değeri, sistemin hem ekserji açısından verimli hem de çevre dostu olduğunu gösterirken, düşük bir ESI değeri sistemin sürdürülebilir olmadığını işaret eder.

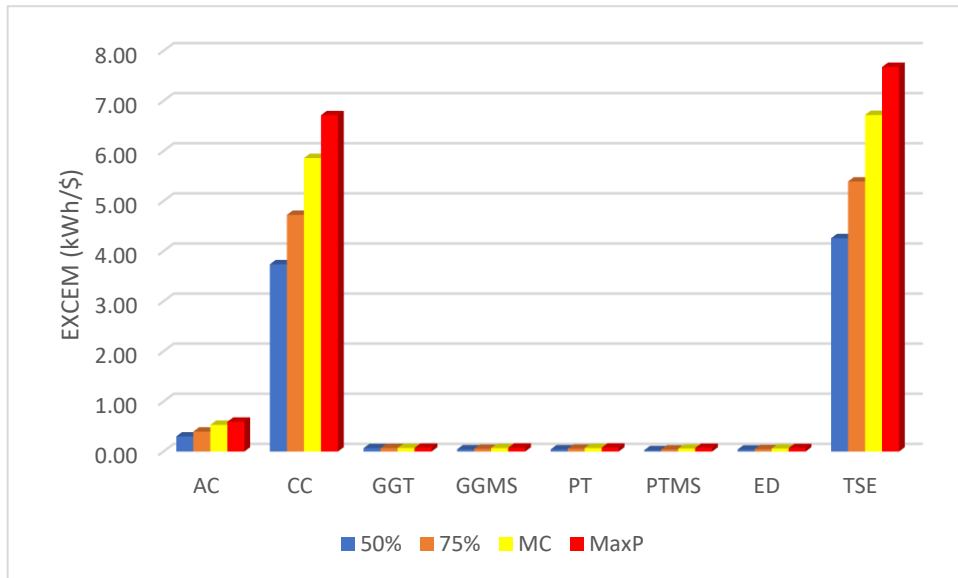
TSE motoru için ESI değeri, artan güç modlarına paralel olarak sırasıyla 0.26, 0.31, 0.35 ve 0.36 olarak hesaplanmıştır. Yanma odası için bu değer 1.22 ile 1.5 arasında değişirken, en yüksek değer Power türbin mekanik şaftı için 301.95 ile 230.71 arasında hesaplanmıştır.

Sürdürülebilirlik Etki Faktörü (SEF), bir sistemin çevresel ve ekolojik etkilerini ölçen ve sürdürülebilirlik performansını değerlendiren bir parametredir. Genel olarak, sistemin ürettiği toplam faydanın, çevreye verdiği toplam zarara oranı şeklinde tanımlanabilir. SEF değeri ne kadar yüksekse, sistemin sürdürülebilirlik açısından o kadar olumlu bir etkisi olduğu söylenebilir.

TSE motoru için SEF değeri, artan güç modları için sırasıyla 1.26, 1.31, 1.35 ve 1.36 olarak hesaplanmıştır. Yanma odası için SEF değeri 2.22 ile 2.5 arasında değişirken, en yüksek değer Maksimum Güç modunda Gaz generatör türbini kısmında 84.40 olarak bulunmuştur. Diğer alt bileşenler için ve ayrıntılı bilgi için Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'e bakabilirsiniz.



Şekil 5.15. Sürdürülebilirlik verimlilik faktörü



Şekil 5.16. Ekserji maliyet enerji kütle analizi

Bu çalışmada analiz edilen son parametre, EXCEM (Ekserji Maliyet Enerji Kütle Akışı) değeri olmuştur. Bu parametre, bir sistemin ekonomik ve termodinamik

performansını değerlendirmek için kullanılan önemli bir termoekonomik parametredir. Belirli bir maliyet karşılığında ne kadar faydalı ekserji üretildiğini ifade eder ve enerji sistemlerinin ekonomik verimliliğini ölçmek amacıyla kullanılır. Ekserji yıkımının, sistemin toplam değerine oranlanarak hesaplanır. Ayrıca, enerji ve kaynak kullanımını optimize etmek, ekonomik maliyetleri düşürmek ve iyileştirme fırsatlarını tespit etmek için kullanılır. Yüksek EXCEM değerleri, sistemin ekonomik verimliliğinin düşük olduğunu veya maliyetlerin yüksek olduğunu gösterirken, düşük EXCEM değerleri sistemin ekonomik verimliliğinin yüksek olduğunu ifade eder. Bu çalışmada, TSE için artan güç modlarında sırasıyla 4.26 kWh/\$, 5.39 kWh/\$, 6.72 kWh/\$ ve 7.68 kWh/\$ olarak hesaplanmıştır. En yüksek değerlere sahip alt bileşen olan yanma odası için ise, artan güç değerleri ile birlikte sırasıyla 3.74 kWh/\$, 4.72 kWh/\$, 5.86 kWh/\$ ve 6.71 kWh/\$ olarak hesaplanmıştır. Ayrıntılı bilgi için Şekil 5.16'ya bakabilirsiniz.

Bu çalışma, askeri ve ticari havacılık sektörlerinde kendini kanıtlamış, kutuplardan çöl koşullarına kadar zorlu hava koşullarında aktif olarak kullanılan orta büyüklükteki helikopterlere güç veren General Electric firmasının ürettiği T700 Turboşaft motorunun ve ana bileşenlerinin farklı çalışma modlarında (%50 Güç, %75 Güç, %100 Güç ve Maksimum Güç) termodinamik, sürdürülebilirlik ve termoekonomik analizlerini gerçekleştirmiştir. İlk olarak, Tablo 4.4'de yer alan motor çevrimi verileri olan basınç, sıcaklık, hava ve yakıt kütle akışları ile şaft beygir gücü değerleri test hücresinden temin edilmiştir. Daha sonra ekserji hesaplamaları yapılarak motorun ve ana komponentlerinin ekserji verimleri, ekserji yıkım oranları, ekserji iyileştirme potansiyelleri, iyileştirilmiş verimleri, çevresel, ekolojik ve sürdürülebilirlik etki faktörleri ve birim maliyet başına üretilen ekserji gibi değerler hesaplanmıştır.

Motor ekserji verimi en iyi Maksimum Güç modunda %26.51 olarak hesaplanırken, motorun iyileştirilmiş ekserji verimi ise %39.94 olarak hesaplanmıştır. Alt bileşenler arasında ise gaz jeneratör türbini ve güç türbini verimleri yaklaşık %98 oranında yüksek çıkmasına rağmen, ekserji verim oranı en düşük olan bileşen yanma odası olmuştur ve bu değer %55.05 ile %59.99 arasında değişmektedir.

Tablo 5.1. CT7-9C Turboprop motoru ile T700-701C Turboşaft motorunun maksimum güç modunda iken ekserji verimlerinin karşılaştırması

Komponent	$\eta_{ex}(\%)$	$\eta_{ex}(\%)$
	T700-701C Turboşaft motor (Bu çalışma)	CT7-9C Turboprop motor (Aydın vd., 2012)
Kompresör (AC)	90.35	90.6
Yanma odası (CC)	59.99	79.9
Gaz generatör türbin (GGT)	98.82	96.2
Power türbin (PT)	98.31	95.2
Egzoz nozul duct (EDN)	98.56	98.1
Motor	26.51 (1359.2 kW-şaft gücü)	30 (1400 kW-şaft gücü)

Sikorsky S70 helikopterinde kullanılan T700-701C Turboşaft motoru ile benzer özellikler taşıyan Casa CN 235 Nakliye uçaklarında kullanılan CT7-9C Turboprop motorunun Tablo 5.1’de ekserji verimleri (Aydın vd., 2012) göz önüne alındığında ve iki motor birbirleriyle karşılaştırıldığında şu sonuçlara ulaşılmıştır.

CT7-9C Turboprop motorunun kompresör verimi, T700-701C Turboşaft motorunun kompresör verimine yakın bulunmuştur. Bunun nedeni, her iki motorda da beş kademe aksenal ve bir kademe radyal olmak üzere toplam altı kademedan oluşan benzer bir kompresör tasarımının kullanılmasıdır.

CT7-9C Turboprop motorunun yanma odası verimi T700-701C Turboşaft motorunun yanma odası veriminden yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi, CT7-9C Turboprop motorunun yanma odası çıkışında ulaştığı maksimum sıcaklık yaklaşık 1547 K iken T700-701C Turboşaft motorunun yanma odası çıkış sıcaklığı 1455 K’dir.

CT7-9C Turboprop motorunun gaz generatör türbin verimi ve power türbin verimi, T700-701C gaz generatör türbin verimi ve power türbin veriminden düşük çıkmıştır. Bunun sebebi, tersinmezlik oranının CT7-9C Turboprop motorunda daha yüksek çıkmasıdır. Bu değerler CT7-9C Turboprop motorunun gaz generatör türbini için %10.5 ve power türbini için %7.4 olarak hesaplanırken T700-701C Turboşaft motorunun gaz generatör türbini için %0.97, power türbini için %1.01 olarak hesaplanmıştır.

CT7-9C Turboprop motorunun egzoz nozul duct kısmı ile T700-701C Turboşaft motorunun egzoz nozul duct kısmı ekserji verimleri birbirlerine yakın çıkmıştır. Bunun nedeni, her iki motorun egzoz nozul duct kısımlarının giriş ve çıkış konumlarındaki basınç ve sıcaklık değerlerinin çok fazla değişmemesidir.

CT7-9C Turboprop motorunun ekserji verimi %30 iken T700-701C Turboşaft motorunun ekserji verimi %26.51 olarak hesaplanmıştır. Gaz türbinli motorların ekserji verimleri, genel olarak sıkıştırma oranı, yanma odası verimi, türbin verimi, teknoloji ve malzeme özelliklerine bağlıdır. Bu çalışmada incelenen T700-701C Turboşaft motoru teknoloji ve malzeme özellikleri göz önüne alındığında CT7-9C Turboprop motoru ile benzer teknoloji ve malzeme özelliklerine sahiptir. Her iki motorun kompresör verimleri birbirlerine yakın olmasına rağmen T700-701C motorunun yanma odası veriminin düşük olması genel motor veriminide aşağı çekmiştir.

Bu çalışmanın yöntem ve bulguları, helikopterlerde kullanılan turboşaft motorların yanı sıra diğer benzer gaz türbini tabanlı motorların performansının değerlendirilmesi açısından da değerlidir. Gelecekteki araştırmalar, turboşaft motorların ileri ekserji ve daha gelişmiş ekonomik analizlerinin yapılmasına odaklanabilir.

KAYNAKÇA

- Ahrendts, J. (1980). Reference states. *Energy-Int.J.*, 5(667-677).
- Akdeniz, H. Y., & Ballı, Ö. (2021). Energetic and exergetic assessment of operating biofuel, hydrogen and conventional JP-8 in a J69 type of aircraft turbojet engine. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 146, 179-1721. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10879-z> adresinden alındı
- Aydın, H. (2012). Ticari Uçakların Ekserjetik Sürdürülebilirlik İndikatörlerinin geliştirilmesi. *Doktora Tezi*.
- Aydın, H., Turan, O., Midilli, A., & Karakoç, T. (2012). Exergetic and exergo-economic analysis of a turboprop engine: a case study for CT7-9. *Int. J. Exergy*, 11, 69-88 . International Journal of Exergy: <https://doi.org/10.1504/IJEX.2012.049089> adresinden alındı
- Aydın, H., Turan, O., Karakoç, T., & Midilli, A. (2013). Exergo-sustainability indicators of a turboprop aircraft for the phases of a flight. *Energy*, 58, 550-560 . Science Direct: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.076> adresinden alındı
- Aydın, H., Turan, O., Karakoç, T., & Midilli, A. (2015). Exergetic Sustainability Indicators as a Tool in Commercial Aircraft: A Case Study For A Turbofan Engine. *International Journal of Green Energy*, 12, 28-40 . International Journal of Green Energy: <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.889004> adresinden alındı
- Aygun, H. (2022). Thermodynamic, environmental and sustainability calculations of a conceptual turboshaft engine under several power settings. *Energy*, 245, 1-17. Science Direct: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123251> adresinden alındı
- Ballı, Ö. (2008). Kojenerasyon Sistemlerinin Enerji, Kullanılabilirlik (Ekserji) ve Ekserjiekonomik Analiz yöntemleri Kullanılarak Performans Değerlendirilmesi. *Doktora Tezi*.
- Ballı, Ö., Aras, H., Aras, N., & Hepbaşlı, A. (2008). Exergetic and exergoeconomic analysis of an Aircraft Jet Engine (AJE). *Int. J. Exergy*, 5, 567-581 . International Journal of Exergy: <https://doi.org/10.1504/IJEX.2008.020826> adresinden alındı
- Ballı, Ö., & Hepbaşlı, A. (2013). Energetic and exergetic analyses of T56 turboprop engine. *Scine Direct*, 73, 106-120. Science Direct: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.04.014> adresinden alındı
- Ballı, Ö., & Hepbaşlı, A. (2014). Exergoeconomic, sustainability and environmental damage cost analyses of T56 turboprop engine. *Energy*, 64, 582-600 . Science Direct: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.066> adresinden alındı

- Ballı, Ö. (2017). Advanced exergy analyses of an aircraft turboprop engine (TPE). *Energy Elsevier*, 124, 599-612. Science Direct: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.121> adresinden alındı
- Ballı, Ö., Ekici, S., & Karakoç, T. H. (2020). TF33 Turbofan Engine in Every Respect: Performance, Environmental and Sustainability Assessment. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 40, 1-13 . <http://dx.doi.org/10.1002/ep.13578> adresinden alındı
- Ballı, Ö., Özbek, E., Ekici, S., Midilli, A., & Karakoç, T. (2021). Thermodynamic comparison of TF33 turbofan engine fueled by hydrogen. *Fuel*, 306, 1-12 . Science Direct: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121686> adresinden alındı
- Ballı, Ö., Dalkıran, A., & Karakoç, T. H. (2021). Energetic, exergetic, exergoeconomic, environmental (4E) and sustainability performances of an unmanned aerial vehicle micro turbojet engine. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 93, 1254-1275 . 1254-1275 <http://dx.doi.org/10.1108/AEAT-03-2021-0088> adresinden alındı
- Ballı, Ö. (2022). İnsansız Hava Araçlarında Kullanılan Turbo Dizel Bir Havacılık Motorunun Enerji, Ekserji ve Eksejiekonomik Performansının Değerlendirilmesi. *Engineer and Machinery*, 63, 473-491. <https://doi.org/10.46399/muhendismakina.111975> adresinden alındı
- Ballı, Ö., & Çalışkan, H. (2022). Various Thermoeconomic Assesments Of A Heat And Power System With A Micro Gas turbine Engine Used For Industry. *Science Direct*, 252, 252/114984. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114984> adresinden alındı
- Ballı, Ö. (2023). Exergetic, sustainability and environmental assessments of a turboshaft engine used on helicopter. *Energy*, 276, 1-11 . Science Direct: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127593> adresinden alındı
- Bayraç, H., Çelikay, F., & Çildir, M. (2018). *Küreselleşme sürecinde sürdürülebilir enerji politikaları*. Bursa: Ekin yayınevi.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G., & Moran, M. (1996). *Thermal Design & Optimization*. ISBN: 978-0-471-58467-4.
- Chand, V. T., Sankar, B. R., & Chowdary, J. R. (2013). Exergy Analysis of Gas Turbine Power Plant. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 4, 3991-3993 <https://tarjomefa.com/wp-content/uploads/2017/09/7656-English-TarjomeFa.pdf>.
- Coban, K., Colpan, C. O., & Karakoc, T. H. (2017). Application of thermodynamic laws on a military helicopter engine. *Energy*, 140, 1427-1436 . <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.179> adresinden alındı
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). *Termodinamik Mühendislik Yaklaşımıyla Yedinci Baskı*. Ankara: Palme Yayınevi ISBN 9786053551621.

- Dagaut, P., & Cathonnet, M. (2006). The ignition, oxidation and combustion of kerosene: a review of experimental and kinetic modelin. *Progress in Energy and Combustion Science*, 32, 48-92 . <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.10.003> adresinden alındı
- Dinc, A., & Gharbia, Y. (2020). Exergy analysis of a turboprop engine at different flight altitude and speeds using novel consideration. *Int J Turbo Jet Eng*, 39, 599-604. <https://doi.org/10.1515/tjj-2020-0017> adresinden alındı
- Dinçer, İ., & Rosen, M. A. (2005). Thermodynamic aspects of renewables and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9, 169-189. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.02.002> adresinden alındı
- Dinçer, İ. (2007). Environmental and sustainability aspects of hydrogen and fuel cell systems. *Int. J. Energy Res.*, 31, 29-55 . <https://doi.org/10.1002/er.1226> adresinden alındı
- Ebadi, M., & Gorji-Bandpy, M. (2005). Exergetic Analysis of Gas Turbine Plant. *International Journal of Exergy*. 2(31-39). <https://doi.org/10.1504/IJEX.2005.006431> adresinden alındı
- Edwards, T., Bill, H., & Maurice, L. (2001). Properties and usage of Air Force fuel - JP-8. *AIAA Aerospace Sciences* (s. 498). Reno/Nevada: American Institute of Aeronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2001-498> adresinden alındı
- Ekici, S. (2015). Mini turbojet/turboprop motorun ileri ekserji analizi. *Yüksek lisans tezi*.
- Ekici, S., Şöhret, Y., & Karakoç, T. H. (2017). Turbojet Motorlar İçin Performans Değerlendirme Parametreleri. *Journal Of Aviation*, 1, 32-38 . <http://dx.doi.org/10.30518/jav.323866> adresinden alındı
- El-Sayed, A. F. (2006). *Aircraft propulsion and gas turbine engines*. New york: CRC Press <https://doi.org/10.1201/9781315156743>.
- Fallah, M., Siyah, H., Ghiasi, R. A., Mahmoudi, S., Yari, M., & Rosen, M. (2016). Comparison of different gas turbine cycles and advanced exergy analysis of the most effective. *Energy*, 116, 701-715. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.009> adresinden alındı
- Ibrahim, T. K., Basrawi, F., Awad, O. I., Abdullah, A. N., Naja, G., Mamat, R., & Hago, F. (2017). Thermal performance of gas turbine power plant based on exergy analysis. *Applied Thermal Engineering*, 115, 977-985. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.032> adresinden alındı
- Karakoç, T. H. (2008). *Gaz Türbinli Motorların Yakıt Sistemleri GTMYS*. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi. Sivil Havacılık Yüksekokulu Yayınları.

- Karakoç, T. H., & Turgut, E. T. (2008). *Gaz Türbinli Motor Sistemleri GTMS*. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi. Sivil Havacılık Yüksekokulu Yayınları.
- Koc, Y., Kose, O., & Yagli, H. (2019). Exergy analysis of a natural gas fuelled gas turbine based cogeneration cycle. *Int. J. Exergy*, 30, 103-125. <https://doi.org/10.1504/IJEX.2019.102162> adresinden alındı
- Kotas, T. (1995). *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis (Reprint Edn.)*. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company.
- Kover, A., & Kellner, T. (2024, 01 11). [www.ge.com/news/reports.stayin-alive-trusty-ge-chopper-engine-that-entered-service-when-the-bee-gees-ruled-the-charts-wins-new-1-billion-lease-on-life](https://www.ge.com/news/reports/stayin-alive-trusty-ge-chopper-engine-that-entered-service-when-the-bee-gees-ruled-the-charts-wins-new-1-billion-lease-on-life) adresinden alındı
- Landis, F. (15.12.2023). *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/technology/gas-turbine-engine> adresinden alındı
- Moran, M. (1982). *Availability analysis A Guide to Efficient Energy Use*. New jersey USA: Prentice Hall.
- Moran, M. (1999). *Engineering Thermodynamics Mechanical Engineering Handbook*. CRC Press LLC.
- Moran, M., & Shapiro, H. (2000). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics 4th ed.* John Wiley & Sons.
- Mousafarash, A., & Ameri, M. (2013). Exergy and exergo-economic based analysis of a gas turbine power generation system. *Journal of Power Technologies*, 93, 44-51. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=1cf6edbd31be639b8b99115dff3b5c5575dc3a6c> adresinden alındı
- Öymen, G., & Ömeroğlu, M. (2020). Yenilenebilir enerjinin sürdürülebilirlik üzerine rolü. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 19, 1069-1087. <https://doi.org/10.46928/iticusbe.769022> adresinden alındı
- Özdemir, K. (18.12.2023). [www.jetphotos.com/photo.https://www.jetphotos.com/photo/10927927](https://www.jetphotos.com/photo/10927927) adresinden alındı
- Rahman, M. M., Ibrahim, T. K., & Abdalla, A. N. (2011). Thermodynamic performance analysis of gas-turbine power plant. *International Journal of the Physical Sciences*, 6, 3539-3550 . <https://doi.org/10.5897/IJPS11.272> adresinden alındı
- Rosen, M. A., & Dinçer, I. (1999). Exergy Analysis of Waste Emissions. *Int. J. of Energy Research*, 23, 1153-1163 . [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-114X\(19991025\)23:13%3C1153::AID-ER545%3E3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-114X(19991025)23:13%3C1153::AID-ER545%3E3.0.CO;2-Y) adresinden alındı
- Rosen, M. A., & Dinçer, I. (2002). Exergy Cost Energy Mass Analysis System And Processes. *Energy Conversion and Management*, 44, 1633-1651. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00179-6](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00179-6) adresinden alındı

- Russell, L. D., & Adebisi, G. A. (1995). *Classical Thermodynamics*. Saunders College Publishing. ISBN:9780030753947 adresinden alındı
- S Manigandan, T. I. (2023). Role of hydrogen on aviation sector: A review on hydrogen storage, fuel flexibility, flame stability, and emissions reduction on gas turbines engines. *Science Direct*, 352. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129064> adresinden alındı
- Sochet, I., & Gillard, P. (2002). Flammability of kerosene in civil and military aviation. *Journal of Loss Prevention in the*, 15, 335-345 . [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(02\)00031-1](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(02)00031-1) adresinden alındı
- Sogut, M. Z., Yalcin, E., & Karakoc, T. H. (2017). Assessment of degradation effects for an aircraft engine considering exergy analysis. *Energy*, 140, 1417-1426. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.093> adresinden alındı
- Szargut, J., Morris, D., & Steward, F. (1988). *Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes*. Hemisphere Publishing Corporation.
- Şöhret, Y., & Karakoç, T. (2014). Gaz Türbinli Uçak Motorlarının Termodinamik Modellenmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1, 29-36. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/207522> adresinden alındı
- Turan, Ö. (2015). An exergy way to quantify sustainability metrics for a high bypass turbofan engine. *Energy*, 89, 722-736. Science Direct: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.04.026> adresinden alındı
- Turan, Ö., & Aydın, H. (2016). Numerical calculation of energy and exergy flows of a turboshaft engine for power generation and helicopter applications. *Energy*, 115, 914-923. ScienceDirect: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.070> adresinden alındı
- Turgut, E. T. (2007). Uçaklarda Kullanılan Gaz Türbinli Motorların Ekserjoekonomik Analizi. *Doktora Tezi*.
- Turgut, E. T., Karakoç, T. H., & Hepbaşlı, A. (2007). Exergetic analysis of an aircraft turbofan engine. *I.J. of Energy Research*, 31, 1383-1397. <https://doi.org/10.1002/er.1310> adresinden alındı
- Turgut, E. T., Karakoc, T. H., Hepbasli, A., & Rosen, M. A. (2009). Exergy analysis of a turbofan aircraft engine. *Int. J. Exergy*, 6, 181-199. <https://doi.org/10.1504/IJEX.2009.023997> adresinden alındı
- Yucer, C. T. (2016). Thermodynamic analysis of the part load performance for a small scale gas turbine jet engine by using exergy analysis method. *Energy*, 111, 251-259. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.108> adresinden alındı
- Yürekli, A. (2019). Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, 1-12 <https://www.eskisehir.edu.tr/Uploads/www/files/k%C4%B1lavuzlar/Eski%C5%9F>

9Fehir%20Teknik%20%C3%9Cniversitesi%20Lisans%C3%BCst%C3%BC%20Tez%20Yaz%C4%B1m%20K%C4%B1lavuzu.pdf.

http-1: https://airandspace.si.edu/collection-objects/general-electric-xt700-ge-700-turboshaft-engine/nasm_A19860224000 (Erişim tarihi: 01.09.2024).

http-2: <https://www.geaerospace.com/propulsion/military/t700> (Erişim tarihi 10.09.2024).

http-3: <https://web.itu.edu.tr/~yuceil/teaching/uck421/uck421-week1.pdf> (Erişim tarihi 21.09.2024).

http-4: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/f-35.html> (Erişim tarihi 01.11.2024).

https-5: <https://www.macrotrends.net/1369/crude-oil-price-history-chart> (Erişim tarihi 05.09.2023).

https-6: <https://www.nasdaq.com/articles/ge-secures-113-bln-contract-provide-t700-series-turbine-engines-us-army> (Erişim tarihi 21.06.2024).

https-7: <https://www.saab.com/products/saab-340> (Erişim tarihi 01.01.2024).

https-8: https://www.si.edu/object/general-electric-xt700-ge-700-turboshaft-engine%3Anasm_A19860224000 (Erişim tarihi 01.12.2024).

https-9: <https://www.skycoreaviation.com/sikorsky-helikopters/black-hawk-ge-t700-engine-by-skycore-aviation/> (Erişim tarihi 10.10.2024).

https-10: <https://www.vhpa.org/heliloss.pdf> (Erişim tarihi 01.09.2024).

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: : 0009-0000-0729-5858
Ad Soyad : Cengizhan GÖK
Yabancı Dil : İngilizce (2022/2 YÖKDİL 83.75)

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2013, Sabiha Gökçen ATL, Uçak Gövde Motor Bölümü
- 2020, Anadolu Üniversitesi, İşletme Fakültesi, İşletme Bölümü
- 2021, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- 2025, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Sivil Havacılık ABD. Sivil Havacılık Bölümü
- 2014, Turbofan Motor (F110) Söküm/Montaj/Keşif Teknisyeni MSB/AFGM/1. Hava Bakım Fabrika Müdürlüğü ESKİŞEHİR.
- 2017, Turboprop/Turboşaft Motor (CT7/T700/T56/TYNE-22) Söküm/Montaj/Keşif Teknisyeni MSB/AFGM/1. Hava Bakım Fabrika Müdürlüğü ESKİŞEHİR.
- 2023, Turboprop/Turboşaft MRO Mühendisi MSB/AFGM/1. Hava Bakım Fabrika Müdürlüğü ESKİŞEHİR.

Yayınları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- 2023, Bildiri, Hydrogen as the fuel of the future and hydrogen-powered aircraft, 14th International Exergy, Energy and Environment Symposium (IEEEES14), Tuzla, İstanbul, Türkiye
- 2023, Bildiri, The Importance of Exergy for Sustainability Aviation, International Symposium on Sustainable Aviation (ISSA23) , National Cheng Kung University, Tainan City, Taiwan

Mesleki Birlik/Dernek/Kuruluş Üyelikleri:

- 2023, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, ESKİŞEHİR.

