



**İŞ JETLERİNDE KULLANILAN BİR
TURBOPROP MOTORUN
SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ANALİZİ**

Yüksek Lisans Tezi

Tuna KARALI

Eskişehir 2019

**İŞ JETLERİNDE KULLANILAN BİR TURBOPROP MOTORUN
SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ANALİZİ**

Tuna KARALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ
(İkinci Danışman: Dr. Elif KORUYUCU)**

**Eskişehir
Eskişehir Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Ağustos 2019**

Bu tez çalışması BAP Komisyonu tarafından kabul edilen 1710F539 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

TUNA KARALI'nın "İş Jetlerinde Kullanılan Bir Turboprop Motorun Sürdürülebilirlik Analizi" başlıklı tezi 20.08.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Üye (Tez Danışmanı)

Üye

Üye

Unvan Adı Soyadı

:Prof.Dr.T.Hikmet KARAKOÇ

:Dr.Öğr.Üyesi İlkay ORHAN

:Dr.Öğr.Üyesi Işıl YAZAR

İmza



Prof.Dr. Murat TANIŞLI

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

FINAL APPROVAL FOR THESIS

This thesis titled “Sustainability Analysis of a Turboprop Engine Used in Business Jet” has been prepared and submitted by TUNA KARALI in partial fulfillment of the requirements in “Eskişehir Technical University Directive on Graduate Education and Examination” for the Degree of Master of Science in Department of Airframe and Powerplant Maintenance Department has been examined and approved on 20.08.2019

Committee Members

Title, Name and Surname

Signature

Member (Supervisor)

:Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ

Member

:Dr. Öğr. Üyesi İlkay ORHAN

Member

:Dr. Öğr. Üyesi Işıl YAZAR

Prof.Dr. Murat TANIŞLI
Institute of Graduate Programs

ÖZET

İŞ JETLERİNDE KULLANILAN BİR TURBOPROP MOTORUN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ANALİZİ

Tuna KARALI

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ağustos 2019

Danışman: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ

İkinci Danışman: Dr. Elif KORUYUCU

Termodinamik yasalar çerçevesinde geliştirilen ekserji analizleri ile icra edilen sürdürülebilirlik çalışmalarının asli amacı; çevresel negatifliklerin minimize edilmesini sağlamak ve endişeleri gidermektir. Bu çalışmada özellikle 2010’lu yıllar olmak üzere son 30 yıl içinde havacılık alanında yapılan sürdürülebilirlik çalışmaları incelenerek gerçekçi çıkarımların yapılması amaçlanmıştır. Bu maksatla 125’den fazla farklı uçak türünde kullanılmak için 47,500’den fazla üretilen, toplamda ise yaklaşık 400 milyon uçuş saatine ulaşmış PT6A motor ailesine ait bir turboprop motor enstrümanite edilerek motor üzerinde yapılan ekserji ve sürdürülebilirlik analizleri sunulmuştur. Bahse konu motorun 579 SHP güç değerleri için ekserji verimi $\psi=19.92$, atık ekserji oranı $r_{aex}=80.08$, ekserji yıkım faktörü $f_{exy}=52.89$, çevresel etki faktörü $r_{cef}=4.02$, ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi $\Theta_{esi}= 0.25$ olarak hesaplanmıştır. İlave olarak ise, pervane RPM’inin 64.50-65.50 aralığındaki serbest türbini izantropik veriminin %36.5-%39.5 olduğu bulunmuştur.

Anahtar Sözcükler: Ekserji, Sürdürülebilirlik, Turboprop

ABSTRACT

SUSTAINABILITY ANALYSIS OF A TURBOPROP ENGINE USED IN BUSINESS JET

Tuna KARALI

Department of Airframe and Powerplant Maintenance
Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, August 2019

Supervisor: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ
(Co-Supervisor: Dr.Elif KORUYUCU)

Main aims of the sustainability analysis and exergy analysis developed in terms of thermodynamic laws are minimise collecteral negativity and relieve anxieties. In this study, it is aimed to deduce realist conclusions by analyzing the studies conducted in last 30 years, especially after 2010. Exergy and sustainability analysis of the instrumentated turboprop engine belonging to PT6A family is presented in this study. The engine has been used on over 125 different aircraft types and has been produced more than 47,500 and has reached nearly 400 million flight hours. As a result of the analysis, for 579 SHP value of this engine, exergy efficiency $\psi = 19.92$, waste exergy ratio $r_{\text{aex}} = 80.08$, exergy destruction factor $f_{\text{exy}} = 52.89$, environmental impact factor $r_{\text{cef}} = 4.02$ and exergetic sustainability index $\Theta_{\text{esi}} = 0.25$ have been calculated. In addition, for the same SHP value, in the 64.50-65.50 RPM range, the isentropic efficiency of the engine has been found in the range of 36.5% to 39.5%.

Keywords: Exergy, Sustainability, Turboprop

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim esnasında bana her türlü desteği veren, yol gösteren saygıdeğer hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ'a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

İkinci danışmanlığımı sabırla üstlenen ve tezimin başarı ile tamamlanmasının baş mimarı olan Dr. Elif KORUYUCU'ya ve ihtiyaç duyduğum desteğini benden esirgemeyen Doç. Dr. Yasin ŞÖHRET'e çok teşekkür ederim.

Tezimi yazmaya başlamam için beni teşvik eden ve ilk kıvılcımı ateşleyen, sürekli uyarıları ile beni yönlendiren, bana ablalık yapan Doç. Dr. Eylem ŞİMŞEK'e, moralimin en düşük olduğu anlarda dahi enerjimi yükselterek devam etmemi sağlayan, sürekli yanımda yer alan saygıdeğer büyüğüm ve ablam Seyran GAMSIZ'a, Askeri Lise ve Harp Okulu yıllarından beri birlikte olduğum okul ve iş arkadaşlarım Yük. Müh. Hasan ÇAKIR ve Yük. Müh. M. Burak ÖZBİLGİN'e teşekkür ederim.

Kurduğumuz çalışma grupları ile başarıya giden yolda bana eşlik eden Dr. Müh. B. Berker TÜRKER ile kız kardeşlerim Elk. ve Hab. Müh. Rabiya KARALI TÜRKER ve geleceğin mühendisi Şahsenem Ceren KARALI'ya destek ve katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemi sağlayan, her zaman ve her yerde varlıklarını daima hissettiğim annem ve babam ile hayatıma renk katan ve bu yolda bana eşlik eden sevgili eşim Gamze'ye bana olan desteklerinden ötürü teşekkürlerimi sunarım.

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 ilke 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.



Tuna KARALI

STATEMENT OF COMPLIANCE WITH ETHICAL PRINCIPLES AND RULES

I hereby truthfully declare that this thesis is an original work prepared by me; that I have behaved in accordance with the scientific ethical principles and rules throughout the stages of preparation, data collection, analysis and presentation of my work; that I have cited the sources of all the data and information that could be obtained within the scope of this study, and included these sources in the references section; and that this study has been scanned for plagiarism with “scientific plagiarism detection program” used by Eskişehir Technical University, and that “it does not have any plagiarism” whatsoever. I also declare that, if a case contrary to my declaration is detected in my work at any time, I hereby express my consent to all the ethical and legal consequences that are involved.



Tuna KARALI

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	iii
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	vii
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	viii
İÇİNDEKİLER	x
TABLolar DİZİNİ	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
GÖRSELLERİN DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Önemi	1
1.2. Tezin Endüstriyel ve Ekonomik Yararları	1
1.3. Tezin Sosyal ve Çevresel Yararları	1
1.4. Tez Çalışma Planı	2
1.5. Literatür Taraması	2
2. TURBOPROP MOTOR TEORİSİ	16
2.1. Isı Motorlarının Tarihsel Gelişimi ve Sınıflandırılması	16
2.1.1. Dıştan yanmalı motorlar	16
2.1.2. İçten yanmalı motorlar	17
2.2. Gaz Türbinli Motor Teknolojisi, Tarihçesi ve Sınıflandırması	19
2.2.1. Turbojet	21
2.2.2. Turbofan	22
2.2.3. Turboşaft	23
2.2.4. Turboprop	24
2.3. Turboprop Motorlar ve Kullanım Alanları.....	24
2.4. Turboprop Motorlar ve Performans Değerlendirmesi	24
2.5. İdeal Turboprop Çevrim Analizi	27
2.6. Gerçek Turboprop Motor Çevrim Analizi	31

	Sayfa
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	33
3.1. İncelenen Motorunun Teknik Verileri (PT6A-20)	33
3.2. Motor Enstrümantasyonu	34
4. TERMODİNAMİK ANALİZ	36
4.1. Enerji Analizi	37
4.2. Ekserji Analizi	38
4.2.1. Giren ekserji	43
4.2.2. Net eksejik güç	44
4.2.3. Çıkan ekserji	44
4.2.4. Kimyasal ekserji	44
4.2.5. Termomekaniksel ekserji	45
4.2.6. Kayıp ekserji	45
4.2.7. Ekserji yıkımı	46
4.2.8. Ekserji verimi	46
4.3. Sürdürülebilirlik Analizi	46
4.3.1. Atık ekserji oranı	47
4.3.2. Ekserji yıkım faktörü	48
4.3.3. Çevresel etki faktörü	48
4.3.4. Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi	48
4.4. İzantropik Verim.....	48
4.4.1. Türbinin izantropik verimi	49
4.4.2. Kompresörün izantropik verimi	50
5. BULGULAR	51
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	59
KAYNAKÇA	60
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1. PT6A-20 motorunun teknik verileri	33
Tablo 3.2. PT6A-20 motorunun HP-RPM değerleri	34
Tablo 4.1. Kimyasal ekserjiler	45
Tablo 5.1. İlgili güç değerleri için hesaplanan sürdürülebilirlik göstergeleri	53
Tablo 5.2. Alçak basınç türbininin izantropik verimi.....	56
Tablo 5.3. Yüksek basınç türbininin izantropik verimi	57



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Tez çalışma planı	2
Şekil 2.1. Isı motorlarının sınıflandırılması	18
Şekil 2.2. Motor tipleri	19
Şekil 2.3. Gaz türbinli motorlar	20
Şekil 2.4. Turbojet motor	21
Şekil 2.5. Turbofan motor	22
Şekil 2.6. Turboşaft motor	23
Şekil 2.7. Turboprop motor	24
Şekil 2.8. Özgül itki karakteristikleri	26
Şekil 2.9. Motor Mach-irtifa bilgileri	26
Şekil 2.10. Gaz türbinli motor evreleri	28
Şekil 2.11. Motor çalışma evreleri	28
Şekil 2.12. Joule çevrimi	29
Şekil 2.13. Adyabatik kompresörlerde gerçek ve izantropik hal değişimlerinin T-s diagramları.....	30
Şekil 2.14. Adyabatik bir türbinde gerçek ve ideal değişimlerinin entalpi- entropi diyagramı	31
Şekil 3.1. Enstrümantasyon bileşenleri	35
Şekil 4.1. Enerji ve ekserjinin karşılaştırılması	36
Şekil 4.2. Yıllara sari ekserji ifadeleri	39
Şekil 4.3. Ekserji tanımlamaları	40
Şekil 4.4. Ekserji üçgeni	41
Şekil 4.5. Küresel sürdürülebilirlik faktörleri	42
Şekil 4.6. Sürdürülebilirliğin ekonomik, sosyal ve çevresel boyutları	46
Şekil 4.7. Sürdürülebilirliğin ekonomik, sosyal ve çevresel boyutlarının kendi aralarındaki ilişkisi	47
Şekil 5.1. Turboprop motorun şematik diagramı	51
Şekil 5.2. Atık ekserji oranları	54
Şekil 5.3. Ekserji yıkım faktörleri.....	54
Şekil 5.4. Çevresel etki faktörleri.....	55
Şekil 5.5. Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksleri.....	55

	Sayfa
Şekil 5.6. Ekserji verimleri.....	56
Şekil 5.7. Alçak Basınç Türbininin İzantropik Verimi (RPM- η_T)	57
Şekil 5.8. Yüksek Basınç Türbininin İzantropik Verimi (RPM- η_T)	58



GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 3.1. PT6A-20 motoru	34
----------------------------------	----



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

c	: Yakıttaki karbon sabiti
Δ	: Değişim miktarı
$\dot{E}$	: Enerji akımı veya birim zamandaki enerji miktarı (kW)
$\dot{E}_x$	: Ekserji akımı veya birim zamandaki ekserji miktarı (kW)
ε	: Özgül ekserji (kJ/kg)
f	: Faktör
g	: Yerçekimi ivmesi (m/s ²)
h	: Yakıttaki hidrojen sabiti, özgül entalpi (kJ/kg)
H	: Isıl değer (kJ/kg)
KE	: Kinetik enerji
m	: Kütle (kg)
$\dot{m}$	: Kütleli debi (kg/s)
o	: Yakıttaki oksijen sabiti
P	: Basınç (kPa)
PE	: Potansiyel enerji
$\dot{Q}$	: Isı akımı veya birim zamandaki ısı miktarı (kW)
r	: Oran (%)
$\bar{R}$	: Evrensel gaz sabiti (8.31447 kJ/kmolK)
s	: Özgül entropi (kJ/kgK), Yakıttaki sülfür sabiti
SHP	: Şaft beygir gücü
T	: Sıcaklık (°C veya K)
U	: İç enerji (kJ)
V	: Hız (m/s)
$\dot{W}$	: Güç (kW)
y	: Mol kesri (%)
z	: Yükseklik (m)
η	: Enerji verimi (%)
φ	: Kimyasal ekserji faktörü
ψ	: Ekserji verimi (%)
θ	: İndeks
0	: Referans ya da ölü hal

aex	: Atık ekserji
ç	: Çıkış
çef	: Çevresel etki faktörü
esi	: Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi
exy	: Ekserji yıkımı
fiz	: Fiziksel
g	: Giriş
i	: Herhangi bir gaz
kay	: Kayıp
KH	: Kontrol hacmi
kim	: Kimyasal
kn	: Kinetik
pt	: Potansiyel
sh	: Soğutma havası
tm	: Termomekaniksel
u	: Alt
y	: Yakıt
yık	: Yıkım

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı ve Önemi

Bu tezde iş jetlerinde kullanılan bir turboprop motor, termodinamiğin birinci ve ikinci yasa prensipleri doğrultusunda enerji, ekserji ve sürdürülebilirlik açılarından ele alınmıştır. Deneysel olarak incelenen çevrim parametreleri ve değerleri ölçülmüş, bununla birlikte daha önce belirtilmiş olan analizlerin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Günümüzde enerji kaynaklarının artan bir ivme ile tüketilmesi ve küresel ısınma gibi çevresel problemlerin gündemde olmasına bağlı olarak incelenen turboprop motorun performansının ve sürdürülebilirliğinin iyileştirilmesi önem taşımaktadır.

1.2. Tezin Endüstriyel ve Ekonomik Yararları

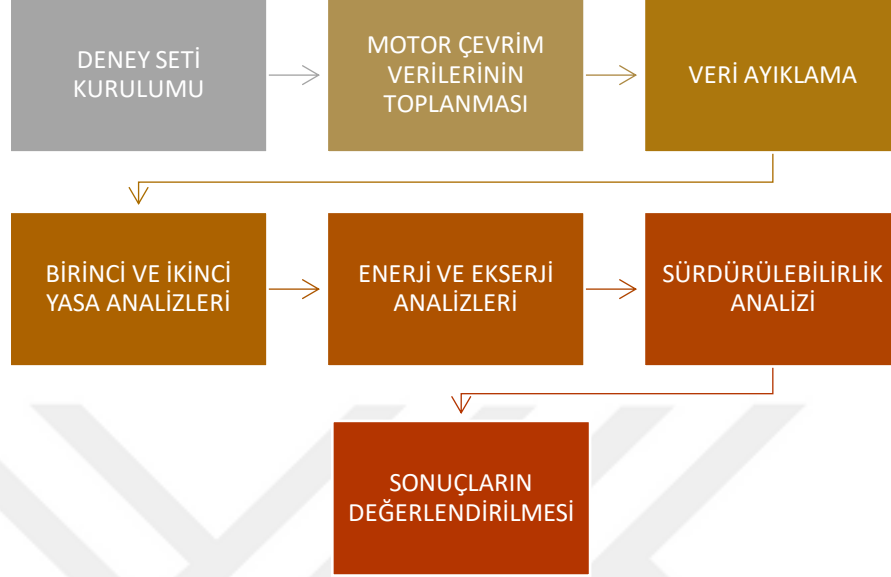
Bu tez çalışması kapsamında incelenmekte olan turboprop tipi uçak motoru yaygın olarak eğitim uçakları olmak üzere pek çok hava aracında kullanılmaktadır. Ülkemizde geliştirilmekte olan yerli ve milli hava aracı ve güç sistemleri çalışmalarına temel nitelikte olan bu çalışma ile ülkemizin ekonomik gelişimine katkı sağlaması hedeflenmektedir.

1.3. Tezin Sosyal ve Çevresel Yararları

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

1.4. Tez Çalışma Planı

Tez çalışma planı Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Tez Çalışma Planı

1.5. Literatür Taraması

Enerji, ekserji ve sürdürülebilirlik analizleri için yapılan açık literatürde yer alan çalışmalar aşağıda belirtilmiştir.

Wu (1991) basit içten tersinir bir Brayton gaz ısı motorunun güç optimizasyonunu ve analizini içeren bir çalışma neticesinde, güç optimizasyonunun gerçek bir ısı motorunun dizaynı ve mevcut Brayton güç santrallerinin performans karşılaştırmaları için bir temel sunduğunu belirtmiştir.

Van Gool (1992) endüstriyel proseslerin ekserji analizlerini örneklendirerek bir literatür taraması gerçekleştirmiş ve özellikle ikinci yasa ile entropinin dizayn proseslerinde sıklıkla kullanılmadığını belirtmiştir. Bu maksatla da ikinci yasa analizleri teriminin kaldırılmasını ve yerine ekserji analizlerinin kullanılmasını önermiştir.

Kanoğlu ve Çengel (1999) jeotermal güç jenerasyonu, ısıtma ve soğutma ile alakalı ekonomik değerlendirmelerin üretildiği bir çalışma ile tipik jeotermal kaynakların sahip olduğu ısıtma ve soğutma potansiyelin, mevcut jeotermal güç üretiminden çok daha büyük olabileceğini gözler önüne sermişlerdir. Öyle ki, sonraki yıllarda alternatif çevre dostu enerji yönetiminde yapılan çalışmalar için geliştirilebilir bir kaynak niteliği taşımaktadır.

Bejan ve Siems (2001) modern uçakların enerji sistemlerinin tasarımında ekserji analizi ile termodinamik eniyilemesine dayanan bir çalışma yapıldığını ve ekserji analizinin teorik sınır olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında, kademeli olarak soğutulan ve sistemden atılan sıcak gaz akışından maksimum ekserji elde etmek olduğu problemiyle çalıştıklarını ve bu kapsamda geliştirdikleri prensip ile uçak enerji sistemi tasarımları gibi tüm sistemlerin kurucu tasarım ilkesine ışık tutmaya çalışmışlardır.

Etele ve Rosen (2001) farklı çevre koşullarının etkilerini araştırmak için bir turbojet motora deniz seviyesinden 15,000 m'ye kadar değişen irtifalarda ekserji analizi uygulamışlardır. Yaptıkları analiz sonucunda deniz seviyesinde %16.9 olan ekserji verimliliğinin irtifa artışıyla birlikte azalarak %15.3'e düştüğünü bulmuşlardır.

Çengel vd. (2002) birbirinden farklı sistemlerin melezlenmesinin tersinmez bir proses olduğunu ve bazı entropileri ortaya çıkardığını ve böylece bazı ekserjilerin proses süresince yıkıldığını belirttikleri bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Ancak çalışmalarında, iki farklı sistemi termodinamiksel olarak kombinlenmesinin boyut olarak daha büyük olacağını ama ekserji bileşeninin çok daha küçük veya işe yarar olduğunu belirtmişlerdir.

Göğüş vd. (2002) bir sistemin ekserji dengesi kayıpların bulunmasına yardımcı olduğunu ve bu dengenin kurulumu ile çevresel koşulların değişimine bağlı olarak iyileştirme adımlarına ihtiyaç duyulduğu, bazı durumlar karşısında anılan etkilerin dikkate değer olduğu belirtilmiştir. Söz konusu çalışmada yapılan hesaplamalar ise ekserji dengesi için bir kontrol basamağı niteliğindedir.

Moorhouse ve Hoke (2002) yaptıkları çalışmada termodinamiğin ikinci yasası ile ekserji ve termoekonomi gibi yöntemleri kullanarak ulaştıkları sonuçları ve bu sonuçları bütün bir hava aracına entegre ederek değerlendirmelerini sunmuşlardır. Söz konusu çalışmada termal değişim analizi normalden düşük ve yüksek Mach değerlerinde kullanarak yapılmış ve yüksek Mach değerlerinde ulaşılan şoktan ziyade termal enerji ilavesi ile yok edilen ekserjinin potansiyel bir faydası olduğunu belirtmişlerdir.

Roth ve Mavris (2003) termodinamiğin ikinci yasasına dayanan yeni ve yenilikçi yaklaşımlar getirerek tasarımcılara yeni teknolojilerin etkisinde kapsamlı ve tutarlı bir şekilde yardım etmeyi amaçlamışlar. Söz konusu potansiyel çalışma yöntemleri, belirli bir teknoloji ile ilişkisi olan aerotermodinamik ve ağırlık yararlarını gerçek anlamda bir görüntü oluşumuna ve her bir faktörün sade bir şekilde hesaplanmasına izin vermektedir. Anılan çalışma Northrop F-5E uçaklarında uygulanan klasik itki problemi üzerine yapılmıştır.

Ordenez ve Bejan (2003) yayımladıkları çalışma ile çevresel kontrol sistemlerinin termodinamik optimizasyonu kapsamında minimum güç gereksinimi gerçekçi sınırlar ve minimum güç tüketiminde çalışmayı kolaylaştıran tasarım özellikleri olmak üzere iki temel konuyu işlemişlerdir. Çalışmalarında üç farklı modelleme ile çevresel kontrol sistemlerinin kabin içerisine verilen hava akımı sıcaklığının minimum güçte çalışması için eniyileme yapılabileceğini göstermişlerdir. Söz konusu çalışmada, tasarım modellerinden bağımsız olarak düzenlenmiş olan hava akımının sıcaklığının daha karmaşık ve gerçekçi tasarımlar için bir yönlendirme olduğu ve termodinamik eniyileme sonuçlarında kullanabileceğini belirtilmiştir.

Leo ve Perez-Grande (2005) uçak motorunun basınç değerlerini kullanarak kabine giren iklimlendirme akışının ekserji birim maliyetini elde etmiş ve çevresel kontrol sistemine bir bileşen olarak uygulayarak bir termoekonomik uygulama gerçekleştirmişlerdir. Bahse konu çalışma kapsamında gerçek cihazlar ile gerçek veriler elde edilmiş ve minimum maliyet nominal hava akışına yakın bir basınçta bulunmuştur. İlave olarak elde edilen ekonomik faktörlerin diğer sistemlere nazaran çok yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Riggins vd. (2006) teori metodoloji ve örnek uygulamalar ile tersinmezlik ve ısı açısından sistematik analiz geliştirmiş ve ortaya koymuşlardır. Çalışmalarında sabit özgül ısı ve Rayleigh ısı modelledikleri basitleştirilmiş hipersonik taşıt konfigürasyonunda örneklemeler göstererek genel entropi üretimi ile uçuş esnasındaki kuvvetlerin üretimine yönelik tartışmalara açıklık getirmişlerdir. Yaptıkları analiz ile yüksek hızlı konfigürasyonlarda değişken özgül ısı, değişken bileşimler, yakıt enjeksiyonu ve kimyasal reaksiyonları kapsayan havacılığın genel problemlerini çözümlemişlerdir.

Ballı vd. (2008) Türk Hava Kuvvetleri Birinci Hava İkmal ve Bakım Merkezi bünyesinde bulunan motor test hücrelerini kullanarak T-37 B/C uçaklarında kullanılan J69-T25A jet motoruna enerji, ekserji ve eksergoekonomi analizler gerçekleştirerek anılan motor ve her bir bileşeni için sayısal maliyet denge denklemleri türetilmiştir. Söz konusu dengeleri gözlemleyebilmek için motorun tüm bileşenlerine maliyet dengeleyici ve yardımcı denklemler uygulanmış ve her bir ürün için ekserji maliyet oranı ve birim ekserji maliyeti hesaplanmıştır.

Struchtrup ve Elfring (2008) termodinamiğin ikinci yasası çerçevesinde uçak motorlarının geri dönüşümsüz harici kayıplarının işlemiş ve bypass oranının egzoz akışındaki termomekanik ekserji yok oluşu üzerindeki etkisini göstermişlerdir. Söz

konusu analizin yüksek bypass turbofan motora sahip modern uçakların kullanımı için yüksek bir motivasyon sağladığı belirtilmiştir.

Turgut vd. (2009) CF6-80 turbofan motoru için deniz seviyesi şartlarında bir ekserji analizi rapor ederek ekserji verimi ve ekserji tahribatı üzerindeki etkileri ile turbomakine bileşenlerinin izantropik etkilerinin geliştirimini incelemişlerdir. Gerçekleştirdikleri çalışma ile inceledikleri kayıplar neticesinde en tersinmez ünitelerin 47.3 MW ile fan ve 35.9 MW ile çekirdek motor egzozu olduğunu ilave olarak ise yanma odasında 31.5 MW ekserji kaybı olduğunu belirtmişlerdir.

Rosen (2009) bir turbojet motorun ekserji kayıpları üzerindeki etkileri bir değişken ve iki sabit referans ortamında incelemiş ve egzoz emisyon değerlerine bağlı olarak ekserji kaybının deniz seviyesinde %65 iken 15,000 m'de %70'e yükseldiğini, bunun ise irtifaya bağlı olarak normal bir kayıp olduğunu belirtmiştir. Süreklilik arz eden bir referans çevre modeli kullanıldığında ise kaybın gerçek değerinden %18 ile %28 bandında artabileceğini iletmiştir.

Zhang vd. (2009) kombine edilmiş Brayton ve ters Brayton döngüleri için bir termodinamik modelini, akış süreçleri içindeki basınç düşüşleri ve sonlu zaman termodinamiğini kullanarak ve gerçek enerji santralinin boyut kısıtlarını da göz önüne alarak oluşturmuşlardır. Söz konusu çalışmada, kompresör ve türbinlerin kanat ve kanatçıklarında dört olmak üzere toplam 11 akış direnci üzerinde çalışılmış olup güç çıkışı, termal dönüşüm verimliliği ve üst çevrim ile kompresör basınç oranları arasındaki ilişkilere yönelik analitik formüller incelenmiştir.

Tona vd. (2010) gelişmiş hava araçlarının tasarımı, geliştirilmesi ve kullanılması için enerji dönüşüm sistemlerinin analizi ile iyileştirmelerin maliyet azaltımı ile yapılandırılması kapsamında gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Bu bilgilerin temelde daha karmaşık olan hava aracı tasarımlarının evrim temelini oluşturacağını belirtmişlerdir. Çalışmalarında tipik bir turbofan motor kullanmış ve motor ile bileşenlerinin global performansını değerlendirmek için ekserji tabanlı bir analiz sunmakla birlikte uçuş döngüsü, ekipmanlar ve uçuş fazları üzerinde ekserji verimliliği için ekserji yıkımı, giriş-çıkış akış değerleri ile sunulmuştur.

Çalışkan vd. (2010) 1968'den 2008'e kadar olan Otto ve Dizel motorların enerji ve ekserji analizi ile alakalı olan çalışmaların bir derlemesini sunmuşlardır. Farklı silindir sayısı, hız ve güç oranlarına sahip olan test motorlarına ait motor bilgileri ile test düzeneği şemalarını tablo ve şekiller ile açıklanmışlardır.

Riggins vd. (2010) entropi ve hava taşıtları arasındaki görev ve performans tabanlı ilişkiyi, kuvvete dayalı araç performansı, harcanan itki kuvveti ile ilişkili mevcut enerji de dâhil olmak üzere genel kayıp akısı ve kullanılabilirlik akı dengesi açısından analiz etmişlerdir. Örnek olarak, basitleştirilmiş tek kademeli, uydu-roket güçlü ve hava soğutmalı motor analiz edilmiş ve kayıp oranlarının incelenmesi ile farklı araç sınıfları için kullanılabilir akı kayıpları açıklanmıştır.

Stanek ve Budnik (2010) buhar güç ünitelerinin çalışması esnasında üretilen CO₂ emisyonlarının değerlendirilmesi için ekserji analizlerinin uygulanması kapsamında bir çalışma gerçekleştirmişler ve örnekleme hesaplamalar ile genel metodoloji üzerine inşa edilmiş bir güç ünitesinin çalışmasını incelemişlerdir. Söz konusu çalışmada, güç ünitesi parametrelerinin değişiminden dolayı CO₂ emisyonu analizinin hassasiyetinin kabul edilebilir olduğu da belirtilmiştir.

Aydın vd. (2012) deneysel bir turboprop-turboşaft motoruna ait değerlendirmeleri; verimlilik, iyileştirme potansiyeli, ekserji yıkım akısı, izafi ekserji yıkımı, yakıt tüketim oranı, üretkenlik yoksunluğu ve yakıt ile üretilen enerji faktörlerini kapsayacak şekilde farklı güç ve tork değerlerinde analiz ederek sunmuşlardır. Ayrıca söz konusu çalışma, şaft tahrikleri uçak motorlarının tasarımında yardımcı olması amacıyla birlikte, bölgesel olarak kullanılan pervaneli ve dahi döner kanatlı uçakların bileşenleri üzerindeki ekserjetik performanslarına ait değerlendirmeleri içermektedir.

Turan (2012) yaptığı çalışmada, 4,000-9,000 m arasındaki referans yüksekliklerde motorun ekserji etkisini spesifik ekserji yardımıyla sunmuştur. Söz konusu analizde, test edilen motorun ekserji veriminin 4,000 m de %50.34 iken 9,000 m de %48.91'e düştüğünü, bunun sonucu olarak referans yüksekliğin artışıyla birlikte ekserji verimliliğinin azaldığını, motorun enerji verimliliğinin ise arttığı belirtilmiştir. İlave olarak, spesifik ekserji analizinin aynı zamanda ekserjetik verimi belirlemek için entegre bir yöntem olarak kullanılabileceği açıklanmıştır.

Aydın vd. (2012) yüksek hızın kritik olmadığı kısa mesafeli taşıma uçakları ile askeri nakliye uçaklarında turboprop motorların önemli bir rol oynadığını, bununla birlikte yakıt tüketimin düşürülmesinin işletme giderlerinin iyileştirilmesinde en önemli araç olduğunu belirtmişlerdir. Bu kapsamda söz konusu çalışmada, bölgesel uçuşlar ve askeri nakliye için ortak olarak geliştirilmiş olan serbest türbine sahip, modern bir turboprop motor olan CT7-9C motoru ekserjoekonomik analiz ile ele alınmış ve tüm

motor bileşenleri için ekserjoekonomik parametreleri ile birlikte ekserjetik parametreler de hesaplanmıştır.

Turan (2012) insansız hava araçlarında kullanılan küçük bir turbojet motorun ekserji ve enerji analizini bazı tasarım parametrelerini kullanarak gerçekleştirmiş olup çalışmada kullanılan teorik verilerin temelinde, motorun ve bileşenlerinin bazı ekserji ve aerotermodinamik özellikleri, kompresör basınç oranı ve türbin giriş sıcaklığı açısından parametrik olarak incelenmesi bulunmaktadır. Çalışma sonuçlarında incelenen turbojet motorun daha iyi enerji ve ekserji verimi için mümkün olan iyileştirmenin incelenmesi sunulmuştur.

Aydın vd. (2013) çevresel etkileri düşürmek için termodinamik verim, itki ve güç, özel yakıt tüketimi ve özgül güç değerlerine sahip mekanizmaları anlamının bir gereklilik olduğunu ve söz konusu çalışmalarında tam ve kısmi yük koşullarında bir turboprop motorun termodinamik analizini yapmışlardır. Çalışmada kullanılan motorun genel veriminin %30.7 ve ekserji veriminin ise %29.2 olarak bulunduğu, optimum fonksiyonel yük koşullarının daha yüksek yüklemelerde sağlandığı açıklanmıştır. Yapılan bu çalışma ile termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarının nezdinde performans değerlendirmelerinin daha kapsamlı olması ve bölgesel nakliye uçakları için daha iyi bir turboprop motor üretim konseptine yardımcı olması amaçlanmıştır.

Ehyaei vd. (2013) deniz seviyesi ve 11,000 m olmak üzere iki farklı irtifa değerlerinde bir J85-GE-21 turbojet motoruna ekserji analizi yapıldığını ve simule olarak gerçekleştirilen verilerin analizinde gerçek uçak verilerinin kullanıldığını bildirmişlerdir. Veriler çerçevesinde ekserji verimliliği incelendiğinde kompresörün %96.7, lülenin %93.7 ve türbin kısmının ise %92.3 verimlilikte olduğu ve giriş hava sıcaklığındaki her 1°C'lik artış için %0.45 oranında bir azalış olduğunu sunmuşlardır.

Atılğan vd. (2013) uçak motorlarının çevresel etkilerinin azaltılması konusunda etkili çözümler üretebilmek için uçak motorlarının termodinamik verimliliğinde iyileşme sağlayan olguların tam olarak anlaşılması gerektiğini belirterek 1,948 SHP ve 640 Nm tork üretebilen ve bölgesel uçaklarda kullanılan bir turboprop motoru ekserjoçevresel yöntemi kullanarak incelemişlerdir. Çalışma sonucundaki verilere dayanarak kompresör ve türbin kısımlarının iyileştirmelere yönelik olarak geliştirilebileceğini ve bu çalışmanın uçak itki sistemlerindeki çevresel etki ölçümlerinde kullanılabileceği belirtilmiştir.

Ballı ve Hepbaşlı (2013) T56 turboprop motorunu %75, %100, military ve kalkış olmak üzere dört farklı takat modunda enerji ve ekserji analiz sonuçlarını sunarak hem

şaft gücü (durum bir) hem de şaft gücü artı egzoz gazının (durum iki) kinetik enerjileri ile enerji ve ekserji performans değerlendirmesi yapıldığını bildirmişlerdir. Bu kapsamda enerji verimliliği durum birde maksimum %25.4 ve durum ikide %28.1 iken, ekserji verimliliği ise durum birde maksimum %23.8 ve durum ikide %26.3 olarak gözlemlenmiştir. Bunların yanında aynı çalışma kapsamında göreceli ekserji tüketimi, yakıt tüketim oranı, verimlilik eksikliği oranı gibi parametrelerde incelenmiş ve çalışma kapsamında sağlanan sonuçlar ile motor kullanıcısı birimlere çalışma modlarının düzenlenmesi ve seçimi için yararlı olması amaçlanmıştır.

Hassan (2013) tarafından yapılan çalışmada havacılık sektörünün yakıt konusunda baskın tüketici olduğunu, havacılık sistemlerinin tasarım ve performans değerlendirmelerinde ekserji analizi uygulamalarının güçlü bir araç olduğu ve bu çalışmada da CF6-50 turbofan motorunun hava alığı ve fan kısımlarında oluşan lokal entropi ve ekserjilerinin araştırıldığını belirtmiştir.

Tai vd. (2014) enerji ve ekserji yasalarına dayalı iki kademeli ayırık akışlı turbofan motorlarının tasarımlarını optimize edebilmek için genetik algoritma uygulanarak turbofan motoru tanımlayan sekiz parametrenin eniyileme değerlerini arama için kullanmış ve de “TurboJet-Engine Optimiser v1.0 (TJEO-1.0)” adını verdikleri bir program geliştirmişlerdir. Motorun termodinamik özelliklerini hesaplamak ve eniyilemeleri uygulamak için geliştirilen TJEO-1.0’ı Python programlama dili ile açık kaynaklı bir genetik algoritma çerçevesine sahip olan Pyevolve’ye entegre edilmiştir. Bu tasarımlarını ise enerji verimliliği, ekserji verimliliği ve ikisinin kombinasyonu kriterleri ile değerlendirmiş olup %1.5-2.3 yakıt tüketimi artışı ile %3.3-11 aralığında ilave spesifik itme kuvveti üretebildikleri belirtilmiştir.

Ballı (2014) tarafından askeri uçaklarda kullanılan deneysel bir turbojet motoruna ait enerjik ve ekserjetik performansına ait artçı yanma etkisini gösterebilmek maksadıyla MIL ve AB çalışma modlarında termodinamik verimsizlikleri tespit etmek için enerji kayıpları ve ekserji tüketimleri incelenmiştir. Çalışmasının sonucunda ise AB modunda enerji ve ekserji veriminin azaldığı ve enerji kayıplarının büyük ölçüde arttığı belirtilmiştir.

Aydın vd. (2014) tarafından bir PW6000 yüksek bypass turbofan motoru için teori, yöntem ve örnek uygulama geliştirerek ekserjo-sürdürülebilirlik açısından incelenmiştir. Ekserjik sürdürülebilirlik indikatörlerini belirleyebilmek için öncelikli olarak ayrıntılı bir ekserji analizinin yapıldığı belirtilmiş ve sonucunda ise ekserji verimliliği, atık ekserji

oranı, ekserji yıkım faktörü, çevresel etki faktörü ve ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi ile motoru analiz edilmiştir. Çalışmada motorun daha çevreci ve daha sürdürülebilir hale getirilebilmesi için itki sisteminin dizaynı ile çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik gelişimi arasında bir bağlantı sunulmuştur.

Grönstedt vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada 2050 yılında piyasaya sunulması beklenen bir turbofan motor için en optimal temel turbofan çevrimi oluşturulması için kalkış tırmanışın zirvesi ve bunların yanında seyir halindeki performans verilerine yer verilmiştir. Çalışmalarında termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarının birleştirilmiş kullanımına dayanarak gelecekte oluşturulacak radikal motor tasarım ve kavramları için kayıpların ölçüldüğü bir zeminde tartışabilmek amaçlanmış olup gözlemlenebilen üç ana kayıp kaynağının azaltılması için üç farklı radikal döngü tanıtılmıştır. Yapılan analizlerin en çarpıcı yönü, çok farklı fiziksel kaynaklardan gelen geri dönüşümsüzlük kayıplarını karşılaştırabilmek için ortak bir değer oluşturulması ile karmaşıklığın büyük bir ölçüde azaltılabileceğidir.

Şöhret vd. (2015) gaz türbinli bir uçak motoruna ait ileri ekserji analizi sunarak motor bileşenlerinin ana ekserji parametrelerini tanıtırken, aynı zamanda motor bileşenleri içinde bulunan içsel/dışsal ve önlenabilir/önlenemez parçalara ait ekserji yıkım oranlarını belirtmişlerdir. Çalışmanın sonucunda alçak basınç kompresörü %89, yüksek basınç kompresörü %86, yanma odası %60.6 ve türbinler %98.6 ekserji verim değerlerinde çıkmış olup kaçınılmaz olan ekserji yıkım oranı %93.5 olduğu için sistemin düşük iyileştirme potansiyeline sahip olduğu tespit edilmiştir.

Aydın vd. (2015) sabit referans şartlar altında orta menzilli bir ticari uçak motorunun ekserjik sürdürülebilirlik indikatörlerine odaklanmış olup söz konusu turbofan motoruna ayrıntılı bir ekserji analizi yapmışlardır. Termodinamiğin ikinci yasası ile sürdürülebilirlik konularına bağlı olarak altı indikatör ile inceleme gerçekleştirilmiş ve bu indikatörler ekserji verimliliği, atık ekserji oranı, ekserji yıkım faktörü, geri kazanılabilir ekserji oranı, çevresel etki faktörü ve ekserjetik sürdürülebilirlik indeksidir. Bu çalışmadaki ölçümlerin sonuçlarına bağlı olarak turbofan motorunun ve hava taşıtının nasıl daha çevreci ve sürdürülebilir hale getirilebileceği amaçlanmıştır.

Bastani vd. (2015) j-85-GE-21 turbojet motorunun farklı bölümleri üzerinde 0.4, 0.6 ve 0.8 Mach olmak üzere üç farklı uçuşta ekserji analizi yaparak ve bu analizlere dayanmak şartıyla ana çevrim üzerindeki etkilerini gözlemleyebilmek için parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Turbojet motorunun tamamındaki ekserji yıkımını

görebilmek için termodinamiğin ikinci yasasına bağlı olarak gerçekleştirilen analizlerin sonucunda en büyük ekserji kaybının art yakıcı kısmında olduğu belirtilmiştir. Çalışmalar esnasında az miktardaki kabin göstergeleri ile bilgisayar kodlarının da yardımıyla en yüksek ekserji verimliliğinin 0.4 Mach surette olduğu gözlemlenmiştir.

Şöhret vd. (2015) bir İHA (İnsansız Hava Aracı)'nın ana güç ünitesini oluşturan bir turbofan motorunun ekserji analizini yapmış ve motorun tasarım parametleri ile gerçek şartlara bağlı kalarak termodinamik yasaları çerçevesinde analizler gerçekleştirilmiştir. Söz konusu çalışma neticesinde yanma odası %58.24 ile en verimsiz kısım olarak, diğer taraftan %99.09 ile yüksek basınç türbini (gaz jeneratörü) ve %95.46 ile kompresör uçuş boyunca en verimli kısımlar olarak tanımlanmıştır.

Turan (2015) tarafından yapılan çalışmada yakıt ekonomisi ve etkinliğinin havacılık dizayn ve operasyonlarında daha büyük bir endişe olmaya başladığını ve bu ihtiyaçtan ötürü de bu çalışmada yeni bir metodoloji geliştirdiğini, bu prosesin boyu boyunca enerji akış haritası çıkarılmış yüksek bypasslı bir motorun maksimum itkide sürdürülebilirliğinin değerlendirmesi için kullanıldığı belirtilmiştir. Çalışma, geniş gövdeli ve çift koridorlu bir ticari uçağa ait, itki gücü 206 kN olan bir motor ile gerçekleştirilmiştir. Sürdürülebilirlik verileri incelendiğinde ise ekserji veriminin %29.6 ve ekserji yıkım faktörünün 0.5037 olduğu görülmektedir. Ayrıca, çevresel etki faktörünün 0.675 ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 1.48 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, kullanılan ekserjetik sürdürülebilirlik metodunun uçak ile motorların dizaynında etkili olduğu ve yeşil hava taşımacılığında bulunan üreticiler, kullanıcılar, karar vericiler ve araştırmacılar için iyi bir araç olduğu belirtilmiştir.

Şöhret vd. (2016) tarafından gaz türbinli uçak motorlarının termodinamik prensiplerine göre çalıştığının bilindiğini ve ekserji analizinin termodinamik bazlı çalışan makineleri değerlendirilmesinde çok faydalı bir yöntem olarak görüldüğü belirtilmiştir. Yaptıkları çalışma ile bu kapsamda literatüre genel bir bakış sunarak gaz türbinli uçak motorlarının en çok incelenen tür olduğu tanımlanmıştır. Lakin, gaz türbinli uçak motorlarının ekserji, ekserjoekonomik, ekserjoçevresel ve ekserjosürdürülebilirlik analizlere duyulan ihtiyaç ve kaleme alınan araştırmalardaki mütabakat eksikliğine değinerek tüm havacılık alanında çalışan mühendisler ile bilim adamları ve araştırmacılara ileri ekserji analizi yönteminin kullanımı ve de alternatif yakıtla çalışan uçak motorlarının ekserji analizlerinin yapılması tavsiye edilmiştir.

Kaya vd. (2016) tarafından yapılan çalışma bir HALE İHA'nın ekserji verimi, atık ekserji oranı, çevresel etki faktörü ve ekserjetik sürdürülebilirlik indeksleri gibi ekserji sürdürülebilirlik performanslarını parametrik olarak araştırılmıştır. Bahse konu İHA ve onun yüksek bypasslı karışık akışlı turbofan motoru herhangi bir modifikasyona bağlı kalmadan kerosenden hidrojen yakıtına geçişi desteklemektedir. Uçuş profili incelendiğinde ise standart atmosfer şartlarında 0 ile 16 km arası ve %60 bağıl nem olduğu görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde ise, hidrojen yakıtı için dizayn edilmeyen bir motorda gözlemlenen verilere göre sürdürülebilirlik performanslarının enerji ve ekserji verimleri hidrojen yakıtı için uygun basınç ve baypas oranları ile geliştirilebileceği belirtilmiştir.

Baklacıoğlu vd. (2016) bir uçağın verimli bir termodinamik tasarım süreci için metodolojilerin gerektiği karmaşık bir sistem olduğunu, bu nedenle de bir uçağın enerji ve ekserji kullanımının daha iyi anlaşılmasının önem arz ettiğini belirtilmiştir. Bu çalışmalarında bir kargo uçağının uçuş safhalarındaki enerji ve ekserji verimliliğinin değerlendirilmesi için geliştirilen bir NE (nöro-evrim) algoritma modellemesi kullanılarak bir topoloji önerilmesi amaçlanmış ve bir GA (genetik algoritma) tarafından optimize edilen bir ANN (yapay sinir ağı) modellemesi kullanılarak farklı güç/motor ayarlarında enerji ve ekserji verileri türetilmeye çalışılmıştır. Çalışmalarının tamamlanması ile deneme ve hata durumlarının karşılaştırılması suretiyle şebekelerini genetik algoritmalar ile evrimleşmesi neticesinde enerji ve ekserji verimliliğinin ortalama karelerdeki hatalar azalmış ve modellemenin doğruluğunun daha da arttığı sonucuna ulaşmıştır.

Turan ve Aydın (2016) son yıllardaki uçak ve helikopterlerin yakıt verimliliklerinin artmasının nedeninin artan yakıt maliyetlerinin yanı sıra havacılık emisyonlarının çevresel etkilerinden de kaynaklandığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında, modern helikopterlerin sahip olduğu turboşaft motor sistemlerinin özellikle enerji ve güç ürettikleri için son derece karmaşık bir yapıya sahip olduğunu, bu nedenle de daha iyi bir enerji ve ekserji kullanımının önem arz ettiği lanse edilmiştir. Söz konusu çalışmalarında, turboşaft motoru ve bileşenlerinde enerji ve ekserji tabanlı bir hesaplama yaklaşımı kullanılmış ve netice olarak eksenel, santrifüjlü kompresörler ile güç türbinlerinin ekserji verimliliğinin %83.8 ile %88.6 arasında bulunduğu, buna karşın yanma odasına karşılık gelen verimlilik değerinin %80.6 olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak ise turboşaftın ekserjetik verimliliğinin 1,500 kW üretim enerjisi ile birlikte %27.5 olarak hesaplandığı ve enerji ve

ekserji temelli sayısal formülasyonlar ile gelecekteki helikopter gelişimlerine bağlı olarak turboşaft değerlendirmelerine yaralı olabileceği açıklanmıştır.

Şöhret vd. (2016) termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarına bağlı olarak bölgesel uçuşlar için kullanılan bir uçağın turboprop motorunun kalkış esnasında ve tam gaz konumundaki performans değerlerini bulabilmek için ekserji analizi yapmış ve motor ve bileşenlerine ait enerji ve ekserji oranlarını, enerji yıkım oranını, iyileştirme potansiyelini, yakıt tüketim oranını ve üretkenlik oranları hesaplanmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile halen hizmette olan turboprop motorun performansını iyileştirmek amaçlanmıştır.

Turan ve Aydın (2016) tarafından hava taşımacılığına bağımlılığın küresel ve yerel çevre için bir problem olduğunu belirterek sürdürülebilirliğin negatif çevresel etkiler olmaksızın uçaklar ve motorları için uygun bir enerji kaynağı üretimine yönelik önemi belirtilmiştir. Bahse konu çalışmada düşük bypasslı 72 kN itki gücüne sahip bir motor üzerinde seçilen altı ekserjetik indikatörle ekserjosürdürülebilirlik analizleri yapılmıştır. Termodinamik yasaları ile Brayton çevriminin esas alındığı çalışma neticesinde motorun ekserji verimliliği %11, atık ekserji oranı 0.348, ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 0.316, çevresel etki faktörü 3.163 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca aynı çalışmada kullanılan motor için geri dönüştürülebilir enerji miktarının sıfır olduğu belirtilmiştir.

Çoban vd. (2017) çalışmalarında küçük ölçekli bir turbojet motoru biyodizel yakıt ile çalıştırarak bu motor üzerinde ekserjetik ve ekserjoekonomik araştırmalar gerçekleştirmişlerdir. Söz konusu motorun bilindiği üzere ana parçalarının kompresör, yanma odası ve yüksek basınç kompresörü olduğu belirtilmiştir ve kompresör için %75.42, yanma odası için %47.68 ve yüksek basınç türbini için ise %99 ekserji verimi tespit edilmiştir. Aynı test jet yakıtı ile gerçekleştirildiğinde ise ekserji verimleri sırasıyla %75.22, %48.34 ve %98.44 olarak hesaplanmıştır.

Ballı (2017) çalışmasında ticari uçaklarda kullanılan yüksek bypasslı bir motorun ölçülebilir sürdürülebilirlik seviyesi için ekserji modellemesi sunarak bileşen seviyesi için on dokuz adet sürdürülebilirlik indikatörü, sistem seviyesi için ise on üç adet sürdürülebilirlik ölçümü gerçekleştirmiştir. Baz alınan motor PW4056 olup deniz seviyesinde Maksimum Kalkış Gücü (MTOP) operasyon modu ve Kalkış Koşurma Gücü (TORP) için ölçümler incelenmiştir. Çalışma sonucunda MTOP için, ekserji verimi 0.268, iyileştirilmiş ekserji verimi 0.577, atık ekserji oranı 0.732, yakıt ekserji atık oranı 0.781, iyileştirilebilir ekserji potansiyel oranı 0.536, atık ekserji iyileştirme potansiyel

oranı 0.732, yakıt ekserji iyileştirme potansiyel oranı 0.572, verimlilik yoksunluk oranı 2.730, çevresel etki faktörü 2.730, ekolojik etki faktörü 3.495, ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 0.366, sürdürülebilirlik verimlilik faktörü 1.366 ve atık ekserji maliyet değeri 0.018 kW/\$ olarak hesaplanmış olup aynı verim, oran ve değerler TORP için sırasıyla 0.205, 0.557, 0.795, 0.848, 0.631, 0.795, 0.674, 3.869, 4.563, 0.258, 1.258 ve 0.019 kW/\$ olarak hesaplanmıştır.

Ekici vd. (2017) gaz türbinli bir motorun kayıplarını ve verimliliğini belirleyen parametreler ile performans değerlendirmesi de dâhil olmak üzere kapsamlı bir ekserji analizi yaparak küçük bir turbojet motorun performansını test verilerine dayanan bir ekserjetik analiz ile gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda %81.57 ile kompresör, %50.13 ile yanma odası ve %97.81 ile türbin ekserji verimliliği hesaplanmış olup ekserji yıkımının %90.7'lik kısmının yanma odasında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında yapılan hesaplamalara göre motora verilen yakıtın ekserji akısının %55'inin motor tarafından kullanılamayacağı özellikte belirtilmiştir.

Ballı (2017) bir turboprop motoruna ait geleneksel ve gelişmiş ekserji analizini sunarak motor bileşenlerine ait ekserji parametrelerini tanıtarak motor bileşenlerini yıkım oranlarına göre kategorize edilmiştir. Çalışmasında, motorun bileşenleri arasındaki karşılıklı bağımlılık ve çalışma koşullarına bağlı olarak gerçekçi iyileştirme potansiyelinin analiz edilmesi amaçlanmış ve motor ekserji verimliliği gerçek durumda %16.63, kaçınılmaz şartlar altında ise %17.13 olarak tespit edilmiştir. Söz konusu sistem önlenemeyen ekserji yıkım oranının %94 olması sebebiyle düşük önleme potansiyeline sahip olduğu açıklanmış ve motorun hava kompresörü, yanma odası ve güç türbini bileşenlerinden elde edilen sonuçlara göre odaklanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Hayes vd. (2017) bir ekserji ölçümüne dayanan termodinamik analiz metodlarının yer bazlı santraller ile uçak itki sistemleri gibi geleneksel ısı ile çalışan sistemlerinin verimliliğini arttırmak için geliştirildiğini ve son yıllarda hukuksal yöntemleri de kapsayacak şekilde ilginin genişlediğini belirtmişlerdir. Gerçekleştirdikleri derleme ile termodinamik ekserji analizlerinin gelecek teknolojiler ekseninde tasarlanacak hava araçları ile çoklu disiplinlere dayalı tasarımlara ışık tutması ve havacılıkta kullanılan araçların eniyilemesinde bir atılım olarak kullanılması amaçlanmıştır.

Çoban vd. (2017) konvansiyonel veya biyoyakıt kullanılan küçük ölçekli bir turbojet motorun ekserjetik performansını ve ekserjoekonomik analizini yaparak motorun performans ve maliyet akışını değerlendirmişlerdir. Biyoyakıt kullanılan motorun ekserji

verimliliği incelendiğinde hava kompresörünün %74.52, yanma odasının %47.68 ve yüksek basınçlı türbinin ise %99 verimliliğe sahip olduğu, konvansiyonel yakıt kullanımında ise sırasıyla %75.22, %48.34 ve %98.44 olarak hesaplandığı belirtilmiştir. Tüm bu verilere ilave olarak ise itki maliyet oranı jet yakıtı için 79.08 \$/h.kN ve biyoyakıt için 91.89 \$/h.kN olarak hesaplanmıştır.

Şöhret (2017) simüle uçuş koşullarında bir turbojet motorun sürdürülebilirlik ve termo-ekolojik değerlendirmelerini içeren bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bahse konu çalışma simüle edilmiş uçuş koşullarının çerçevesinde bir turbojet motorun sürdürülebilirlik göstergeleri ve enerji sistemleri için tasarlanmış olan termoeekolojik parametreler ile incelenen ilk çalışma olduğu için önem arz etmektedir. Anılan çalışmada yer alan turbojet motorunun ekolojik verim katsayısı 0.87 olarak hesaplanmış olup havacılık ve çevre bilimleri için faydalı bir çalışma olması hesaplanmıştır.

Yıldırım vd. (2017) çalışmalarında helikopter motorları için farklı motor güçlerinin enerji, ekserji analizleri ile sürdürülebilirlik değerlendirmesini gerçekleştirmiş ve yakıtın daha etkili kullanımının çevre için potansiyel yararlarının olacağını ve işletme maliyetlerini düşüreceğini belirtmişlerdir. Söz konusu çalışma, piston-prop helikopter motorunun 150-600 SHP değerleri arasında değişen farklı güçlerde C_8H_{16} yakıtını kullanarak enerji ve ekserji analizleri ile sürdürülebilirlik değerlendirmesini içermektedir. Çalışma sonucunda, en yüksek enerji, ekserji verimliliği ve ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi ile en düşük atık ekserji oranı, ekserji yıkım faktörü ve çevresel etki faktörünün 250 SHP’de olduğu gözlemlenmiştir.

Çoban vd. (2017) çalışmalarında bir askeri helikopter motorunda termodinamik kanunlarının uygulanmasını işlemişlerdir. Söz konusu çalışmada değişken yükleme değerlerinde askeri helikopter için kullanılan bir turboşaft motorun enerji ve ekserji analizleri sunulmaktadır. Çalışmanın ana amacının motorun performansının belirlenmesi ve motorun bileşenlerindeki enerji yıkım miktarlarının hesaplanmasının olduğu belirtilmiştir. İlave olarak, bağıl ekserji yıkımı, yakıt harcama oranı, verimlilik yoksunluğu, iyileştirme potansiyeli gibi ekserji performans parametreleri de incelenmiştir. Sonuç olarak ise toplam ekserji yıkımının %88.8 ile en yüksek kısmının yanma odasında, en düşük kısmının ise %0.75 ile yüksek basınç türbininde olduğu tespit edilmiştir.

Ekici vd. (2018) bilim insanları ve araştırmacıların son on yıllık dönemde özellikle sürdürülebilir enerji tüketimine ilgi gösterdiğini ve bu kapsamda yaptıkları çalışma ile

küçük ölçekli bir turbojet motoruna ait sürdürülebilirlik indikatörlerini sıralayarak gelişmelere farklı bir açıdan bakma imkânı sunmuşlardır. Söz konusu çalışmada deneysel verilere dayanan bir ekserji tabanlı sürdürülebilirlik analizi yapılmıştır. Turbojet motorunun sürdürülebilirlik indikatörleri sırasıyla ekserji verimliliği, atık ekserji oranı, geri kazanılabilir ekserji oranı, çevresel etki faktörü ve ekserjik sürdürülebilirlik indeksi olarak belirlenmiş ve ekserji verimliliği %27.25 olarak hesaplanmıştır.

Söğüt (2018) çalışmasında mikro turbojet motorlarda alternatif yakıtlar için ekserjetik tersinmezlik ve sürdürülebilirlik performansı değerlendirmesi yapmış olup ilk olarak jet A-1 yakıtı ile yedi farklı alternatif yakıtın enerji ve ekserji verimlilikleri incelemiştir. Bahse konu çalışmada SR-30 mikro-turbojet motorunun operasyonel verileri referans alınmıştır ve bu referansa göre, metanol ve etanol karışımı kullanılarak oluşturulan yakıtın motorun ekserji verimliliğini %22.35 ve %20.56 arttırdığı gözlemlenmiştir.

Ballı vd. (2018) hidrojen yakıtı kullanımının bir turbojet motorun ekserji performansına etkileri kapsamında bir çalışma gerçekleştirmiş olup bu çalışmalarında askeri eğitim uçaklarında kullanılan bir J69-T25A turbojet motoru üzerinde çalışmışlardır. Üç aşamalı olarak gerçekleştirdikleri çalışmalarında, ilk olarak; jet yakıtı kullanılarak elde edilmiş olan güncel test verileri üzerinden ekserji parametrelerinin üretimi sağlanmış, ikinci aşamada; parametrik olarak tahmini motorda hidrojen yakıtı kullanımı ile ekserji değerlendirmesi yapılmış, son kısımda ise; hidrojen ve jet yakıtı ile ilgili bulunan veriler birbirleri ile kıyaslanmıştır. Gerçekleştirilen çalışmanın sonucunda ise hidrojen yakıtının turbojet motorunda kullanımının, özellikle yanma odasında, ekserjetik performans verileri üzerinde negatif bir etkisinin olduğu, buna karşılık ise egzoz gaz yayınının önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir.

Şöhret ve Karakoç (2018) düşük emisyonlu bir uçak motoruna ait yanma odasının ekserji indikatörleri alanında gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarında, daha çevre dostu bir enerji sistemi geliştirilmesi ve bu kapsamda küresel iklim değişikliği ile çevresel etkisinin minimize edilmesinin odağında, şimdiye kadar yapılmış olan çalışmaların bir derlemesi ile araştırmacılara ve özellikle bu alanlarda çalışan kişiler için referans niteliği taşıyacak olan bir kaynak üretmişlerdir.

2. TURBOPROP MOTOR TEORİSİ

2.1. Isı Motorlarının Tarihsel Gelişimi ve Sınıflandırılması

Isı enerjisi, yakıtların yanmasıyla meydana gelir. Bu ısı enerjisinin mekanik enerjiye dönüşmesini sağlayan kuvvet makinelerine ise ısı motorları denir. Mekanik enerjinin ortaya çıkması için ısı enerjisi gereklidir. Birtakım yakıtlardan ve motor silindirlerinden üretilerek elde edilebilen ısı motorları dıştan yanmalı ve içten yanmalı motorlar olmak üzere iki grupta incelenir (Safgönül vd, 2013; Kodal, 2009).

2.1.1. Dıştan yanmalı motorlar

Yanma ile açığa çıkan sıcak gazlarda bulunan ısı enerjisini bir başka akışkana yönlendiren ve bu akışkanda bulunan ısı enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren motorlar, dıştan yanmalı motorlardır. Gaz ve buhar türbinleri içeren bu motorlar eskiden buharlı makine örnekleri olarak geliştirilmiş olsa bile, 1665 yılındaki Worecester makinesi adıyla tanınan ve suyu daha yüksek menzillere pompalamak amacıyla kullanılan makine, ticari olarak kullanılan ilk buharlı makinedir. Daha sonra 1698 yılında Thomas Savery adındaki İngiliz, adına buhar pompası dediği ve su pompalamada kullanılan makineyi icat etti. Yapılan makinenin fazlaca ısı enerjisine ihtiyaç duyması, yüksek basınç adı altına meydana gelen riskler ve makinenin veriminin beklenilenden düşük olması sebebiyle tercih edilmedi. 1712 yılında Thomas Newcomen adına sahip İngiliz mühendis, maden ocaklarında bulunan suyun tahliye edilmesi gerekçesiyle Newcomen makinesi ismiyle tanınan bir makine daha geliştirdi. Fakat bu makinedeki verim yine beklentiyi karşılamayan düşüklükte bir seviyedeydi. James Watt, İskoç mucit, 1764 yılında kendisine verilen bir Newcomen makinesini onardı ve üzerinde 1781 yılına dek birtakım seri iyileştirmeler yaptı. Bu çalışmaların yanı sıra makinede var olan düşük verimi yükseltmek nedeniyle farklı bir çalışma daha yaparak çift odalı bir buhar makinesi geliştirmiş oldu. Bu makinenin %7 gibi çok düşük değerlerde veriminin olması, makinenin ilk olarak maden ocaklarında su tahliyesi amacıyla ve tekstil fabrikalarında kullanılabilmesini sağlamıştır (Şengün, 2014).

Verimlilik üzerine bazı çalışmalar yapmış olan Sadi Carnot, termodinamik biliminin aynı zamanda kurucusu sayılır. Carnot çevrimi adıyla mühendislikte bilinen ve buzdolabı-klima gibi günümüzde kullanılan cihazların ısıtma-soğutma ilkesini oluşturan formülü geliştirmiştir. Carnot'un verimlilik konusunda yapmış olduğu çalışmalar sonrasında gücü yüksek olan buhar makinelerine ilgi artmış ve buharlı gemiler-

lokomotifler-otomobiller ihya edilerek endüstride başarının artması tetiklenmiştir. Makinelerdeki artıştan sonra, ısı makineleri üzerinde bulunan gelişim, içten yanmalı motorların buluşuyla sürdürülmüştür (Çengel ve Boles, 2013).

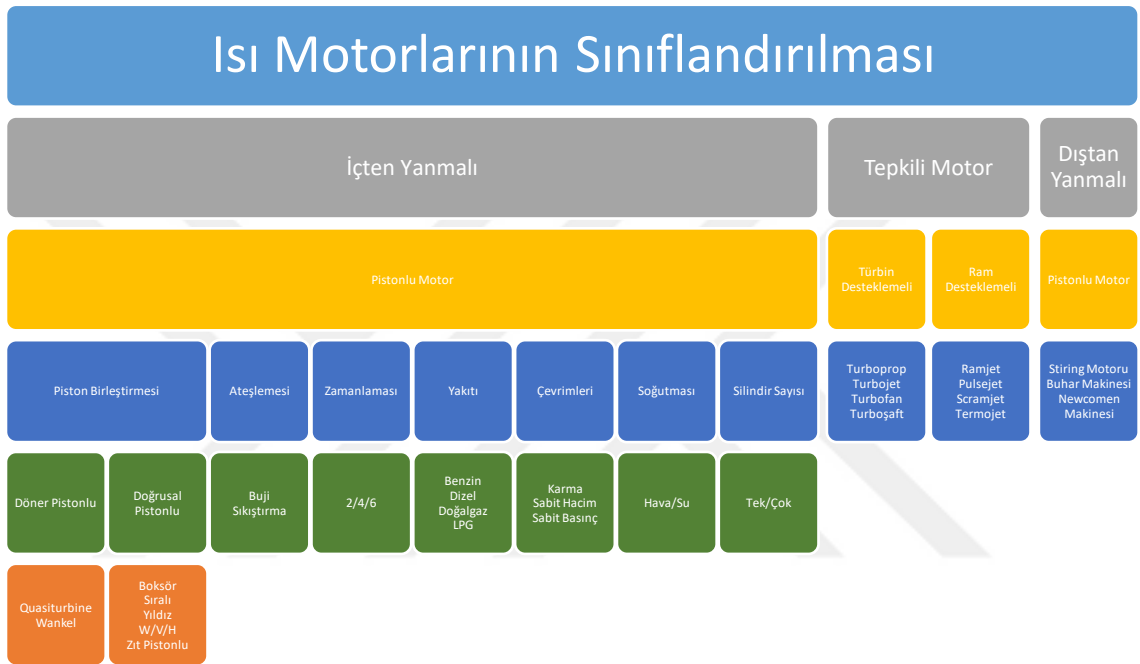
2.1.2. İçten yanmalı motorlar

Yanma sonucu meydana gelen sıcak gazların ortaya çıkardığı ısı enerjisi, içten yanmalı motorlarda doğrudan mekanik enerjiye çevrilir. 1673 yılında Christian Huygens adlı fizikçi ve onun asistanı Denis Papin, Paris’te, öncül sayılan, içten yanmalı motorların içinde piston bulundurduğu metalik bir silindirden oluşturulmuş bir düzenek geliştirdi. Otto Von Guericke adlı Alman bilim insanı tarafından ortaya konan ilkenin üzerine çalışan Huygens, vakum yaratmanın yöntemi olarak barutun ısıtılması durumunda ortaya çıkan yanma sürecini kullandı. İsviçreli bir mucit olan François Isaac de Rivaz otomobilin gelişimine 1775 yılına yakın bir sürede katkıda bulundu. Tarafından yapılan buharlı otomobillerin çoğu, esnek olmamalarından dolayı başarılı olamadı. Buna rağmen 30 Ocak 1807’de volta tabancısının çalışma mekanizmasından ilham alarak yapmış olduğu bir düzeneğin patentini aldı. Belçikalı mühendis Etienne Lenoir “Gazlı ve Genleşmiş Havalı Motor” isminde iki zamanlı bir içten yanmalı motorun patentini 1859 yılında aldı ve 1860’da elektrik sayesinde ateşlenebilen su soğutmalı ilk motoru geliştirdi. Paul Haenlein adlı Alman mühendis 1872 yılında uzunluğu 50 metre olan hava aracında Lenoir gaz motorunu kullandı ve bu denemesinde 20 metre yükseğe ulaşarak 18 km/h hız yaptı (Pulkrabek, 2016).

Gaz motorunun Etienne Lenoir tarafından keşfedilmesi, 1850’lerde sanayide küçük bir motora duyulan ihtiyacı gören Nikolaus Otto’yu etkiler. 1867’de Paris’te yapılan uluslararası fuarda geliştirilen yeni motor, ödüle layık görülür. Motordaki en belirgin özellik, Lenoir motorunun üçte biri kadar yakıt kullanıyor olmasıdır. Tarihe geçen darbesiz çalışma özelliğine sahip ilk basınçsız gaz motoru da bu motordur. Otto, birtakım deney ve değişiklik yapmasının ardından dört zamanlı motor çalıştırma prensibini (emiş-sıkıştırma-yanma-dışarı atma) bulur. Dünyada bu motor “Atmosferik Otto Gaz Motoru” olarak tanınmaktadır. Fransız mühendis Aplhonse Beau de Rochas ise bu prensibi iyileştirerek emme, sıkıştırma, yanma ve egzozdan ibaret dört zamanlı bir termodinamik ilkesi geliştirmiştir. Teorisyen Beau de Rochas’ın çalışmaları sadece teoride kalsa da içten yanmalı motorların uygulamada kullanılmasına başlanmış olur. 1872 yılında, Otto, Beau de Rochas ilkesini ilk uygulayan mühendis olduğu için bu çevrim bundan böyle

“Otto Çevrimi” adıyla bilinmeye başlar. Sıvı yakıtın kullanıldığı ilk motoru 1884’te Otto yapmayı başarır. Otto’nun keşfi olan hava-yakıt karışımının ve ateşleme sisteminin, geride kalan sistemlere göre daha güvenli ve iyi olduğu bilinir. 1875 yılından itibaren geliştirilerek kullanılmaya başlanan içten yanmalı motorlarda efektif verim %30-37 arasında değişim göstermektedir (Safgönül vd., 2013).

Isı motorlarına ait sınıflandırma örneği Şekil 2.1’de sunulmuştur:

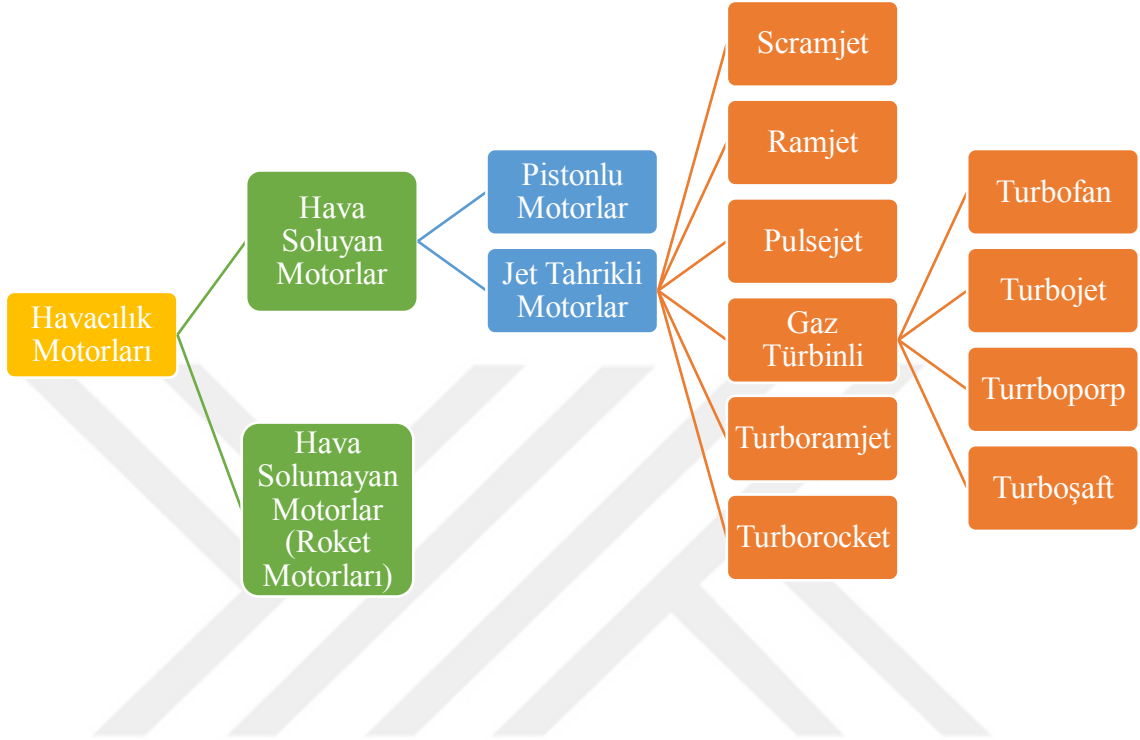


Şekil 2.1. Isı motorlarının sınıflandırılması (Safgönül vd. 2013)

Dıştan yanmalı motorlar içten yanmalı motorlara göre daha büyük yapılarda olmasına rağmen güç olarak nispeten zayıftırlar. Fakat bazı durumlarda daha verimli yanma sonucunda daha zararsız çıktılar içerebilirler. Düşük yanma sıcaklıkları ve basınçları sebebiyle daha az zararlı egzoz gazları ürettikleri için çevre dostu olma eğilimindedirler.

Jet tahriki ile uçan sistemlere tahrik sağlama ilkesi ortaya çıkmış ve bahse konu sistem ile akışkana ait moment değiştirilebilmektedir. Tepkili motor adını alan jet tahrik sistemleri hava soluyan ve hava solumayan şeklinde olmak üzere iki ana gruba ayrılır.

Bu kapsamda hava sistemlerinin kullandığı motor tiplerinin detayları Şekil 2.2’de verilmiştir.

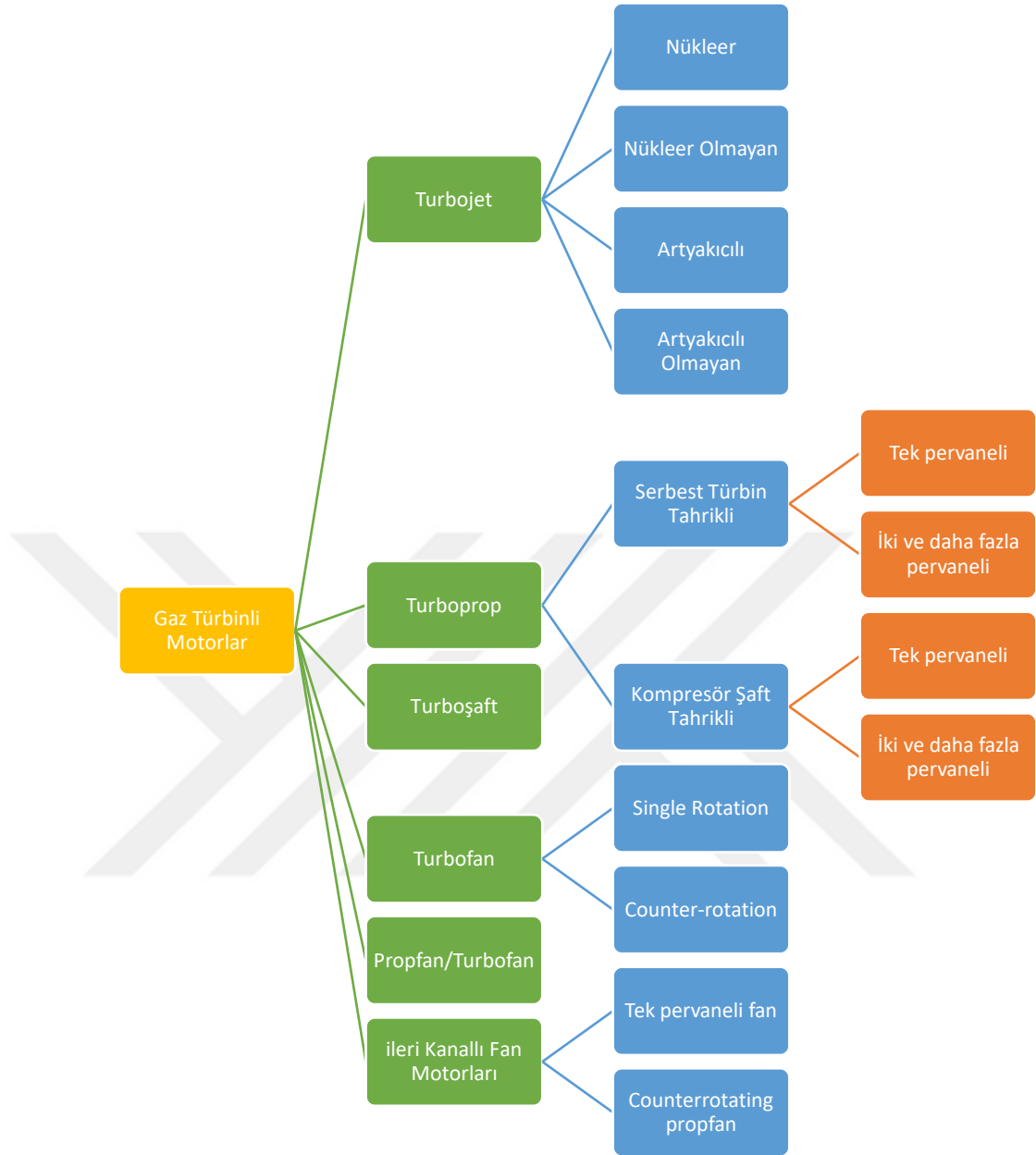


Şekil 2.2. Motor tipleri (El-Sayed, 2018)

2.2. Gaz Türbinli Motor Teknolojisi, Tarihçesi ve Sınıflandırılması

Günümüzde kullanılan hava araçlarında, jet motoru diğer bir söyleyişle tepkili motor adıyla bilinen makinelere gaz türbinli motorlar denir. Havanın emilerek sıkıştırılması ve sıkıştırılan havanın yakıt ile yakılması sonucunda meydana gelen yüksek basınç ve sıcaklıktaki havanın sahip olduğu enerji türbinler vasıtasıyla mekanik güce dönüştürülür. Gaz türbinli motorlar Brayton çevrimi olarak bilinen bu döngü sayesinde ısı enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür. Basit bir dille bu motorlar; “atmosferdeki havanın sıkıştırılması ve yakıtla ısıtılarak yakılması sonucu çıkan gazların püskürtülmesiyle oluşturulan ters yönde itme gücü” ilkesi ile çalışır. Bu sayede elde edilen itme gücü bağlı olunan aracın ileri hareketini sağlar (Kodal, 2009).

Şekil 2.3’de gaz türbinli motor çeşitlerini gösteren bir özet sunulmuştur.



Şekil 2.3. Gaz türbinli motorlar (Çengel ve Boles, 2013; Kerrebrock, 1992)

1791 yılında John Baber, jet motorlarının aslı olan gaz türbini dizayn etti. Kompresörlü ilk gaz türbini Fransa, Almanya, ABD, Norveç'te sırasıyla 1894, 1900, 1902, 1903 yıllarında ortaya çıkmıştır. Bu türbinler büyük fakat düşük verimli olmalarına karşın 1911'de Alfred Büchi'nin tasarladığı sanayi gaz türbininin 1916'da uçaklarda kullanılmasıyla ilk başarılı uygulama gerçekleştirilmiş oldu. 4000 kW'lık bu motor ilk olarak %18 verim ile jeneratör tahriki için kullanılmaktaydı. Fakat bu motorlar için en önemli ilerleme uçak kullanımlarıyla beraber meydana gelmiştir.

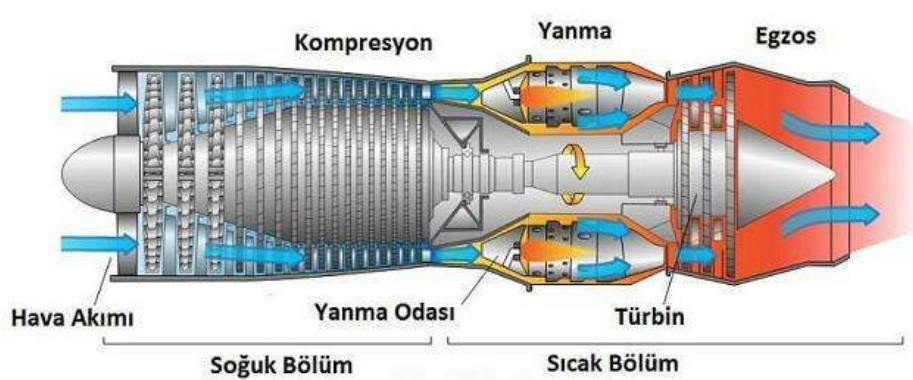
İngiliz Hava Kuvvetleri pilotlarından olan Frank Whittle egzoz gazlarının jet tepkisine dayalı uçak tahrikini kullanmayı tasarlayan ilk insandır. 1930'da ilerleyen yıllarda turbojet adıyla da anılacak olan bir gaz türbini ve bir difüzörün birleşimiyle oluşturduğu jet motorunun patentini aldı. 1936 yılında ise bu motorun imalatı için Power Jets Ltd. Şirketini kurdu. Almanların 1937'de geliştirdiği Hes 3B isimli jet motoru Heinkel He 178 üzerinde denendi. İlk başarılı uygulama ise yine Whittle'ın geliştirdiği Power Jet W.1 isimli jet motorunun Gloster G.49 üzerinde 15 Mayıs 1941 tarihinde İngilizler tarafından yapıldı (Kerrebrock, 1992).

İkinci Dünya Savaşı'nın son zamanlarına doğru daha sık olarak kullanılmaya başlanan jet uçaklarının savaşa önemli bir etkisi olmamıştır. Savaş esnasında en başarılı girişim Almanlar tarafından Messerschmitt Me 262 uçağıyla yapılmıştır. Füzeler ve jet uçaklar ilk sırada olmak üzere gaz türbinli motorlar, günümüzde insansız hava taşıtları, model roketler, roket motorları ve uzay taşıtlarında yer almaktadır. Ayrıca deniz santralleri, yüksek hızlı otomobiller ve endüstriyel gaz türbinleri gibi alanlarda da kullanımı bulunmaktadır.

Aynı emme, sıkıştırma, yanma ve egzoz ilkeleri ile türbin, kompresör, yanma odası ve nozzle gibi temel kısımlardan oluşan gaz türbinli uçak motorları kullanılacakları alanların ihtiyaçlarına ve gereksinimlerine cevap verecek şekilde eniyileme metodu kapsamında seçilir.

2.2.1. Turbojet

Turbojet motorun bölümleri Şekil 2.4'de verilmiştir.



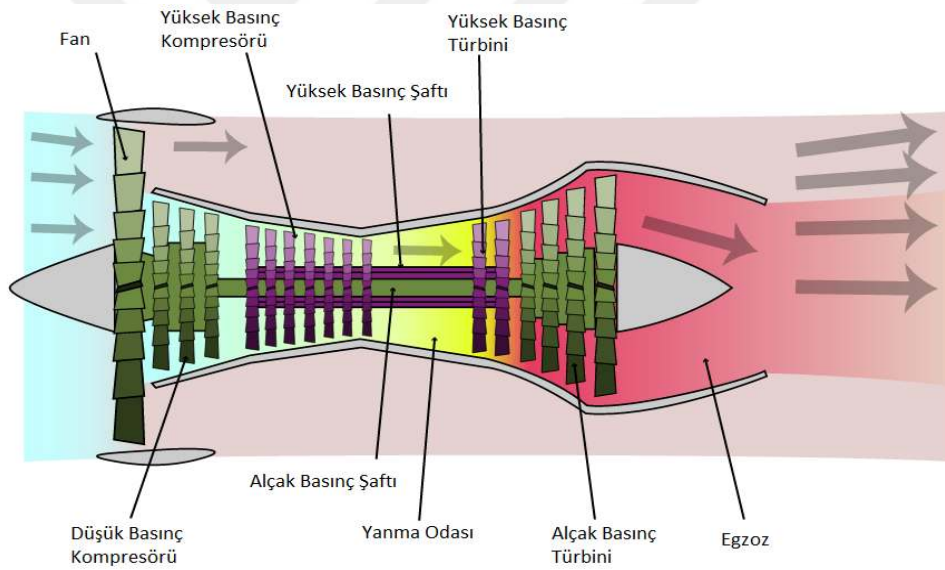
Şekil 2.4. Turbojet Motor (http-1)

Turbojet motoru küçük kütleli havanın motora girip havanın büyük ölçüde ivmelendirilmesiyle tepkisini elde eder. Öncelikle hava kompresörde sıkıştırılır ve yanma odasında püskürtülen yakıt ile yanar. Bunun sonucunda ortaya çıkan gaz hızlı bir şekilde genişleyerek türbinlerin tahriğini sağlar. Nozuldaki daralma sayesinde bu gaz daha da hızlanarak büyük bir itme gücü elde edilmiş olur.

Uçaklarda tercih edilen ilk gaz türbinli motor tipi, turbojettir. Turbojet motorlar yüksek yakıt sarfiyatına sahip olmasına rağmen hız, manevra gibi ihtiyaçların karşılanması için kullanılan bir motordur. Bunun yanında yüksek irtifa ve uzun menzilli uçuşlar için de ideal bir motor tipidir.

2.2.2. Turbofan

Turbofan motorun bölümleri Şekil 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2.5. Turbofan Motor (http-2)

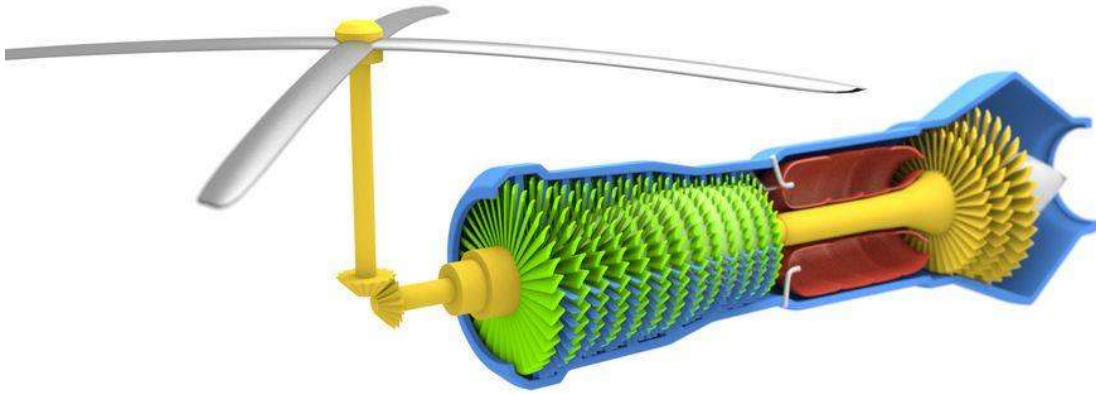
Turbofan motorlarında türbin sadece kompresörü çalıştıracak düzeyde enerji üretir. Yüksek enerjiye sahip havanın yanma sonucunda meydana gelen diğer gazların türbini yüksek basınç ve nozul bölümünü hızlı bir şekilde terk ederek atmosfere ulaşması sonucunda asıl itki kuvveti oluşturulur.

Turbofanlar hem turbopropeller gibi alçak seviyedeki hızlarda yüksek verimli, hem de turbojetler gibi yüksek irtifa ve hız konusunda iyidir. Kısa mesafe kalkışlarına neden olan durum turbofanın düşük seviyeli hızda artan tepkisidir. Lakin turbopropellerden farklı

olarak artmakta olan hava hızıyla turbofan tepkisi kısıtlanmaz. İtkinin artması uçuş hızının artması ile doğru orantılı, hız ise yakıt tüketimi ile ters orantılıdır. Yani hız artarsa yakıt tüketimi düşer. Turbofan motorlar soğuk iklim şartlarına için daha elverişlidir. Başka motor tiplerine göre %10-20 daha sessiz olan turbofan motorlar, turboprop motorlar gibi fan ile türbin arasında bulundurduğu dişli kademeye ihtiyaç duymaz. Bu da bu motorları daha hafif ve basit yapar.

2.2.3. Turboşaft

Turboşaft motora ait görsel Şekil 2.6’da verilmiştir.

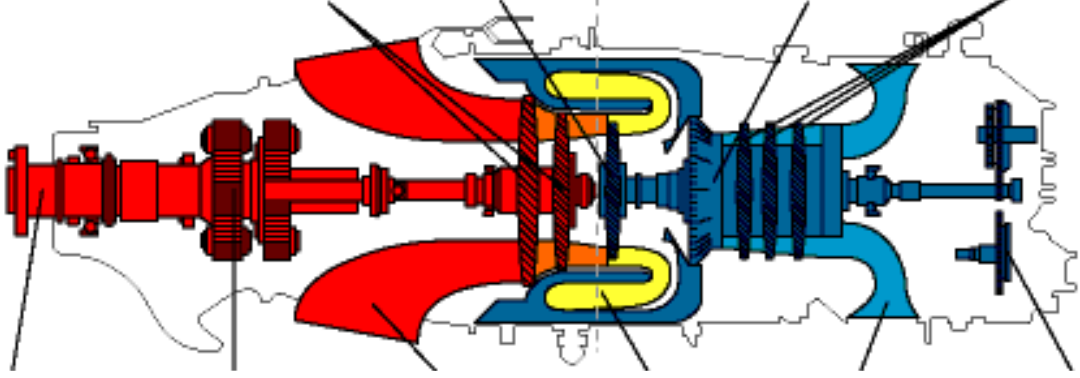


Şekil 2.6. Turboşaft Motor (<http-3>)

Turboprop motorlarının aksine turboşaft motorlar pervane kullanmaz. Pervane yerine gücü helikopter rotoru sağlar. Güç sağlayan jeneratörün hızı ile helikopter rotorunun hızı birbirinden tamamen bağımsızdır. Güç miktarını ayarlamak için jeneratör hızı değiştirilse bile rotor hızı sabit kalabilmektedir.

2.2.4. Turboprop

Turboprop motora ait görsel Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7. Turboprop Motor (<http-4>)

Turboprop motoru ilk olarak Gyorgy Jendrassik tarafından 1938 yılında Budapeşte’de dizayn edilmiştir. Diğer itki gücüne bağlı çalışan turbo motorlardan farklı olarak üretilen enerjinin türbin ve şaft sayesinde pervaneye aktarılmasıyla hareket gücü sağlanır. Yani temel olarak motorun amacı pervaneye hareket vermektir. Egzoz gazlarında kayda değer bir itki gücü kalmaz. Bu motorlar tek şaftlı ve iki şaftlı olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Tek şaftlı motorlarda kompresör ve pervane gücünü aynı şafttan alarak çalışır. İki şaftlı motorlarda ise birinci şaft kompresör için çalışırken bağımsız olan ikinci şaft pervaneye güç aktarmaktadır. Bu motorlar diğer türevlerine göre düşük hızlarda daha verimlidir. Bu bağlamda nakliye uçaklarında sıklıkla tercih edilir.

2.3. Turboprop Motorlar ve Kullanım Alanları

Turboprop motorları türbinler ve şaft vasıtasıyla bir pervaneyi döndürerek hareket sağlarlar. Arka türbin yanma itkisiyle çevrilir. Harekete geçen türbin kompresör ve pervaneye güç sağlar. Nakliye uçakları ve küçük uçaklarda tercih edilmelidir. Modern versiyonları ise daha yüksek performans sağlarken boyut olarak da küçülmektedir. Uçaklarda tercih edilen motorlar turbojetlere göre ağır ve karmaşıktır (Ekici vd., 2016).

1940’lı yıllarda pistonlu motorlar egzoz türbinli kompresörler ile çevrelenmiş olsa da seyahat hızının ve irtifanın yükseltilmesinde yeterli olmamıştır. Bu nedenle yüksek irtifada verimi düşmeyen gaz türbinleri pervane ile birleştirilerek kullanımı sağlanmıştır. Bu tip sistemlerin ilk örnekleri İkinci Dünya Savaşı’nda birkaç uçak için uygulanmış ve hız, irtifa gibi parametrelerin gelişimi sağlanmıştır. 1950 yılında ise Rolls-Royce çıkışlı

dart ve turboprop motorlar Viscount ve Vanguard tipi uçaklarda uygulanarak başarı elde edilmiştir. Bu gelişmelerden sonra bu tip sistemler yük ve yolcu uçaklarında görülmeye başlanmıştır (El-Sayed, 2018).

Pistonlu motora oranla türbin motoru, yaptığı titreşimlerin az olması, aynı orandaki güç düşünüldüğünde daha küçük sürüklenme kuvvetine neden olması ve de kullanılan yakıtın daha ucuza mal edilmesi gibi başarılı özelliklerinden dolayı daha güvenilir sayılmaktadır. Fakat, günümüze dek üzerinde çalışılan gaz türbinleri temelde 400 şaft beygir gücünden daha yüksek güçlerde üretilmesinden dolayı ağırlığı daha az olan uçaklar zorunlu olarak pistonlu motorlarla kuşatılmaktadır.

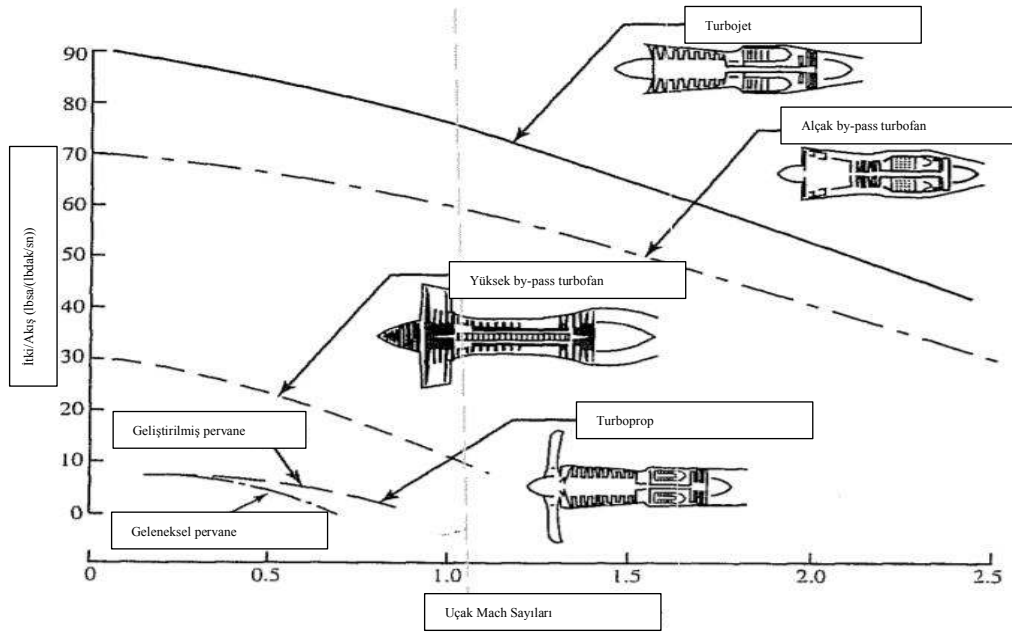
2.4. Turboprop Motorlar ve Performans Değerlendirmesi

Farklı uçuş karakterlerinde bir uçağı istenen biçimde itmek için ihtiyaç duyulan itme gücünü sağlama kabiliyeti ile bir uçak motorunun becerisi incelenebilir. Motor beceri parametreleri şunlardır (El-Sayed, 2018):

- Genel verimlilik
- Tahrik verimliliği
- Termal verimlilik
- Pervane verimliliği
- Uçak menzili
- Kalkış itkisi
- Özel yakıt tüketimi

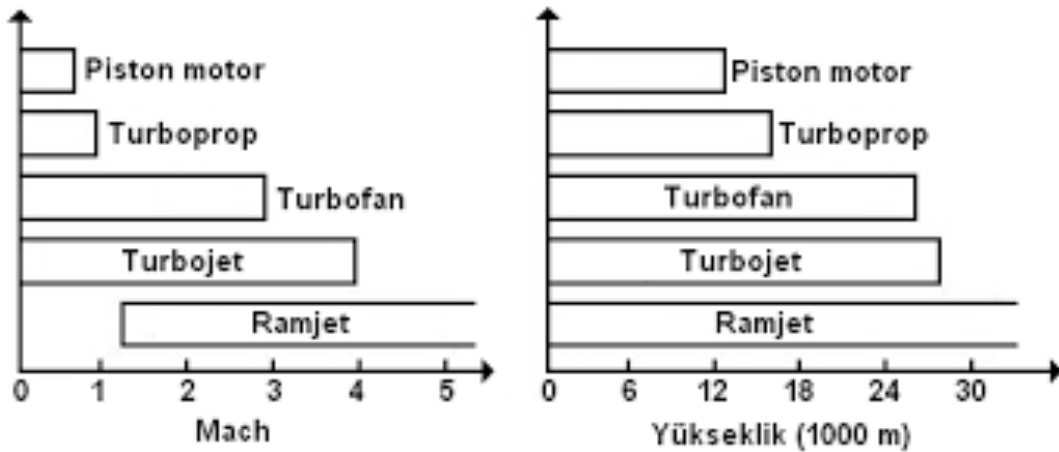
Her ne kadar motorlar için standart bir verimlilik prosedürü ve parametre seti var gözükse de farklı görev ve gereksinimlere göre verimlilik tanımı değişebilmektedir. Örneğin askeri uçaklarda hızlı kalkış ve manevra kabiliyeti önemliyken yakıt sarfiyatı nispeten önemsizdir. Sivil uçaklarda ise yakıt sarfiyatı ve menzil kritik konulardandır (Turan, 2000).

Tipik uçak motorlarının özgül itki karakteristikleri Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Özgül itki karakteristikleri (Şöhret ve Karakoç, 2014)

Turboprop motorlar genel olarak düşük irtifa ve hızlarda yakıt ekonomisi yapması ile tanınırlar. Bu sebeple düşük irtifalı, kısa mesafeli veya yakıt ekonomisinden dolayı uzun mesafeli kargo uçakları tarafından sıkça tercih edilen motorlardır. Saatte 300-750 kilometrelik hızlarda yüksek verim sağlarlar. Motor Mach-irtifa bilgileri Şekil 2.9’da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Motor Mach-İrtifa bilgileri (Şöhret ve Karakoç, 2014)

Turboprop motorların verimi pervane verimine tamamen bağlıdır. Pervane verimi ise hava yoğunluğuna ve dolayısıyla irtifa ve uçuş hızına bağlıdır. Yüksek irtifa

ve hızlarda verim düşmektedir. Gaz türbinlerinin farklı uçuş rejimlerinde sabit bir devir hızı olmaktadır. Dolayısıyla pervanenin de sabit hız fakat ayarlanabilir hatveli olması gerekmektedir. Gaz türbinli motorlarda verim alabilmek için belirli yükseklikte bir devir sayısı gerektiğinden kompresör şaftı ve pervane şaftı arasında farklı oranlarda planet dişli yerleşimi sağlanır.

Turboprop motorlar 450-10000 beygir gücüne sahip olabilmektedirler. Kompresör çeşitleri ise radyal ya da eksenel olmaktadır. Turboprop motorların yakıtları diğer pistonlu uçak motorlarının yakıtlarından farklılık gösterir. Yüksek alevlenme sıcaklığına sahip gaz yağı kerosen tercih edilir.

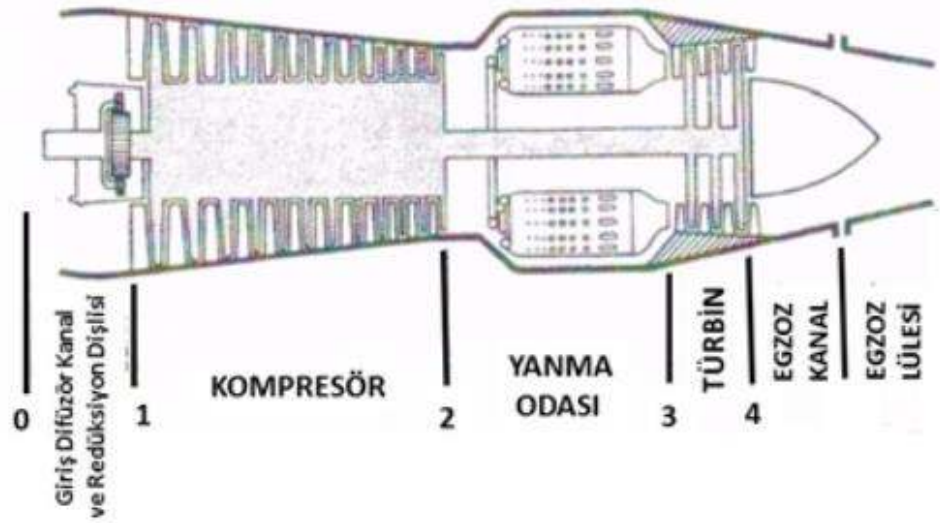
Gaz türbinli motorlar içinde turboprop motorların verimliliği görece yüksektir. 18000'den 30000 ft aralığına kadar, saatte 300-750 km hızlar arasında verimli çalışabilmektedir. Fakat pervaneden dolayı elde edilebilecek hızlar limitlidir. Motor aksamaları (dişli kutusu vb.) genel olarak ağır ve spesifik tasarım ürünleridir.

2.5. İdeal Turboprop Çevrim Analizi

Güç üreten makinelerin çevrim analizlerinde sıklıkla termodinamik çevrimler kullanılır. Sürtünme gibi faktörlerin yarattığı zorluklar sebebiyle gerçek ısı makinelerinin analizlerini yaparken bazı kabuller yapılmasına ihtiyaç duyulur. Bu sebeple, gerçek çevrime en yakın olacak şekilde; ancak içten tersinir hal değişimlerinden meydana gelen “ideal çevrim” elde edilir (Şöhret ve Karakoç, 2014).

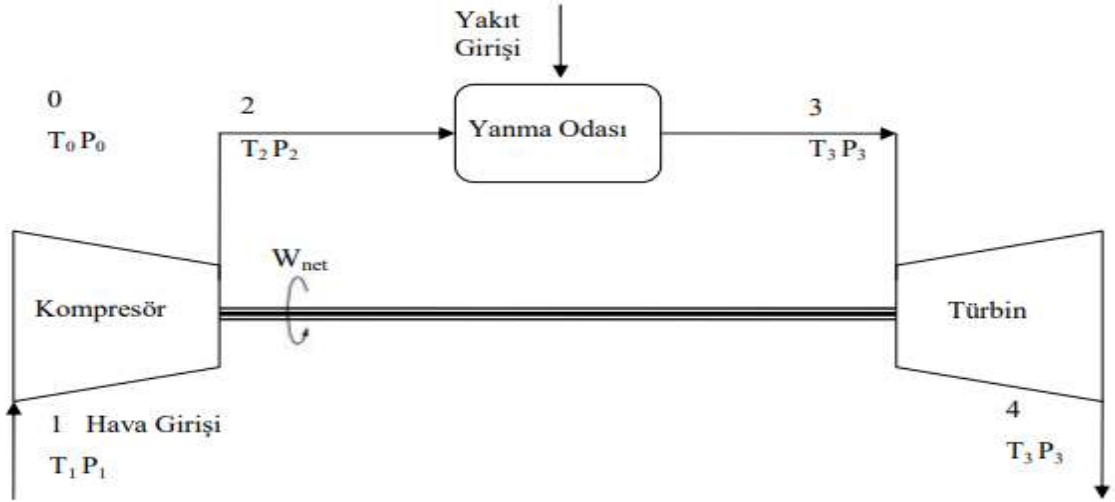
Çevrim analizi sonucunda gaz türbinli motorların itki kuvveti veya özgül yakıt sarfiyatı gibi performans değişkenleri elde edilir. Bu değişkenlerin bulunmasında uçuş şartları, tasarım sınırlamaları ve tasarım seçenekleri dikkate alınır. Bu hesaplamalar motordan geçen havanın termodinamik davranışları izlenerek yapılır. Bu sayede en iyi motor isterlerinin belirlenmesinde çevrim analizinin önemi anlaşılır (Turan, 2000).

Gaz türbini motorunun çalışma esasları periyodik bir sistem olarak tanımlanır. Bu sistem, George Brayton tarafından icat edilmiş olan Brayton çevrimi ya da çok bilinen adıyla Joule çevrimidir. Brayton sistemi üç temel alt sistemden oluşur. Bunlar: gaz kompresörü, yanma odası ve genişleme türbinidir.



Şekil 2.10. Gaz türbinli motor evreleri (Şöhret ve Karakoç, 2014)

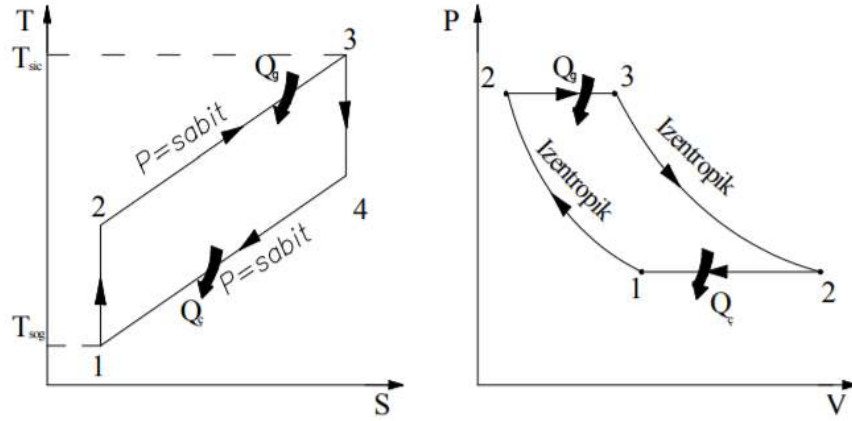
Şekil 2.10'da sırasıyla gaz türbinli motorların çalışma evreleri gösterilmektedir. 0, 1, 2, 3, ve 4 numaralı evrelerin giriş-çıkış noktalarındaki sıcaklık ve basınç değerleri aşağıdaki şemada T ve P harfleri kullanılarak ifade edilmektedir (Ülbeği, 2012).



Şekil 2.11. Motor çalışma evreleri (Ülbeği, 2012)

Şekil 2.11'de belirtildiği gibi, termodinamik analiz ile bazı kabuller yapılarak analiz işlemleri basitleştirilir. Bu işlem sonucunda diğer içten yanmalı güç çevrimleri gibi açık sistemler kapalı bir sistem gibi analiz edilmeye uygun hale getirilir (Yeşilata, 2018).

Şekil 2.12'deki diyagramlar ile şekilde gösterilen Joule çevrimi, ikişer izobar ve izotermik hal değişimleriyle ifade edilir.



Şekil 2.12. Joule çevrimi (Yeşilata, 2018)

Çevrim işlemleri aşağıda açıklandığı gibi dört işlemten oluşmuştur:

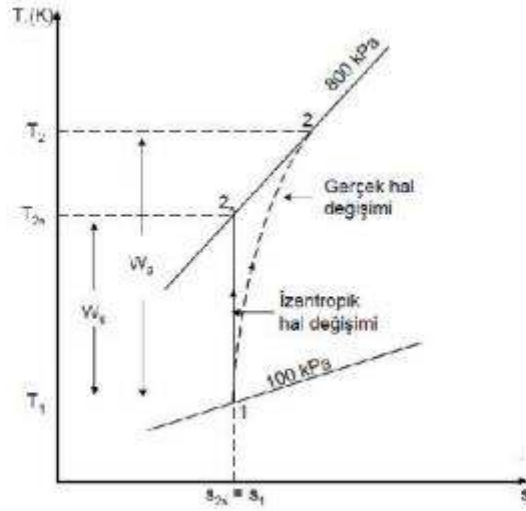
- 1-2: Girişte ve kompresörde tersinir sıkıştırma,
- 2-3: Sabit basınçta yakıt yakılması,
- 3-4: Türbin ve egzoz çıkışındaki havadan statik genleşme,
- 4- 1: Sabit basınç durumunda havayı soğutarak başlangıç haline dönme.

Brayton sisteminin ilk aşaması gaz kompresörüdür. Kompresöre giren hava sabit hızla kompresör kademeleri boyunca ilerlerken basınç ve sıcaklıkta artış görülür. Bu artış, kompresör palelerinin son kademelere doğru gittikçe küçülen boyutlarda kullanılmasıyla sağlanmış olur. Kompresördeki havanın değişken hızla ilerlemesi stall denen ve motorun düzgün çalışmasına engel olan olay ile sonuçlanır. Bu durumda, akış düzensizliğine bağlı olarak tüm kompresörün ters yönde dönme riski bulunmaktadır.

Gaz kompresörü sırasında gerçekleşen sıkıştırma işlemi izantropik yani adyabatik kabul edilir. Kompresör çıkışındaki basınç ve sıcaklık arasında aşağıdaki gibi oran bulunur.

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'de gösterilen k, özgül ısı oranını ifade eder. Bu parametrenin değeri hava için 1.4 olarak kabul edilir. Turbo makine elemanlarının ideal ve gerçek durumlardaki verimi izantropik olarak ölçülür. Verim, kompresör ve türbin gibi turbo makine elemanlarının ürettikleri ve kullandıkları işler arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır.



Şekil 2.13. *Adyabatik kompresörlerde gerçek ve izantropik hal değişimlerinin T-s diyagramları*
(Çengel, 1996)

Şekil 2.13’de, adyabatik kompresörlerde kullanılan iş için gerçek durum ve izantropik durum değişimleri gösterilmiştir. Gerçek durumlarda kompresörde kullanılan iş, izantropik duruma göre daha fazladır. Dolayısıyla, kompresör çıkış sıcaklığı ideal duruma kıyasla gerçek durumlarda fazla olacaktır. İzantropik verim, aşağıda verilen denklem ile hesaplanmaktadır. T_{2s} ve T_2 , sırasıyla, ideal şartlardaki ve gerçek hallerdeki kompresör çıkış sıcaklıklarını ifade etmektedirler.

$$\eta_c = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \quad (2.2)$$

Bu denklem yardımıyla, gerçek çıkış sıcaklığını bulabilmek için kompresörün izantropik verimi ve basınç oranının bilinmesi yeterli olacaktır.

Brayton sisteminin ikinci aşaması brülör (yakıcı) ya da yanma odasıdır. Kompresör boyunca sabit hızla akan hava, basıncı ve sıcaklığı artırılmış şekilde yanma odasına girer. Tam yanma sağlayabilecek, en verimli hava-yakıt oranı kullanılarak yanma olayı gerçekleşir.

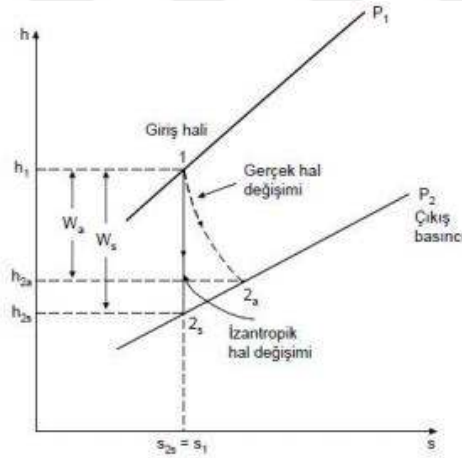
Brayton sisteminin son basamağı genleşme türbinidir. Yanma işleminden sonra ortaya çıkan gazlar, yüksek basınç ve sıcaklıkta türbine yönlendirilir. Genleşme türbininde bu gazların kaybettiği basınç ve sıcaklık şaft gücüne çevrilerek kimyasal enerjiden mekanik enerji elde edilmiş olur. Mekanik enerjinin çoğu kompresörü çalıştırmak için kullanılır. Bir miktar mekanik enerji ise motor aksesuarlarının çalışabilmesi için kullanılır. Türbin alt sistemine ait verimlilik hesabı izantropik verim hesabıyla elde edilir. Aşağıdaki denklem ile bulunur.

$$\eta_t = \frac{T_3 - T_{4s}}{T_3 - T_4} \quad (2.3)$$

İzantropik çıkış sıcaklığı hesabı için aşağıdaki denklemden yararlanılır. Denklemlerde T3 türbin giriş sıcaklığı, T4s izantropik türbin çıkış sıcaklığı ve T4 gerçek türbin çıkış sıcaklığını ifade eder.

$$\frac{T_3}{T_{4s}} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (2.4)$$

Şekil 2.14’de adyabatik (izantropik) bir türbinde gerçek ve ideal değişimlerin entalpi-entropi diyagramı gösterilmektedir (Çengel, 1996). Türbinden çıkan gazlar yüksek hızlarda egzozdan atmosfere atılarak itki kuvveti oluşur. Turbojet motorlarda elde edilen düşük debili itki gücü kompresöre yüksek hızda gelen hava ile elde edilirken; turbofanda ise kompresöre giren düşük hızlı hava ile yüksek debide itki oluşturulur. Bu durum, turboprop motorlarda pervane aracılığıyla sağlanır (Turgut, 2009).



Şekil 2.14. Adyabatik bir türbinde gerçek ve ideal değişimlerinin entalpi-entropi diyagramı (Çengel, 1996)

2.6. Gerçek Turboprop Çevrim Analizi

Gerçek motor çevrim analizi, yapılan bazı kabuller ile ideal çevrim analizinden farklılaşır. Standart hava döngüsü analizinde gerçeklemesi imkânsız fakat anlamlı ve ideal bir turbo makine varsayımı yapılmaktadır. Gerçekçi analizde matematiksel performans hesaplanırken, kompresör ve türbin verim değişkenleri, gerçeğe uygun termal özellikler, basınç kaybındaki önemli değerler dikkate alınır (Şöhret ve Karakoç, 2014).

Gaz türbini motorlarının gerçek şartlarda çalışması sırasında, kompresördeki sıkıştırma işleminden genişleme türbininde itki kuvveti oluşturma işlemine kadar olan

süreçte verim kayıpları yaşanır. Bu kayıplar sistemin izantropik olmasının önüne geçer. Brayton sistemlerde, tüm çıkış gücünün artırılması amacıyla genellikle kompresördeki sıkıştırma oranları artırılır (http-5).



3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. İncelenen Motorun Teknik Verileri: PT6A-20

Tezimizde kullanılan PT6A motoru ilk üretildiği tarihten günümüze kadar 47,500 adetten fazla üretilen, 180’den fazla ülkede, 128 farklı uçakta kullanılan ve 400 milyondan fazla uçuş saatine sahip bir motordur. (http-6).

Deneysel çalışmada kullanılan enstrümanite edilmiş PT6A-20 motorunun teknik kitapları üzerinden alınan verilerinin eşliğinde incelenmesi faydalı olmaktadır. Deneyde kullanılan motor, serbest türbinli, annular tip yanma odasına sahip 6.3:1 sıkıştırma oranına sahiptir. Pervanelerinin dönüş yönü saat yönünün tersine olup pervane şaft konfigürasyonu flanşlı ve pervane şaft aktarım oranı 0.0668:1’dir. Motorun çapı 482.6 mm, uzunluğu 1,575 mm ve kuru ağırlığı 125 kg’dır. PT6A-20 motorunun yağ tüketimi 0.091 kg/sa’dır. Teknik veriler aşağıdaki tabloda da sunulmuştur.

Tablo 3.1. PT6A-20 motorunun teknik verileri

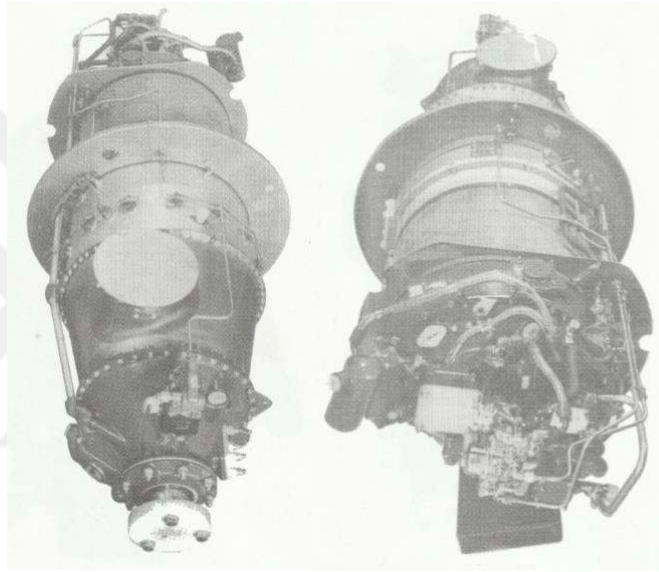
Motor Tipi	Serbest Türbin
Yanma Odası Tipi	Annular
Sıkıştırma Oranı	6.3:1
Pervane Dönüş Yönü	Saat Yönünün Tersine
Pervane Şaft Konfigürasyonu	Flanşlı
Pervane Şaft Aktarım Oranı	0.0668:1
Motor Çapı	482.6 mm
Motor Uzunluğu	1,575 mm
Yağ Tüketimi	0.091 kg/sa
Ağırlığı	125 kg

Deneysel çalışmalarda kullanılan motor take-off aşamasında 579 ESHP güce ve 2,200 Shaft rpm’e sahip, rotor hızı 33,000 rpm’de iken 70 Jet Thrust’ı üretebilen ve 0.65 lb/ESHP/sa (15°C’de) yakıt tüketimine sahiptir. Aynı motor maksimum tırmanma esnasında aynı shaft RPM değeri ile 566 ESHP güce sahip, aynı rotor hızında 62 jet thrust’ı üretirken 0.067 lb/ESHP/sa yakıt tüketmektedir. Diğer konfigürasyon değerleri aşağıdaki tabloda belirtilmiştir.

Tablo 3.2. *PT6A-20 motorunun HP-RPM değerleri*

	ESHP	Shaft RPM	Jet Thrust (Rotor Hızı 33,000 rpm)	JP-4 Yakıt Tüketimi LB/ESHP/HR (15 °C)
Kalkış	579	2200	72	0.649
Max. Havada Kalma	579	2200	72	0.649
Max. Tırmanma	566	2200	70	0.653
Max. Menzil	522	2200	68	0.670

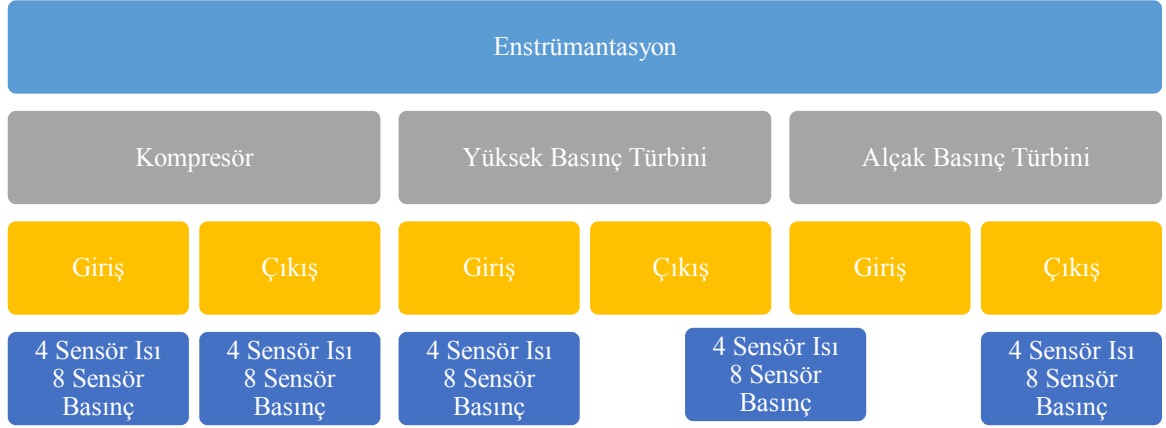
Söz konusu motora ait teknik kitaplardan alınmış olan kesit resimleri Görsel 3.1’de sunulmuştur.



Görsel 3.1. *PT6A-20 Motoru*

3.2. Motor Enstrümantasyonu

Çalışma kapsamında kullanılan motorun sıcaklık ve basınç değerlerinin alınabilecek şekilde enstrümantasyon edilmiş olması çalışma için büyük bir olanak sağlamıştır. Sıcaklık ve basınç değerleri alınan kısımlar sırası ile kompresör girişı ve çıkışı, yüksek basınç türbini (gaz jeneratörü) girişı, Yüksek basınç türbini çıkışı/alçak basınç türbini (güç türbini) girişı ve alçak basınç türbini çıkışıdır. Enstrümantasyon bileşenleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. *Enstrümantasyon bileşenleri*

Yapılan enstrümantasyon neticesinde seyyar bremzenin kurulması ile motor çalıştırma esnasında alınan verilerin bremzenin bordo paneli üzerinden görülebilmekte ve kontrol edilebilmekte, ayrıca bağlanan bir bilgisayar sayesinde anlık olarak kaydedilerek bilimsel çalışmalar için veriler alınabilmektedir.

Enstrüman edilişi aşamasında takılan bütün sensörlerin açısal ve eksenel konumlamaları hesaplanmış, açılan deliklerin açısal ve eksenel konumları belirtilmiş ve final çıkış açısı ile çıkış konumları tanımlanmıştır.

İlave olarak bahse konu motorun takıldığı bir uçakta gözlemlenebilecek olan güç verileri ile RPM değerlerinin de okunması ve kaydedilmesine olanak sağlanmıştır.

4. TERMODİNAMİK ANALİZ

Sistemlerin ve cihazların analizinde önemli rol oynayan termodinamik, enerji dönüşüm ve transferlerini neticesinde meydana gelen süreçlerde de kilit bir rol oynamaktadır. Doğanın kanunları ele alındığı vakit, işin ısıya dönüşümü kusursuz mümkün iken, tersi olan proste dışarıdan desteğe ihtiyaç duyar ve çevrimsel motor gibi cihazlardan faydalanılır (Dinçer ve Rosen, 2007).

Enerjinin yoktan var edilemediği veyahut var iken de yok edilemediği bilinmektedir ve iş yapabilme yeteneği ile değişikliklere sebep olabilme kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Tabir olarak ise ilk defa Newton tarafından, kinetik ve potansiyel enerji olmak üzere mekanik alanda kullanıldığı kabul edilmektedir. Kavramsal olarak bir birleştirici olarak kullanılması 19'uncu yüzyılın ortalarına tekabül etmekte olup o dönemin en büyük başarılarından biri olarak lanse edilir (Dinçer ve Rosen, 2007).

Ekserji ise basitçe, bir enerji kaynağının kullanılması ile elde edilebilen maksimum potansiyel olarak tanımlanabilmektedir (Moorhouse, 2003).

Ekserji ile enerjinin karşılaştırılması mümkündür ve bu karşılaştırma (Dinçer ve Çengel, 2001; Dinçer ve Rosen, 2007) Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Enerji ve ekserjinin karşılaştırılması (Yıldırım, 2004)

Termodinamiğin Yasaları:

Sıfırıncı yasa; a cismi b cismi ile ısı dengede ve b cismi de c ile ısı dengede ise a ve c cisimleri de birbirleri ile ısı dengededir.

Birinci yasa; enerjinin korunumunu ifade eder. Enerjinin yoktan var edilemediği veya var iken de yok edilemediğini, lakin bir biçimden diğerine dönüşebileceğinin tanımlamasıdır.

İkinci yasa için kabul edilen iki farklı tanım vardır. Clausius, “ısı yüksek sıcaklıklı ortamdan düşük sıcaklıklı ortama doğru kendiliğinden geçer” diye tanımlar iken Kelvin-Planck “tek bir ısı kaynağı kullanarak bunun tamamını işe çeviren bir makine yapmak mümkün değildir” şeklinde tanımlamıştır.

Hayatın her alanında karşımıza çıkan termodinamik, özellikle kendini günlük yaşamımızı kolaylaştıran cihazlar ile tasarımlarda kendini göstermektedir.

4.1. Enerji Analizi

Sistemin toplam enerjisi iç, potansiyel ve kinetik enerjilerin toplamı olarak ifade edilir:

$$\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \quad (4.1)$$

Kapalı sistemler, hal değişimleri sırasında hareketsizdir. Bu nedenle de söz konusu sistemlerde kinetik ile potansiyel sistemler ihmal edilebilir. Bundan dolayıdır ki denklem:

$$\Delta E = \Delta U \quad (4.2)$$

olarak kullanılabilir.

Adyabatik bir hal değişimi esnasında termodinamiğin birinci yasasına göre sistemin toplam enerjisindeki net değişim, sisteme giren toplam enerji ile sistemden çıkan toplam enerjinin farkı olarak belirtilebilir.

$$\Delta \dot{E}_{sistem} = \dot{E}_g - \dot{E}_ç \quad (4.3)$$

Ayrıca, sürekli akışlı bir sistem için kütle korunumu:

$$\Sigma \dot{m}_g = \Sigma \dot{m}_ç \quad (4.4)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Sürekli akışlı açık sistemler dâhilinde kontrol hacmi içinde toplam enerjinin sabit olmasından dolayı enerji değişimi de sıfır olmaktadır. Bundan ötürü, giren enerji ile çıkan enerji miktarları kontrol hacmi içinde eşittir. Dolayısıyla enerjinin korunumu:

$$\Sigma \dot{E}_g = \Sigma \dot{E}_ç \quad (4.5)$$

$$\dot{Q}_g + \dot{W}_g + \Sigma_g \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) = \dot{Q}_\zeta + \dot{W}_\zeta + \Sigma_\zeta \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (4.6)$$

olarak ifade edilmektedir.

Aynı şartlar altında enerji dengesi ise:

$$\dot{E}_y = \dot{Q}_{kay} + \dot{W} \quad (4.7)$$

formülü ile hesaplanmaktadır.

İçten yanmalı motorlar söz konusu olduğunda yanma odasına giren yakıtın alt ısı değeri neticesinde belirli bir enerji girişi olur. Birim zaman içinde elde edilen enerji miktarı:

$$\dot{E}_y = \dot{m}_y H_u \quad (4.8)$$

formülü ile ifade edilmekte olup termodinamiğin birinci yasasına göre yanma işlemi ile kaybettiğimiz enerji miktarı, bir önceki formülde hesaplamış olduğumuz enerji miktarının işe dönüşmeyen kısmı yani diğer bir ifade ile işe dönüşen net güçten farkı olarak belirtilmektedir.

$$\dot{Q}_{kay} = \dot{E}_y - \dot{W} \quad (4.9)$$

Motorun sahip olduğu ısı verim:

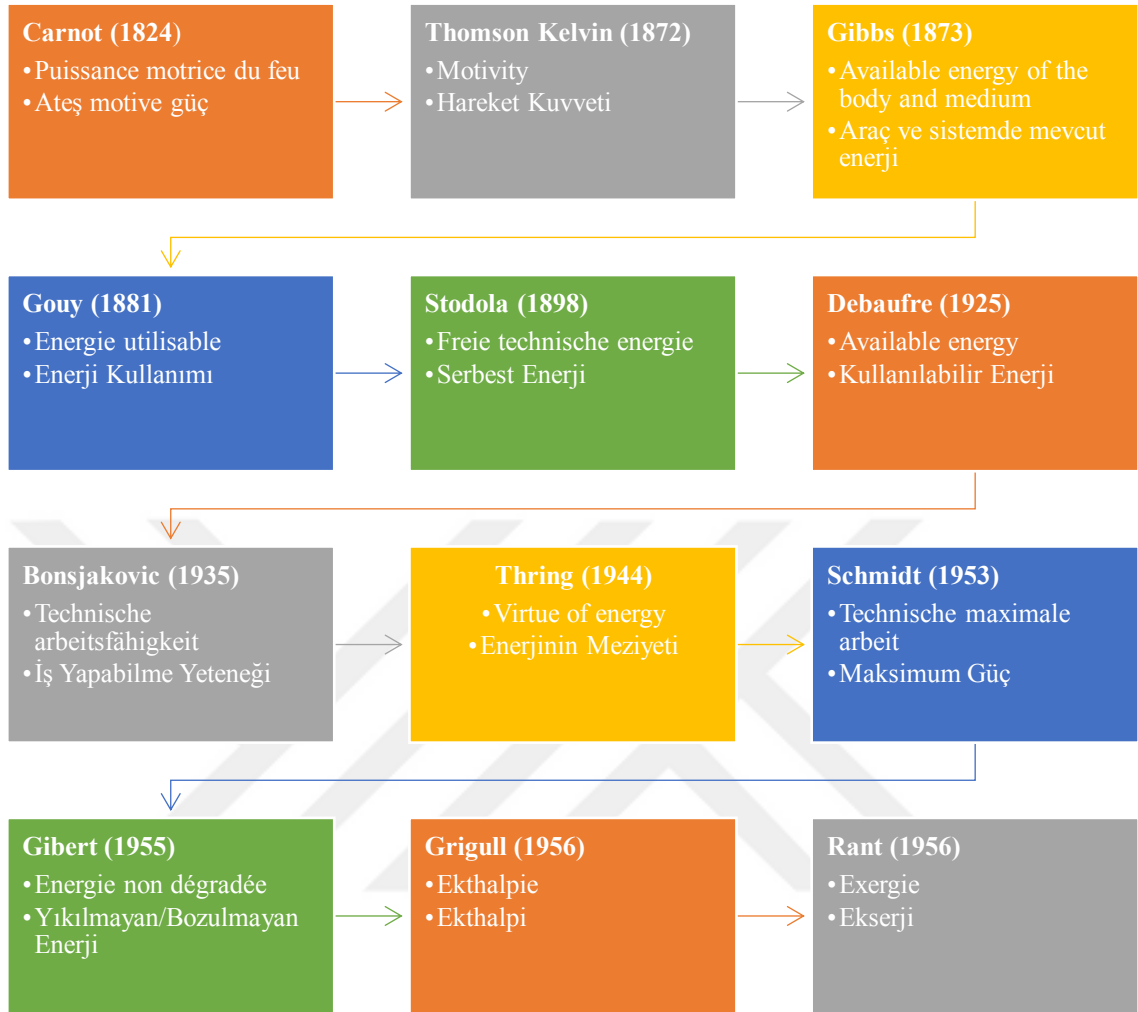
$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{E}_y} \quad (4.10)$$

şeklinde ifade edilir ve işe dönüşen net gücün yukarıda hesaplanan yakıttan elde edilmiş olan enerji miktarına oranı olarak belirtilir.

4.2. Ekserji Analizi

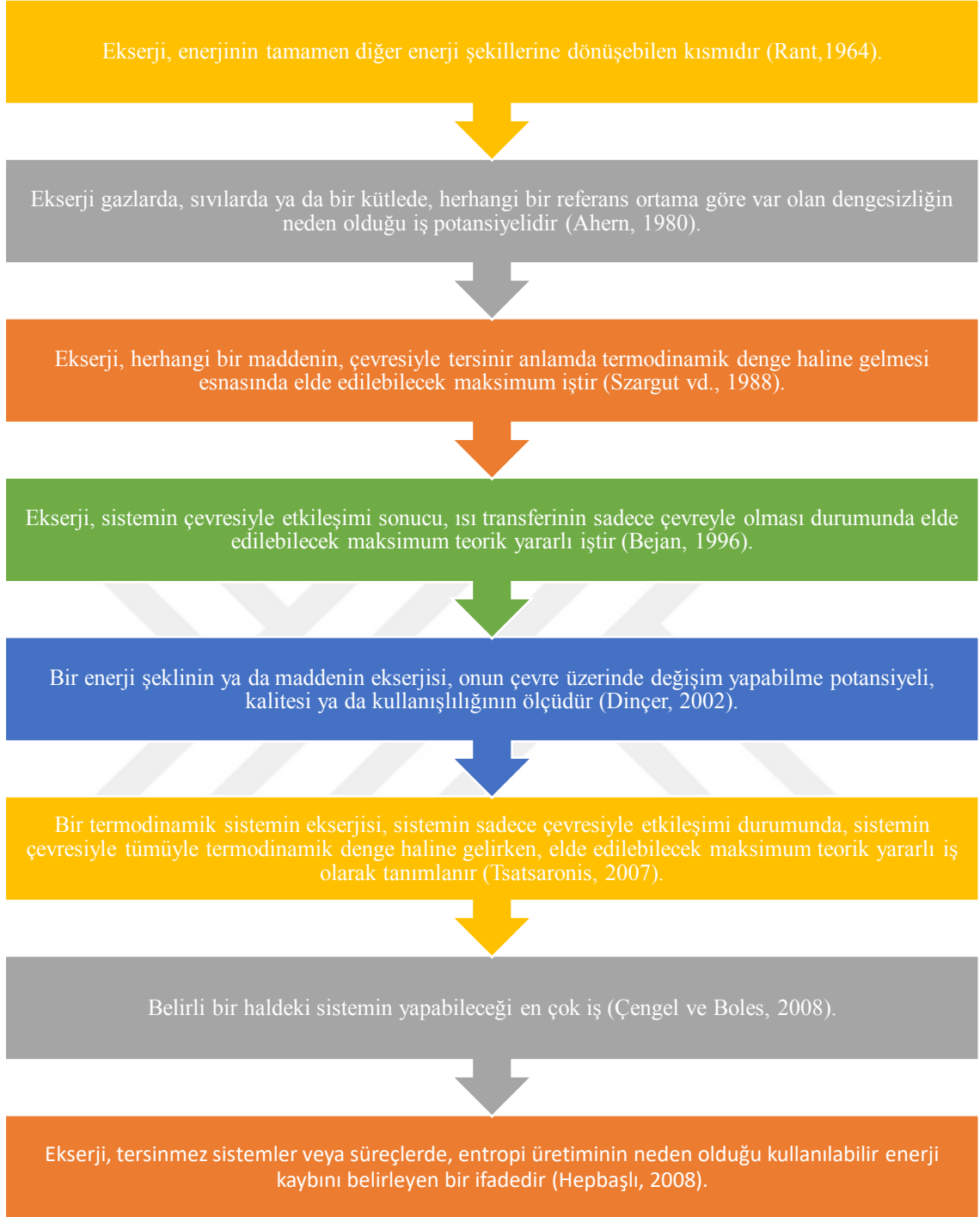
Terimsel olarak incelendiğinde ekserjinin ilk defa 1824 yılında Carnot tarafından kullanıldığı görülmektedir. Formülasyonunun kökeni ise 1881 yılında Gouy ve 1898 yılında Stadola'ya dayanmaktadır. (Ekici, 2015).

Gouy ve Stadola'ya göre bir sistemin maksimum maksimum potansiyelde iş gerçekleştirebilmesi, o sistemin iç enerjisi ile çevre şartlarına bağlıdır. Bundan dolayı Gouy ve Stadola, iç enerji ve çevre şartlarına bağlı bir fonksiyon geliştirerek formülasyon gerçekleştirilmiştir. Yirminci yüzyılda birçok yazar ve/veya araştırmacı bu konsepti geliştirerek tanımlamalar yapmıştır. Bahse konu tanımlamalar/ifadeler Şekil 4.2'de belirtilmiştir (Junior, 2012).



Şekil 4.2. Yıllara sari ekserji ifadeleri(Junior, 2012; Ekici 2015)

Karakoç’a (2008) göre ise ekserjinin tanımı bazı bilim insanları tarafından Şekil 4.3’de belirtildiği gibi yapılmaktadır:



Şekil 4.3. Ekserji tanımlamaları (Ekici, 2015)

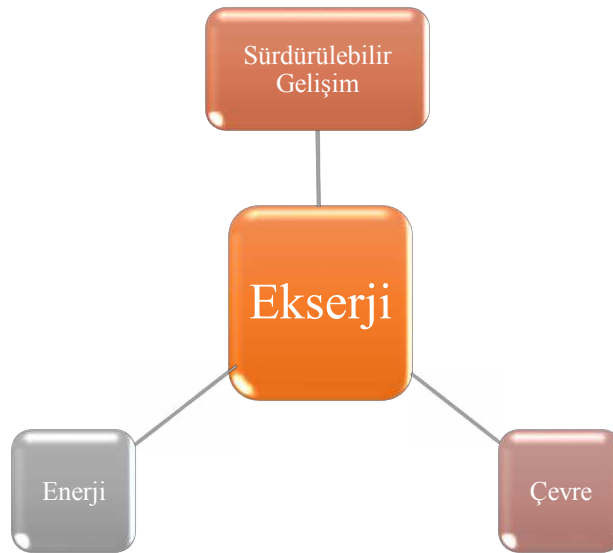
Enerji ve ekonomi arasındaki ilişkinin önem kazanması ve bu iki kavramın birbirini arasındaki ilişkinin dikkatleri üzerine çekmesi 1970’li yılların temel konuları arasında kendini yer bulmuştur. Aynı konunun devamında yani 1980’li yıllarda ise enerji üretiminden kaynaklı, çevresel etkilerin kötüye gitmesi birtakım endişeleri de beraberinde getirmiş ve bu kapsamda yeni yöntemler geliştirmeye, üretim, tüketim ve de

dönüştürme gibi enerji proseslerindeki olumsuzlukların ve negatifliklerin minimize edilebilmesi için çalışılmasına zemin hazırlamış ve sürdürülebilirlik ilkesi kendisine yer bulmuştur (Rosen, 2007).

İnsan hayatını kolaylaştırmak için geliştirilen yeni sistemler ile enerji kaynaklarının verimli kullanılması ve sürdürülebilir bir yaşam standardının sağlanması için yapılan çalışmalar, temel yaşamımızda ihtiyaç duyduğumuz yeryüzünün sahip olduğu kaynakların kontrolsüzce tüketilmesini engelleyerek gelecek nesillere daha yaşanılır bir dünya bırakılmasını sağlamaktadır.

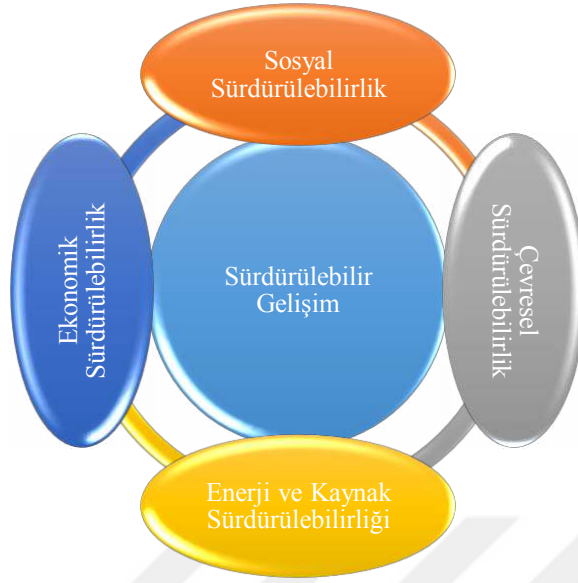
Sistemlerin geliştirilmesi ve tasarımları ile enerjinin, termodinamiğin ikinci yasası ile kütle korunumu ve tasarruf ilkelerinin harmanlanarak kullanılması ile gerçekleştirilen analizlere ekserji analizleri denir. Ekserji analizleri neticesinde elde edilen verim hesapları, enerji analizlerinden elde edilen verilerden daha anlamlı olduğu değerlendirilmektedir (Rosen, 2002; Dinçer ve Rosen, 2007; Altuntaş, 2011).

Ekserji analizlerinin neticesinde elde edilen veriler ile sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi için bileşenlerinin tam ve etkin olarak belirlenebilmesi ve anlaşılması gerekmektedir (Dinçer, 2007).



Şekil 4.4. Ekserji Üçgeni (Dinçer, 2007)

Şekil 4.4’de gösterildiği üzere, ekserji merkezli yaklaşım içinde, sürdürülebilir gelişim, enerji ve çevre sürekli birbirleri ile iki yönlü etkileşim içindedir.



Şekil 4.5. Küresel sürdürülebilirlik faktörleri (Dinçer, 2007)

Küresel sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi için, ekonomik, sosyal ve çevresel sürdürülebilirlik ile enerji ve kaynak sürdürülebilirliğinin birleşimi sayesinde oluşan gelişimin sağlanması gerekmektedir (Şekil 4.5).

İş yapabilme potansiyeli olarak da tanımlanabilen ekserji, fiziksel ekserji (Ex_{fiz}), kimyasal ekserji (Ex_{kim}), kinetik ekserji (Ex_{kn}) ve potansiyel ekserji (Ex_{pt})'nin toplamı olarak ifade edilmektedir.

$$\dot{Ex} = \dot{Ex}_{fiz} + \dot{Ex}_{kim} + \dot{Ex}_{kn} + \dot{Ex}_{pt} \quad (4.11)$$

Ekserji dengesi ise:

$$\dot{Ex}_g = \dot{Ex}_\zeta + \dot{Ex}_{kay} + \dot{Ex}_{i\zeta} + \dot{Ex}_{yık} \quad (4.12)$$

formülüyle belirtildiği gibidir.

Daha açık olarak ifade etmek gerekirse:

$$\Sigma \dot{m}_g \varepsilon_g = \Sigma \dot{m}_\zeta \varepsilon_\zeta + \dot{W} + \Sigma \left(1 - \frac{T_0}{T_{sh}}\right) \dot{Q} + \dot{Ex}_{yık} \quad (4.13)$$

şeklinde yazılabilir.

Birim zamanda açığa çıkan ısı miktarı:

$$\dot{Q} = \dot{m}_y H_u - (\dot{W} + \dot{m}_\zeta \Delta h_\zeta) \quad (4.14)$$

formülüyle hesaplanmaktadır.

Isı ve iş arasındaki fark giriş ve çıkış akımlarındaki enerji değişim oranlarından kaynaklanmaktadır (Yücer, 2017).

$$E_i = m_i c_{p,i} T_i \quad (4.15)$$

Gaz türbinli motorlarda her bir bileşen için kütle korunumu ve enerji dönüşümlerini içiren formüller aşağıda belirtildiği şekildedir. (Ballı ve Hepbaşlı, 2013)

Hava alığı için:

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{\zeta,1} + \dot{m}_{\zeta,2} \quad (4.16)$$

$$\dot{W}_{HA} = \dot{m}_{\zeta,1} c_{p,\zeta,1} T_{\zeta,1} + \dot{m}_{\zeta,2} c_{p,\zeta,2} T_{\zeta,2} - \dot{m}_g c_{p,g} T_g \quad (4.17)$$

Kompresör:

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{\zeta} = \dot{m}_h \quad (4.18)$$

$$\dot{W}_K = \dot{m}_h (c_{p,h,\zeta} T_{\zeta} - c_{p,h,g} T_g) \quad (4.19)$$

Yanma odası:

$$\dot{m}_{gz} = \dot{m}_h + \dot{m}_y \quad (4.20)$$

$$\dot{m}_h c_{p,h,\zeta} T_{h,\zeta} + \dot{m}_y \eta_{YO} LHV = \dot{m}_{gz} c_{p,gz} T_{gz} \quad (4.21)$$

Türbin:

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{\zeta} = \dot{m}_{gz} \quad (4.22)$$

$$\dot{W}_T = \dot{m}_{gz} (c_{p,gz,g} T_g - c_{p,gz,\zeta} T_{\zeta}) \quad (4.23)$$

4.2.1. Giren ekserji

Sisteme giren ekserji miktarı, yakıt ekserji miktarı olarak ifade edilmektedir. Burada ifade edilen ekserji miktarını sadece kimyasal ekserji oluşturmaktadır ve yakıta ait özgül ekserji değeri ile kütleli debisinin çarpımına eşittir:

$$\dot{E}x_g = \dot{E}x_y = \dot{m}_y \varepsilon_y \quad (4.24)$$

Bahse konu yakıtın özgül ekserji değeri (ε_y), yakıta ait alt ısı değeri ile kimyasal ekserji faktörünün çarpımı ile bulunur:

$$\varepsilon_y = H_u \varphi \quad (4.25)$$

Kimyasal ekserji faktörü olan φ , sıvı yakıtlar için aşağıda belirtilen eşitlik yardımı ile hesaplanabilmektedir (Aydın, 2012):

$$\varphi = 1.0401 + 0.1728 \frac{h}{c} + 0.0432 \frac{o}{c} + 0.2169 \frac{s}{c} (1 - 2.0628 \frac{h}{c}) \quad (4.26)$$

Bu denklemdeki $\frac{h}{c}, \frac{o}{c}, \frac{s}{c}$ sıvı yakıt içerisindeki sırasıyla; hidrojen, oksijen ve sülfür bileşenlerinin karbona oranlarıyla göstermektedir.

4.2.2. Net ekserjetik güç

Sistem içinde işe dönüşen güç iki farklı şekilde hesaplanabilmektedir. Bunlardan ilki P-V diyagramı kullanılarak diyagram altında kalan alanın hesaplanması, ikinci yol ise üretici firmanın vermiş olduğu motor gücünden faydalanılarak yapılan hesaplamadır.

$$\dot{E}x_{i\dot{s}} = \dot{W} \quad (4.27)$$

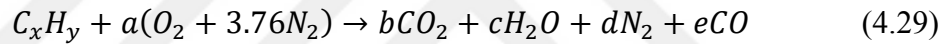
4.2.3. Çıkan ekserji

Sistemden çıkan ekserji miktarı:

$$\dot{E}x_{\dot{c}} = \sum \dot{m}_i (\varepsilon_{kim} + \varepsilon_{tm})_i \quad (4.28)$$

ile hesaplanmaktadır.

Eşitlik içinde kullanılan ε_{kim} için C_xH_y 'nin yanma denklemi:



olarak ifade edilebilir.

4.2.4. Kimyasal ekserji

Kimyasal ekserji, sabit basınç ve sıcaklık altında kontrollü maddenin çevre ile kimyasal olarak dengeyi gelmesi halinde elde edilen iş olarak tanımlanmaktadır (Rivero ve Garfias, 2006).

Kimyasal ekserji hesapları standart bir çevre modeli gerektirmektedir ve bu çevre modeline göre $T_0 = 298.15 \text{ K}$ ve $p_0 = 101.325 \text{ kPa}$ 'dır (Szargut vd, 1988). Model I (Ahrendts, 1980) ve Model II (Szargut vd.) olmak üzere literatürde kabul edilen iki farklı referans çevre basıncına göre tablolastırılmış olan kimyasal ekserjiler mevcuttur (Ekici, 2015).

Son yıllarda yapılan çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda en çok kullanılan yaklaşımın Model II olduğu belirtilmektedir (Moran vd., 2011).

Tablo 4.3'de çeşitli maddelerin kimyasal ekserji değerleri iki farklı model için verilmiştir.

Tablo 4.1. Kimyasal ekserjiler (Ekici, 2015)

Madde	Kimyasal Formülü	Model I ($p_0 = 1.019 \text{ atm}$)	Model II ($p_0 = 1 \text{ atm}$)
Nitrojen	N_2	640	720
Oksijen	O_2	3950	3970
Karbondioksit	CO_2	14175	19870
Metenol (gaz)	CH_3OH	715070	722300
Metanol (sıvı)	CH_3OH	710745	718000
Etenol (gaz)	C_2H_5OH	1348330	1363900
Etenol (sıvı)	C_2H_5OH	1342085	1357700

Kimyasal ekserji aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_{kim} = \bar{R}T_0 \ln \frac{y}{y^e} \quad (4.30)$$

Atmosfer farklı gazların birleşiminden oluşmaktadır. Aşağıdaki tabloda deniz seviyesi şartlarına bağlı olarak (1 atm ve 298.15 K) hazırlanmış olan referans çevre modeli sunulmuştur (Moran ve Shapiro, 2000).

Diğer taraftan kimyasal ekserjinin hesaplanması için şu eşitlik kullanılmaktadır:

$$\bar{e}x_{ch} = \sum_{i=1}^j y_i \bar{e}x_{ch,i} + \bar{R}_u T_0 \sum_{i=1}^j y_i \ln y_i \left(\frac{kJ}{kmol} \right) \quad (4.31)$$

4.2.5. Termomekaniksel ekserji

Termomekaniksel ekserji,

$$\varepsilon_{tm} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (4.32)$$

formülü ile hesaplanabilir.

4.2.6. Kayıp ekserji

Bir sistem içerisindeki kayıp ekserji, sistem dışına atılan ve mevcut sistem dahilinde bir daha kullanılamayacak olan ekserji kaybını belirtmektedir ve aşağıdaki formüllerin yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$Ex_{kay} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{sh}} \right) Q \quad (4.33)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_y H_U - (\dot{W} + \dot{m}_\zeta \Delta h_\zeta) \quad (4.34)$$

$$\dot{m}_\zeta \Delta h_\zeta = \dot{m}_{CO_2} (h - h_0)_{CO_2} + \dot{m}_{H_2O} (h - h_0)_{H_2O} + \dot{m}_{N_2} (h - h_0)_{N_2} + \dot{m}_{CO} (h - h_0)_{CO} \quad (4.35)$$

4.2.7. Ekserji yıkımı

Bir sistemin içindeki tersinmezlikler ile entropi üretiminden kaynaklı olarak ortaya çıkan ekserji yıkımı;

$$Ex_{yık} = T_0 S_{üretim} \quad (4.36)$$

şeklinde ifade edilebilir.

4.2.8. Ekserji verimi

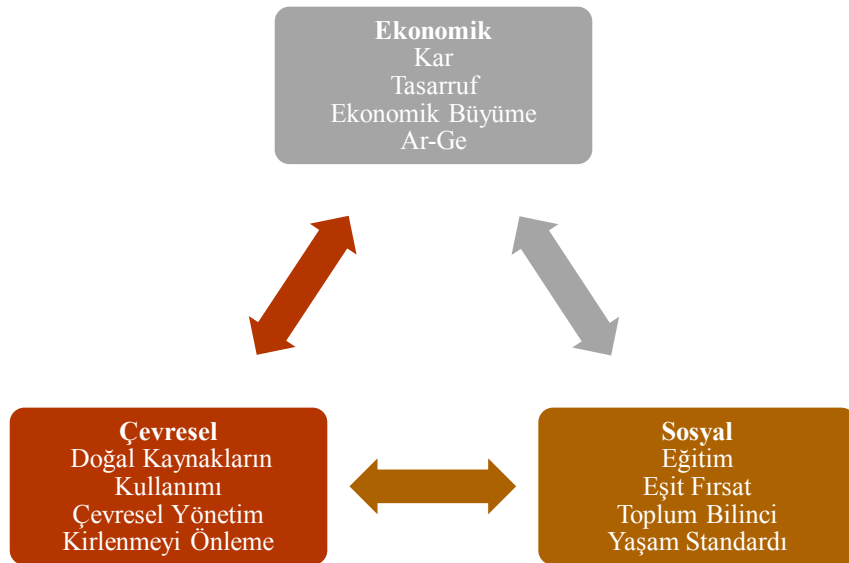
Net olarak elde edilen ekserjetik gücün giren ekserji miktarına oranına ekserji verimi denir.

$$\psi = \frac{W}{Ex_{in}} \quad (4.37)$$

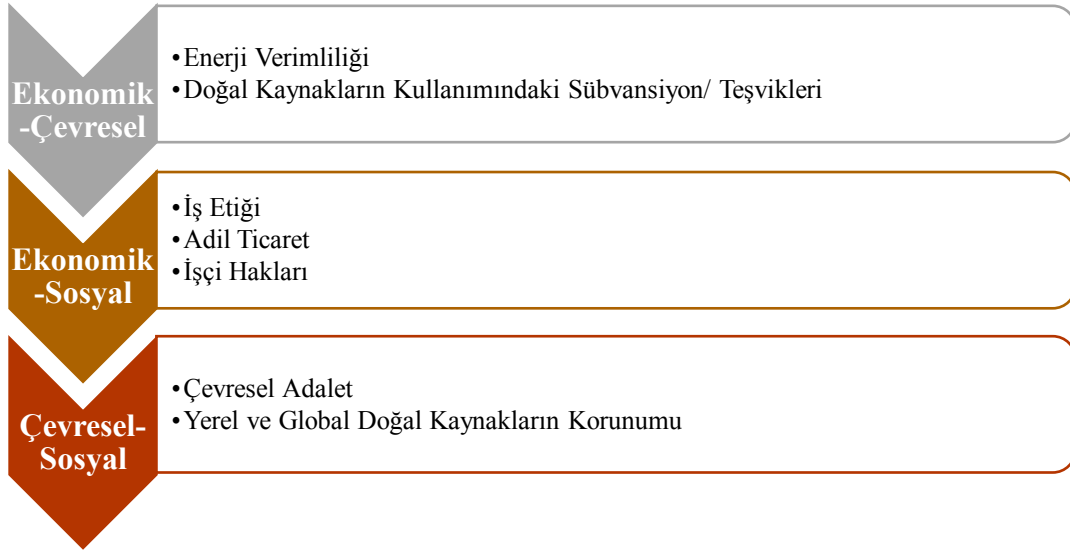
4.3. Sürdürülebilirlik Analizi (Ekserji Sürdürülebilirlik İndikatörleri)

Sürdürülebilirlik, doğal kaynakların tamamen tükenmesine engel olmak, aşırı ve kontrolsüz tüketimin önüne geçmek, bizden sonra gelecek olan nesillerin ihtiyaçlarına karşılık verebilecek ve faydalanabilecekleri şekilde kaynakları dikkatli kullanmaktır (Yıldırım, 2004).

Sürdürülebilirlik, ekonomik, çevresel ve sosyal olmak üzere farklı boyutlar ile bu boyutların birbiriyle olan ilişkilerinin sonucu anlam kazanabilmektedir. Söz konusu ilişki Şekil 4.6 ve 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Sürdürülebilirliğin ekonomik, sosyal ve çevresel boyutları (Rosen,2002)



Şekil 4.7. Sürdürülebilirliğin ekonomik, sosyal ve çevresel boyutlarının kendi aralarındaki ilişkisi
(Rosen, 2002)

Ekserji ve sürdürülebilirlik kavramları incelendiğinde verimliliğin bunlar ile ayrılmaz bir bütün olduğu görülmektedir.

Tasarım, analiz ve performans iyileştirme gibi alanlarda kullanılan ekserji analizlerinin son zamanlarda sistemlere bağlı sürdürülebilirlik düzeylerinin incelenmesinde de kullanıldığını görmekteyiz. Ekserji tabanlı sürdürülebilirlik analizlerinde ekserji analizleri neticesinde hesaplanmış değerlerin kullanıldığını söyleyebiliriz.

Sürdürülebilirlik indikatörleri, ekserji tabanlı sürdürülebilirliğin göstergesi olup bunlar; ekserji verimi, atık ekserji oranı, ekserji yıkım faktörü ve ekserjetik sürdürülebilirlik indeksidir.

4.3.1. Atık ekserji oranı

Sistemin çalışması sırasında, ekserjinin bir kısmı egzoz gazının dışarı salınımı ile yok olurken bir kısmı da sistemin bileşenleri içerisinde yıkıma uğrar. Diğer bir deyişle sistemin atık ekserjisi, kayıp ekserji ile ekserji yıkımının toplamına eşittir.

$$\sum \dot{E}x_{aex} = \sum \dot{E}x_{yık} + \sum \dot{E}x_{kay} \quad (4.38)$$

Atık ekserji oranı ise yukarıda hesaplanan atık ekserji toplamının giren ekserjinin toplamına olan oranıdır.

$$r_{aex} = \frac{\sum \dot{E}x_{aex}}{\sum \dot{E}x_g} = \frac{\sum \dot{E}x_{yık} + \sum \dot{E}x_{kay}}{\sum \dot{E}x_g} \quad (4.39)$$

4.3.2. Ekserji yıkım faktörü

Sistemin olumlu olmayan parametrelerinden biri olan ekserji yıkım faktörü, ekserji tabanlı sürdürülebilirlik hesaplamalarının bir ürünüdür.

Ekserji yıkımının toplam giren ekserjiye oranı, ekserji yıkım faktörüdür.

$$f_{exy} = \frac{\sum Ex_{yık}}{\sum Ex_g} \quad (4.40)$$

4.3.3. Çevresel etki faktörü

Çevresel etki faktörü, atık ekserji oranının ekserji verimine olan oranı ile ifade edilir ve bu faktör yıkım sonrası çevreye atılmış olan ekserjinin, diğer bir deyişle atık ekserjinin atılmış olduğu çevreye ne derece zarar verdiğinin gösterilmesi için önemli bir parametredir.

$$r_{cef} = \frac{r_{aex}}{\psi} \quad (4.41)$$

4.3.4. Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi

Sürdürülebilirlik analizlerinin ne düzeyde olduğunun değerlendirilmesi için en önemli parametrelerinden biri de ekserjetik sürdürülebilirlik indeksidir (Yıldırım, 2004).

Bahse konu indeksin yüksek olması demek verimin yüksek olduğunu gösterir ki bu da aynı zamanda atık ekserji oranı ile çevresel etki faktörünün düşük olduğu anlamına gelir. Yani kısacası arzu edilen bir sistemde söz konusu indeksin yüksek olmasıdır.

Ekserji, verimliliğin yükseltilmesi için kullanılan bir araç olma özelliğini taşımakla birlikte süreçler içindeki termodinamik kayıpların düşürülmesi maksadıyla ilişkilendirilir.

Ekserji sürdürülebilirlik indeksi, ekserji verimi ile atık ekserji oranının orantılanması ile hesaplanır.

$$\Theta_{esi} = \frac{1}{r_{cef}} = \frac{\psi}{r_{aex}} \quad (4.42)$$

4.4. İzantropik Verim

Mühendislik alanlarında yapılan birtakım hesaplamalar için tersinmezlik ve etkilerinin nicel bazda olan bazı büyüklüklerin belirlenmesinin faydası olmaktadır. Tamamen tersinil hal değişimleri ile oluşmuş olan Carnot çevrimi, gerçek çevrimlerin karşılaştırılması için model çevrim olma özelliğini taşımaktadır. Söz konusu model çevrim mükemmelliği simgelemektedir ve araştırmacılar için kendi çalışmalarında üst

sınırın ne olacağına yönelik bilgiler sunmuştur. Aynı şekilde tersinmezlikler neticesinde meydana gelmiş olan kayıpların belirlenmesi için çalışmalara ışık tutmuştur (Çengel ve Boles, 2008).

Sürekli akış koşulları ile çalışan türbin, kompresör ve lüle gibi komponentlerden oluşan ısı veya soğutma makinalarının tersinmezliklerinden kaynaklanan kayıpların irdelenmesi için de kullanılabilir. Tabi ki bahse konu irdelene öncesinde gerçek hal değişimlerini kapsayan bir modelleme için mükemmel hal değişimini tanımlamak gerekmektedir (Çengel ve Boles, 2008).

Gerçek çalışma şartlarında bu tür sistemler ile çevre arasında bir miktar ısı transferi olabilmektedir. Bununla birlikte sürekli akış modellemelerin tamamına yakını adyabatik koşullarda veya yakın koşullarda çalıştığı kabul görmektedir. İlave olarak, tersinmezliğin olmadığı mükemmel hal değişimlerinde kayıplar olmamaktadır. Bu gerekçelerin çerçevesinde mükemmeli simgeleyen bir model olarak izantropik hal değişiminin seçilmesi sürekli akış düzenekleri için yöntem olarak kabul edilebilir. Çünkü izantropik hal değişimi tersinmezlik içermediği için adyabatik düzeneklerde gerçekleştirilen çalışmalarda ideal bir modeldir (Çengel ve Boles, 2008).

Gerçekte olan hal değişimi, izantropik hal değişimi ile ne kadar benzer olursa sistemin çalışması da o kadar iyi olmaktadır. Gerçek sistemin modellediğimiz şekline ne kadar yakın olduğunu gösterebilmek için ihtiyaç duyduğumuz sayısal parametreye yani izantropik/adyabatik verime ve bu parametrenin tanımlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. İzantropik/adyabatik verim, gerçek hal değişiminin izantropik hal değişimden olan sapması olarak tanımlanabilmektedir (Çengel ve Boles, 2008).

4.4.1. Türbinin izantropik verimi

Sürekli akış sistemlerinde türbinlerin giriş ve çıkış basınç değerleri bellidir. Bundan ötürü türbinler için kabul edilen mükemmel hal değişimi, giriş ile çıkış arasındaki izantropik hal değişimidir. Yani türbinin izantropik verimi, türbinin gerçekte yapmış olduğu işin izantropik hal değişimine bağlı olarak yapmış olduğu işe oranı olarak tanımlanmaktadır ve aşağıda ki formül ile hesaplanmaktadır (Çengel ve Boles, 2008).

$$\eta_T = \frac{\text{Gerçek türbin işi}}{\text{İzantropik türbin işi}} = \frac{w_a}{w_s} \quad (4.43)$$

Ayrıca, türbin içinden geçen akışkanın potansiyel ve kinetik enerjilerindeki değişimler, entalpi değişikliğine göre ihmal edilebilecek seviyede olmakla birlikte

türbinin işi entalpi değişimine eşit olmakta ve aşağıda belirtildiği gibi yazılabilmektedir (Çengel ve Boles, 2008).

$$\eta_T \cong \frac{h_1 - h_{2a}}{h_1 - h_{2s}} \quad (4.44)$$

Bahse konu denklemde h_{2a} gerçek hal değişimini, h_{2s} ise izantropik hal değişimi sembolize etmektedir.

Tasarımı iyi gerçekleştirilmiş büyük türbinlerin izantropik verimleri %90'nın üzerindeyken küçük türbinlerde bu oran %70'lere kadar düşmektedir (Çengel ve Boles, 2008).

4.4.2. Kompresörün izantropik verimi

Bir kompresörün izantropik verimi, izantropik kompresör işinin gerçekte olan kompresör işine orantılanmasıyla bulunur ve aşağıdaki formül ile hesaplanır (Çengel ve Boles, 2008).

$$\eta_K = \frac{\text{izantropik kompresör işi}}{\text{Gerçek kompresör işi}} = \frac{w_s}{w_a} \quad (4.45)$$

Türbinin izantropik veriminden farklı olarak, kompresörün izantropik veriminin hesaplanmasında orantının tam tersi olarak kurulduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise w_s 'nin w_a 'dan daha küçük bir değere sahip olması ve verimim %100'den daha küçük bir değer ile hesaplanarak araştırmacılar için yanlış bir algıya kapılarak yanlış değerlendirilmelere yapılmasını engellemektir (Çengel ve Boles, 2008).

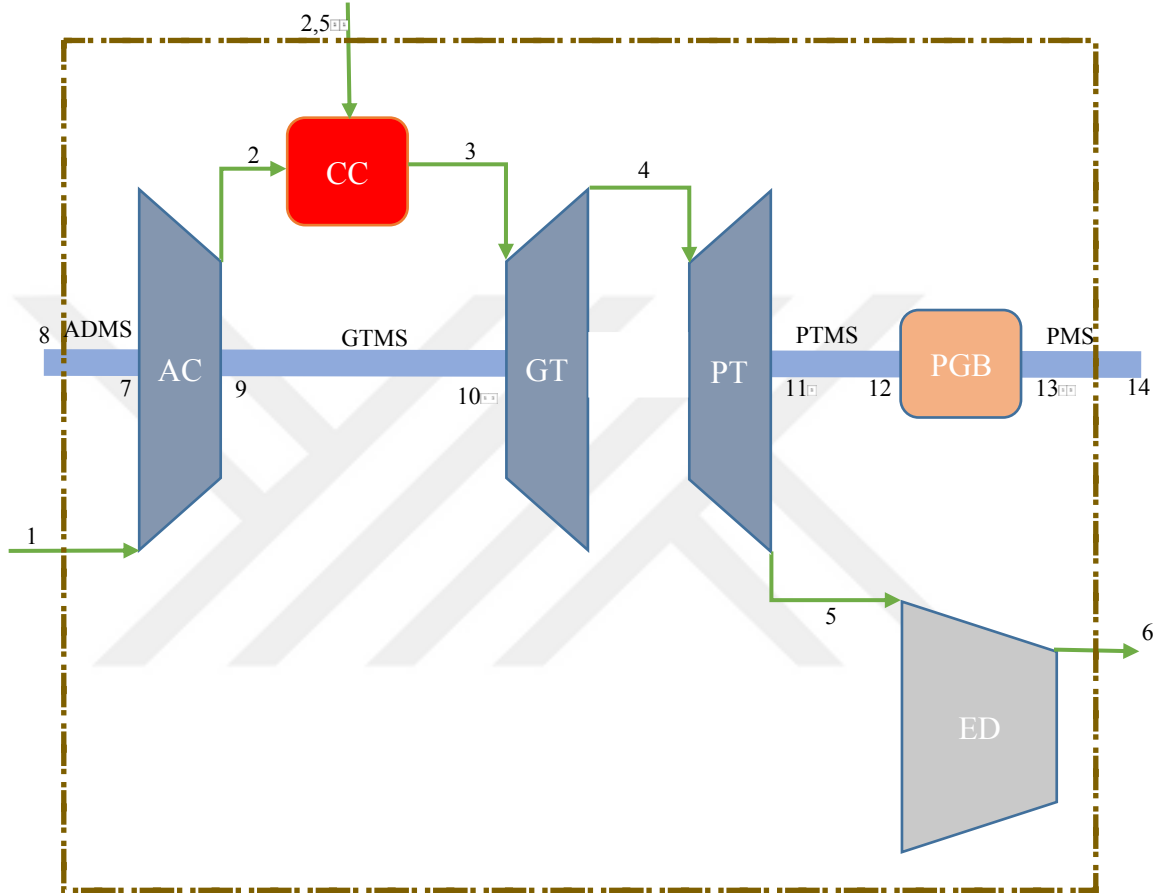
Aynı mantık çerçevesinde entropi değişimlerine bağlı olarak formül aşağıda belirtilen şekli alabilmektedir.

$$\eta_K \cong \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad (4.46)$$

Tasarımı iyi ve güzel gerçekleştirilmiş bir kompresörün izantropik verimi %75 ile %85 arasındadır (Çengel ve Boles, 2008).

5. BULGULAR

Çalışma kapsamında incelenen önceki verilerin ve bilimsel gelişmelerin şemsiyesi altında bilimsel verilerin üretilmesi için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve bu kısımda sunulması planlanmıştır.



Şekil 5.1. Turboprop motorun şematik diagramı

Şekil 5.1’de belirtilmiş olan kısaltmaların tanımlamaları aşağıda sunulmuştur (Ballı, 2017):

AC: Kompresör (Air Compressor)

ADMS: Yardımcı Tahrir Mekanik Mili (Accessory Drive Mechanical Shaft)

CC: Yanma Odası (Combustion Chamber)

ED: Egzoz (Exhaust Duct)

GT: Gaz Türbini (Gas Generator Turbine)

GTMS: Gaz Türbini Mekanik Mili (Gas Turbine Mechanical Shaft)

PGB: Pervane Dişli Kutusu (Propeller Gearbox)

PMS: Pervane Mekanik Mili (Propeller Mechanical Shaft)

PT: Güç Türbini (Power Turbine)

PTMS: Güç Türbini Mekanik Mili (Power Turbine Mechanical Shaft)

Hesaplamalar yapılırken bazı kabullerin yapılması ve değerlendirmelerin bu kabuller belirtildikten sonra yapılması esastır. Bu kapsamda söz konusu çalışmaya yönelik olarak yapılmış olan kabuller aşağıda listelenmiştir:

- Motor sürekli bir halde düzenli bir akış ile çalıştırılmıştır.
- İdeal gaz karışımı prensibi, hava ve gazlar için uygulanmıştır.
- Yanma reaksiyonu tamamlanmış olarak kabul edilmiştir.
- Yanma odasında kullanılan yakıt Jet-A1 olarak belirlenmiştir.
- Motorda kullanılan yakıtın kimyasal formülü $C_{12}H_{23}$ ve $LHV=42,800$ kJ/kg'dir.
- Kompresör ve Türbin adyabatik olarak kabul edilmiştir.
- Kinetik ve potansiyel enerji ile ekserji değişimlerin ihmal edilmiştir.
- Motora giren havanın hızı statik şartlarda çalışıldığı için sıfır olarak kabul edilmiştir.
- Boşalan ve soğutma için kullanılan hava analiz esnasında dikkate alınmamıştır.
- Analiz çalışması esnasında ortam sıcaklığı 298.15 K ve basıncı 101.33 kPa olarak kabul edilmiştir.

Bilgisayara aktarılmış olan verilerin anlamlandırılması aşamasında ilk etapta 4,096 satırda toplam 200,704 adet veri girişi saptanmıştır. Daha sonra motorun ilk çalışma ve susma kısımlarındaki çalışmamıza esas teşkil etmeyecek kısımların çıkarılması ile sadeleştirilmeye gidilmiş ve 2,155 satırda 105,595 veri üzerinden işlem yapılacak şekle getirilmiştir.

Sensörlerin isim ve seri numaralarının karışık olması ve bilgisayara aktarılan verilerin belirli bir düzen ile gelmiyor olmasından ötürü liste sütunsal bazda yeniden düzenlenerek deneysel çalışmanın hesaplamalarına başlanmıştır. Deneysel verilerin hesaplanması kısmında direk sıfır gösteren bir sensör ile diğer sensörlere kıyasla aşırı anlamsız olan 4 sensör direk elenmiş ve hesaplamalara hiç katılmamıştır.

Bu tür motorların çalışmadıkları zamanları kapsayan dönemlerde yerde çalıştırılması ve beklemedeki sürelerine göre teknik kitaplarında belirtilen periyotlarda bakımlarının yapılması gerekmektedir. Deneyde kullanılan motorun teknik dokümanları incelendiğinde bu tür verilere ulaşılamaması nedeniyle kesin bir bilgi sunulamamakla birlikte deneyde kullanılan motorun uzun süredir çalıştırılmadığı tespit edilmiştir.

İlk kısımda sistemin sürdürülebilirlik analizine yönelik dördüncü bölümün ilgili kısmında bulunan formüller ile hesaplanmış, birtakım veriler elde edilmiş ve sonuçlarına ulaşılmıştır.

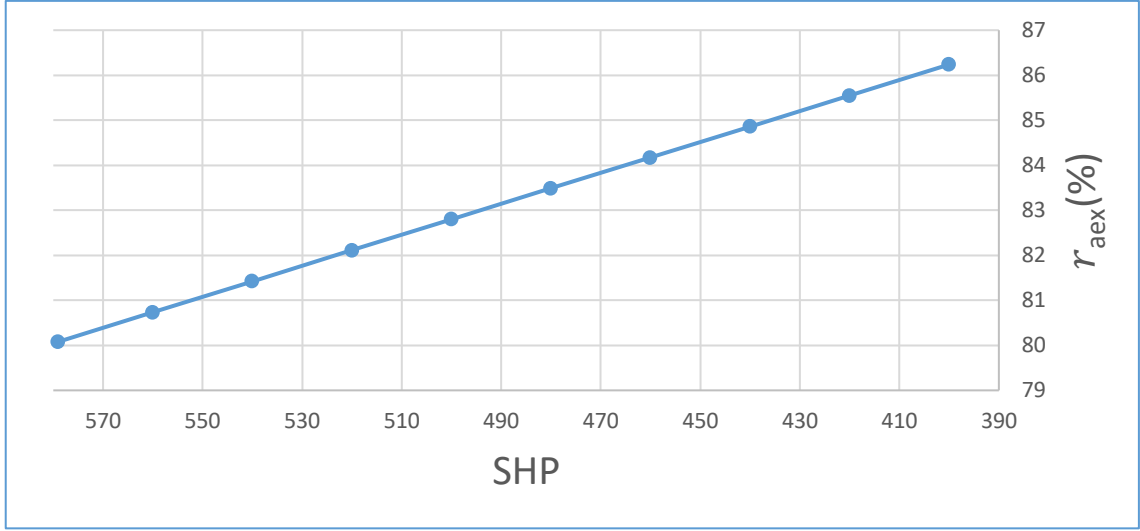
Deneysel verilerin alınması ve devamında hesaplanması esnasında yakıt akış verilerinin sağlıklı sağlanamaması nedeniyle belirlediğimiz ortalama 64-66 RPM değerlerinde sabit yakıt tüketimi ile teknik verilerinde belirtilmiş olan maksimum 579 SHP ile 400 SHP aralığında sonuçlara ulaşılmıştır.

Tam yanma olduğu kabul edilmiş ve buna göre denklemler oluşturulmuştur.

Tablo 5.1. İlgili güç değerleri için hesaplanan sürdürülebilirlik göstergeleri

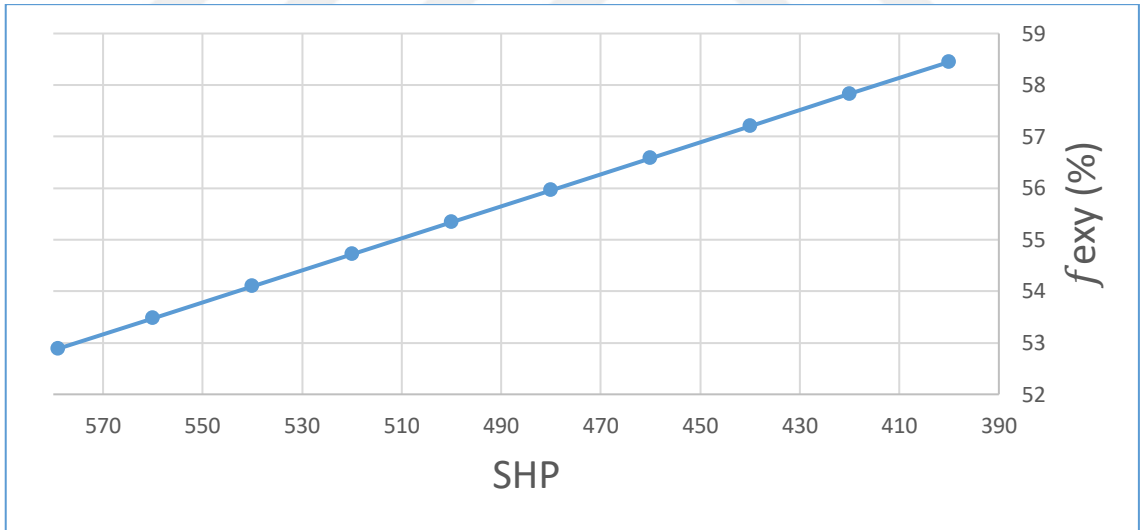
Güç (SHP)	r_{aex} (%)	f_{exy} (%)	$r_{çef}$ (%)	θ_{esi}	ψ (%)
579	80,08	52,89	4,02	0,25	19,92
560	80,73	53,48	4,19	0,24	19,27
540	81,42	54,10	4,38	0,23	18,58
520	82,11	54,72	4,59	0,22	17,89
500	82,80	55,34	4,81	0,21	17,20
480	83,49	55,96	5,06	0,20	16,51
460	84,17	56,58	5,32	0,19	15,83
440	84,86	57,21	5,61	0,18	15,14
420	85,55	57,83	5,92	0,17	14,45
400	86,24	58,45	6,27	0,16	13,76

Atık ekserji oranı ise yukarıda hesaplanan atık ekserji toplamının giren ekserjinin toplamına olan oranıdır. Sürdürülebilirlik değerlendirmesi sonucu elde edilen atık ekserji oranları Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Atık ekserji oranları

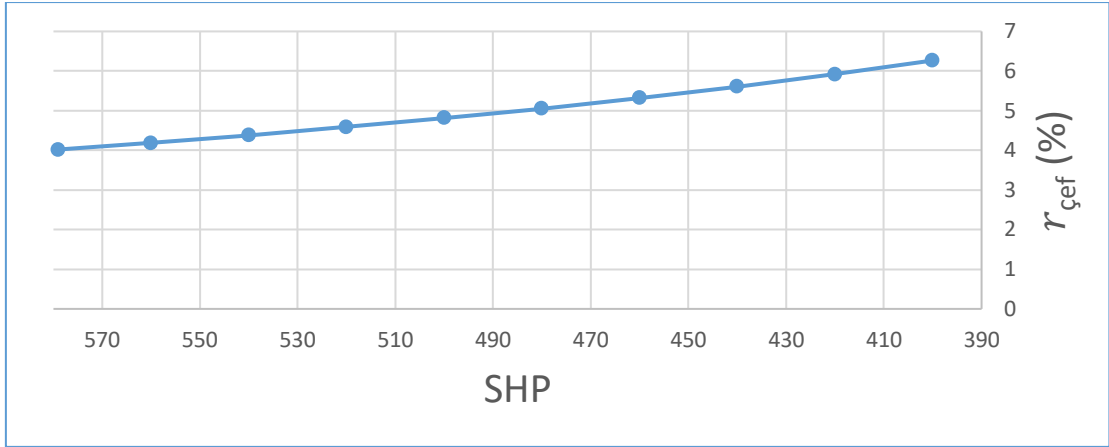
Ekserji yıkımının toplam giren ekserjiye oranı, ekserji yıkım faktörüdür. Sürdürülebilirlik değerlendirmesi sonucu elde edilen ekserji yıkım faktörleri Şekil 5.3’de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Ekserji yıkım faktörleri

Ekserji yıkım faktörleri incelendiği zaman %52 ile %59 arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

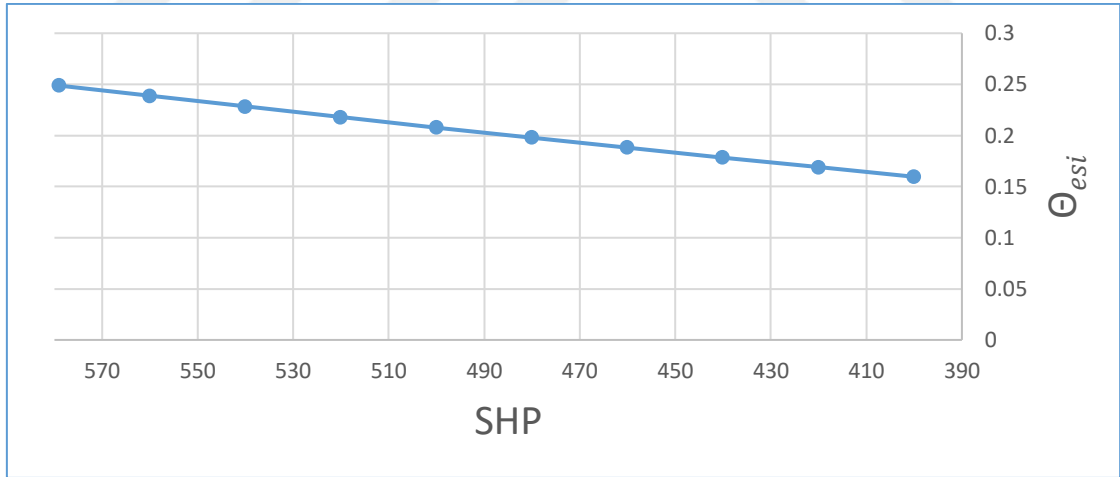
Çevresel etki faktörü, atık ekserji oranının ekserji verimine olan oranı ile ifade edilir. Sürdürülebilirlik değerlendirmesi sonucu elde edilen çevresel etki faktörleri Şekil 5.4’de gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Çevresel etki faktörleri

Çevresel etki faktörleri %4 ile %6.5 arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

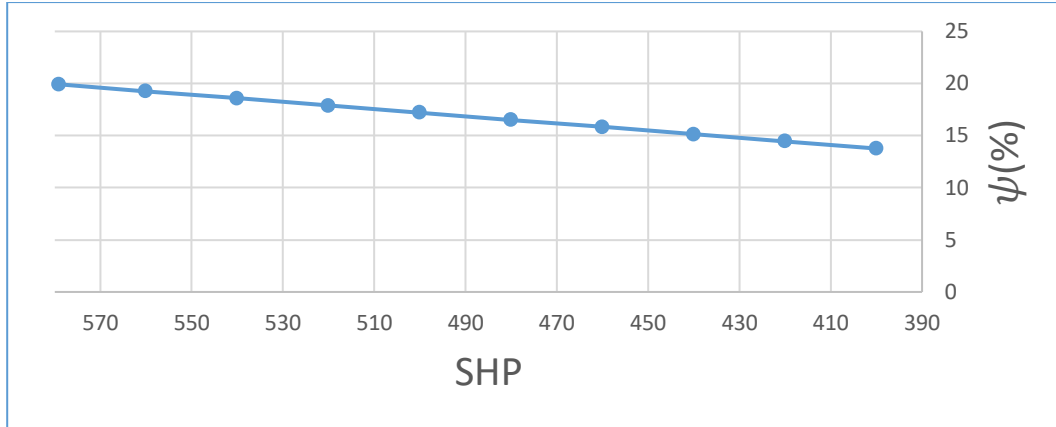
Ekserji sürdürülebilirlik indeksi, ekserji verimi ile atık ekserji oranının orantılanması ile hesaplanmaktadır. Sürdürülebilirlik değerlendirmesi sonucu elde edilen Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksleri

Sürdürülebilirlik analizlerinin ne düzeyde olduğunun değerlendirilmesi için en önemli parametrelerinden biri de ekserjetik sürdürülebilirlik indeksidir. Analiz sonucu bahse konu indeks değerlerinin 0.15 ile 0.25 arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

Hesaplamalar sonucu bulunan ekserjetik verimlere ait grafik Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6. Ekserji verimleri

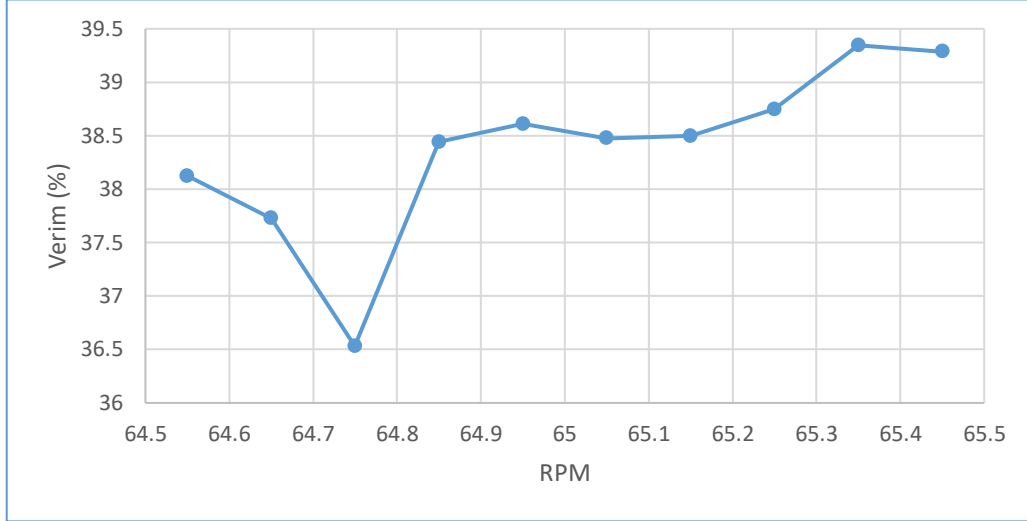
İlave olarak türbinin adyabatik verimleri hesaplanmıştır. Türbinlerin adyabatik verimleri hesaplanırken alçak basınç ve yüksek basınç türbinleri birbirinden ayrı değerlendirilmiştir. Bunun nedeni alçak basınç türbininin hesaplamalarında prop RPM verilerinin kullanılmasına karşın yüksek basınç türbininin hesaplamalarında ise jet RPM verilerinin kullanılmasıdır.

Alçak basınç türbininin hesaplamaları için prop RPM değerleri 64.50 ile 65.50 aralığı seçilmiş ve 0.1 RPM aralıkları ile ortalama değerler alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Çengel ve Boles'in (2008) sunmuş olduğu basınç ve sıcaklık tabloları ile bir önceki bölüm yani "4.4. İzantropik Verim" başlığı altında sunulan formüllere göre hesaplamalar yapılmış ve değerler Tablo 5.2'de sunulduğu şekilde bulunmuştur:

Tablo 5.2. Alçak basınç türbininin izantropik verimi

Prop RPM	İzantropik Verim %
64,51-64,6	38,12
64,61-64,7	37,73
64,71-64,8	36,53
64,81-64,9	38,44
64,91-65,0	38,61
65,01-65,1	38,48
65,11-65,2	38,50
65,21-65,3	38,75
65,31-65,4	39,35
65,41-65,5	39,29

Alçak basınç türbininin hesaplanan izantropik verimine göre aşağıdaki grafik elde edilmiştir:



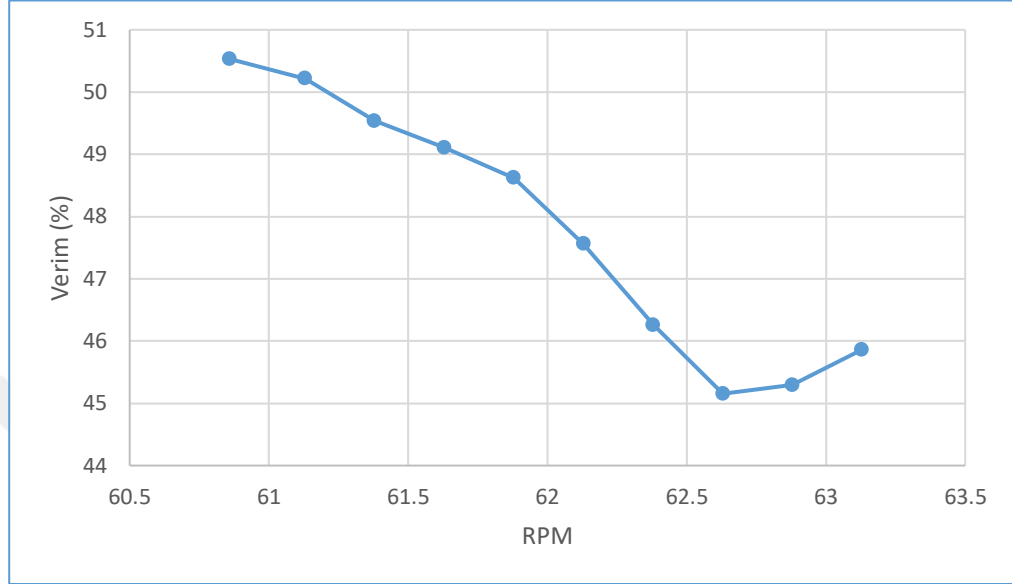
Şekil 5.7. Alçak basınç türbininin izantropik verimi ($RPM-\eta_T$)

Yüksek basınç türbininin hesaplamaları için jet RPM değerleri 60.76 ile 63.25 aralığı seçilmiş ve 0,25 RPM aralıkları ile ortalama değerler alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Alçak basınç türbini hesaplamalarında olduğu gibi Çengel ve Boles'in (2008) sunmuş olduğu basınç ve sıcaklık tabloları ile bir önceki bölüm yani "4.4. İzantropik Verim" başlığı altında sunulan formüllere göre hesaplamalar yapılmış ve değerler Tablo 5.3'de sunulduğu şekilde bulunmuştur:

Tablo 5.3. Yüksek basınç türbininin izantropik verimi

Prop RPM	İzantropik Verim %
60,76-61	50,53
61,01-61,25	50,22
61,26-61,5	49,53
61,51-61,75	49,11
61,76-62	48,62
62,01-62,25	47,56
62,26-62,5	46,26
62,51-62,75	45,15
62,76-63	45,29
63,01-63,25	45,86

Yüksek basınç türbininin hesaplanan izantropik verimine göre Şekil 5.8'deki grafik elde edilmiştir:



Şekil 5.8. Yüksek basınç türbininin izantropik verimi ($RPM-\eta_T$)

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

579 SHP güç değerleri için atık ekserji oranının $r_{aex}=80.08$, ekserji yıkım faktörünün $f_{exy}=52.89$, çevresel etki faktörü $r_{cef}=4.02$, ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi $\Theta_{est}=0.25$ olduğu gözlemlenmiştir.

Aynı SHP değeri için motorun ekserji verimi $\psi=19.92$ olarak belirlenmiştir.

Alçak basınç türbini incelendiğinde prop RPM'nin 64.5-65.5 aralığında izantropik veriminin %36.5 ile %39.5 aralığında olduğu görülmektedir.

Yüksek basınç türbini incelendiğinde ise jet RPM'nin 60.75-63.25 aralığında izantropik veriminin %45.5 ile %50.5 aralığında olduğu görülmektedir.

Yanma odasından çıkan anında gazların daha sıcak olduğu bilindiği için yüksek basınç türbininin sahip olduğu izantropik veriminin alçak basınç türbininkinden yüksek olması beklenen bir özelliktir. Lakin, Çengel ve Boles'e (2008) göre iyi tasarlanmış gaz türbinlerinin verimlerinin %90'ların üzerinde ve küçük türbinlerde ise bu oranın %70'lere düştüğü belirtilmektedir. Bu nedenlerden ötürü deneysel hesaplamalarda verilerini kullandığımız söz konusu motora ait türbin izantropik verilerinin yetersiz olduğu görülmektedir.

Önceki bölümlerde motorun çalıştırması neticesinde 200,704 adet verinin (kullanılan 105,595 adet veri) alındığı belirtilmiştir. Bahse konu motorun uzun süredir uçuşlarda kullanılmadığı, yerdeki bakımları ile çalıştırmalarının düzenli yapılmadığı ve teknik dokümanlarında da eksikliklerinin olduğu tespit edilmiştir.

İlave olarak sensör elementlerin son derece hassas olduğu ve arızalanmalarının da zaman geçtikçe kaçınılmaz olduğu bilinmektedir.

KAYNAKÇA

- Ahern, J.E. (1980). The exergy method of energy systems analysis, Wiley, New York, USA.
- Altuntaş, Ö. (2011). Piston prop uçak motorlarında ekserjoekonomik çevresel optimizasyon. Yayınlanmış Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Atılğan, R., Turan, Ö., Altundaş, Ö., Aydın, H. and Synylo, K. (2013). Environmental impact assessment of a turboprop engine with the aid of exergy. *Energy* 58, 664-671.
- Atılğan R. (2014). Bir turboprop uçak motorunun farklı yüklerdeki eksergo-çevresel Analizi. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Aydın, H., Turan, Ö., Karakoç, T.H. and Midilli, A. (2012). Component-based exergetic measures of an experimental turboprop/turboshaft engine for propeller aircrafts and helicopters. *Int. J. Exergy*, Vol. 11, No. 3.
- Aydın, H., Turan, Ö., Midilli, A. and Karakoç, T.H. (2012). Exergetic and exergo-economic analysis of a turboprop engine: a case study for CT7-9C. *Int. J. Exergy*, Vol. 11, No. 1.
- Aydın, H., Turan, Ö., Midilli, A. and Karakoç, T.H. (2013). Energetic and exergetic performance assessment of a turboprop engine at various loads. *Int. J. Exergy*, Vol. 13, No. 4.
- Aydın, H., Turan, Ö., Karakoç, T.H. and Midilli, A. (2014). Sustainability assessment of PW6000 turbofan engine: an exergetic approach. *Int. J. Exergy*, Vol. 14, No. 3.
- Aydın, H., Turan, Ö., Karakoç, T.H. and 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.
- Baklacioğlu, T., Aydın, H. and Turan, Ö. (2016). Energetic and exergetic efficiency modeling of a cargo aircraft by a topology improving neuro-evolution algorithm. *Energy* 103, 630-645.
- Ballı, Ö., Aras, H., Aras, N. and Hepbaşlı, A. (2008). Exergetic and exergoeconomic analysis of an Aircraft Jet Engine (AJE). *Int. J. Exergy*, Vol. 5, Nos. 5/6.
- Ballı, Ö. and Hepbaşlı, A. (2013) Energetic and exergetic analyses of T56 turboprop engine. *Energy Conversion and Management* 73, 106–120.
- Ballı, Ö. (2014). Afterburning effect on the energetic and exergetic performance of an experimental turbojet engine (TJE). *Int. J. Exergy*, Vol. 14, No. 2.
- Ballı, Ö. (2017). Advanced exergy analyses of an aircraft turboprop engine (TPE). *Energy* 124, 599-612.
- Ballı, Ö. (2017). Exergy modeling for evaluating sustainability level of a high by-pass turbofan engine used on commercial aircrafts. *Applied Thermal Engineering*, 123, 138–155.

- Ballı, Ö., Şöhret, Y. and Karakoç, H.T. (2018). The effects of hydrogen fuel usage on the exergetic performance of a turbojet engine. *International Journal of Hydrogen Energy* 43, 10848-1085.
- Bastani, M., Jafari, R. and Ghasemi, H. (2015). Exergy analysis of an aircraft turbojet engine. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, April, 380-386.
- Bejan, A. (1996). *Entropy generation minimization*. CRC Press, Florida, USA.
- Bejan, A. and Siems, D.L. (2001). The need for exergy analysis and thermodynamic optimization in aircraft development. *Exergy Int. J.* 1(1), 14–24.
- Çalışkan, H., Tat, M.E. and Hepbaşlı, A. (2010). A review on exergetic analysis and assessment of various types of engines. *Int. J. Exergy*, Vol. 7, No. 3.
- Çengel, Y.A., Wood, B. and Dinçer, İ. (2002). Is bigger thermodynamically better?. *Exergy, an International Journal* 2, 62–68.
- Cengel, Y.A. ve Boles, M.A. (2008), *Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik*, 5'inci Baskı, Güven Bilimsel, Türkiye.
- Cengel, Y.A. ve Boles, M.A. (2013), *Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik*, 7'nci Baskı, Palme Yayıncılık.
- Cohen, H., Rogers, G.F.C., and Saravanamuttoo, H.I.H. (1987) *Gas Turbine Theory*, 3rd Edition, New York: Longman Scientific and Technical.
- Çoban, K., Şöhret, Y., Colpan, C.Ö. and Karakoç, T.H. (2017). Exergetic and exergoeconomic assessment of a small-scale turbojet fuelled with biodiesel. *Energy* 140, 1358-1367.
- Çoban, K., Colpan, C.Ö. and Karakoç, T.H. (2017). Application of thermodynamic laws on a military helicopter engine. *Energy* 140, 1427-1436.
- Dinçer, İ. and Çengel, Y.A. (2001). Energy, entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering. *Entropy*, 3, 116-149.
- Dincer, I. (2002). The role of exergy in energy policy making. *Energy policy*, 30 (2), 137-149.
- Dinçer I. (2007). Environmental and sustainability aspects of hydrogen and fuel cell systems. *Int J Energy Res.*, 31, 29-55.
- Dinçer, I. and Rosen, M.A. (2007). Exergy: energy, environment and sustainable development, 454.
- Ehyaei, M.A., Anjiridezfuli, A. and Rosen, M.A. (2013). Exergetic analysis of an aircraft turbojet engine with an afterburner. *Thermal Science*, Vol. 17, No. 4, 1181-1194.
- Ekici, S. (2015), *Mini Turbojet/Turboprop Motorun İleri Ekserji Analizi*. Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi. Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ekici S., Altuntaş O., Açıkkalp E., Söğüt M.Z. and Karakoç T.H. (2016). Assessment of thermodynamic performance and exergetic sustainability of turboprop engine using mixture of kerosene and methanol. *International Journal of Exergy*, 19, 295-314.
- Ekici, S., Şöhret, Y., Çoban, K., Altuntaş, Ö. and Karakoç, T.H. (2017). Performance evaluation of an experimental turbojet engine. *Int J Turbo Jet Eng.*, 34(4): 365–375.

- Ekici, S., Şöhret, Y., Çoban, K., Altuntaş, Ö. and Karakoç, T.H. (2018). Sustainability metrics of a small scale turbojet engine. *Int J Turbo Jet Eng*, 35(2), 113-119.
- Etele, J. and Rosen, M.A. (2001). Sensitivity of exergy efficiencies of aerospace engines to reference environment selection. *Exergy Int. J.*, 1(2), 91–99.
- El-Sayed, A.F. (2018). *Aircraft Propulsion and Gas Turbine Engines*, CRC Press.
- Göğüş, Y.A., Çamdalı, Ü. and Kavsaoğlu, M.Ş. (2002). Exergy balance of a general system with variation of environmental conditions and some applications. *Energy* 27, 625–646.
- Grönstedt, T., Irannezhad, M., Lei, X., Thulin, O. and Lundbladh, A. (2014). First and second law analysis of future aircraft engines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol.136 / 031202-1.
- Hassan, H.Z. (2013). Evaluation of the local exergy destruction in the intake and fan of a turbofan engine. *Energy* 63, 245-251.
- Hayes, D., Lone, M., Whidborne, J.F., Camberos, J. and Coetzee, E. (2017). Adopting exergy analysis for use in aerospace. *Progress in Aerospace Sciences* 93, 73–94.
- Hepbasli, A. (2008), A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 593-661.
- Hill, P.G. and Paterson C.R. (1992). *Mechanics and Thermodynamics of Propulsion*, Addison-Wesley Publishing Company, Second Edition.
- Junior, S.O. (2012), *Exergy: Production, Cost and Renewability (Green Energy and Technology)*, Springer, London.
- Kanoğlu, M. and Çengel, Y.A. (1999). Economic evaluation of geothermal power generation, heating, and cooling. *Energy* 24, 501–509.
- Karakoç, T.H. (2008). *Uzman gözüyle termodinamik uygulamaları*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Kaya, N., Turan, Ö., Karakoç, T.H. and Midilli, A. (2016). Parametric study of exergetic sustainability performances of a high altitude long endurance unmanned air vehicle using hydrogen fuel. *International Journal of Hydrogen Energy* 41, 8323-8336.
- Kerrebrock, J.L. (1992). *Aircraft Engines and Gas Turbines*, 2nd Edition, MIT Press, Cambridge.
- Kodal, A. (2009). *Tepki ile Tahrik Ders Notları*, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Leo, T.J. and Perez-Grande, I. (2005). A thermoeconomic analysis of a commercial aircraft environmental control system. *Applied Thermal Engineering* 25, 309–325.
- Mattingly, J.D. (2006). *Elements of Propulsion Gas Turbines and Rockets*, AIAA Education Series, Virginia.
- Moorhouse, D.J. and Hoke, C.M. (2002). Thermal analysis of hypersonic inlet flow with exergy-based design methods. *Int.J. Applied Thermodynamics*, Vol.5 (No.4), pp.161-168.
- Moorhouse, D.J. (2003). Proposed system-level multidisciplinary analysis technique based on exergy methods, *Journal of Aircraft*, Vol. 40, No. 1, 11-15.

- Moran, M. J. and Shapiro, H. N., (2000). Fundamental of engineering thermodynamics, (Third Ed.), John Wiley & Sons, New York.
- Moran, M.J., Shapiro, H.N., Boettner, D.D. ve Bailey, M.B. (2011). Fundamentals of Engineering Thermodynamics, John Wiley & Sons Inc., A.B.D.
- Pulkrabek, W.W. (2016). İçten Yanmalı Motorlar: Mühendislik Temelleri, Güven Bilimsel Kitabevi, Facsimile baskı, 480.
- Rant, Z. (1964). “Thermodynamische bewertung der verluste bei techniscen energiemwandlungen”, Brennstoff-Wrme-Kraft, 16 (9), 453-457.
- Riggins, D.W., Taylor, T. and Moorhouse, D.J. (2006). Methodology for performance analysis of aerospace vehicles using the laws of thermodynamics. Journal of Aircraft Vol. 43, No. 4.
- Riggins, D.W., Moorhouse, D.J. and Camberos, J.A. (2010). Characterization of aerospace vehicle performance and mission analysis using thermodynamic availability. Journal of Aircraft Vol. 47, No. 3.
- Rivero, R. and Garfias, M. (2006). Standard chemical exergy of elements updated, Energy, 31, 3310-3326.
- Rosen, M.A. (2002). Assessing energy technologies and environmental impacts with the principles of thermodynamics. Applied Energy, 72, 427–441.
- Rosen, M.A. (2009). Exergy losses for aerospace engines: effect of reference-environment on assessment accuracy. Int. J. Exergy, Vol. 6, No. 3.
- Roth, B. and Mavris, D. (2003). Method for propulsion technology impact evaluation via thermodynamic work potential. Journal of Aircraft Vol. 40, No. 1.
- Safgönül, B., Ergeneman, M., Arslan, H.E. ve Soruşbay, C. (2013). İçten Yanmalı Motorlar, Birsen Yayınevi, 1. Baskı, 218.
- Saravanamuttoo H.I.H. (1987). Modern turboprop engines. Progress in Aerospace Science, vol. 24, 225-248.
- Söğüt, M.Z. (2018). Exergetic irreversibility and sustainability performances for alternative fuels in the micro-turbojet engine. International Journal Of Green Energy, Vol. 15, No. 3, 169–180.
- Struchtrup, H. and Elfring, G.J. (2008). External losses in high-bypass turbo fan air engines. Int. J. Exergy, Vol. 5, No. 4.
- Stanek, W. and Budnik, M. (2010). Application of exergy analysis for evaluation of CO₂ emission from operation of steam power unit. Archives of thermodynamics Vol. 31, No. 4, 81–91.
- Szargut, J., David, R.M. and Steward, F. (1988). Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes, Hemisphere Publishing, New York.
- Şengün, H.İ. (2014). Motorlar ve termodinamik esaslar, Umuttepe Yayınları, 1. Baskı, 214.
- Şöhret Y. ve Karakoç T.H. (2014). Gaz türbinli uçak motorlarının termodinamik modellenmesi. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Cilt:1, Sayı:2, 29-36.

- Şöhret, Y., Açıklalp, E., Hepbaşlı, A. and Karakoç, T.H. (2015). Advanced exergy analysis of an aircraft gas turbine engine: Splitting exergy destructions into parts. *Energy* 90, 1219-1228.
- Şöhret, Y., Dinç, A. and Karakoç, T.H. (2015). Exergy analysis of a turbofan engine for an unmanned aerial vehicle during a surveillance mission. *Energy* 93, 716-729.
- Şöhret, Y., Söğüt, M.Z., Karakoç, T.H. and Turan, Ö. (2016). Customised application of exergy analysis method to PW120A turboprop engine for performance evaluation. *Int. J. Exergy*, Vol. 20, No. 1.
- Şöhret, Y., Altuntaş, Ö., Hepbaşlı, A. and Karakoç, T.H. (2016). Exergy as a useful tool for the performance assessment of aircraft gas turbine engines: A key review. *Progress in Aerospace Sciences* 83, 57–69.
- Şöhret, Y. (2017) Sustainability and thermo-ecologic assessments of a turbojet engine at simulated flight conditions. *Int. J. Sustainable Aviation*, Vol. 3, No. 4.
- Şöhret, Y. and Karakoç, T.H. (2018). Exergy indicators of a low-emission aero-engine combustor. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* Volume 90, Number 2, 344–350.
- Szargut, J., David, R.M. and Steward, F. (1988). *Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes*, Hemisphere Publishing, New York.
- Tai, V.C., See, P.C. and Mares, C. (2014). Optimisation of energy and exergy of turbofan engines using genetic algorithms. *Int. J. Sustainable Aviation*, Vol. 1, No. 1.
- Tona, C., Raviola, P.A., Pellegrini, L.F. and de Oliveira Jr, S. (2010). Exergy and thermoeconomic analysis of a turbofan engine during a typical commercial flight. *Energy* 35, 952–959.
- Tsatsaronis, G. (2007). Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics. *Energy*, 32, 249-253.
- Turan Ö. (2000). *Gaz Türbinli Motorlarda Performans Analiz ve Değerlendirme Programları*. Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Turan, Ö. (2012). Effect of reference altitudes for a turbofan engine with the aid of specific-exergy based method. *Int. J. Exergy*, Vol. 11, No. 2.
- Turan, Ö. (2012). Exergetic effects of some design parameters on the small turbojet engine for unmanned air vehicle applications. *Energy* 46, 51-61.
- Turan, Ö. (2015). An exergy way to quantify sustainability metrics for a high bypass turbofan engine. *Energy* 86, 722-736.
- Turan, Ö. and Aydın, H. (2016). Numerical calculation of energy and exergy flows of a turboshaft engine for power generation and helicopter applications. *Energy* 115, 914-923.
- Turan, Ö. and Aydın, H. (2016). Exergy-based sustainability analysis of a low-Bypass turbofan engine: A case study for JT8D. *Energy Procedia* 95, 499 – 506.
- Turgut, E.T., Karakoç, T.H., Hepbaşlı, A. and Rosen, M.A. (2009). Exergy analysis of a turbofan aircraft engine. *Int. J. Exergy*, Vol. 6, No. 2.

- van Gool, W. (1992). Exergy analysis of industrial processes. Energy Vol. 17, No. 8, pp. 791-803.
- Wu, C. (1991). Power optimization of an endoreversible brayton gas heat engine. Energy Convers. Mgmt. Vol.31, No.6, pp.561-565.
- Ülbegi K.T. (2012). Turboprop Motorlarda Enerji Verimliliği ve Ekserji Analizi. Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Yeşilata, B. (2018). Termodinamik ders notları, Harran Üniversitesi Yayını.
- Yıldırım, E. (2004). Helikopter Motorunun Ekserjetik Analizi ve Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi. Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yıldırım, E., Altuntaş, Ö., Mahir, N. and Karakoç, T.H. (2017). Energy, exergy analysis, and sustainability assessment of different engine powers for helicopter engines. International Journal Of Green Energy, VOL. 14, NO. 13, 1093–1099.
- Yücer, C.T. (2017). Exergetic sustainability assessment of a gas turbine jet engine at part loads. Anadolu University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering, 18 (5), 1018-1030.
- Zhang, W., Chen, L. and Sun, F. (2009). Power and efficiency optimization for combined Brayton and inverse Brayton cycles. Applied Thermal Engineering 29, 2885–2894.
- http-1. <http://erhandilaver.blogspot.com/2014/11/turbofan-motorlar-ve-calsma-sistemleri.html> (Erişim tarihi:17.08.2019)
- http-2. <https://aviation.stackexchange.com/questions/43458/where-is-the-generator-in-a-large-turbofan-of-a-commercial-airliner?rq=1> (Erişim tarihi:17.08.2019)
- http-3. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/52406588> (Erişim tarihi:17.08.2019)
- http-4. <http://www.primeturbines.com/pt6a-engine-repair.php> (Erişim tarihi:17.08.2019)
- http-5. <http://www.havacilikdunyasi.net/Gaz-Turbin-Teorisi/bolum-iv-gercek-cevrim-analizi/> (Erişim tarihi: 13.08.2019)
- http-6. <http://www.pt6nation.com/en/about/pt6-engine/> (Erişim tarihi: 12.08.2019)

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Tuna KARALI
Doğum Yeri ve Tarihi : Tatvan-01.06.1988

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Hava Harp Okulu Havacılık ve Uzay Mühendisliği – Ağustos 2010
Lisans Öğrenimi : Anadolu Üniversitesi İktisat Fakültesi Uluslararası İlişkiler – Temmuz 2018
Yükseklisans Öğrenimi : Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Uçak Gövde Motor Bakım ABD – (Devam ediyor)
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

İş Deneyimi

Çalıştığı Kurumlar : 2010- Hava Kuvvetleri Komutanlığı
İletişim
E-Posta Adresi : tkarali@hvkk.tsk.tr

Akademik Çalışmaları

Karali, T., Yildirim, E. and Karakoc, T. H. (2019). A Study: Focus the Sustainability within the Scope of Analysing Aircraft Engines. *International Symposium on Sustainable Aviation (ISSA-2019)*'da sunulan poster. Budapeşte-Macaristan.
Karali, T., Yildirim, E. and Karakoc, T. H. (2018). Sustainability Assessment of a Turboprop Aircraft Engine with Experimental Data. *World Energy Strategies Congress and Exhibition 2019 (WESCE'19)*'da sunulan bildiri. İstanbul- Türkiye. Sözlü Sunum.

Tarih: 20/08/2019