

**MİNİ TURBOJET/TURBOPROP
MOTORUN İLERİ EKSERJİ ANALİZİ**

Selçuk EKİCİ
Yüksek Lisans Tezi

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı
Mayıs-2015

**Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir. Proje No: 1407F357**

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Selçuk Ekici'nin “Mini Turbojet/Turboprop Motorun İleri Ekserji Analizi” başlıklı Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 07.05.2015 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Yard. Doç. Dr. Önder ALTUNTAŞ
Üye (İkinci Danışman)	: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ
Üye	: Prof. Dr. Yunus Ali ÇENGEL
Üye	: Yard. Doç. Dr. Kıvanç DİNÇER
Üye	: Yard. Doç. Dr. Emin AÇIKKALP

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

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MİNİ TURBOJET/TURBOPROP MOTORUN İLERİ EKSERJİ ANALİZİ

Selçuk EKİCİ

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı

Danışman: Yard. Doç. Dr. Önder ALTUNTAŞ

İkinci Danışman: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ

2015, 115 sayfa

Bu tezde Jet Cat USA firmasının Jet Cat P-60 ürün adına sahip devir aralığı 50 000 – 165 000 rpm, egzoz gaz çıkış sıcaklığı 580 – 690 °C, yakıt türü kerosen olan jet motoru sistem komponentlerinin tersinmezlik miktarlarının belirlenmesinde kullanılan ekserji analiz yöntemi ile birlikte ekserji analizi sonucunda tespit edilmiş tersinmezlikler miktarının komponentler arasındaki ilişkileri inceleyen ileri ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca motorun sürdürülebilirlik indikatörleri tez kapsamında sunulmuştur.

Proje numarası “1407F357” olan ve “Mini Turbojet/Turboprop Motorun İleri Ekserji Analizi” başlıklı bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mini Turbojet, Ekserji Analizi, İleri Ekserji Analizi, Sürdürülebilirlik İndikatörleri

ABSTRACT

Master of Science Thesis

ADVANCED EXERGY ANALYSIS FOR A SMALL SCALE TURBOJET/TURBOPROP ENGINE

Selçuk EKİCİ

**Anadolu University
Graduate School of Sciences
Aircraft Engine Body Maintenance Program**

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Önder ALTUNTAŞ

Co-Supervisor: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ

2015, 115 pages

In this thesis, exergy to examine the amount of irreversibility of jet engine system components and advanced exergy analysis to determine the amount of irreversibility of the relationship between the components was performed in Jet Cat P-60 (company name Jet Cat USA, RPM range of 50 000 – 165 000, the exhaust gas outlet temperature of 580 – 690 °C, fuel type of kerosene). In addition, the sustainability indicators of turbojet engine is presented in thesis.

Thesis studies have been performed in titled of "Advanced Exergy Analysis for a Small Scale Turbojet/Turboprop Engine" that is supported by Anadolu University Scientific Research Projects Commission and the project number is 1407F357.

Keywords: Mini Turbojet, Exergy Analysis, Advanced Exergy Analysis, Sustainability Indicators

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgisi, tecrübesi, emeği ve desteğiyle beni yönlendiren danışmanım Yard. Doç. Dr. Önder ALTUNTAŞ ve ikinci danışmanım Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ'a sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Destekleriyle her an yanımda hissettiğim değerli hocalarım Doç. Dr. M. Ziya SÖĞÜT, Doç. Dr. M. Ertunç TAT, Yard. Doç. Dr. Emin AÇIKKALP, Yard. Doç. Dr. İlkey ORHAN'a ve üzerimde emeği olan tüm hocalarıma ve öğretmenlerime teşekkürlerimi sunarım.

Zaman ve bilgilerini benimle paylaşan Yasin ŞÖHRET, Görkem YALIN, Emre YÜCA ve diğer tüm değerli arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu tezi hazırlarken bana gösterdiği saygı, verdiği manevi destek ve yardımları yanı sıra, hayatıma getirdiği neşe ve yeni umutlar için ayrıca sevgili eşim Seda Duygu EKİCİ'ye candan teşekkür ederim.

Hayatım boyunca sevgi ve desteğiyle daima yanımda olan sevgili aileme, bana verdikleri emek için sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Selçuk EKİCİ

Mayıs 2015

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgiler	1
1.2. Literatür Özeti	4
1.2.1. Ekserji analizi literatür özeti	9
1.2.2. İleri ekserji analizi literatür özeti	17
1.3. Tezin Amaç ve Kapsamı	30
2. TERMODİNAMİK ANALİZ	31
2.1. Enerji Analizi	31
2.1.1. Enerji terimleri	32
2.2. Ekserji Analizi.....	35
2.2.1. Ekserji bileşenleri.....	41
2.2.1.1. Kinetik ekserji	41
2.2.1.2. Potansiyel ekserji	42
2.2.1.3. Fiziksel ekserji	42
2.2.1.4. Kimyasal ekserji.....	45
2.2.2. Ekserji ile sistem değerlendirme parametreleri.....	51
2.2.2.1. Ekserji verimi	51
2.2.2.2. İzafe ekserji tüketim oranı	54
2.2.2.3. Yakıt ekserjisi tüketim oranı	54
2.2.2.4. Giren ekserji tüketim oranı.....	55
2.2.2.5. Ürün ekserjisi tüketim oranı.....	55

2.2.2.6.Ekserji iyileştirme potansiyeli.....	56
2.2.3.Ekserji yıkımı ve ekserji kaybı.....	56
2.3. İleri Ekserji Analizi	57
2.3.1.İçsel ve dışsal ekserji yıkımı	58
2.3.1.1.İçsel ve dışsal ekserji yıkım hesabı	59
2.3.2.Kaçınılabılır ve kaçınılamaz ekserji yıkımı	62
2.3.2.1.Kaçınılabılır ve kaçınılamaz ekserji yıkım hesabı	63
2.3.3.Birleşik ekserji yıkımı	64
2.3.3.1.Birleşik ekserji yıkımı hesabı.....	64
2.3.4.Ekserji yıkımındaki iki ayrışmanın kombinasyonu	64
2.3.4.1.Ekserji yıkımındaki iki ayrışmanın kombinasyon hesabı	65
2.3.5.Ekserji yıkım ayrışması özeti	66
2.4. Ekserji Tabanlı Sürdürülebilirlik Analizi.....	70
3. TURBOJET MOTORUN DENEYSEL ÇALIŞMALARI BULGULARI	73
3.1. Turbojet Motorun Tanıtımı	73
3.2. Veriler, Kabuller ve Hesap Yöntemi.....	73
4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	87
4.1. Ekserji Analizi Sonuçları	87
4.2. İleri Ekserji Analizi Sonuçları.....	91
4.3. Sürdürülebilirlik İndikatörleri Analiz Sonuçları	101
4.4. Yapılması Planlanan Çalışmalar	102
KAYNAKLAR	103
ÖZGEÇMİŞ	113

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Gaz türbinli motorlar güç üretim amacına göre şematik gösterim.....	2
Şekil 1.2 Termodinamik analizin şematik gösterimi.....	3
Şekil 2.1 Termodinamiğin birinci yasası enerjinin korunumu.....	32
Şekil 2.2 Ekserji bileşenleri şematik gösterim Tsatsaronis tanımı.....	40
Şekil 2.3 Ekserji bileşenleri şematik gösterim Gundersen tanımı.....	41
Şekil 2.4 Fiziksel ekserji hesap yolları Gundersen tanımı.....	43
Şekil 2.5 Szargut ve arkadaşları tarafından önerilen çevre komponentleri.....	45
Şekil 2.6 Elementlerin standart kimyasal ekserjilerinin hesaplanmasındaki rota..	46
Şekil 2.7 Sistem komponentlerinin birbirleriyle olan ilişkisi.....	59
Şekil 2.8 Ekserji yıkım parçalarının şematik gösterimi.....	67
Şekil 3.1 Kompresör giriş sıcaklığı deney verilerinin ortalama değeri.....	74
Şekil 3.2 Kompresör çıkış sıcaklığı deney verilerinin ortalama değeri.....	75
Şekil 3.3 Kompresör giriş basıncı deney verilerinin ortalama değeri.....	75
Şekil 3.4 Kompresör çıkış basıncı deney verilerinin ortalama değeri.....	76
Şekil 3.5 Türbin giriş sıcaklığı deney verilerinin ortalama değeri.....	76
Şekil 3.6 Türbin çıkış sıcaklığı deney verilerinin ortalama değeri.....	77
Şekil 3.7 Türbin giriş basıncı deney verilerinin ortalama değeri.....	77
Şekil 3.8 Türbin çıkış basıncı deney verilerinin ortalama değeri.....	78
Şekil 3.9 Deneysel turbojet motorun sistem şeması.....	79
Şekil 4.1 Sistem komponentlerin ekserji yıkım oranları.....	89
Şekil 4.2 Sistem komponentlerinin ekserji verimleri.....	91
Şekil 4.3 Kompresör dışsal ekserji yıkım miktarı ve içsel-dışsal ekserji yıkım oranları.....	94
Şekil 4.4 Kompresör kaçınılabılır ekserji yıkım miktarı, kaçınılabılır kaçınılamaz ekserji yıkım oranları.....	95
Şekil 4.5 Yanma odası dışsal ekserji yıkım miktarı ve içsel-dışsal ekserji yıkım oranları.....	95
Şekil 4.6 Yanma odası kaçınılabılır yıkım miktarı, kaçınılabılır-kaçınılamaz yıkım oranları.....	96

Şekil 4.7 Türbin dışsal ekserji yıkım miktarı ve içsel-dışsal ekserji yıkım oranları.....	96
Şekil 4.8 Türbin kaçınılabılır ekserji yıkım miktarı ve kaçınılabılır kaçınılamaz ekserji yıkım oranları.....	97
Şekil 4.9 Sistemin dışsal ekserji yıkım miktarı ve içsel-dışsal ekserji yıkım oranları.....	98
Şekil 4.10 Sistemin kaçınılabılır ekserji yıkım miktarı, kaçınılabılır kaçınılamaz ekserji yıkım oranları.....	98
Şekil 4.11 Sistem komponentlerinin kompresör dışsal ekserji yıkımı üzerindeki oranları.....	99
Şekil 4.12 Sistem komponentlerinin yanma odası dışsal ekserji yıkımı üzerindeki oranları.....	99
Şekil 4.13 Sistem komponentlerinin türbin dışsal ekserji yıkımı üzerindeki oranları.....	100

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Yıllara göre kronolojik sıra: Turbojet/turboprop/turbofan motorları ekserji analizi ve farklı sistemler için ileri ekserji analizi.....	6
Çizelge 2.1 Ekserjinin gelişimi.....	35
Çizelge 2.2 Enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması.....	37
Çizelge 2.3 Entropi ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması.....	38
Çizelge 2.4 Bazı maddelerin standart molar kimyasal ekserjileri.....	47
Çizelge 2.5 Hidrokarbon yakıtların molar kimyasal ekserjileri.....	49
Çizelge 2.6 Motor komponentlerinin ürün ve yakıt ilişkili ekserji miktarları.....	53
Çizelge 2.7 Gaz türbinli motor komponentlerinin çıkış ve giriş ilişkili ekserji miktarları.....	53
Çizelge 2.8 Ekserji yıkım parçalarının toplam formülleri.....	67
Çizelge 2.9 Teorik bir enerji dönüşüm sisteminin ekserji yıkımı ve içsel ekserji yıkımı formülleri.....	68
Çizelge 2.10 Teorik bir enerji dönüşüm sisteminin kaçınılamaz, içsel kaçınılamaz ekserji yıkımı formülleri.....	69
Çizelge 3.1 Sistem için kütleli debi, sıcaklık ve basınç verileri.....	78
Çizelge 3.2 Emisyon ölçüm cihazının ölçüm parametreleri ve birimleri.....	81
Çizelge 3.3 Yanma ürünleri emisyon ölçümü analizinde elde edilen veriler.....	82
Çizelge 3.4 Atmosfer havasının bileşenleri.....	84
Çizelge 3.5 Maddelerin katsayıları.....	86
Çizelge 4.1 Sistemin ekserji sonuçları.....	87
Çizelge 4.2 Sistemin ekserji yıkım analizi.....	88
Çizelge 4.3 Sistemin yakıt ürün tabanlı ekserji miktarları.....	90
Çizelge 4.4 Sistem komponentlerinin ileri ekserji analiz sonuçları.....	92
Çizelge 4.5 Her bir komponent için ürün ekserji başına kaçınılamaz ekserji yıkımı.....	92
Çizelge 4.6 Sistem komponentlerinin dışsal ekserji yıkım analizi.....	93
Çizelge 4.7 Sistem için iki ayrışmanın kombinasyonu.....	101
Çizelge 4.8 Sistemin sürdürülebilirlik indikatör sonuçları.....	102

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

AC	: Kompresör
c	: Özgül ısı (kJ/kgK)
CC	: Yanma odası
E	: Enerji (kJ)
e	: Birim kütle için enerji (kJ/kg)
Ēx	: Ekserji (kW)
GT	: Gaz türbin
h	: Entalpi (kJ/kg)
\bar{h}	: Molar entalpi (kJ/kmol)
KE	: Kinetik enerji
LHV	: Alt ısııl değer (kJ/kg)
\dot{m}	: Kütlesel debi (kg/s)
p	: Basınç
PE	: Potansiyel enerji
PT	: Güç türbini
Q	: Isıl enerji (kJ)
q	: Birim kütle için ısııl enerji (kJ/kg)
R_g	: Gaz sabiti (kJ/kgK)
R_u	: Evrensel gaz sabiti (kJ/kmolK)
s	: Entropi (kJ/kgK)
\bar{s}	: Molar entropi (kJ/kmolK)
T	: Sıcaklık (K)
v	: Özgül hacim (m ³ /kg)
U	: İç enerji (kJ)
W	: İş (kJ)

Alt ve üst indisler

AV	: Kaçınılabilir
ch	: Kimyasal
des	: Yıkım

EN	:	İçsel
EX	:	Dışsal
in	:	Giriş
kin	:	Kinetik
k	:	k'inci komponent
loss	:	Kayıp
F	:	Yakıt
out	:	Çıkış
UN	:	Kaçınılamaz
P	:	Ürün
ph	:	Fiziksel
pot	:	Potansiyel
tot	:	Toplam
1,2, ...,5	:	İstasyon numaraları

1. GİRİŞ

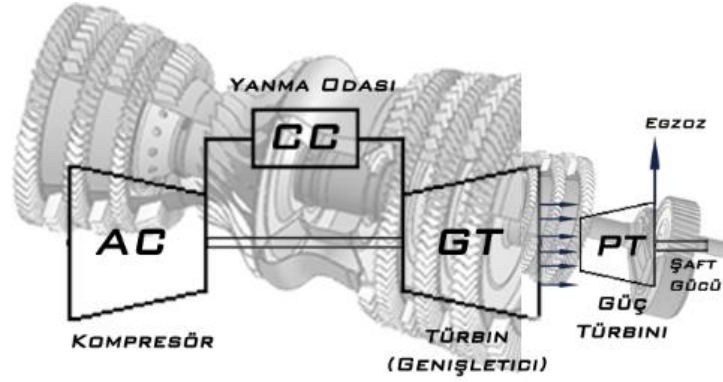
1.1. Genel Bilgiler

Hızla gelişen teknolojiyle birlikte enerji dönüşüm sistemlerinin çevresel etkilerinin neler olduğunu bilmek en önemli konulardan biri haline gelmiştir (Mahashabde ve ark. 2011). Bu yüzden, günümüzde enerji politikaları ve çevresel konularda ki en önemli anahtar, enerji kaynaklarından elde edilebilen en iyi verimi elde etmek olmuştur. Bu nedenle en iyi verimli enerji dönüşüm sistemini bulmak önemli derecede gerekli hale gelmiştir (Dincer 2002).

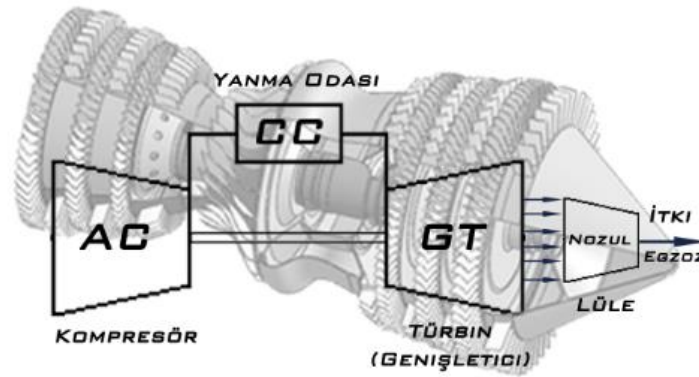
Gaz türbinli motorlar, enerji üretim alanında ana bileşenlerden biridir. Günümüzde artan enerji taleplerindeki boşluğu doldurmada önemli bir rol oynamaktadırlar. 20. yüzyılın başlarından itibaren gaz türbinli motorlar gerek havacılık gerekse sanayi uygulamalarında sürekli bir gelişmeye tabi tutulmuştur.

Gaz türbinli motorlar güç üretim amacına göre endüstriyel ve aero-türevi olmak üzere iki temelde toplanır. Piyasada mevcut gaz türbinlerinin güçleri 500 kilowatt (kW)'dan 250 megawatt (MW)'a kadar değişmektedir (EPA 2008; Ranasinghe 2013). Aero-türevli gaz türbinli motorlar uçak motorları olarak modifiye edilen bölümü oluşturur ve genellikle 500 kW ile 40 MW güç aralığındaki motorlardır (Altayib 2011). Şekil 1.1a ve b'de sırasıyla endüstriyel gaz türbinli motorların ve aero-türevi gaz türbinli motorların şematik gösterimi verilmiştir.

Gaz türbinli motorlar kompresör, yanma odası ve türbin komponentlerinden oluşur. Atmosferik hava, kompresör tarafından içerisine çekilir ve taze hava kompresör içerisinden geçerken yüksek bir basınç seviyesine kadar sıkıştırılır. Basıncı arttırılan hava daha sonra yanma odasına verilir. Yanma odasında sıkıştırılmış hava, enjekte edilen yakıt ile birlikte yakılır. Yanma odası içerisinde havanın basıncı bir miktar azalır. Yanma odası çıkışında ürün olarak yanmış gazlar yüksek bir sıcaklıkta bulunur ve direk olarak türbine iletilir. Türbin girişindeki yüksek sıcaklıktaki yanma ürünleri, türbin içerisinde enerjilerini bırakarak atmosfere doğru belirli bir genişleme oranıyla genişler. Böylelikle türbin, yanma ürünlerinin enerjisini kullanılabilir işe dönüştürmüş olur.



(a)



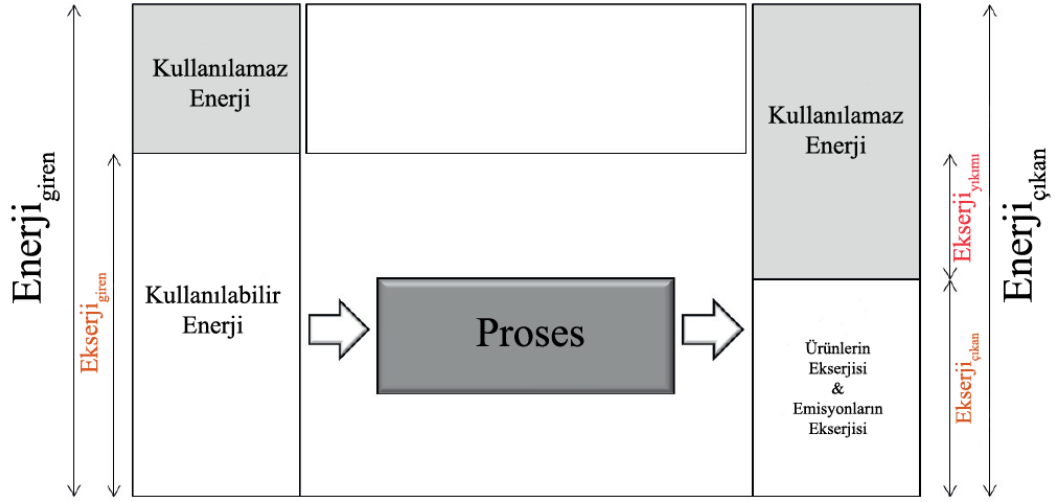
(b)

Şekil 1.1. Gaz türbinli motorlar güç üretim amacına göre şematik gösterim. (a) endüstriyel gaz türbinli motorlar ve (b) aero-türevli gaz türbinli motorlar. Burada; AC: kompresör, CC: yanma odası, GT: gaz türbin, PT: güç türbini

Havacılık sektöründeki gaz türbinli motorların performanslarının iyileştirilerek çevresel etkilerinin azaltılmasının önemi 1999 yılında Hükümetlerarası İklim Değişikliği Panelinde (IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change) sunulan Havacılık ve Küresel Atmosfer adlı konu ile ciddi şekilde ele alınmış ve yayımlanmıştır (Penner 1999). Bu kitapta havacılık sektörünün, insan kaynaklı CO₂ salımına etkisinin %2-3 arasında olduğu belirtilmiştir. %2-3 değeri az bir miktar gibi görünse de, Penner'a (1999) göre havacılık sektörünün gün geçtikçe büyüyor olması, (her geçen yıl içerisinde yaklaşık olarak %4.7 büyümektedir), çevresel etkiler yönünden ciddi bir problem oluşturabileceği anlamına gelmektedir. Bu büyümeye örnek olarak, Airbus (2009)

raporuna göre günümüzde yaklaşık olarak 15,750 tane ticari uçak olduğu varsayılmaktadır ve büyümenin etkisiyle 2028 yılında yaklaşık olarak ticari uçak sayısının 32,000 olacağı tahmin edilmektedir.

Havacılık sektörünün çevresel etkilerini tam anlamıyla belirlemek, anlamak ve değerlendirmek için çeşitli analiz yöntemleri vardır. Termodinamik analiz enerji dönüşümü sağlayan sistemleri sürdürülebilirlik, çevresel etki ve performans açısından değerlendirmeye tutan en etkili analiz yöntemlerinden biridir (Dincer ve Rosen 2007). Günümüzde termodinamik analiz yaygın bir şekilde her sektörde sistemleri değerlendirme amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 1.2. Termodinamik analizin şematik gösterimi (Taheri ve ark. 2014)

Termodinamik analiz gaz türbinli motorların tasarım, üretim ve kullanım aşamasında verimsizlikleri değerlendirmede önemli bir faktör olarak değerlendirilir. Termodinamik analizin ilk bölümü olan enerji analizi gaz türbinli motorların sahip olduğu enerji hakkında bilgi verirken ikinci bölümü olan ekserji analizi ise elde edilebilecek maksimum iş hakkında bilgileri sunar (Şekil 1.2) (Cengel ve Boles 2008; Taheri ve ark. 2014). Ekserji analiziyle birlikte gaz türbinli motorda meydana gelen tersinmezliklerin yeri ve miktarı tespit edilerek motorun performansı üzerine etkileri belirlenebilmektedir. Ekserji analizi sadece sistem komponentlerinin tersinmezlik miktarlarının belirlenmesinde fayda sağlamaktadır. Daha ileri bir analiz yöntemi olan ileri ekserji analiz yöntemi ise

ekserji analizi sonucunda tespit edilmiş tersinmezlikler miktarının komponentler arasındaki ilişkiler göz önünde bulundurularak verimsizlik ilişkilerinin ayrıntılı bir haritasını sunar.

1.2. Literatür Özeti

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

- ✚ Gaz türbinli motor (Gas turbine engine)
- ✚ Termodinamik Analiz (Thermodynamic Analysis)
- ✚ Birinci yasa, ikinci yasa (First law, second law)
- ✚ Sürdürülebilirlik, sürdürülebilirlik göstergeleri (Sustainability, sustainability indicators)
- ✚ Enerji, ekserji, enerjetik, exerjetik, enerjetik verim, exerjetik verim (Energy, exergy, energetic, exergetic, energetic efficiency, exergetic efficiency)
- ✚ İleri ekserji (Advanced exergy)
- ✚ İçsel ekserji yıkımı, dışsal ekserji yıkımı, kaçınılmaz ekserji yıkımı, kaçınılamaz ekserji yıkımı (Endogenous exergy destruction, exogenous exergy destruction, avoidable exergy destruction, unavoidable exergy destruction)
- ✚ Turbojet, turboprop, turbofan, turboshaft

Literatür taraması sonucu gaz türbinli motorların termodinamik analizi iki başlık altında (ekserji analizi ve ileri ekserji analizi) toplanmıştır (Çizelge 1.1).

Ekserji analizi literatür özeti bölümü; turbojet, turboprop ve turbofan gaz türbinli motorlar için yıllar bazında kronolojik sırada sunulmuştur. İleri ekserji analizi literatür özeti bölümü ise sadece yıllar bazında kronolojik sırayla sunulmuştur. Çünkü gaz türbinli motorlar için bu analiz yöntemi açık literatürde sadece örneksel bir brayton çevrimi olarak mevcuttur. Bu durum aynı zamanda tezin önemini, özgünlüğünü ve ayrıcalığını sunmaktadır.

Çizelge 1.1’de ekserji analizi literatürünün yıllar bazında motor türü, motor modeli ve yazarları görülmektedir. İleri ekserji analiz yöntemi yeni bir metot olmasından dolayı açık literatürde spesifik olarak havacılık ileri ekserji analizi söz konusu değildir. Dolayısıyla Çizelge 1.1’de ileri ekserji analizi literatürü için sistem türü ve yazarları gösterilmiştir. Çizelge 1.1’de verilen kronolojik sıralamanın ayrıntılı anlatımı ekserji analizi literatür özeti ve ileri ekserji analizi literatür özeti alt bölümlerinde verilmiştir.

Çizelge 1.1. Yıllara göre kronolojik sıra: Turbojet/turbofan/turboprop uçak motorları ekserji analizi ve farklı sistemler için ileri ekserji analizi

Yıl	Motor Türü	Ekserji Analizi Motor Model	Yazar	Sistem Türü	İleri Ekserji Analizi Yazar
2000	Turbojet	J-79	Roth ve Mavris (2000)	-	-
2001	Turbojet	-	Etele ve Rosen (2001)	-	-
2002	-	-	-	Kojenerasyon	Tsatsaronis ve Park (2002)
2003	Turbojet	-	Riggins (2003)	-	-
2006	-	-	-	a. Çevrimli elektrik santrali b. Örnek sistem	a. Czielsa ve ark. (2006) b. Tsatsaronis ve ark. (2006)
2007	a. Turbofan b. Turbofan c. Turbofan	a. CF6-80 b. CF6-80 c. -	a. Karakoc ve ark. b. Turgut ve ark. (2007) c. Turgut ve ark. (2007)	-	-
2008	Turbojet	J69-T25A	Balli ve ark. (2008)	a. Absorpsiyonlu soğutma makineleri b. Örnek: soğutma makineleri, kojenerasyon güç santral sistemleri, kombine güç santrali, basit gaz türbin	a. Morosuk ve Tsatsaronis (2008) b. Kelly (2008)
2009	Turbofan	CF6-80	Turgut ve ark. (2009)	a. Soğutma sistemi b. Örnek gaz türbin c. Örnek gaz türbin d. Kojenerasyon	a. Morosuk ve Tsatsaronis (2009) b. Kelly ve ark. (2009) c. Morosuk ve Tsatsaronis (2009) d. Mert ve ark. (2009)

Çizelge 1.1. (Devam) Yıllara göre kronolojik sıra: Turbojet/turbofan/turboprop uçak motorları ekserji analizi ve farklı sistemler için ileri ekserji analizi

2010	Turbofan	-	Tona ve ark. (2010)	<ul style="list-style-type: none"> a. Soğutma sistemi b. Kojenerasyon c. Kojenerasyon 	<ul style="list-style-type: none"> a. Tsatsaronis ve Morosuk (2010) b. Razmara ve Saray (2010) c. Tsatsaronis ve Morosuk (2010)
2011	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> a. Kojenerasyon b. Helis sarmal tüp 	<ul style="list-style-type: none"> a. Morosuk ve Tsatsaronis (2011) b. Bahiraei ve ark. (2011)
2012	<ul style="list-style-type: none"> a. Turbojet b. Turbofan c. Turboprop d. Turboprop/turboshaft 	<ul style="list-style-type: none"> a. - b. - c. CT7-9C d. CT7-9C 	<ul style="list-style-type: none"> a. Turan (2012) b. Turan (2012) c. Aydın ve ark. (2012a) d. Aydın ve ark. (2012b) 	<ul style="list-style-type: none"> a. Güneş panelli soğutma sistemi b. Kojenerasyon c. Kombine santral d. Voorhess soğutma makinesi e. Endüstriyel fabrika f. Buhar metan dönüşüm prosesi hidrojen üretimi g. Damıtma sistemi h. Metodoloji karşılaştırma i. Süperkritik elektrik santrali 	<ul style="list-style-type: none"> a. Tsatsaronis ve Morosuk (2012) b. Hu (2012) c. Morosuk ve ark. (2012) d. Petrakopoulou ve ark. (2012) e. Morosuk ve ark. (2012) f. Vuckovic ve ark. (2012) g. Boyano ve ark. (2012) h. Wei ve ark. (2012) i. Casseti ve Colombo (2012) j. Wang ve ark. (2012)
2013	<ul style="list-style-type: none"> a. Turbojet b. Turbofan c. Turboprop d. Turboprop 	<ul style="list-style-type: none"> a. J85-GE-21 b. CF6-50 c. - d. T56 	<ul style="list-style-type: none"> a. Ehyaei ve ark. (2013) b. Hassan (2013) c. Atulgan ve ark. (2013) d. Balli ve Hepbasli (2013) 	<ul style="list-style-type: none"> a. Güç santrali CO₂ yakalama prosesi b. Biokütle gazlaştırma ünitesi ve kombine çevrimli santral c. Akışkan yatak yanma sistemi d. Isı pompası (GEHP) 	<ul style="list-style-type: none"> a. Petrakopoulou ve ark. (2013) b. Soltani ve ark. (2013) c. Çallak (2013) d. Gungor ve ark. (2013)

Çizelge 1,1. (Devam) Yıllara göre kronolojik sıra: Turbojet/turbofan/turboprop uçak motorları ekserji analizi ve farklı sistemler için ileri ekserji analizi

a. Turbojet	a. J85-CAN-15 (ikincil yakıtlı)	a. Balli (2014)	a. Trijenerasyon	a. Açık kalp ve ark. (2014)
2014	b. JT8D	b. Turan ve ark. (2014)	b. Isı pompası	b. Erbay ve Hepbasli (2014)
b. Turbofan	c. T56	c. Balli ve Hepbasli (2014)	c. Isıl işlem prosesi	c. Vuckovic ve ark. (2014)
c. Turboprop			d. Gıda kurutma prosesi	d. Erbay ve Hepbasli (2014)
			e. Elektrik üretimi	e. Açık kalp ve ark. (2014)

1.2.1. Ekserji analizi literatür özeti

- ✚ Turbojet motorlarda kronolojik sıraya göre ekserji analizi ile ilgili olarak;

Roth ve Mavris (2000) J-79 turbojet motorun termodinamik kayıp model analizinin bir karşılaştırmasını literatüre sunmuşlardır. Kompresör verimini %85, türbin verimini %90, yanma odası basınç düşümünü %5 ve diğer komponentleri mükemmel kabul ederek hesapları gerçekleştirmişlerdir. J-79 performans parametrelerini (hava debisi, hava-yakıt oranı, yakıt debisi, özgül yakıt tüketimi, net itki, itki verimi vb.) standart döngü çevrimine göre tablo halinde vermişlerdir. Her bir komponent için giriş çıkış ekserjini hem deniz seviyesi hem de 0.9 mach'da 20,000 feet için hesaplamışlardır. Deniz seviyesi ve 20,000 feet şartlarında komponentler arasında en yüksek ekserji kaybını yanma odasında (81.3 BTU/lbm) bulmuşlardır.

Etele ve Rosen (2001) referans çevre seçiminden dolayı hava araçları motorlarının ekserji verimliliğinin hassasiyeti başlıklı makalelerinde bir turbojet motoruna deniz seviyesinden 15,000 metre irtifa aralığını kadar değişen bölgede ekserji analizini uygulamış ve referans çevre seçiminin etkisini göstermişlerdir. Artan irtifa ile motorun gerçek rasyonel verimliliğinin azaldığı sonucuna varmışlardır. Deniz seviyesinde %16.9 olan verimin 15,000 metre irtifada %15.3'e düştüğünü göstermişlerdir.

Riggins (2003) jet motorlarının performanslarının termodinamik sürekliliğine, tersinmezliklerden meydana gelen kayıp iş prensibiyle yaklaşımda bulunmuştur. Bu prensip ile tersinmezliklerden meydana gelen performans kayıplarını açık bir şekilde ölçümlerle birlikte tanımlamıştır. Jet motorlarının tasarım ve optimizasyon değerlendirmesinde akış ekserjisinin önemini makalesinde vurgulamıştır. Jet motorlarındaki itki, kayıp iş ve kullanılabilirliği geleneksel termodinamik yöntemlerle optimizasyonunun yapılabileceğini sunmuştur.

Balli ve ark. (2008) bir uçak jet motorunun ekserjetik ve eksergoekonomik analizini literatüre kazandırmışlardır. Çalışma; bir eğitim

uçağının T-37B/C modelinin sahip olduğu J69-T25A isimli jet motorunun enerji, ekserji ve eksergoekonomik analizini içermektedir. Motor verilerini Türk Hava Kuvvetlerinin bakım merkezinden deneysel olarak elde etmişlerdir. Her bir komponentin sıcaklık, basınç, hava ve yakıt debisi, enerji miktarı ve ekserji miktarı tablo halinde çalışmada sunulmuştur. Ekserji verimini en yüksek %97 ile mekanik şaftta bulmuşlardır. Diğer komponentlerin ekserji verimi ise sırasıyla %96.05, %88.41, %81.33, %55.13 ile gaz türbin, egzoz kanalı, hava kompresörü ve yanma odası hesaplamışlardır. Jet motorunun ekserji verimi ise %34.84 bulmuşlardır.

Turan (2012) insansız hava aracı uygulamalarında kullanılan küçük bir turbojet motorun bazı tasarım parametrelerinin ekserjetik etkilerini incelemiştir. Küçük turbojet motoru için teorik veriler kullanarak kompresör sıkıştırma oranını ve türbin giriş sıcaklığını değiştirerek ekserjetik ve aerotermodinamik özelliklerini literatüre sunmuştur. Türbin giriş sıcaklığını sırasıyla 1200 K, 1300 K, 1400 K, 1500 K ve kompresör sıkıştırma oranını 2 ile 7 arasında değiştirerek kabullerde bulunmuştur. Motorun itki aralığı değerleri ise 894-907 N arasındadır. Referans değer olarak 9000 metre irtifadaki sıcaklık ve basıncı kullanmıştır. Sonuç olarak, farklı sıkıştırma oranı ve farklı türbin giriş sıcaklığı kombinasyonlarını ekserji analiziyle birleştirerek motorun komponentlerinin ekserji verimlerini değerlendirmiştir. Yüksek kompresör sıkıştırma oranının, kompresörün ekserji verimini arttırdığını ve türbin giriş sıcaklığının kompresörün ekserji verimini etkilemediğini bulmuştur. Sıkıştırma oranında 2 ile 7 arasındaki artışın ekserji verimini %82.87'den %86.83'e çıkardığını hesaplamıştır. Kompresör sıkıştırma oranındaki ve türbin giriş sıcaklığındaki artış aynı zamanda yanma odasının ekserji verimini de arttırmaktadır. Yanma odası için en iyi ekserji verimini türbin giriş sıcaklığının 1500 K ve kompresör sıkıştırma oranının 7 olduğu durumda %59.72 olarak bulmuştur. Türbin içinse; türbin giriş sıcaklığının 1200 K'den 1400 K'e yükselmesi ve kompresör sıkıştırma oranının 2'den 4'e doğru artırılması sonucu en iyi ekserji verimini elde etmiştir. Fakat 1500 K türbin giriş sıcaklığı için kompresör sıkıştırma oranı arttıkça türbin ekserji veriminin azaldığını hesaplamıştır. Bu nedenle yüksek türbin giriş sıcaklığında optimizasyon yapılması gerekliliğini ortaya koymuştur.

Ehyaey ve ark. (2013) ikincil yanmalı bir uçak turbojet motorunun ekserjetik analizini gerçekleştirmişlerdir. Makaleye konu olan turbojet motorunun (J85-GE-21) ekserjetik analizi iki farklı irtifa ve iki farklı hava giriş hızı (100 m/s, 200 m/s) için yapılmıştır. Bu irtifalar deniz seviyesi ve 11,000 metredir. Turbojet motorunu; alık, kompresör, yanma odası, türbin, ikincil yakıcı ve nozul olmak üzere altı bölümde incelemişlerdir. Deniz seviyesi verilerine göre yapılan ekserji analizinde, en yüksek ekserji verimini kompresörde %96.7 ve sırasıyla %93.7 ile nozul, %92.3 ile türbin olarak hesaplamışlardır. Turbojet motorunun ekserji verimini ise giriş hava sıcaklığının her 1⁰C artışı ile %0.45 azaldığını bulmuşlardır. Her iki irtifadaki ekserji analizi sonuçlarına bakıldığında da, motorun alığına gelen havanın hızı azaldığında motorun bütün komponentlerinin ve tüm motorun ekserji veriminin azaldığı sonucuna varmışlardır.

Balli (2014), askeri uçaklarda kullanılan deneysel bir turbojet motorunun (J85-CAN-15 ikincil yakıcı) enerjetik ve ekserjetik performansı üzerine ikincil yanmanın etkisini araştırmıştır. Motorun enerji kayıplarını ve ekserji tüketimini askeri ve ikincil yakıcı operasyon modunda incelemiştir. Askeri modda motorun enerji verimini %31.64, ikincil yanma operasyon modunda %24.18 olarak hesaplamıştır. Ekserji verimini ise askeri modda %29.81, ikincil yanma operasyon modunda da %22.77 olarak bulmuştur. Çalışmanın sonucu olarak ikincil yanma operasyon modu motorun enerji ve ekserji verimliliğini düşürmekte oysa enerji kayıplarını ve ekserji tüketimini önemli derecede arttırdığını bulmuştur. Önemli sonuçlardan bir diğeri ise; ikincil yanma operasyonunun turbojet motorun termodinamik performanslarını azalttığını ayrıca motorun yakıt tüketimini ve çevresel etkilerini arttırdığını çalışmada göstermiştir.

✚ Turbofan motorlarda kronolojik sıraya göre ekserji analizi ile ilgili olarak;

Karakoc ve ark. (2007) bir turbofan motorda (CF6-80) yakıt olarak kerozen yerine hidrojen kullanımının ekserji analizini incelemişlerdir. Yakıt olarak kerozen yerine hidrojen kullanıldığında motordan aynı gücü elde etme durumunda özgül yakıt tüketiminin %39.2 azaldığını belirtmişlerdir. Ekserji

verimini ekserji çıkışı/ekserji girişi ve ekserjetik ürün/ekserjetik yakıt tabanlı olarak iki şekilde hesaplamışlardır. Bu durumda en yüksek ekserji yıkımını 45.6 MW ile yanma odasında olduğunu bulmuşlardır. Ekserji girişi/ekserji çıkışı tabanlı ekserji verim hesabıyla en yüksek ekserji verimini %98.25 ile yüksek basınç türbininde hesaplamışlardır. Ürün/yakıt tabanlı ekserji verimi hesabında ise en yüksek ekserji verimini %97.27 ile alçak basınç türbininde hesaplamışlardır. Birinci durum ekserji verim hesabına göre motorun ekserji verimi (%87.41) ikinci durum ekserji verimi (%85.41) hesabından yüksek çıkmıştır.

Turgut ve ark. (2007) bir turbofan motor olan CF6-80 motorun ekserji analizini deniz seviyesi şartlarına göre hesaplamışlardır. Bu makalenin özgünlüğü ise komponentlerin sahip olduğu normal izantropik verim değerlerini %1, %3, %5 arttırarak ekserji analizini tekrarlamışlar ve birbirleriyle karşılaştırmışlardır. İzantropik verim artışıyla bütün komponentlerin ekserji verimlerinin arttığını bulmuşlardır. Ekserji yıkımı içinse izantropik verim artışıyla ekserji yıkımlarının azaldığını öne sürmüşlerdir. Yanma odasının 35.76 MW ile en yüksek tersinmezliğe sahip olduğunu hesaplamışlardır. Ayrıca yanma odasının 8.03 MW ile en yüksek ekserjetik geliştirilebilirlik potansiyele sahip olduğunu ortaya çıkarmışlardır.

Turgut ve ark. (2007) kerosen yakıtlı ve ikincil yanmaya (afterburner) sahip bir turbofan motorun deniz seviyesi ve 11,000 metre yükseklikteki verilerine göre ekserjetik analizini yapmışlardır. Motor komponentleri; bir fan, bir kompresör, bir yanma odası, bir türbin, ikincil yanma ve egzozdur. Her bir komponentin hem deniz seviyesi hem de 11,000 metredeki ekserji yıkımlarına bakıldığında ikincil yanmanın her iki durum içinde en yüksek ekserji yıkımına sahip olduğunu hesaplamışlardır. Ekserji verimini ekserji çıkışı/ekserji girişi ve ekserjetik ürün/ekserjetik yakıt tabanlı olarak iki yolla da hesaplamışlardır. Her iki yolla da hesaplanan ekserji veriminin birbirlerinden farklı çıktığını makalelerinde sunmuşlardır. Deniz seviyesi şartlarında ürün/yakıt tabanlı ekserji verimine bakıldığında en yüksek verimin %88.5 ile türbinde olduğunu bulmuşlar ve diğer komponentler içinse sırasıyla %80.6 fan, %70.4 kompresör ve %66.7 yanma odası olarak hesaplamışlardır. Deniz seviyesi maksimum ekserji yıkım değeri 95.46 MW ile ikincil yanmanın sahip olduğunu belirtmişlerdir. Deniz seviyesi ekserji

veriminin 11,000 metre irtifadaki ekserji veriminden yüksek olduğunu elde etmişlerdir. Bunun sebebinin, yüksek irtifalarda çevre sıcaklığının çok düşük olması ve bu yüzden aynı kayıp miktarlarının yüksek ekserji kaybına sebebiyet verdiğini öne sürmüşlerdir.

Turgut ve ark. (2009) General Electric'e ait olan CF6-80 turbofan motorun deniz seviyesi verilerine göre ekserji analizini literatüre sunmuşlardır. Turbofan motorun komponentlerinin izantropik verimlerini değiştirerek, ekserji verimleri ve ekserji yıkımları üzerine etkilerini araştırmışlardır. Fandaki itki kuvvetini 7.029 MW ve motorun sıcak bölgesindeki (core engine) itki kuvvetini 5.230 MW olarak hesaplamışlardır. Sistemin ekserji yıkımları incelendiğinde; en yüksek ekserji yıkımının 47.31 MW ile fan egzozunda olduğunu hesaplamışlar ve sırasıyla motorun sıcak bölgesindeki yıkımı 35.91 MW, yanma odasındaki yıkımı ise 31.54 MW bulmuşlardır. Diğer komponentlerin ekserji yıkımları ise; yüksek basınç kompresöründe 2.85 MW, fanda 2.19 MW ve yüksek basınç türbininde 2.06MW'dır. Fan, kompresörler ve türbinlerde yüksek izantropik verimden dolayı (%80-%95) yüksek ekserji verimleri elde etmişlerdir. Komponentlerin izantropik verimlerini %1, %3, %5 oranlarında arttırdıkça ekserji verimlerinin arttığını gözlemişlerdir. Fan için ekserji verimleri artışına bakıldığında; orijinal izantropik verimden %1 artış fanın ekserji verimini %0.81 arttırmış, %3 izantropik verimde artış %2.42 ekserji veriminde artışı ve %5'lik izantropik verim artışı ise %4.04 ekserji veriminde artış sağladığını hesaplamışlardır. Turbofan motorun komponentlerinin ekserji verimine bakıldığında; %12.71 ile en düşük motor sıcak bölge egzozunda olduğunu (core engine exhaust) ve fan egzozunda ise %12.94 olduğunu bulmuşlardır.

Tona ve ark. (2010) bir turbofan motorun, ticari uçakların sahip olduğu tipik uçuş fazlarında ekserji ve termoekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Ticari uçakların sahip olduğu tipik uçuş fazları; kalkış (takeoff), tırmanış (climbing), seyir (cruise), alçalma (descent), bekleme (holding) ve inişdir (landing). Her bir faz için ekserji yıkımını, kayıp ekserji miktarını, itki ekserjini ve besleme ekserjini hesaplamışlardır. Buzlanma sisteminin kapatıldığı durum için (anti-ice OFF) fazlar arasında en yüksek toplam ekserji yıkımını seyir fazında %36 bulmuşlardır. Ekserji verimlerini bütün fazlar için her iki durumu kapsayacak

şekilde (buzlanma sisteminin kapalı veya açık olması durumu) hesaplamışlar ve bütün fazlar için buzlanma sisteminin açık olduğu şartlarda kapalı olduğu şartlara göre ekserji verimliliğinin arttığını saptamışlardır.

Turan (2012), özgül ekserji tabanlı metottu kullanarak bir turbofan motorun ekserji parametrelerine referans yüksekliğinin etkisini araştırmıştır. Referans yüksekliği olarak 4000, 5000, 6000, 7000, 8000 ve 9000 metreyi seçmiştir. 0.9 Mach uçuş hızında turbofan motorun ekserji verimine bakıldığında, referans yüksekliğinin azalması ile ekserji veriminin arttığı sonucuna varmıştır. 9000 metrede %48.91 olarak hesapladığı motor ekserji verimini 4000 metrede %50.34 olarak hesaplamıştır. 9000 metre irtifada turbofan motorun komponentlerinin ekserji verimini en yüksek %89 fanda ve sırasıyla yüksek basınç türbini %88, alçak basınç türbini %81, yüksek basınç kompresörü %80, egzoz nozul ve fan nozul %75 ve yanma odasını %73 olarak hesaplamıştır. Bir diğer önemli sonuç olarak referans yüksekliğinin artışı ile motorun enerji veriminin arttığını belirtmiştir.

Hassan (2013) bir turbofan motorun (CF6-50) hava alığındaki ve fanındaki yerel ekserji yıkımını hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yardımıyla değerlendirmiştir. Yerel entropi üretimini termal ve vizkozite dahil edilerek önceden belirlenmiş olan akış alanından hesaplamıştır. Uçağın seyir fazında turbofan motorun sahip olduğu fanın kullanılabilir iş potansiyelinden 1.95 MW kaybına sebep olduğunu ve hava alığı ile karşılaştırıldığında, alığın neden olduğu kaybın (4.6 kW) ihmal edilebilir bir değerde olduğunu hesaplamıştır.

Turan ve ark. (2014) JT8D turbofan motorun kalkış modunda (takeoff mode) bazı ekserjetik parametrelerini hesaplamışlardır. Bu parametreler; yakıt tüketim oranı, yakıt ekserji faktörü, ürün ekserji faktörü, geliştirilebilirlik potansiyel oranı ve verimlilik kayıp oranıdır. Yüksek basınç türbini ve alçak basınç türbininde yüksek izantropik verimden dolayı yakıt tüketim oranını %0.2, %0.4 bulmuşlardır. Maksimum yakıt tüketim oranı %12.6 ile tersinmez yanma odasında olduğunu göstermişlerdir. Yakıt ekserji faktörünü ise en yüksek yanması odasında %49.5 hesaplamışlardır.

- ✚ Turboprop motorlarda kronolojik sıraya göre ekserji analizi ile ilgili olarak;

Aydın ve ark. (2012a) CT7-9C turboprop motorun ekserjetik ve eksergo-ekonomik analizini yapmışlardır. Her bir komponentin giriş-çıkış sıcaklık ve basınçlarını, hava ve yakıt debisini ölçmüşlerdir. Ekserji analizi sonucu her bir komponent için giriş-çıkış ekserji değerlerini, ekserji yıkımlarını, ekserji verimlerini ve ekserjetik performans değerlerini grafik ve tablolar halinde sunmuşlardır. En yüksek verimi egzoz bölümünde % 98.1 en düşük verimi ise yanma odasında % 79.9 olduğunu belirlemişlerdir.

Atılğan ve ark. (2013) ekserji analizi yardımıyla bir turboprop motorun çevresel etki değerlendirmesini literatüre sunmuşlardır. Çalışmanın bir bölümünde turboprop motorun ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir. Turboprop motorun yerde çalıştırma operasyonundaki parametrelerini; güç türbin hızını, hava debisini, yakıt debisini, atmosfer sıcaklığı ve basıncını, nem oranını ve güç türbini giriş sıcaklığını tablo halinde vermişlerdir. Ekserji analizi sonucunda her bir istasyonun ekserjetik değerlerini hesaplamışlardır.

Balli ve Hepbasli (2013) T56 turboprop motorun enerjetik ve ekserjetik analizlerini gerçekleştirmiştir. T56 turboprop motorun analizini dört farklı yük modunda ve iki farklı durum için gerçekleştirmişlerdir. Bu yük modları; %75 güç, %100 güç, askeri mod (military-mode) ve kalkış modudur (takeoff mode). Durum A olarak adlandırdıkları performans değerlendirmesini şaft gücüne göre ve Durum B olarak adlandırdıkları performans değerlendirmesini ise şaft gücü ile egzoz gazlarının enerji-ekserji toplamına göre hesaplamışlardır. T56 turboprop motorun Durum A için enerji ve ekserji verimine bakıldığında; enerji veriminin minimum değeri %75 yük modunda %21.9 ve maksimum değerini kalkış modunda %25.5 olarak, ekserji verimini ise %75 yük modunda %20.5 kalkış modunda ise %23.8 olarak hesaplamışlardır. T56 turboprop motorun Durum B için enerji ve ekserji verimine bakıldığında enerji veriminin minimum değeri %75 yük modunda %25 ve maksimum değerini kalkış modunda %28.1 olarak, ekserji verimini ise %75 yük modunda %23.4 kalkış modunda ise %26.3 olarak hesaplamışlardır. Dikkat çekici sonuçlardan bir tanesi olarak, T56 turboprop motorun şaft gücünü arttırmak

için sadece yakıt debisini arttırmak gerektiğini makalelerinde sunmuşlardır. Motorun tamamının enerji ve ekserji analizine bakıldığında; motorun egzoz ürünlerinden kaynaklı kinetik enerji-ekserji hesaplamalarda göz önüne alındığında motorun enerji verimi, ekserji verimi ve geliştirilebilirlik potansiyelinin arttığı fakat kayıp enerji oranı, ekserji tüketim oranı, yakıt tüketim oranı ve yakıt-ürün oranının azaldığı sonucuna varılmıştır. Komponent tabanlı ekserji analizine bakıldığında yanma odasının en önemli ekserji tüketen komponent olduğunu belirlemişlerdir.

Balli ve Hepbasli (2014) T56 turboprop motorun; eksergoekonomik, sürdürülebilirlik ve çevresel zarar maliyeti analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın ana konusu, T56 turboprop motorun farklı yüklerde eksergoekonomik, sürdürülebilirlik ve çevresel zarar maliyeti analizlerini yaparak performans değerlendirmesini literatüre kazandırmaktır. T56 turboprop motorun analizini dört farklı yük modunda gerçekleştirmişlerdir. Bu yük modları; %75 güç, %100 güç, askeri mod (military-mode) ve kalkış modudur (takeoff mode). Turboprop motor için her bir modun termodinamik özelliklerini tablolar halinde makalelerinde sunmuşlardır. Turboprop motorun %75 yük halinde en yüksek ekserji verimine sahip komponentler %98.64 ile egzoz kanalı, %98.50 ile şanzıman, %98.49 ile gaz türbin mekanik şaftı ve %98.00 ile gaz türbinidir. En düşük ekserji verimi ise %66.83 ile yanma odasında bulunmuştur. Turboprop motorun %100 yük halinde en yüksek ekserji verimine sahip komponentler %98.74 ile egzoz kanalı, %98.65 ile gaz türbini, %98.50 ile gaz türbin mekanik şaftı ve %98.50 ile şanzımandır. En düşük ekserji verimi ise %66.18 ile yanma odasında bulunmuştur. Turboprop motorun askeri modda yük halinde en yüksek ekserji verimine sahip komponentler %99.04 ile gaz türbini, %98.74 ile egzoz kanalı, %98.50 ile gaz türbin mekanik şaftı ve %98.50 ile şanzımandır. En düşük ekserji verimi ise %66.12 ile yanma odasında bulunmuştur. Turboprop motorun kalkış modu yük halinde en yüksek ekserji verimine sahip komponentler %99.54 ile gaz türbini, %98.75 ile egzoz kanalı, %98.50 ile gaz türbin mekanik şaftı ve %98.50 ile şanzımandır. En düşük ekserji verimi ise %66.04 ile yanma odasında bulunmuştur. %75'den başlayarak sırasıyla %100, askeri ve kalkış moduna doğru

gidildikçe gaz türbininin ekserji veriminin arttığı fakat yanma odasının ekserji veriminin azaldığı tablolardan anlaşılmaktadır.

✚ Turboprop/turboshaft motorlarda kronolojik sıraya göre ekserji analizi ile ilgili olarak;

Aydın ve ark. (2012b) pervaneli motor içeren uçaklar ve helikopterler için kullanılan bir deneysel turboprop/turboshaft (CT7-9C) motorun komponent tabanlı ekserjetik değerlendirmesini literatüre kazandırmışlardır. Turboprop/turboshaft motoru 6 farklı torkta ve yer operasyonunda çalıştırmışlardır. Operasyonlar sırasıyla 240 N.m, 350 N.m, 485 N.m, 552 N.m, 580 N.m, 630 N.m torkdadır. Çalışmada motorun farklı tork ve güç özelliklerinde; verimlerini, geliştirilebilme potansiyellerini, ekserji yıkım oranlarını, yakıt tüketim oranlarını kısacası motorun ekserjetik performanslarını karşılaştırarak değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak yaygın olarak bölgesel uçaklarda ve helikopterlerde kullanılan motorun sahip olduğu komponentlerin ekserjetik performansı üzerine çalışma parametrelerinin etkisini değerlendirmişlerdir.

1.2.2. İleri ekserji analizi literatür özeti

Tsatsaronis ve Park (2002) termal sistemlerin yatırım maliyetlerini ve kaçınılabılır-kaçınılamaz ekserji yıkımlarını incelemişlerdir. Termal sistemlerin yatırım verimliliğini ve termodinamik performanslarını, sistemin bir komponenti için ekserji yıkımının kaçınılabılır ekserji yıkımı parçasını kaçınılabılır yatırım maliyeti ile ilişkilendirerek ve değerlendirerek geliştirilebilirlik potansiyellerinde tahminde bulunmuşlardır. Bu tahmini örnek bir kojenerasyon sistemi üzerinden gerçekleştirmişlerdir. Kojenerasyon sisteminin sahip olduğu komponentleri kompresör, türbin, ısı değiştirici ve yanma odası olarak kabul ederek, kaçınılabılır-kaçınılamaz ekserji yıkımı ve yatırım maliyetleri ile ilişkilendirip nasıl bir tahminde bulunulabileceğini açıklamışlardır.

Cziesla ve ark. (2006) harici ateşleme ile birleştirilmiş çevrimli elektrik santralının kaçınılabılır termodinamik verimsizliklerinin maliyetini

incelemişlerdir. Sistemin kaçınılabılır verimsizliklerinin maliyetini ileri ekserji analizini kullanarak ekserji yıkımları ve ekserji kayıplarıyla ilişkilendirmişlerdir. Analizi, her bir komponentin kaçınılabılır-kaçınılamaz ekserji yıkımlarını ve yatırım maliyetlerini hesaplayarak gerçekleştirmişlerdir. Enerji-dönüşüm sistemleri için kaçınılabılır ekserji yıkımları ve kaçınılabılır yatırım maliyetleri konsepti, tasarım aşamasında uygun maliyeti hesaplayabilmek için en verimli yol olduğunu makalelerinde sonuç olarak belirtmişlerdir.

Tsatsaronis ve ark. (2006) termal sistemlerin içsel-dışsal ekserji yıkımlarının nasıl analiz edilebileceğini literatüre sunmuşlardır. Ekserji yıkımının içsel-dışsal ekserji yıkım parçalarını tanımlamışlar ve formüllerini tanıtmışlardır. Gerçek verilere dayalı sistem üzerinde içsel ekserji yıkımının hesap yaklaşımını gerçekleştirmişlerdir. Örnek sistemde en yüksek ekserji yıkımını yanma odasında (42.510 MW) hesaplamışlar ve bu yıkımın büyük bir parçasının (28.388 MW) içsel ekserji yıkımından kaynaklı olduğunu bulmuşlardır. İleri ekserji analizinin diğer bir sonucu olarak; komponentler arasındaki etkileşimden kaynaklı ekserji yıkımının (dışsal ekserji yıkımı) türbinde yaklaşık %50 olduğunu, kompresörde ise %77 olduğunu belirtmişlerdir.

Morosuk ve Tsatsaronis (2008) absorpsiyonlu soğutma makinelerinin ekserji analizine yeni bir yaklaşım başlıklı makalelerinde, enerji dönüşümünü gerçekleştiren sistemlerin ekserji analizine yeni bir yaklaşım ile ekserji yıkımını kaçınılır-kaçınılmaz (avoidable-unavoidable), iç kaynaklı-dış kaynaklı (endogenous-exogenous) olmak üzere ayırarak literatüre sunmuşlardır. Makalelerinde ekserji yıkımını ayırmanın, bir sistemin geliştirilebilirlik potansiyelinin ve verimsizliklerinin daha düzgün anlaşılabilceğini göstermişlerdir.

Kelly (2008) ekserji yıkımının içsel ve dışsal ekserji yıkım parçalarına dayalı olarak enerji sistemlerinin geliştirilebilirlik potansiyelleri incelemiştir. Çalışmasında soğutma makineleri sistemlerini, basit gaz türbin sistemlerini, kojenerasyon güç santral sistemlerini ve kombine güç santrallerini incelemiştir. Bu sistemlerin ileri ekserji analizlerinin nasıl gerçekleştirileceğini ve ileri ekserji analiz sonuçlarının nasıl değerlendirileceğini çalışmasında sunmuştur. Sonuç olarak ileri ekserji analizinin, geleneksel ekserji analizine göre daha ayrıntılı

sonuçlar verdiğini ve bu sonuçlar üzerinden yola çıkılarak sistemlerin hangi komponentlerinin ne kadar geliştirilebilirlik potansiyellerine sahip olduğunu belirlemede, ileri ekserji analizinin iyi bir araç olduğunu söylemiştir.

Morosuk ve Tsatsaronis (2009) bir soğutma sisteminin farklı iş akışkanlarıyla çalıştırılmasının ileri ekserji analizini değerlendirmişlerdir. Makalede ekserji yıkımının içsel ekserji yıkımı parçasını; dikkate alınan komponentin gerçek çalışma koşullarında ve verimliliğinde çalıştırılırken diğer sistem komponentlerin ideal koşullarda çalıştırılması durumunda elde edilen ekserji yıkımı olarak tanımlamışlardır. Toplam ekserji yıkımı ile içsel ekserji yıkımı arasındaki farkı dışsal ekserji yıkımı olarak göstermişlerdir. Dışsal ekserji yıkımını tüm sistemin yapısında ve dikkate alınan komponentin haricinde geriye kalan komponentlerde meydana gelen tersinmezlikler tarafından, dikkate alınan komponentte oluşan etki olarak tanımlamışlardır. Ekserji yıkımının diğer parçalarından biri olan kaçınılamaz ekserji yıkımını, bir komponent içerisinde gelecekte var olacak en iyi teknolojilerle bile asla nleyemeyeceğimiz yıkım olarak tanımlamışlardır. Kaçınılabilir ekserji yıkımını toplam ekserji yıkımı ile kaçınılamaz ekserji yıkımı arasındaki fark olarak tanımlamışlardır. Sistemde kullanılan iş akışkanlarını; R125, R134a, R22, R717 ve R500 ile R407C karışımı olduğunu belirtmişlerdir. Makalenin ana konusunun iş akışkanlarının gelecekte kullanılabilitesini değerlendirmek olmadığını belirterek, sadece amacın farklı malzeme özelliklerinin ileri ekserji analizi sonuçları üzerine nasıl etki ettiğini göstermek olduğunu belirtmişlerdir.

Kelly ve ark. (2009) ileri ekserji analizinin içsel-dışsal ekserji yıkım parçalarının üzerine yaklaşımlarda bulunmuşlardır. Enerjiyi dönüştüren bir sistemin bir komponentinin tersinmezliklerinin (ekserji yıkımlarını) iki bölüme ayrıldığını ileri sürmüşlerdir. Birinci bölümü; bakılan komponentin sahip olduğu verimsizlikle ilişkilendirmişlerdir. İkinci bölümü ise; sistemin yapısı ve tüm sistemin diğer komponentlerinin verimsizliklerine bağlı olduğunu söylemişlerdir. Bu yüzden komponentte meydana gelen ekserji yıkımını iki parçada tanımlamışlardır. İçsel ekserji yıkımını sadece komponentin performansına bağlı olarak değerlendirmek gerektiğini dışsal ekserji yıkımını ise tüm sistemin geriye kalan diğer tüm komponentlerinin verimsizliklerinden dolayı meydana gelen

ekserji yıkımı olarak değerlendirmek gerektiğini belirtmişlerdir. Makalede ekserji yıkımının içsel parçasının diğer bilim insanları tarafından hesaplanan dört farklı hesap yaklaşımını tartışmışlardır. Her bir yaklaşım ile ilişkili uygulamalar için avantaj, dezavantaj ve kısıtlamaları makalelerinde sunmuşlardır. Ekserji yıkımının içsel-dışsal ekserji yıkımı parçaları için diğer bilim insanları tarafından geliştirilen yaklaşımların karşılaştırılabilir ve kabul edilebilir sonuçlar olduğu sonucuna varmışlardır. Kabul edilemez sonuçlar verdiği için yapısal teori yaklaşımının, ekserji yıkımının içsel ekserji yıkımı parçasını hesaplamak için kullanılmaması gerektiğini söylemişlerdir. Ekserji yıkımının içsel-dışsal ekserji yıkımı olarak ayrılmasının sistem komponentleri arasındaki ilişkiyi daha iyi anlamamızda yardımcı olduğunu belirtmişler ve enerjiyi dönüştüren bir sistemin geliştirilebilirlik potansiyeli için daha kullanışlı bilgileri temin edebildiğimizi söylemişlerdir. Özellikle bu konseptin kaçınılabilir-kaçınılamaz ekserji yıkımı ile birleştirildiği zaman daha anlamlı olduğunu öne sürmüşlerdir.

Morosuk ve Tsatsaronis (2009) kimyasal reaksiyona sahip sistemler için ileri ekserji analizi tanıtan bir makale yayınlamışlardır. Makalede, örnek sistem olarak basit bir gaz türbin kullanmışlar ve sisteme ileri ekserji analizi uygulamışlardır. Tüm sistemin komponentlerinin birbirleriyle olan etkileşimlerini ekserji yıkımının içsel-dışsal parçalarıyla ve sistem komponentlerinin geliştirilebilirlik potansiyellerini ekserji yıkımının kaçınılabilir-kaçınılamaz parçalarıyla değerlendirmişlerdir. Sistemin bir komponentindeki ekserji yıkımını kaçınılabilir/kaçınılamaz, içsel/dışsal ve kaçınılmaz içsel/ kaçınılmaz dışsal, kaçınılabilir içsel/ kaçınılabilir dışsal olarak değerlendirilmesi gerekliliğini ortaya koymuşlardır. Sistemin değerlendirmesini ise ekserji yıkımının kaçınılabilir içsel/ kaçınılabilir dışsal parçalarından yapılması gerektiğini öne sürmüşlerdir. Bir gaz türbinli sistem için geleneksel ekserji analizi ile ileri ekserji analizini karşılaştırdıklarında şu verileri elde etmişlerdir; (a) Tüm sistemin verimliliğinin geliştirilebilirlik potansiyeli yaklaşık olarak %5'dir. Çünkü sistemdeki ekserji yıkımının %70'den fazlası kaçınılamaz ekserji yıkımıdır. (b) Yanma odasındaki ekserji yıkımının sadece dörtte biri kaçınılabilir ekserji yıkımıdır. Yanma odası için, kaçınılabilir içsel ekserji yıkımı (örneğin yanma odası çıkış sıcaklığı azaltılarak önlenbilir) kaçınılabilir dışsal ekserji yıkımından (türbin ve

kompresördeki iyileştirmeler aracılığıyla azaltılabilir) dört kat fazladır. (c) Kompresördeki ekserji yıkımının %50'den fazlası dışsal ekserji yıkımıdır. Bu yıkımın yaklaşık %22'si yanma odasından %27'si türbinden kaynaklıdır. (d) Türbindeki bir iyileştirme, türbindeki kaçınılabılır içsel ekserji yıkımını ve yanma odasının kaçınılabılır dışsal ekserji yıkımını etkileyecektir.

Mert ve ark. (2009) Zonguldak, Ereğli Demir-Çelik fabrikasındaki kojenerasyon sistemine ileri ekserji analizini uygulamışlardır. Sistem iki gaz türbini ve iki ısı geri kazanımlı buhar jeneratörlerini içermektedir. Her bir gaz türbin sisteminin net gücünün 39.5 MW ve yakıt debisinin 20.84 kg/s olduğunu belirtmişlerdir. Geleneksel ekserji analizi sonucunda en verimli komponentin gaz türbin (94.07) olduğunu, ısı geri kazanımlı buhar jeneratörünün ekserji verimini ise %64.61 olduğunu söylemişlerdir. Yanma odası verimini ise %74.87 hesaplamışlardır. İleri ekserji analizi sonucunda en yüksek ekserji yıkımının yanma odasında 46.5 MW, gaz türbininde ise 5.8 MW olarak hesaplamışlardır. Geliştirilebilirlik potansiyellerine bakıldığında yanma odasının geliştirilebilirlik potansiyelinin 11.7 MW, gaz türbininin 0.3 MW olarak hesaplamışlardır. Kojenerasyon sisteminin toplam ekserji yıkımının 70 MW bunun %83.5'ini (yaklaşık 58.5 MW) içsel ekserji yıkımının oluşturduğunu söylemişlerdir. Dışsal ekserji yıkım miktarı ise 11.5 MW dır. Yanma odasında ekserji yıkımının içsel ekserji yıkımı parçasını %80, dışsal ekserji yıkımı parçasını ise %20 olarak hesaplamışlardır.

Tsatsaronis ve Morosuk (2010) doğal gazın sıvılaştırılması için kullanılan bir soğutma sisteminin ileri ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir. Doğal gazın sıvılaştırılması için kullanılan soğutma sistemi üç kademeli bir soğutma sistemidir. İleri ekserji analizi ile üç-kademeli soğutma sisteminin, her bir komponentindeki ekserji yıkımlarını içsel-dışsal ve kaçınılabılır-kaçınılamaz olarak hesaplamışlardır. Böylelikle ileri ekserji analizi yardımıyla komponentlerin ve tüm sistemin termodinamik verimliliğinin iyileştirilme potansiyellerini belirlemişlerdir. Ayrıca her bir komponentin sahip olduğu ekserji yıkımı üzerine diğer komponentlerin ilişkilerini ve etkilerini araştırmışlardır. Kaçınılabılır ekserji yıkımı parametresinin tanımlanmasının her sistem ve sistem komponenti için

geliştirilebilirlik potansiyelinin belirlenmesinde önemli bir rol oynadığını öne sürmüşlerdir.

Razmara ve Saray (2010) bir basit gaz türbin sisteminin ve kojenerasyon elektrik üretim tesisinin içsel-dışsal kaynaklı ekserji yıkımına dayalı olarak verimliliklerini incelemişlerdir. İçsel-dışsal ekserji yıkımını parçalarını enerjii dönüştüren sistemler için yeni bir gelişme olarak makalelerinde sunmuşlardır. Sistemlerinin incelemesini iki farklı yakıt kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Bu yakıtlar doğal gaz ve dizeldir. Yakıtların karışım oranlarını %50-%50 doğal gaz-dizel, %70-%30 doğal gaz-dizel, %90-%10 doğal gaz-dizel ve %100 doğal gaz olarak belirlemişlerdir. Her iki durum içinde yanma odasında içsel ekserji yıkımının en yüksek değerde olduğunu hesaplamışlardır. Sistem dizel yakıt yerine doğal gaz ile çalıştırıldığında; yanma odasının ekserjetik verimliliğini, gaz türbin sisteminde bulunan diğer komponentlerin ekserji verimliliğine göre biraz daha az olduğunu diğer yakıtlandırılmış sisteme göre (dizelle yakıtlandırılmış) ise %1.76 verimin fazla çıktığını hesaplamışlardır. Ayrıca kojenerasyon sisteminin yanma odasının ekserjetik verimliliğinin doğal gaz kullanımında %1.87 artış sağladığını bulmuşlardır.

Tsatsaronis ve Morosuk (2010) elektrik üretimi ile sıvılaştırılmış doğal gazı yeniden gazlaştıran yeni bir konsept olan birleştirilmiş kojenerasyon sisteminin detaylı bir ileri ekserjetik analizini literatüre sunmuşlardır. Analizlerinin içeriği; her bir komponent için ekserji yıkımlarını kaçınılır-kaçınılmaz (avoidable-unavoidable), iç kaynaklı-dış kaynaklı (endogenous-exogenous) ve kaçınılıbilir dış kaynaklı ekserji yıkımının detaylı ayrıntısını kapsamaktadır. Sonuç olarak yeni bir kojenerasyon konsepti olan elektrik üretimiyle kombine olmuş sıvılaştırılmış doğal gazın tekrar gazlaştırılması sisteminin toplam enerji verimi %75.5, ekserji verimi ise %52.6 olarak hesaplanmış ve bu verim değerleriyle termodinamik açıdan avantajlı olduğu ispatlanmıştır. İleri ekserji analizi ile elde edilen sonuçların diğer termodinamik analizlerle elde edilen sonuçlardan daha detaylı ve daha güvenilir olduğunu makalelerinde belirtmişlerdir.

Morosuk ve Tsatsaronis (2011) ileri ekserji analiz yöntemini kullanarak LNG tabanlı kojenerasyon sistemlerinin karşılaştırmalı değerlendirmesini

literatüre sunmuşlardır. Elektrik üretimiyle birlikte sıvılaştırılmış doğal gazı yeniden gazlaştırma işlemini birlikte yapan birleştirilmiş bir gaz türbin tabanlı yeni bir konseptin ileri ekserji analizini makalelerinde sunmuşlardır. Sistemleri üç alt sistemden (LNG alt sistemi, N₂ alt sistemi ve açık gaz türbin güç sistemi) oluşmaktadır. Her bir sistem için detaylı ileri ekserji analiz sonuçlarını makalelerinde sunmuşlardır.

Bahiraei ve ark. (2011) tipik bir helis sarmal tüpün geliştirilebilirlik potansiyelini kaçınılabılır-kaçınılamaz ekserji yıkımı kavramlarına dayalı olarak incelemiştir. Sistemi, sürekli akışlı-sürekli açık sistem, tam gelişmiş zorlanmış taşınım halinde, uniform duvar sıcaklığında kabul etmişlerdir. Akışkanı su olan sistemin, sarmal kavis oranının, boyutsuz giriş sıcaklık farkının, sarmalın boyutsuz geçit uzunluğunun ve akışkan özelliklerinin kaçınılabılır ekserji yıkımı üzerine etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar helis sarmal tüpte termodinamik optimizasyonun önemli olduğunu göstermektedir.

Tsatsaronis ve Morosuk (2012) ileri termodinamik (ekserjetik) analiz başlığı altında ileri ekserjiyi tanıtmışlardır. Bir komponentin ekserji yıkımını kaçınılabılır-kaçınılamaz ekserji yıkımı olarak iki bölümde tanımlamanın termodinamik verimliliği geliştirmek için gerekli olan potansiyelin belirlenmesinde bir ölçü sağlayacağını söylemişlerdir. Alternatif olarak ekserji yıkımını içsel-dışsal ekserji yıkımı olarak iki parçaya ayırmanın sistemin bileşenleri arasında meydana gelen etkileşimler hakkında bilgi sağlayacağını belirtmişlerdir. Bir tarafta kaçınılabılır-kaçınılamaz ekserji yıkımı diğer tarafta içsel-dışsal ekserji yıkımının arasındaki ayrımlar mühendislerin termodinamik verimsizlikleri geliştirmede (kaçınılabılır ekserji yıkımı) ve sistem komponentleri arasındaki etkileşimleri tanımlamada olanak sağlayacağını göstermişlerdir. Kaçınılabılır içsel ekserji yıkımının ve kaçınılabılır dışsal ekserji yıkımının hesaplanması enerjii dönüştüren sistemlerin termodinamik performanslarını geliştirmek için en iyi rehber olduğunu söylemişlerdir.

Hu (2012) bir güneş paneli çift kademeli absorpsiyonlu soğutma sisteminin ileri ekserji analizini gerçekleştirmiştir. Sistem olarak, bir solar toplayıcı ve iki kademedan oluşan lithium bromide (LiBr) su-absorpsiyonlu soğutucu kullanmıştır. İleri ekserji analizi sonucunda, iki kademeli bir LiBr-su

absorpsiyonlu soğutucunun performans katsayısının 1.1'den 1.38'e yükseltilebileceğini ve kaçınılabilir ekserji yıkımının önlenmesi sayesinde verimliliğinde %25 artış sağlanabileceğini hesaplamıştır.

Morosuk ve ark. (2012) sıvı doğalgaz gazlaştırıcı ve elektrik üreten bir sisteme ileri ekserji tabanlı analizleri uygulamışlardır. LNG tabanlı kojenerasyon sistemine ileri ekserji tabanlı uyguladıkları analizler ileri ekserjetik, ileri eksergoekonomik ve ileri eksergoçevresel analizdir. Termodinamik verimsizlik (ekserji yıkımı), maliyetler ve çevresel etkiler dâhilinde kaçınılabilir ve kaçınılamaz ekserji yıkımıyla incelemiştir. Bu analizlerin yardımıyla sistemin geliştirilebilir termodinamik verimlilik potansiyelinin ne kadar arttırılabileceğini, tüm sistem maliyeti ve tüm sistemin çevresel etkisinin ne kadar azaltılabileceğini ortaya çıkarmışlardır.

Petrakopoulou ve ark. (2012) bir kombine çevrim santraline geleneksel ve ileri ekserji analizini uygulamışlardır. Santralin, gaz türbin sisteminin genişletici bölümü (türbin) ve yüksek basınç buhar türbini dışında kalan komponentlerinin ekserji yıkımlarının çoğunu kaçınılamaz ekserji yıkımı olarak hesaplamışlardır. En yüksek ekserji yıkımının yanma odasında olduğunu belirlemişlerdir. Komponentin toplam ekserji yıkımının yaklaşık %87'si komponentin çalışmasının sonucu olduğunu (içsel ekserji yıkımı) ve toplam ekserji yıkımının %68'inin kaçınılamaz ekserji yıkımı olduğunu belirtmişlerdir. Sistemin komponentler arası etkileşimden kaynaklı ekserji yıkımının (dışsal ekserji yıkımı) çok az olduğunu hesaplamışlardır.

Morosuk ve ark. (2012) bir Voorhees sıkıştırma işlemini kullanarak bir soğutma makinesinin geleneksel termodinamik ve ileri ekserjetik analizini gerçekleştirmişlerdir. Voorhees sıkıştırma işlemini, iki aşamalı buhar-sıkıştırma soğutma makinelerine alternatif bir çözüm olarak sunmuşlar ve analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Termodinamik bakış açısıyla en önemli komponentin 11.46 kW ekserji yıkımıyla kondenser olduğunu, evaporatörün 7.881 kW ekserji yıkımıyla ikinci sırada geldiğini belirtmişlerdir.

Vuckovic ve ark. (2012) gerçel zamanlı veriler ile bir endüstriyel fabrikanın ısıl prosesinin değerlendirmesini ekserji analizi, kaçınılabilir-kaçınılamaz ekserji yıkımı (ileri ekserji) analizi ve eksergoekonomik analiz ile

değerlendirmişlerdir. En yüksek ekserji yıkımının kazanda olduğunu ve oranının toplam ekserji yıkımının %97'sinden fazla olduğunu hesaplamışlardır. İleri ekserji analizi sonucunda kazanın sahip olduğu ekserji yıkımının %92.34'ü kaçınılamaz ekserji yıkımı olduğunu belirtmişlerdir.

Boyano ve ark. (2012) buhar-metan dönüşüm prosesi (SMR) ile hidrojen üretiminin ileri ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir. Sistemin içsel ekserji yıkım miktarına bakıldığında; COMBRET (yakıt olarak metan kullanan yanma odası) 111.75 MW ile birinci sırada, ikinci sırada 30.31 MW ile REFORM (dönüştürücü) gelmektedir. Dışsal ekserji yıkım miktarında da COMBRET 21.95 MW ile en yüksek miktara sahiptir. Böylelikle ekserji yıkımının en fazla olduğu komponent COMBRET tir. Bu komponentin geliştirilebilirlik miktarı ise 34.32 MW'dır (kaçınılabir ekserji yıkım miktarı). Sistemdeki en düşük ekserji yıkım miktarına HT-SHIFT (yüksek sıcaklıkta su-gaz değiştirici reaktör) komponenti (0.70 MW) sahiptir.

Wei ve ark. (2012) yatırım maliyetleri ve kaçınılabir ekserji yıkımı aracılığıyla damıtma sistemlerinin enerji kullanım analizini ve değerlendirmesini gerçekleştirmişlerdir. Kondenser ve kazanın farklı sıcaklıklar için kaçınılabir-kaçınılamaz ekserji yıkımlarını ve yatırım maliyetlerini belirlemişlerdir. Sistemin minimum enerji ihtiyacını ve asgari olabilecek teorik kademe sayısını ekserji yıkımının kaçınılabir ve kaçınılamaz ekserji yıkımı parçalarıyla belirlemişlerdir.

Cassetti ve Colombo (2012) enerji sistemlerinin dışsalılıklarını ve verimliliklerini değerlendirmek için ileri ekserji analizini ve geleneksel metotları karşılaştırmışlardır. Endüstriyel sektörlerin çevresel etkilerini belirlemede ve verimliliklerini geliştirmede yaygın olarak kullanılan farklı metodolojiler ile ileri ekserji analizini değerlendirmişlerdir. Makalede kullanılan metodolojiler, endüstriyel sektör için; Çevresel Etki Değerlendirmesi (EIA), Yaşam Döngüsü ve Değerlendirmesi (LCA), Risk Değerlendirmesi (RA) ve ekserji analizi tabanlı metodolojiler ise; Kümülatif Ekserji Tüketim Analizi (CExC), Eksergoçevresel analiz, Genişletilmiş Ekserji Muhasebesi (EEA)'dir. Endüstriyel süreçleri analiz etmek için kullanılması gereken en uygun metodolojiyi belirlemede kullandıkları yöntem; literatür analizi sonunda topladıkları verilerle belirledikleri metodolojinin gerçekleştirmesi gereken amaçları sıralayarak en uygun olanını

seçmişlerdir. Literatüre göre bir metodoloji on üç amacı gerçekleştirebilmelidir. Analitik Hiyerarşi Süreç adlı yazılımları ile aldıkları sonuçlara göre; Eksergoçevresel analiz ve Genişletilmiş Ekserji Muhasebesi (İleri Ekserji Analizi) dışsallıkları, tüketimleri ve verimlilikleri değerlendirmede en kullanışlı analiz yöntemi çıkmıştır. Yaşam Döngüsü ve Değerlendirmesi metottu ise ticaret sürecinde sayısal analizleri değerlendirmede en iyi yöntem olarak sonuç vermiştir. Ekserji tabanlı analizlerin, literatürde kullanılan diğer analizlere göre daha düzgün ve ayrıntılı sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Wang ve ark. (2012) yakıtı kömür olan bir süperkritik elektrik santralının ileri termodinamik analizini ve değerlendirmesini gerçekleştirmişlerdir. Makalede, sistemi oluşturan başlıca komponentlerin geleneksel ekserji analizi ile sadece termodinamik verimsizliklerinin anlaşılabilceği fakat ileri ekserji analizi ile komponentler arasındaki etkileşimlerinden kaynaklı verimsizlikler ve her bir komponentin geliştirilebilirlik potansiyelinin doğru bir şekilde hesaplanabileceğine yer verilmiştir. Türbindeki toplam ekserji yıkımının neredeyse %90'ının kendi sahip olduğu içsel yıkımdan (endogenous part) kaynaklı olduğu sonucuna varılmıştır. Kazanın, geriye kalan komponentlerle karşılaştırıldığında tersinmezliklerden dolayı oluşan sistemin ekserji yıkımının büyük bir miktarına sahip olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca, kazanın hala en büyük kaçınılabilir ekserji yıkımına sahip olduğu saptanmıştır. Besleme suyu ısıtıcısındaki kaçınılabilir ekserji yıkımının en büyük parçası dışsal kaynaklıdır.

Petrakopoulou ve ark. (2013) bir kimyasal döngü yakımı güç santralının CO₂ yakala prosesini ileri ekserji analizi ile değerlendirmişlerdir. Güç santralının çalışması sürecinde en önemli komponentleri, reaktör ünitesi, genişletici ve ana gaz türbin sisteminin kompresörü olarak belirlemişlerdir. CLC komponentinin en yüksek ekserji yıkımına sahip olduğunu ve bu yıkımın büyük bir bölümünün içsel ekserji yıkımı olduğunu belirtmişlerdir. Kaçınılabilir ekserji yıkım miktarlarına bakıldığında 64.72 MW ile CLC komponentinin en yüksek miktara sahip olduğunu ardından GT1 komponentinin 7.69 MW ile ikinci sırada kaldığını hesaplamışlardır.

Soltani ve ark. (2013) bir biokütle gazlaştırma ünitesiyle entegre edilmiş harici ateşlemeli bir kombine çevrimli güç santralının ileri ekserji analizini

gerçekleştirmişlerdir. Pompa hariç bütün komponentlerin ekserji yıkımının, kaçınılamaz ekserji yıkımı parçasından ve içsel ekserji yıkımı parçasından oluştuğunu hesaplamışlardır. Bu komponentlerde modifikasyon aracılığıyla çok az bir iyileştirme yapılabileceğini öne sürmüşlerdir. Yanma odası için ekserji yıkımının kaçınılabılır-dışsal ekserji yıkımı parçası değeri diğer komponentlerin ilişkilerinden meydana gelen ekserji yıkımı değerlerinden daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Bu yüzden yanma odasında meydana gelen ekserji yıkımının, diğer komponentlerin verimliliklerinin geliştirilebilmesiyle daha etkili bir şekilde azaltılabileceği sonucuna varmışlardır. Yayınlarında, geleneksel ekserji analizi sonucunda öncelikli olarak modifikasyon yapılması gereken komponentleri gazlaştırıcı ünite ile yanma odası olarak bulmuşlardır. İleri ekserji analizi sonucunda elde edilen komponentlerin kaçınılabılır ekserji yıkım parçalarına bakıldığında ise öncelikli modifikasyon yapılması gereken komponentleri; ısı değiştirici, buhar türbini, yanma odası ve kondenser olarak bulmuşlardır. Bunun sonucunda ileri ekserji analizinin daha ayrıntılı ve etkili bir analiz olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Çallak (2013) akışkan yatak yanma sisteminin dinamik ve ileri ekserji analizi gerçekleştirmiştir. İzmir Torbalı'da bulunan bir buhar üretim tesisinden gerçek zamanlı veri olarak gerçekleştirdiği çalışmasında; ekserji analizi sonucu en yüksek ekserji yıkımını 4556.5 kW ile akışkan yataklı yanma sisteminde olduğunu ve 819.4 kW ile ikinci sırada buhar üretim biriminde meydana geldiğini belirtmiştir. Akışkan yataklı yanma sisteminin ekserji verimini %44.2 ve buhar üretim biriminin ekserji verimini %46.2 olarak hesaplamıştır. İleri ekserji analizi sonucunda, akışkan yataklı yanma sisteminin kaçınılabılır ekserji yıkım miktarını 2465.9 kW, buhar üretim biriminin kaçınılabılır ekserji miktarını 234.3 kW olduğunu belirtmiştir.

Gungor ve ark. (2013) deneysel değerlere dayalı bir gaz motoru tahrikli ısı pompasının (GEHP) ekserji yıkımı parçalarını (kaçınılabılır-kaçınılamaz) 45 °C ve hava hızının 1 m/s olması durumunda değerlendirmişlerdir. Sistemi GEHP ve kurutma odası olmak üzere iki bölüme ayırmışlardır. GEHP bölümünü; gaz motoru, kompresör, kondenser, genişleme valfi ve evaporatör olmak üzere ileri ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonucunda, kurutma kanalı

tarafından en yüksek ekserji yıkımının meydana geldiğini hesaplamışlardır. Bu komponentin toplam ekserji yıkımının yaklaşık %64.0-70.8'nin kaçınılabilir ekserji yıkımı olduğunu belirtmişlerdir. Kondensere bakıldığında toplam ekserji yıkımının %96.8-98.7'nin kaçınılabilir olduğunu hesaplamışlardır. Genişleme valfinde ise bu değer %77.6–85.9 olduğunu bulmuşlardır.

Açıkkalp ve ark. (2014) bir fabrikada bulunan dizel-gaz (dual yakıtlı) motor tahrikli bir trijenerasyon sisteminin ileri ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir. Trijenerasyon sisteminin komponentlerini motor, türbin, kompresör, sıkıştırılmış hava soğutucu, ısı geri kazanımlı buhar jeneratörü, yağlama yağı ısıtıcısı, yağlama yağı soğutucusu, düşük sıcaklık soğutucusu, su ısıtıcısı, su soğutucusu, absorpsiyonlu soğutucu ve jeneratör olarak tanımlamışlardır. Sistemin ekserji verimini %35.4 olarak hesaplamışlar ve toplam ekserji yıkımının %65.9 olduğunu belirtmişlerdir. Bütün sistem komponentlerinin birbirleriyle olan etkileşimlerinin çok zayıf olduğunu ve nedeninin komponentlerin sahip oldukları içsel ekserji yıkım oranının dışsal ekserji yıkım oranından çok yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Kaçınılabilir ekserji yıkım oranının, kaçınılamaz ekserji yıkım oranından küçük olduğunu ve böylelikle trijenerasyon sistem sürecinin düşük bir geliştirilebilirlik potansiyeline sahip olduğunu bulmuşlardır. Analiz sonucunda turbo hava kompresörünün geliştirilebilirlik potansiyeli araştırmalarına uygunluğu nedeniyle sistemde ki en önemli komponent olduğunu belirtmişlerdir.

Erbay ve Hepbaslı (2014) gıda kurutmada kullanılan ısı pompası kurutma sisteminin ileri ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir. Pilot ölçekli ısı pompası kurutma sisteminin ileri ekserji analizini 45, 50, 55 °C'de gerçekleştirmişlerdir. Geleneksel ekserji analizi sonucunda en yüksek ekserji yıkımının evaporatörde meydana geldiğini ve sırsıyla genişleme valfi ve ısı geri kazanım ünitesinde olduğunu belirtmişlerdir. İleri ekserji analizi sonucunda, içsel ekserji yıkımının kompresör ve kondenserde çok yüksek olduğunu hesaplamışlardır. Evaporatör ve ısı geri kazanım ünitesinde tüm ekserji yıkımlarının yaklaşık yarısı kaçınılabilir-dışsal ekserji yıkımı olduğunu belirtmişlerdir. Kurutma hava sıcaklığı 45 °C'den 55 °C'ye arttırıldığı zaman sistemin ekserji verimliliğinin %65.94'den %91.95'e artacağını hesaplamışlardır.

Vuckovic ve ark. (2014) mevcut bir sanayi tesisindeki ısı işlemlerinin ileri ekserji analizi ve eksergoekonomik performans değerlendirmesini gerçekleştirmişlerdir. Makalede, endüstriyel enerji temini sağlayan kompleks bir fabrikanın ekserji verimliliğini geliştirme potansiyelini ve kritik komponentlerin performans tanımlamasını ileri ekserji analizi yapılarak araştırılmıştır. Tesis bir kauçuk fabrikasının bir bölümüdür ve tesisin fabrikadaki rolü, üretim tesislerine buhar, basınçlı hava, soğutma suyu ve hem ısıtma hem de sıhhi kullanım için sıcak su sağlamak olduğu belirtilmiştir. Tesisin öncelikle kaçınılabılır-kaçınılamaz ekserji yıkım miktarı her bir komponent için hesaplanmıştır. Daha sonra tesisin kaçınılabılır ekserji miktarının ne kadarının önlenebileceği araştırılmıştır. Makaledeki verileri gerçek zamanlı olarak elde etmişler ve Mühendislik Denklem Çözücüsü (Engineering Equation Solver, EES) kullanarak hesaplamışlardır. En yüksek ekserji yıkımının buhar kazanında meydana geldiğini ve tüm sistemin toplam ekserji yıkımının %80'den fazlasının kazandan kaynaklı olduğunu literatüre sunmuşlardır. Buhar kazanının sahip olduğu toplam ekserji yıkımının %83.53'ünün kaçınılamaz ekserji yıkımı olduğunu hesaplamışlardır. Tesis genel ekserji verimliliğinin, kaçınılamaz çalışma koşullarının sağlanmasına yol açacak önlemlerin uygulanmasından sonra %7.44 artmış olabileceğini tahmin edilmiştir.

Erbay ve Hepbasli (2014) gıda kurutmada kullanılan bir toprak kaynaklı ısı pompasının performans değerlendirmesini geleneksel ve ileri ekserji analizi ile gerçekleştirmişlerdir. Kondenserin tasarımından dolayı en önemli sistem komponenti olduğunu belirtmişlerdir. Kompresördeki verimsizliklerin yapısal geliştirmeler aracılığıyla iyileştirilebileceğini öne sürmüşlerdir. Kondenser ve evaporatörün etkileşimlerinin ve ekipman dizaynlarının sahip oldukları verimliliğe etkilerinin önemli olduğunu göstermişlerdir. Genişleme valfinin kaçınılabılır ekserji yıkımını (geliştirilebilirlik potansiyelini) %4.4 olarak hesaplamışlardır. Kondenserin kaçınılabılır ekserji yıkım oranını %90 ile en yüksek geliştirilebilirlik potansiyeline sahip olduğunu hesaplamışlardır.

Açıkkalp ve ark. (2014) doğal gaz kullanan ve elektrik üreten bir işletmenin ileri ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir. Sistemin ekserji verimliliğini %40.2 olarak belirlemişlerdir. Sistemin toplam ekserji yıkım oranını ise 78.242 MW olarak hesaplamışlardır. İşletmenin sahip olduğu komponentlerin

ekserji yıkım oranlarını dört (içsel, dışsal, kaçınılabilir, kaçınılmaz) parçada incelemiştir. Analiz sonucunda yanma odasında, yüksek basınç buhar türbininde ve kondenserde yüksek geliştirilebilirlik potansiyeli olduğunu hesaplamışlardır. Komponentler arası etkileşimin zayıf olduğunu belirtmişler ve bunun nedeninin içsel ekserji yıkım oranı (%70) olduğunu öne sürmüşlerdir. Sistemin geliştirilebilirlik potansiyelini ise %38 bulmuşlardır.

1.3. Tezin Amaç ve Kapsamı

Bu tezde Jet Cat USA firmasının Jet Cat P-60 ürün adına sahip devir aralığı 50 000 – 165 000 rpm, egzoz gaz çıkış sıcaklığı 580 – 690 °C, yakıt türü kerosen olan jet motoru sistem komponentlerinin tersinmezlik miktarlarının belirlenmesinde kullanılan ekserji analiz yöntemi ile birlikte ekserji analizi sonucunda tespit edilmiş tersinmezlikler miktarının komponentler arasındaki ilişkileri inceleyen ileri ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca motorun sürdürülebilirlik indikatörleri tez kapsamında sunulmuştur.

Çalışma kapsamında; Turbojet motorun çevrim verileri elde edilmiş, veriler sürdürülebilirlik, ekserji ve ileri ekserji analizi yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Tezin ikinci bölümünde Turbojet motor verilerinin değerlendirme sürecinde kullanılan ekserji ve ileri ekserji analiz yöntemleri anlatılmıştır. Üçüncü bölümde Turbojet motorun verileri ve kabulleri grafikler ve tablolar aracılığıyla gösterilmiş ayrıca değerlendirme sürecindeki matematiksel model sunulmuştur. Tezin son bölümü olan dördüncü bölümde ise analizlerin sonuçları ve gelecekte yapılması planlanan çalışmaların özeti sunulmuştur.

Proje numarası “1407F357” olan ve “Mini Turbojet/Turboprop Motorun İleri Ekserji Analizi” başlıklı bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir.

2. TERMODİNAMİK ANALİZ

Bu bölüm termodinamik analizin parçaları olan enerji, ekserji ve ileri ekserji analizlerinin temelini sunar. Her bir analizin arasındaki farklılıkları karşılaştırarak, avantajlarıyla birlikte önemleri sunulmuştur.

2.1. Enerji Analizi

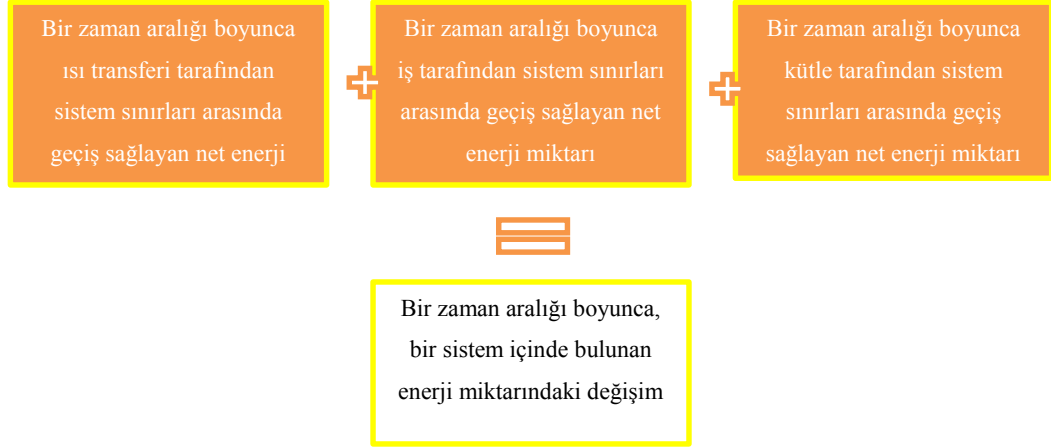
Dincer ve Rosen (2007) enerji analizini, maddelerin fiziksel yada kimyasal proses içeren herhangi bir işlemde kullanılan enerji miktarını / enerji transferini ve/veya enerji dönüşümünü değerlendirmek için ortaya çıkmış geleneksel bir yöntem olarak tanımlar. Enerji analizi termodinamiğin birinci yasasını temel alır (Cengel ve Boles 2008).

Termodinamiğin birinci yasası, enerjinin yoktan var edilemeyeceğini ve vardan da yok edilemeyeceğini gösterir. Enerjinin sadece bir formdan başka bir forma dönüşebileceğini açıklar. Enerjinin niceliği ile ilişkili olan termodinamiğin birinci yasası, toplam enerji miktarının değişmeyeceğini açıklar. Enerji, belirlenen sistem sınırlarından ısı, iş ve/veya kütle akışı olarak geçiş sağlar. Enerjinin bu hareketi sistem sınırındaki geçişine göre tanımlanmaktadır. Eğer sistem sınırı ile çevresi arasındaki sıcaklık farkından dolayı enerji geçişi sağlanıyorsa ısı enerji geçişi, bir sıcaklık farkı yoksa ve enerji geçişi mevcutsa iş olarak tanımlanır. Kütle akışı ise çevreden-sisteme veya sistemden-çevreye kütle geçişi ile enerji geçişi mekanizması sağlamaktadır (Cengel ve Boles 2008).

Enerji; kinetik, potansiyel, kimyasal, ısı, manyetik, elektrik, nükleer gibi değişik formlarda olabilir. Bir sistem için bu enerji formlarının toplamı, sistemin toplam enerjisini oluşturur. Termodinamiğin birinci yasası olan enerjinin korunumu yasası bir sistemin toplam enerji formlarıyla ilişkili olarak Cengel ve Boles tarafından (2008) şöyle tanımlanmıştır;

“Enerjinin korunumu ilkesi bir hal değişimi sırasında kapalı bir sistemin toplam enerjisindeki net değişim (artma veya azalma) sisteme giren toplam enerji ile sistemden çıkan toplam enerjinin farkına eşit olduğunu ifade eder.”

Termodinamiğin birinci yasası Şekil 2.1’deki gibi ifade edilir:



Şekil 2.1. Termodinamiğin birinci yasası enerjinin korunumu (Moran ve ark., 2011).

2.1.1. Enerji terimleri

Bir sistem için enerji, iç (duyulur, gizli, kimyasal ve nükleer), kinetik, potansiyel, elektrik ve manyetik gibi farklı biçimlerde bulunabilir. Elektrik, manyetik etkiler göz ardı edildiğinde, (2.1) hal değişimi sırasında sistemin toplam enerjisindeki değişim iç, kinetik ve potansiyel enerjileri değişiminin toplamıdır.

$$\Delta E_{sistem} = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \quad (2.1)$$

“ ΔU ” iç enerjideki değişim, “ ΔKE ” kinetik enerjideki değişim, “ ΔPE ” potansiyel enerjideki değişimdir. Denklem (2.1)’deki toplam enerji değişimi formülünün (sistemdeki enerji değişimi) açık bir yazılışı ise;

$$\Delta E_{sistem} = E_2 - E_1 = (U_2 - U_1) + (KE_2 - KE_1) + (PE_2 - PE_1) \quad (2.2)$$

dır. Denklem (2.2) birim kütle için yazılırsa (2.3) elde edilir.

$$\Delta e_{sistem} = e_2 - e_1 = (u_2 - u_1) + (ke_2 - ke_1) + (pe_2 - pe_1) \quad (2.3)$$

dir. Sistemin referans ortama göre hareketinden dolayı sahip olduğu enerjiye kinetik enerji (KE) denir ve (2.4)'de gösterilmiştir.

$$KE = \frac{1}{2}m(V^2) \quad (2.4)$$

Denklem (2.4) birim kütle için ifade edildiğinde (2.5) olarak gösterilir.

$$ke = \frac{1}{2}(V^2) \quad (2.5)$$

Sistemin referans ortama göre yerçekimine ve enerji akımının yüksekliğine bağlı olarak sahip olduğu enerjiye potansiyel enerji (PE) denir. Ağırlık merkezi ile referans noktası arasındaki yüksekliğin “z” olduğu ve yer çekimi ivmesinin “g” olduğu bir yerdeki sistemin potansiyel enerjisi (PE) (2.6)'daki gibidir.

$$PE = mgz \quad (2.6)$$

Birim kütle ile ifade edildiğinde (2.7) elde edilir.

$$pe = gz \quad (2.7)$$

Denklem (2.8) iç enerjideki değişimi ifade eder.

$$\Delta U = m(u_2 - u_1) \quad (2.8)$$

Denklem (2.9) kinetik enerjideki değişimi, (2.10) potansiyel enerjideki değişimi ifade eder.

$$\Delta KE = \frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) \quad (2.9)$$

$$\Delta PE = mg(z_2 - z_1) \quad (2.10)$$

Şekil 2.1’de görüldüğü üzere elektrik, manyetik alan, yüzey gerilimi ve nükleer reaksiyonun bulunmadığı sistemlerde enerji geçişinin formları ısı, iş ve kütle biçimlerinde olmaktadır. Enerjinin net geçiş miktarı giren ve çıkan enerji geçişi miktarlarının farkına eşittir. Enerjinin korunumu (2.11)’de gösterilmiştir.

$$\dot{E}_g - \dot{E}_ç = (\dot{Q}_g - \dot{Q}_ç) + (\dot{W}_g - \dot{W}_ç) + (\dot{E}_{küttele,g} - \dot{E}_{küttele,ç}) = \Delta \dot{E}_{sistem} \quad (2.11)$$

Denklem (2.11)’de “g” ve “ç” indisleri sırası ile sisteme giren ve çıkan değişkenleri göstermektedir. “ $(\dot{Q}_g - \dot{Q}_ç)$ ” net ısı enerji geçişini, “ $(\dot{W}_g - \dot{W}_ç)$ ” net iş geçişini ve “ $(\dot{E}_{küttele,g} - \dot{E}_{küttele,ç})$ ” net kütle ile enerji aktarımını göstermektedir. “ ΔE_{sistem} ” sistemdeki enerji miktarındaki değişimdir. Adyabatik sistemler için ısı enerji geçişi “ $(\dot{Q}_g - \dot{Q}_ç)$ ” sıfır olur. Herhangi bir şekilde iş etkileşiminde bulunmayan sistemler için “ $(\dot{W}_g - \dot{W}_ç)$ ” sıfır olur. Eğer sisteme, sistem sınırlarından herhangi bir kütle geçişi söz konusu değilse “ $(\dot{E}_{küttele,g} - \dot{E}_{küttele,ç})$ ” sıfır olur (Bejan ve ark. 1996; Cengel ve Boles 2008).

Sürekli akışlı sürekli açık bir sistemin kontrol hacminin enerji korunum ifadesi (2.12)’de gösterilmiştir.

$$\dot{E}_g - \dot{E}_ç = \Delta \dot{E}_{sistem} = 0 \quad (2.12)$$

Denklem (2.12)’nin sürekli akışlı sürekli açık bir sistem için çevreden kontrol hacmine ve/veya kontrol hacminden çevreye olan enerji akışının açık şekilde yazılışı (2.13)’de verilmiştir.

$$\begin{aligned} & \dot{Q}_g + \dot{W}_g + \sum \dot{m}_g \left[h_g + \frac{V_g^2}{2} + gz_g \right] \\ & = \dot{Q}_ç + \dot{W}_ç + \sum \dot{m}_ç \left[h_ç + \frac{V_ç^2}{2} + gz_ç \right] \end{aligned} \quad (2.13)$$

Denklem (2.13)'e göre sürekli akışlı sürekli açık bir sistem için termodinamiğin birinci yasasını diğer bir adıyla enerjinin korunum denklemini net iş ve net ısı enerjisi şeklinde yazılmış hali (2.14)'dür.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_c \left[h_c + \frac{V_c^2}{2} + gz_c \right] - \sum \dot{m}_g \left[h_g + \frac{V_g^2}{2} + gz_g \right] \quad (2.14)$$

2.2. Ekserji Analizi

Ekserji terimi ilk kez 1824 yılında Carnot tarafından kullanılmıştır. Ekserji analizinin formülasyon kökeni ise ilk olarak Gouy ve Stodola tarafından literatüre sunulmuştur. Gouy ve Stodola bir sistemin maksimum potansiyelde iş gerçekleştirebilmesini, o sistemin iç enerjisinin ve çevre şartlarının (basınç, sıcaklık ve çevrenin kompozisyonu) bir fonksiyonu olarak tanımlamışlardır ve formülasyonla göstermişlerdir. Bu konsept yirminci yüzyıl boyunca birçok yazar tarafından geliştirilmiştir. Ekserjinin gelişimiyle ilgili yazarlar Çizelge 2.1'de görülmektedir (Junior 2012).

Çizelge 2.1. Ekserjinin gelişimi (Junior 2012)

Yıl	Yazar	Tanımlama
1824	Carnot	“Puissance motrice du feu” “Ateş motive güç”
1872	Thomson (Kelvin)	“Motivity” “Hareket Kuvveti”
1873	Gibbs	“Available energy of the body and medium” “Araç ve sistemde mevcut enerji”
1881	Gouy	“Energie utilisable” “Enerji Kullanımı”
1898	Stodola	“Freie technische energie” “Serbest Enerji”

Çizelge 2.1. (Devam) Ekserjinin gelişimi (Junior 2012)

Yıl	Yazar	Tanımlama
1925	Debaufre	“Available energy” “Kullanılabilir Enerji”
1935	Bonsjakovic	“Technische arbeitsfähigkeit” “İş Yapabilme Yeteneği”
1944	Thring	“Virtue of energy” “Enerjinin Meziyeti”
1953	Schmidt	“Technische maximale arbeit” “Maksimum Güç”
1955	Gibert	“Energie non dégradée” “Yıkılmayan/Bozulmayan Enerji”
1956	Grigull	“Ekthalpie” “Ekthalpi”
1956	Rant	“Exergie” “Ekserji”

Karakoç’a (2008) göre ekserji, bazı bilim insanları tarafından şu şekillerde tanımlanmaktadır;

- ✚ Belirli bir haldeki sistemin yapabileceği en çok iş (Cengel ve Boles 2008).
- ✚ Ekserji, tersinmez sistemler veya süreçlerde, entropi üretiminin neden olduğu kullanılabilir enerji kaybını belirleyen bir ifadedir (Hepbaşı 2008).
- ✚ Ekserji gazlarda, sıvılarda ya da bir kütlede, herhangi bir referans ortama göre var olan dengesizliğin neden olduğu iş potansiyelidir (Ahern 1980).
- ✚ Bir termodinamik sistemin ekserjisi, sistemin sadece çevresiyle etkileşimi durumunda, sistemin çevresiyle tümüyle termodinamik denge haline gelirken, elde edilebilecek maksimum teorik yararlı iş olarak tanımlanır (Tsatsaronis 2007).

- ✚ Bir enerji şeklinin ya da maddenin ekserjisi, onun çevre üzerinde değişim yapabilme potansiyeli, kalitesi ya da kullanılabilirliğinin ölçüsüdür (Dinçer 2002).
- ✚ Ekserji, sistemin çevresiyle etkileşimi sonucu, ısı transferinin sadece çevreyle olması durumunda elde edilebilecek maksimum teorik yararlı iştir (Bejan 1996).
- ✚ Ekserji, herhangi bir maddenin, çevresiyle tersinir anlamda termodinamik denge haline gelmesi esnasında elde edilebilecek maksimum iştir (Szargut ve ark. 1988).
- ✚ Ekserji, enerjinin tamamen diğer enerji şekillerine dönüşebilen kısmıdır (Rant 1964).

Enerji ve ekserji arasındaki benzerlikler ve farklılıklar birçok bilim insanı tarafından tartışılmıştır. Dinçer (2002) tarafından enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması (Dinçer 2002)

Enerji	Ekserji
Çevresel değişkenlere değil, sadece madde veya enerji akış değişkenlerine bağlıdır.	Her ikisine de bağlıdır.
Sıfırdan farklıdır.	Ölü durumda sıfırdır.
Prosesde korunur. Yoktan var yada vardan yok olmaz.	Tersinir proseslerde korunur. Tersinmez proseslerde ise tüketilir.
Miktarın bir ölçüsüdür.	Entropi nedeniyle kalitenin ölçüsüdür.

Literatürde birçok yazar tarafından ekserji ve entropi arasındaki farklılıklar tartışılmıştır. Ekserji ve entropi arasındaki farklılıkları Kay (2002) Çizelge 2.3’de şöyle sıralamıştır;

Çizelge 2.3. Entropi ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması (Kay 2002)

Entropi	Ekserji
Enerjinin ne kadar tersinmezlik ve belirsizlik ürettiğini açıklar.	Enerjiyle neler yapılabildiğini açıklar.
Enerjinin ne olduğu hakkında bilgi verir.	Enerjiyle bir şey yapmanın potansiyeli hakkındadır.
Bir prosesteki tersinmezliği açıklar.	Durumun, dengenin ne kadar dışında olduğunu, bu durumla yararlı bir şey yapıp yapılamayacağını belirtir.
Entropi artışı, enerji dönüşümü sırasında ortaya çıkan belirsizliktir.	Ekserji, enerji dönüşümü sırasında, elde edilen enerji hakkında bilgi verir.

Karşılaştırmaya göre ekserji ve entropi zıt değildir. Ekserji, enerji dönüşümü sırasında, kazanılan enerji hakkında elde edilen yararlı bilgidir. Entropi artışı ise, enerji dönüşümü sırasında, enerji hakkında ortaya konulan belirsizliktir.

Ekserji analizi ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılır (Bejan ve ark. 1996; Cengel ve Boles 2008; Moran ve ark. 2011);

- ✚ Bir proseste gerçekleşen akışların yönü tayin edilebilir.
- ✚ Birinci yasa enerjinin miktarı ile ilgilenirken enerjinin kalitesi hakkında bize bilgi vermez. Fakat ikinci yasa bize enerjinin bir kalitesinin olduğunu gösterir ve bu kaliteyi matematiksel olarak sunar. Kalitedeki azalmayı gözler önüne serer.

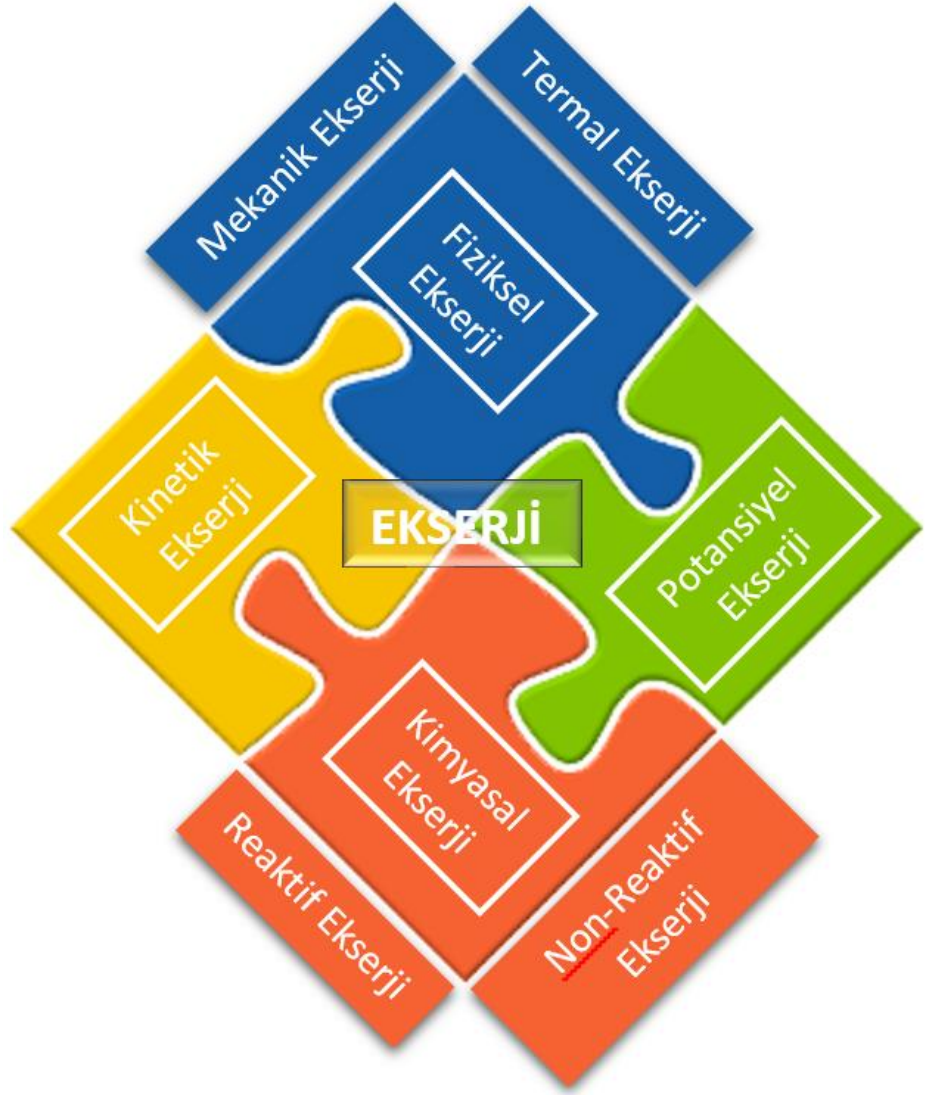
- ✚ Bir sistemin sahip olduğu gerçek verimin ideal verime ne kadar yaklaştığını ve yaklaşamayan b6l6m6n nedeni olan termodinamik kayıpları ve/veya yıkımları nedenleri ve yerleriyle birlikte sunar.
- ✚ Bir sistemin dizaynında, optimizasyonunda ve geliştirilmesinde kullanılmaktadır.

Bir sistem için n6kleer, manyetik, elektrik ve y6zey gerilme etkileri g6z ardı edildiğinde toplam ekserjisi fiziksel, kimyasal, kinetik ve potansiyel ekserjilerden oluşur. Sırasıyla;

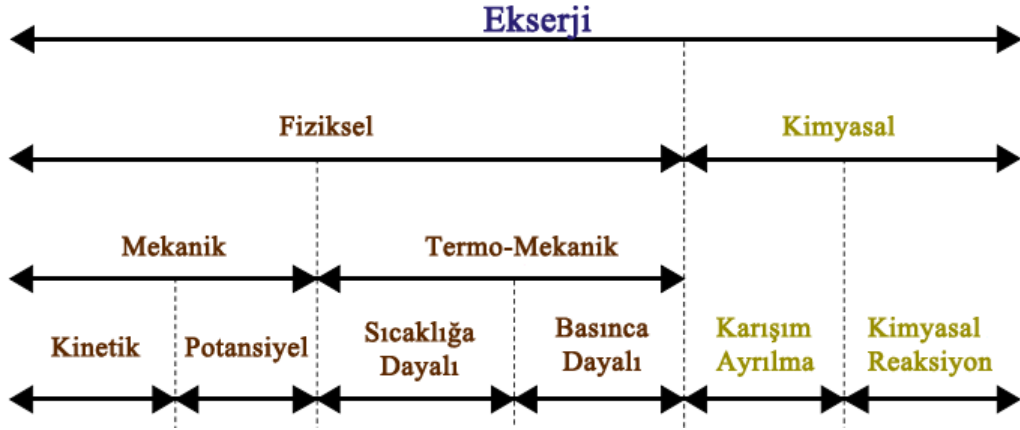
- ✚ fiziksel ekserji (sistemin sıcaklık ve basıncının çevrenin sıcaklık ve basıncından sapmasından dolayı)
- ✚ kimyasal ekserji (evrenin sahip olduğu kimyasal bileşimden, sistemin sahip olduğu kimyasal bileşimin sapmasından dolayı)
- ✚ kinetik ekserji (evreye g6receli olarak sistem hızının artmasından kaynaklı)
- ✚ potansiyel ekserji (evreye g6receli olarak sistem y6ksekliğinin artmasından kaynaklı)

olarak açıklanmaktadır (Tsatsaronis 2007).

Fiziksel ekserji iki parçadan oluşmaktadır. Sistemin basıncıyla ilişkili olan mekanik ekserji ve sistemin sıcaklığı ile ilişkili olan termal ekserji. Bir sistemin kimyasal ekserjisi ise reaktif ekserji ve reaktif olmayan ekserji olmak 6zere ikiye ayrılmaktadır. Reaktif ekserji kimyasal reaksiyonlarla ilişkili hesapları, reaktif olmayan ekserji ise genişleme, sıkıştırma, karışım ve ayırma gibi reaktif olmayan s6relerdeki hesaplarla ilişkilidir (şekil 2.2). Gundersen (2011) ise ekserjiyi şekil 2.3'deki gibi sınıflandırmıştır. Tsatsaronis (2007)'den farklı olarak 6ncelikle ekserjiyi fiziksel ve kimyasal ekserji olmak 6zere ikiye ayırmıştır. Daha sonra fiziksel ekserjiyi mekanik ve termo-mekanik ekserji olmak 6zere ikiye ayırmış ve mekanik ekserjiyi kinetik ve potansiyel ekserji olarak g6stermiştir.



Şekil 2.2. Ekserji bileşenleri şematik gösterim (Tsatsaronis tanımı)



Şekil 2.3. Ekserji bileşenleri şematik gösterim (Gundersen tanımı).

2.2.1. Ekserji bileşenleri

2.2.1.1. Kinetik ekserji

Kinetik enerji, mekanik enerjinin bir türüdür. Bu nedenle faydalı iş tamamen dönüştürülebilir. Bir sistemin kinetik enerjisinin iş potansiyeli veya ekserjisi, çevre sıcaklığı ve basıncından bağımsız olarak kinetik enerjinin miktarına eşittir (Cengel ve Boles 2008). Kinetik enerjinin ekserjisi (2.15)'de gösterilmiştir.

$$\dot{E}x_{kin} = \frac{1}{2} \dot{m} (V^2) \quad (2.15)$$

Burada; \dot{m} ($\frac{kg}{s}$) akışkanın kütleli debisi, V ($\frac{m}{s}$) sistemin bulunduğu çevreye göre izafi hızıdır. Denklem (2.15)'de birim kütle ile ifade edildiğinde (2.16) ile gösterilir

$$ex_{kin} = \frac{1}{2} (V^2) \quad (2.16)$$

2.2.1.2.Potansiyel ekserji

Potansiyel enerjide mekanik enerjinin bir türüdür. Dolayısıyla tamamen işe çevrilebilir. Böylece bir sistemin potansiyel enerjisinin iş potansiyeli veya ekserjisi, çevrenin sıcaklığı ve basıncı ne olursa olsun potansiyel enerjisinin kendisine eşittir (Cengel ve Boles 2008). Potansiyel enerjinin ekserjisi (2.17)'de gösterilmiştir.

$$\dot{E}x_{pot} = \dot{m}gz \quad (2.17)$$

Burada; g yer çekimi ivmesi, z sistemin bulunduğu ortamdaki referans düzlemine göre izafi yüksekliğidir. Denklem (2.18) potansiyel ekserjinin birim kütle ile ifadesidir.

$$ex_{pot} = gz \quad (2.18)$$

2.2.1.3.Fiziksel ekserji

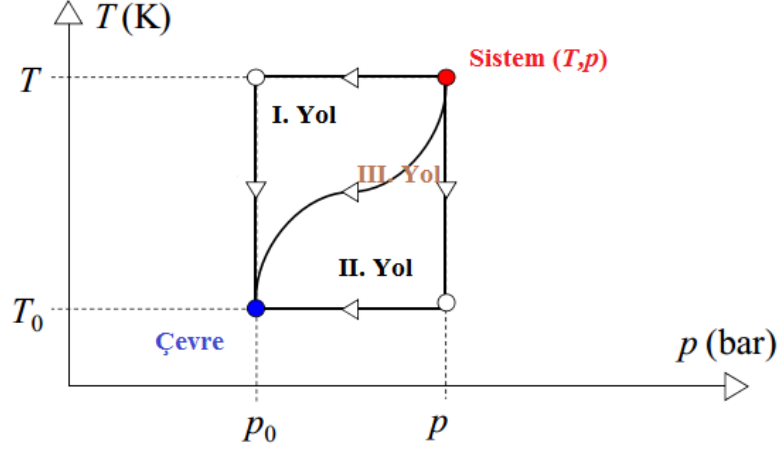
Fiziksel ekserji; bir maddenin başlangıç sıcaklığı T ve basıncından P tersinir süreçler boyunca çevre sıcaklığı T_0 ve basıncına P_0 getirilmesi durumunda elde edilen maksimum iş miktarı olarak tanımlanır (Cornelissen 1997) ve (2.19) ile hesaplanır.

$$\dot{E}x_{ph} = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (2.19)$$

Burada h entalpiyi, s entropiyi simgeler. Gundersen (2011) tanımından yola çıkarak fiziksel ekserjinin sıcaklığa dayalı olan (**termo-mekanik**) kısmı (2.20) ve fiziksel ekserjinin basınca dayalı olan (**termo-mekanik**) bölümü ise (2.21)'de gösterilmiştir.

$$\dot{E}x_{ph}^T = \dot{m}[(h\langle T, p \rangle - h\langle T_0, p \rangle) - T_0(s\langle T, p \rangle - s\langle T_0, p \rangle)] \quad (2.20)$$

$$\dot{E}x_{ph}^p = \dot{m}[(h(T_0, p) - h(T_0, p_0)) - T_0(s(T_0, p) - s(T_0, p_0))] \quad (2.21)$$



Şekil 2.4. Fiziksel ekserji hesap yolları (Gundersen tanımı)

Bu ayırım termo-mekanik ekserjiyi dolayısıyla fiziksel ekserjiyi hesaplarken I. yol ile II. yolun farklılığını ortaya koyacaktır (Şekil 2.4). Gundersen'e (2011) göre ekserji literatüründeki fikir birliği II. yol ile fiziksel ekserjinin hesaplandığıdır. Yani öncelikle sabit basınçta sıcaklığın T 'den T_0 'a düştüğüdür. Bir diğer yol ise sıcaklık ve basıncın aynı anda düştüğü III. yoldur.

İdeal gazlar için, entalpi sadece sıcaklığın, entropi ise hem sıcaklığın hem basıncın fonksiyonudur. Denklem (2.22) ideal gazlar için entalpinin sıcaklık ile olan ilişkisini ve denklem (2.23) ideal gazlar için entropinin hem sıcaklık hem de basınç ile olan ilişkisini göstermektedir.

$$dh = c_p(T) dT \quad (2.22)$$

$$ds = \frac{dh}{T} - \frac{vdp}{T} \quad (2.23)$$

$$pv = R_g T \quad (2.24)$$

Denklem (2.24)'de p basınç, v özgül hacim, R_g gaza özel sabit ve T sıcaklıktır. İdeal gaz yasası göz önünde bulundurularak (denklem 2.24) denklem (2.23)'de (2.22) yerine konur ve integrali alınırsa entropi değişimi;

$$s - s_0 = c_{p,ort} \ln \frac{T}{T_0} - R_g \ln \frac{p}{p_0} \left(\frac{kJ}{kg.K} \right) \quad (2.25)$$

elde edilir. Bu yaklaşım sabit özgül ısılar yaklaşık çözümdür. Birim mol için yazılırsa (2.26) elde edilir.

$$\bar{s} - \bar{s}_0 = \bar{c}_{p,ort} \ln \frac{T}{T_0} - R_u \ln \frac{p}{p_0} \left(\frac{kJ}{kmol.K} \right) \quad (2.26)$$

Burada R_u evrensel gaz sabitidir. İdeal gazlar için sabit özgül ısılar yaklaşımıyla elde edilen entropi değişimi (2.25), sıcaklığın fonksiyonu olan entalpinin denklemi (2.22) ve fiziksel ekserji denklemi (2.19) birleştirilirse;

$$\dot{E}x_{ph} = \dot{m} \left[(c_{p,ort(T)} T - c_{p,ort(T)} T_0) - T_0 \left(c_{p,ort} \ln \frac{T}{T_0} - R_g \ln \frac{p}{p_0} \right) \right] \quad (2.27)$$

$$\dot{E}x_{ph} = \dot{m} \left[c_{p,ort(T)} \left[T - T_0 - T_0 \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] + R_g T_0 \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) \right] \quad (2.28)$$

$$\dot{E}x_{ph} = \dot{m} \left[c_{p,ort(T)} T_0 \left[\frac{T}{T_0} - 1 - \ln \frac{T}{T_0} \right] + R_g T_0 \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) \right] \quad (2.29)$$

elde edilir. Denklem (2.27), (2.28) ve (2.29) literatürde sabit özgül ısı yaklaşımıyla ideal gazlar için fiziksel ekserjinin hesabında kullanılan denklemler ve varyasyonlarıdır. Literatürdeki birçok makale ve tezlerde hava ve yanma ürünlerinin ideal gaz yasasına uyduğu kabul edilerek fiziksel ekserjileri (2.27), (2.28) veya (2.29)'daki formülasyon kullanılarak hesaplanmaktadır.

Bu tezde ise hava ve yanma ürünlerinin fiziksel ekserjileri hesaplanırken özgül ısılarının sıcaklıkla değişmesi (değişken özgül ısılar) göz önüne alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Tezin 3. Bölümünde ayrıntılı şekilde anlatılmıştır.

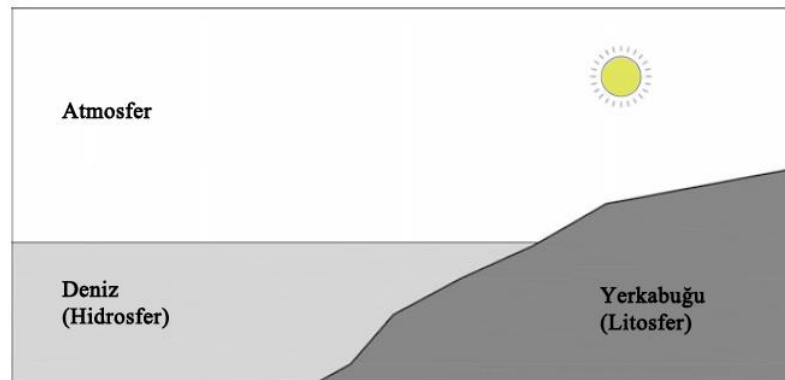
2.2.1.4. Kimyasal ekserji

Kimyasal ekserji, göz önünde bulundurulmuş maddenin sabit sıcaklık ve basınçta çevre ile kimyasal olarak dengeye gelmesi halinde elde edilebilir iştir (Rivero ve Garfias 2006).

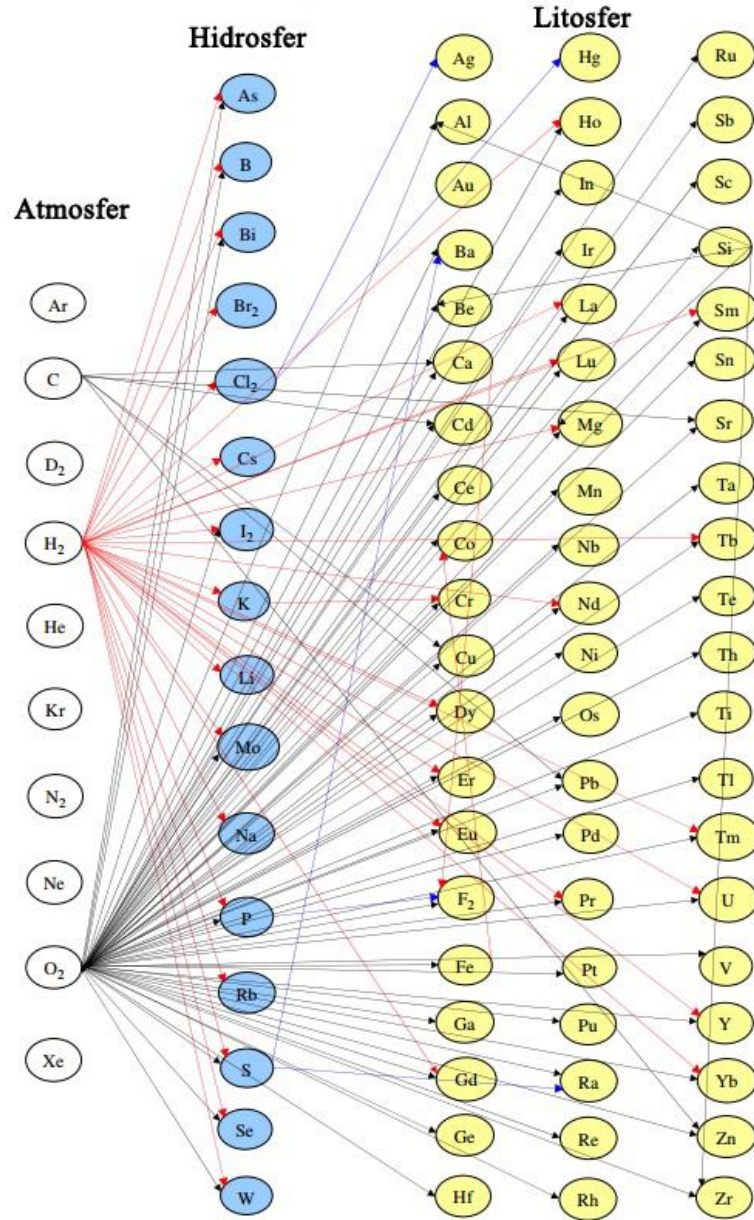
Maddelerin kimyasal ekserjileri hesaplanırken bazı maddelerin özellikleri referans alınmıştır. Referans alınan maddeler üç başlık altında toplanmıştır (Şekil 2.5). Bunlar;

- ✚ Atmosferdeki gazlar,
- ✚ Litosferdeki katı maddeler,
- ✚ Hidrosferdeki iyonik ve iyonik olmayan

maddelerdir (Szargut ve ark. 1988). Szargut ve arkadaşları (1988) tarafından önerilen standart kimyasal ekserji hesabı, standart bir çevre modeli gerektirir. Bu modele göre çevre şartları $T_0 = 298.15 K$ ve $p_0 = 101.325 kPa$ 'dır.



Şekil 2.5. Szargut ve arkadaşları (1988) tarafından önerilen çevre bileşenleri



Şekil 2.6. Elementlerin standart kimyasal ekserjilerinin hesaplanmasındaki rota (Rivero ve Garfias 2006)

Rivero ve Garfias, (2006), Szargut ve arkadaşlarının (1988) oluşturmuş oldukları atmosfer, hidrosfer ve litosfer referans maddelerine göre standart kimyasal ekserjilerinin hesaplanmasındaki rotayı Şekil 2.6'daki gibi göstermiştir.

Referans çevre basıncının değişkenliği, maddelerin kimyasal ekserjilerinin farklılık göstermesine sebebiyet vermektedir. Literatürde Model I ve Model II olarak kabul edilen iki farklı referans çevre basıncına göre maddelerin

kimyasal ekserjileri tablolaştırılmıştır. Model I, Ahrendts'in (1980) $p_0 = 1.019 \text{ atm}$ 'de maddelerin kimyasal ekserjilerini tabloştırdığı yaklaşımdır. Model II ise Szargut ve arkadaşları (1988) tarafından çevre basıncının 1 atm olarak alındığı yaklaşımdır. Bazı maddelerin standart molar kimyasal ekserjileri $\bar{e}_{ch} \left(\frac{kJ}{kmol} \right)$, Çizelge 2.4'de Model I ve Model II olarak verilmiştir.

Çizelge 2.4. $T_0 = 298.15 \text{ K}$ ve p_0 'da bazı maddelerin standart molar kimyasal ekserjileri $\bar{e}_{ch} \text{ (kJ/kmol)}$

Madde	Kimyasal Formülü	Model I (Ahrendts, 1980)	Model II (Szargut ve ark., 1988)
Nitrojen	$\text{N}_{2(g)}$	640	720
Oksijen	$\text{O}_{2(g)}$	3950	3970
Karbondioksit	$\text{CO}_{2(g)}$	14175	19870
Metanol (gaz)	$\text{CH}_3\text{OH}_{(g)}$	715070	722300
Metanol (sıvı)	$\text{CH}_3\text{OH}_{(s)}$	710745	718000
Etanol (gaz)	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_{(g)}$	1348330	1363900
Etanol (sıvı)	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_{(s)}$	1342085	1357700

Moran ve arkadaşlarına göre (2011) en yaygın olarak kullanılan yaklaşım Model II'dir (Çizelge 2.4).

Bir gaz karışımının kimyasal ekserjisi (2.30)'daki gibi hesaplanır.

$$\bar{e}_{ch} = \sum_{i=1}^j y_i \bar{e}_{ch,i} + \bar{R}_u T_0 \sum_{i=1}^j y_i \ln y_i \left(\frac{kJ}{kmol} \right) \quad (2.30)$$

Denklem (2.30)'daki y_i toplam gaz fazı içerisindeki i 'inci gazın mol oranını, $\bar{e}_{ch,i}$ i 'inci gazın standart molar kimyasal ekserjisini, \bar{R}_u evrensel gaz sabitini, T_0 çevre sıcaklığını ifade eder. Bu denklem bir gaz türbinli motor için kompresöre giren havanın ve yanma odasından çıkan yanma ürünlerinin kimyasal ekserjilerinin hesabında kullanılmaktadır.

Hidrokarbon yakıtların kimyasal ekserjileri yakıtın fazına göre değişkenlik göstermektedir. Çizelge 2.5’de karbon, oksijen, hidrojen, kükürt ve azot içeren yakıtların kimyasal ekserjilerinin hesaplanması için bağıntılar verilmiştir. Bu bağıntılardaki H/C (hidrojen/karbon), O/C (oksijen/karbon), S/C (kükürt/karbon) ve N/C (azot/karbon) terimleri atomik oranları tanımlamaktadır.

Çizelge 2.5’de hidrokarbon yakıtların fazlarına göre yaklaşık olarak molar kimyasal ekserji formülleri verilmiştir. C_aH_b veya $C_aH_bO_c$ kimyasal formüllerine sahip hidrokarbon yakıtların molar kimyasal ekserjilerinin tam çözümü için (2.31) veya (2.32) kullanılmalıdır (Moran ve ark. 2011).

$C_aH_bO_c$ için;

$$\begin{aligned} \bar{e}x_{ch} = & \left[\bar{h}_F + \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) \bar{h}_{O_2} - a\bar{h}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{h}_{H_2O} \right] \\ & - T_0 \left[\bar{s}_F + \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) \bar{s}_{O_2} - a\bar{s}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{s}_{H_2O} \right] \end{aligned} \quad (2.31)$$

C_aH_b için;

$$\begin{aligned} \bar{e}x_{ch} = & \left[\bar{h}_F + \left(a + \frac{b}{4} \right) \bar{h}_{O_2} - a\bar{h}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{h}_{H_2O} \right] \\ & - T_0 \left[\bar{s}_F + \left(a + \frac{b}{4} \right) \bar{s}_{O_2} - a\bar{s}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{s}_{H_2O} \right] \end{aligned} \quad (2.32)$$

dur. F alt indisi yakıtı simgelemektedir. O_2 , CO_2 ve H_2O için özgül entropi denklemini (2.33), (2.31) ve (2.32)’de yerine koyarsak;

Çizelge 2.5. Hidrokarbon yakıtların $\bar{e}x_{ch}$ (kJ/kmol) molar kimyasal ekserjileri (Kotas 1995; Russel ve Adebıy 1993)

Madde	Kimyasal ekserji denklemleri
	$\frac{\bar{e}x_{ch}}{LHV} = 1.0438 + 0.0158 \frac{H}{C} + 0.0813 \frac{O}{C} + 0.0471 \frac{N}{C} \quad \frac{O}{C} \leq 0.5$
Kati	$\frac{\bar{e}x_{ch}}{LHV} = \frac{1.0438 + 0.0158 \frac{H}{C} - 0.3343 \frac{O}{C} \left(1 + 0.0609 \frac{H}{C}\right) + 0.0447 \frac{N}{C}}{1 - 0.4043 \frac{O}{C}} \quad \frac{O}{C} > 0.5$
	$\frac{\bar{e}x_{ch}}{LHV} = 1.0374 + 0.0159 \frac{H}{C} + 0.0567 \frac{O}{C} + 0.5985 \frac{S}{C} \left(1 - 0.1737 \frac{H}{C}\right)$
Sıvı	$\frac{\bar{e}x_{ch}}{LHV} = 1.04224 + 0.011925 \frac{H}{C} - 0.042 \frac{1}{C}$
	$\frac{\bar{e}x_{ch}}{LHV} = 1.0401 + 0.1728 \frac{H}{C} + 0.0432 \frac{O}{C} + 0.2196 \frac{S}{C} \left(1 - 2.0628 \frac{H}{C}\right)$
	$\frac{\bar{e}x_{ch}}{LHV} = 1.0334 + 0.0183 \frac{H}{C} - 0.0694 \frac{1}{C}$
Gaz	$\frac{\bar{e}x_{ch}}{LHV} = 1.033 + 0.0169 \frac{H}{C} - 0.0698 \frac{1}{C}$

$$\bar{s}_i(T_0, y_i^e p_0) = \bar{s}_i(T_0, p_0) - \bar{R}_u \ln y_i^e \quad (2.33)$$

$C_aH_bO_c$ için;

$$\begin{aligned} \bar{e}\bar{x}_{ch} = & \left[\bar{h}_F + \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) \bar{h}_{O_2} - a\bar{h}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{h}_{H_2O} \right] (T_0, p_0) \\ & - T_0 \left[\bar{s}_F + \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) \bar{s}_{O_2} - a\bar{s}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{s}_{H_2O} \right] (T_0, p_0) \\ & + \bar{R}_u T_0 \ln \left[\frac{(y_{O_2}^e)^{a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2}}}{(y_{CO_2}^e)^a (y_{H_2O}^e)^{\frac{b}{2}}} \right] \end{aligned} \quad (2.34)$$

C_aH_b için;

$$\begin{aligned} \bar{e}\bar{x}_{ch} = & \left[\bar{h}_F + \left(a + \frac{b}{4} \right) \bar{h}_{O_2} - a\bar{h}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{h}_{H_2O} \right] (T_0, p_0) \\ & - T_0 \left[\bar{s}_F + \left(a + \frac{b}{4} \right) \bar{s}_{O_2} - a\bar{s}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{s}_{H_2O} \right] (T_0, p_0) \\ & + \bar{R}_u T_0 \ln \left[\frac{(y_{O_2}^e)^{a + \frac{b}{4}}}{(y_{CO_2}^e)^a (y_{H_2O}^e)^{\frac{b}{2}}} \right] \end{aligned} \quad (2.35)$$

$C_aH_bO_c$ ve C_aH_b hidrokarbon yakıtları için Gibbs fonksiyonu ($\bar{g}_f = \bar{h}_F - T_0 \bar{s}_F$) kullanılarak denklem (2.34), (2.36) gibi, denklem (2.35), (2.37) gibi ifade edilir.

$C_aH_bO_c$ için;

$$\begin{aligned} \bar{e}\bar{x}_{ch} = & \left[\bar{g}_F + \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) \bar{g}_{O_2} - a\bar{g}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{g}_{H_2O} \right] (T_0, p_0) \\ & + \bar{R}_u T_0 \ln \left[\frac{(y_{O_2}^e)^{a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2}}}{(y_{CO_2}^e)^a (y_{H_2O}^e)^{\frac{b}{2}}} \right] \end{aligned} \quad (2.36)$$

C_aH_b için;

$$\begin{aligned} \bar{e}x_{ch} = & \left[\bar{g}_F + \left(a + \frac{b}{4} \right) \bar{g}_{O_2} - a \bar{g}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{g}_{H_2O} \right] (T_0, p_0) \\ & + \bar{R}_u T_0 \ln \left[\frac{(y_{O_2}^e)^{a+\frac{b}{4}}}{(y_{CO_2}^e)^a (y_{H_2O}^e)^{\frac{b}{2}}} \right] \end{aligned} \quad (2.37)$$

Dolayısıyla ideal gazın ve/veya yakıtın sahip olduğu toplam ekserji; fiziksel ekserji için sabit özgül ısı yaklaşımı olan (2.29) ve Çizelge 2.5 yaklaşık olarak molar kimyasal ekserji formülleri kullanılarak (2.38):

$$\begin{aligned} \dot{E}x_T = \dot{E}x_{ph+ch} = & \left(\dot{m} \left[c_{p,ort(T)} T_0 \left[\frac{T}{T_0} - 1 - \ln \frac{T}{T_0} \right] + R_g T_0 \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) \right] \right. \\ & \left. + \left[\frac{\bar{e}x_{ch}}{LHV} \right] \right) \end{aligned} \quad (2.38)$$

elde edilir. Yaklaşık çözüm (denklem 2.38) yerine değişken özgül ısılar/tam çözüm kullanılmıştır.

2.2.2. Ekserji ile sistem değerlendirme parametreleri

2.2.2.1. Ekserji verimi

Literatürde ekserji verimi farklı yaklaşımlarla hesaplanabilmektedir. Birinci yaklaşım evrensel verim veya çıkış/giriş tabanlı verim tanımı ile (2.39)'da gösterilmiştir (Aravind 2010; Bejan ve ark. 1996; Kotas 1995; Moran ve ark. 2011).

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{out}}{\dot{E}x_{in}} = 1 - \frac{\dot{E}x_{des} + \dot{E}x_{loss}}{\dot{E}x_{in}} \quad (2.39)$$

İkinci yaklaşım ise fonksiyonel ekserji-verimi veya ürün/yakıt tabanlı verim tanımı ile (2.40)'da gösterilmiştir.

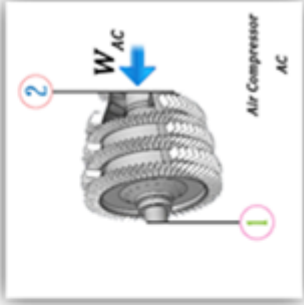
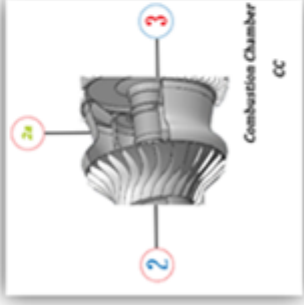
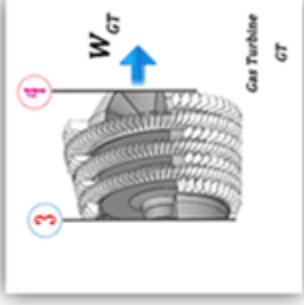
$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_P}{\dot{E}x_F} = 1 - \frac{\dot{E}x_{des} + \dot{E}x_{loss}}{\dot{E}x_F} \quad (2.40)$$

Literatürde geçerli olan yaklaşım ürün/yakıt tabanlı yaklaşımdır. Ürün/yakıt tabanlı ekserji verimi ya da diğer adıyla fonksiyonel ekserji verimi hesabında, “ürün” olarak adlandırılan kısım $\dot{E}x_P$, sistem tarafından kullanılabilir sonuç olarak üretilen bölümdür. “Yakıt” olarak adlandırılan terim ise $\dot{E}x_F$, ürünü üretmek için sisteme sağlanan kaynaktır. Ekserji verimi; enerji sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu için etkili anlayışlar sağlamaktadır.

Çizelge 2.6’da gaz türbinli motorların sahip olduğu komponentlerin ürün ve yakıt ile ilişkili ekserji miktarları görülmektedir.

Çizelge 2.7’de ise gaz türbinli motorların sahip olduğu komponentlerin çıkış ve giriş ile ilişkili ekserji miktarları görülmektedir.

Çizelge 2.6. Gaz türbinli motor componentlerinin ürün ve yakıt ilişkili ekserji miktarları

Komponent	Kompresör, pompa ya da fan	Yanma odası	Türbin ya da genişletici
Şematik Gösterimi			
Ürün Ekserji Miktarı, $\dot{E}x_p$	$\dot{E}x_2 - \dot{E}x_1$	$\dot{E}x_3 - \dot{E}x_2$	\dot{W}_{GT}
Yakıt Ekserji Miktarı, $\dot{E}x_f$	\dot{W}_{AC}	$\dot{E}x_{2a}$	$\dot{E}x_3 - \dot{E}x_4$

Çizelge 2.7. Gaz türbinli motor componentlerinin çıkış ve giriş ilişkili ekserji miktarları

Çıkış Ekserji Miktarı, $\dot{E}x_{out}$	$\dot{E}x_2$	$\dot{E}x_3$	$\dot{W}_{GT} + \dot{E}x_4$
Giriş Ekserji Miktarı, $\dot{E}x_{in}$	$\dot{E}x_1 + \dot{W}_{AC}$	$\dot{E}x_2 + \dot{E}x_{2a}$	$\dot{E}x_3$

2.2.2.2. İzafi ekserji tüketim oranı

Sistemin her bir komponentinde meydana gelen ekserji yıkım ve ekserji kaybının (ekserji tüketim miktarının), tüm sistemde meydana gelen ekserji tüketim miktarına oranını tanımlayan ölçüdür. Bu oran “izafi ekserji tüketim oranı” olarak adlandırılır ve (2.41)’de k’inci sistem komponenti için izafi ekserji tüketim oranı (ϕ) (Ballı 2008; Xiang ve ark. 2004);

$$\phi = \frac{\dot{E}x_{des,k} + \dot{E}x_{loss,k}}{\dot{E}x_{des,sys} + \dot{E}x_{loss,sys}} \quad (2.41)$$

eşitliğinden hesaplanır.

Denklem (2.41)’deki $\dot{E}x_{des,k} + \dot{E}x_{loss,k}$ terimleri, sırasıyla k’inci sistem komponentindeki ekserji yıkımı ve ekserji kaybıdır. $\dot{E}x_{des,sys} + \dot{E}x_{loss,sys}$ terimleri ise sırasıyla, tüm sistemde meydana gelen ekserji yıkımı ve ekserji kaybıdır. İzafi ekserji tüketim oranı, tüm sistemde meydana gelen ekserji tüketim oranının ne kadarının hangi komponentte meydana geldiğini gösteren bir ölçüdür.

2.2.2.3. Yakıt ekserjisi tüketim oranı

Sistemin her bir komponentinde meydana gelen ekserji tüketim miktarının, sisteme sağlanan toplam yakıt ekserjisi miktarına oranıdır. Bu oran “yakıt ekserjisi tüketim oranı” olarak adlandırılır ve (2.42)’de k’inci sistem komponenti için yakıt ekserjisi tüketim oranı (φ) (Ballı 2008; Xiang ve ark. 2004);

$$\varphi = \frac{\dot{E}x_{des,k} + \dot{E}x_{loss,k}}{(\dot{E}x_{ph+ch})_F} \quad (2.42)$$

eşitliğinden hesaplanır.

Denklem (2.42)'deki $(\dot{E}x_{ph+ch})_F$ terimi, sisteme sağlanan yakıtın toplam ekserji miktarını ifade eder. Yakıt ekserjisi tüketim oranı, hangi sistem komponentinde ne kadar yakıt ekserjisinin kullanılmadığını gösterir.

2.2.2.4. Giren ekserji tüketim oranı

Sisteme sağlanan yakıttan farklı olarak elektrik, su dönüş hatlarından gelen sıcak su akımı gibi diğer ekserji miktarı sağlayan maddelerin sisteme girişleri de söz konusu olabilir. Böyle bir sistem için her bir sistem komponentinde meydana gelen ekserji tüketim miktarının, tüm sisteme giren toplam ekserji akımına oranına “giren ekserji tüketim oranı” denir ve (2.43)'de k'nci sistem komponenti için giren ekserji tüketim oranı (θ) (Ballı 2008);

$$\theta = \frac{\dot{E}x_{des,k} + \dot{E}x_{loss,k}}{\dot{E}x_{in,sys}} \quad (2.43)$$

denkleminde hesaplanır.

Denklem (2.43)'deki $\dot{E}x_{in,sys}$ terimi, sisteme giren tüm ekserji akımlarının toplam ekserjisini ifade eder. Giren ekserji tüketim oranının, yakıt ekserjisi tüketim oranından farkı sadece yakıtın sisteme sağladığı ekserji miktarının kaybını ve yıkımını komponentler bazında değerlendirmekle kalmayıp, ayrıca sisteme giren fakat kimyasal reaksiyona uğramayan hava gibi sisteme ekserji sağlayan diğer bileşenleri de değerlendirmesidir.

Giren ekserji tüketim oranı, sisteme giren toplam ekserji miktarının hangi sistem komponentinde ne kadarının kullanılmadığını göstermektedir.

2.2.2.5. Ürün ekserjisi tüketim oranı

Sistemin her bir komponentinde meydana gelen ekserji tüketim miktarının, sistemin ürettiği toplam üretim ekserjisi miktarına oranıdır ve (2.44)'de k'nci sistem komponenti için ürün ekserjisi tüketim oranı (ϑ) (Ballı 2008; Xiang ve ark. 2004);

$$\vartheta = \frac{\dot{E}x_{des,k} + \dot{E}x_{loss,k}}{\dot{E}x_{p,total}} \quad (2.44)$$

denkleminde hesaplanır.

Denklem (2.44)'deki $\dot{E}x_{p,total}$ terimi, sistemin meydana getirdiği ürünlerin toplam ekserjisidir. Ürün ekserjisi tüketim oranı, sistemin komponentler bazında ne kadarının tüketildiğini gösteren bir ölçüdür.

2.2.2.6. Ekserji iyileştirme potansiyeli

Ekserji tüketim miktarındaki iyileştirmeyi temel alan bu tanım, kazanılabilecek ekserji tüketim miktarının bulunmasına yardımcı olur.

Kazanılan bu ekserji tüketim miktarına “ekserji iyileştirme potansiyeli miktarı” denir ve (2.45)'de k'inci sistem komponenti için ekserji iyileştirme potansiyeli miktarı ($\dot{E}x IP$) (Van Gool 1997);

$$\dot{E}x IP = (1 - \eta_{ex})(\dot{E}x_{des,k} + \dot{E}x_{loss,k}) \quad (2.45)$$

Sistem için ekserji iyileştirme potansiyel miktarı (2.46);

$$\dot{E}x IP = (1 - \eta_{ex})(\dot{E}x_{des,sys} + \dot{E}x_{loss,sys}) \quad (2.46)$$

denkleminde hesaplanır.

Ekserji iyileştirme potansiyeli, sistemin hangi komponenti üzerinde yapılacak olan bir iyileştirmenin, daha verimli olabileceğini gösterir. Bu yüzden önemlidir.

2.2.3. Ekserji yıkımı ve ekserji kaybı

Gerçekte mevcut sistemler için ekserji, enerjinin korunumu gibi bir yasaya tabi değildir. Bu yüzden sistem için seçilen kontrol hacmi çıkışındaki

ekserji miktarı, her zaman kontrol hacmi girişindeki ekserji miktarından daha az olmaktadır. İş üreten bir sistem için kontrol hacmine girişteki ve çıkıştaki ekserji miktarı (2.47)'de gösterilmiştir.

$$\dot{E}x_g \geq \dot{E}x_\zeta + \dot{W} \quad (2.47)$$

Denklem (2.47)'de eşitliğin söz konusu olduğu durum tersinir süreçler içindir. Var olan sistemlerde eşitsizliği mecbur kılan etken, ekserjide meydana gelen kayıplar ve yıkımlardır.

Denklem (2.48)'de kontrol hacmi için ekserji dengesi gösterilmiştir. Bu yüzden ekserji, enerjinin korunumu gibi bir yasaya tabi değilken sadece ekserjinin dengesi söz konusudur. Diğer bir deyişle, gerçek bir hal değişimi sırasında enerji korunur, entropi üretilir ve ekserji yok olur (Cengel ve Boles 2008).

$$\dot{E}x_g = \dot{E}x_\zeta + \dot{W} + \dot{E}x_{des} + \dot{E}x_{loss} \quad (2.48)$$

Denklem (2.48)'de $\dot{E}x_{des}$ terimi, bir sistemin termodinamik verimsizliklerini oluşturan iki etkenden bir tanesidir ve sistem sınırları içerisinde entropi üretiminden kaynaklı tersinmezliklerle ilişkili olan ekserji yıkımı olarak tanımlanır. $\dot{E}x_{loss}$ terimi ise, bir sistemin termodinamik verimsizliklerini oluşturan iki etkenden ikincisidir ve, madde ve enerji akışları aracılığıyla ekserji transferiyle ilgili ekserji kayıpları olarak tanımlanır (Tsatsaronis 2007).

2.3. İleri Ekserji Analizi

Ekserji analizi, bir enerji dönüşümü sağlayan sistemin performansını değerlendirmek ve geliştirmek için kullanılabilecek mükemmel bir yöntemdir (Tsatsaronis ve Morosuk 2012). Ekserji analizinin avantajları birçok yayında ve bu ekserji analizi bölümünde tartışılmıştır. Fakat geleneksel ekserji analizi, bir sistemin tüm komponentleri arasındaki geliştirilebilirlik potansiyelini birbirleriyle bağımlılık açısından bizlere sunmamaktadır (Tsatsaronis ve Park 2002; Cziesla ve ark. 2006; Morosuk ve Tsatsaronis 2008; Tsatsaronis ve Morosuk 2012).

Komponentlerin birbirleriyle olan ilişkileri ileri ekserji analizi ile değerlendirilebilmektedir. Bu değerlendirme sistemin her bir komponentinin sahip olduğu ekserji yıkımının içsel-dışsal ve kaçınılabilir-kaçınılamaz olarak bölünmesiyle elde edilmektedir. İleri ekserji analizinde ekserji yıkımının iki parçaya ayrılma yaklaşımı, bir enerji dönüşüm sistemi tasarımcısı için sistemin verimliliğini arttırmada değerli ve detaylı bilgiler sunar. Ayrıca bu yaklaşım, ekserji analizinin doğruluğu ve termodinamik verimsizliklerin oluşumunu anlamamızda ve ekserji tabanlı analizleri gerçekleştirirken performans değerlendirmelerini anlaşılabilir kılmakta kolaylık sağlar (Tsatsaronis 1999).

2.3.1.İçsel ve dışsal ekserji yıkımı

k 'inci komponent için toplam ekserji yıkımı (2.49)'daki gibi içsel ve dışsal ekserji yıkımı olarak ayrılmaktadır.

$$\dot{E}x_{des,k} = \dot{E}x_{des,k}^{EN} + \dot{E}x_{des,k}^{EX} \quad (2.49)$$

Denklem (2.49)'daki $\dot{E}x_{des,k}^{EN}$ ekserji yıkımının içsel ekserji yıkım bileşenini, $\dot{E}x_{des,k}^{EX}$ ise dışsal ekserji yıkım bileşenini sembolize etmektedir (Kelly 2008; Morosuk ve Tsatsaronis 2009; Petrakopoulou 2011; Tsatsaronis ve Morosuk 2012; Açikkalp 2013).

İçsel ekserji yıkımı ($\dot{E}x_{des,k}^{EN}$) k 'inci komponentin mevcut sahip olduğu verimliliği ile çalışması durumunda ve diğer komponentlerin ideal çalışma koşullarında k 'inci komponentte meydana gelen tersinmezliklerle ilişkilidir. Diğer bir deyişle, k 'inci komponent haricindeki komponentlerin ideal koşullarda çalıştırıldığı ve k 'inci komponentin ise gerçek koşullarda çalıştırıldığı düşünüldüğünde, k 'inci komponentte elde edilen tersinmezlikler toplamıdır.

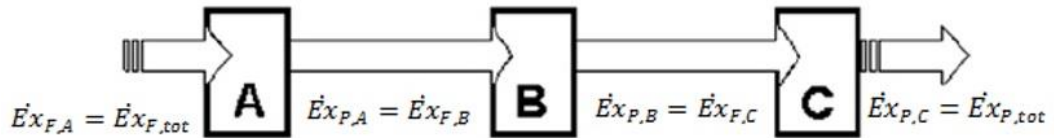
Dışsal ekserji yıkımı ($\dot{E}x_{des,k}^{EX}$) diğer komponentlerde meydana gelen tersinmezliklerin k 'inci komponent üzerindeki etkisini açıklar. Diğer bir deyişle, dışsal ekserji yıkımı, k 'inci komponentte meydana gelen tersinmezlik miktarının ne kadarının hangi komponentte meydana gelen tersinmezliklerden dolayı

olduğunu ayrıntılı şekilde bize sunar. İzlenen yöntem k 'nci komponent ve seçilen bir komponentin gerçek çalışma koşullarında çalıştırıldığı kabul edilirken diğer komponentlerin ideal durumlarda çalıştırıldığı kabulüne dayanır ve sistem tümüyle analiz edilir. Böylelikle k 'nci komponentin sahip olduğu ekserji yıkım miktarının ne kadarının seçilen komponentten dolayı meydana geldiği bulunur (Kelly 2008; Morosuk ve Tsatsaronis 2009; Petrakopoulou 2011; Tsatsaronis ve Morosuk 2012; Açikkalp 2013).

2.3.1.1. İçsel ve dışsal ekserji yıkım hesabı

Sistemin bir komponentinin içsel ve dışsal ekserji yıkımı hesabında öncelikle içsel ekserji yıkımı hesaplanır. Komponentin içsel ekserji yıkımı belirlenirken, komponent için çalışma şartları tersinmez (gerçek çalışma şartlarında) kabul edilirken diğer komponentler tersinir (ideal çalışma şartlarında) çalıştığı kabul edilir. Böylece seçilen komponent için içsel ekserji yıkımı hesaplanmış olur. Dışsal ekserji yıkım miktarı ise (2.49) kullanılarak toplam ekserji yıkım miktarından çıkartılarak elde edilir.

Literatürde içsel ve dışsal ekserji akımının şematik gösterimi Şekil 2.7'deki gibidir (Kelly 2008; Tsatsaronis ve Morosuk 2012).



Şekil 2.7. Sistem komponentlerinin birbirleriyle olan ilişkisi (Kelly 2008; Tsatsaronis ve Morosuk 2012).

Şekil 2.7'de bir teorik enerji dönüşüm sisteminin sahip olduğu A, B ve C komponentleri görülmektedir. Her bir komponent birbirleriyle ilişkili olarak yakıt ve ürün ekserji etkileşimlerine bakıldığında bir komponentin ürün ekserjisi diğer komponentin yakıt ekserjisi olmaktadır. Başka bir deyişle A komponentinin ürün ekserjisi, B komponentinin yakıt ekserjisidir. Aynı şekilde B komponentinin ürün ekserjisi, C komponentinin yakıt ekserjisi olmaktadır. Ayrıca A komponentinin

yakıt ekserjisi sistemin yakıt ekserjisini tanımlarken, C komponentinin ürün ekserjisi sistemin ürün ekserjisini tanımlamaktadır. Bu analizde sistemin toplam ürün ekserjisi sabittir ve dolayısıyla tüm sistem içerisinde ekserji kaybı söz konusu değildir. Sistemin toplam ekserji dengesi (2.50);

$$\dot{E}x_{F,tot} = \dot{E}x_{P,tot} + \sum_k \dot{E}x_{des,k} + \dot{E}x_{loss,tot} \quad (2.50)$$

Denklem (2.50)'deki toplam ekserji yıkımının açılımına (2.51)'de değinilmiştir ($\dot{E}x_{loss,tot} = 0$);

$$\sum_k \dot{E}x_{des,k} = \dot{E}x_{des,A} + \dot{E}x_{des,B} + \dot{E}x_{des,C} \quad (2.51)$$

dir. Denklem (2.40), (2.50) ve (2.51) yardımıyla komponentlerin ekserji yıkımları sırasıyla;

Komponent C;

$$\dot{E}x_{des,C} = \dot{E}x_{P,C} \left(\frac{1}{\eta_{ex,C}} - 1 \right) = \dot{E}x_{P,tot} \left(\frac{1}{\eta_{ex,C}} - 1 \right) \quad (2.52)$$

dir. (2.52) aşağıdaki formülasyon sırasıyla çıkarılmıştır. Ürün/yakıt tabanlı ekserji verim formülü göz önünde bulundurulduğunda;

- i. $\eta_{ex,C} = \frac{\dot{E}x_{P,C}}{\dot{E}x_{F,C}}$
- ii. $\dot{E}x_{des,C} = \dot{E}x_{F,C} - \dot{E}x_{P,C}$
- iii. $\dot{E}x_{F,C} = \frac{\dot{E}x_{P,C}}{\eta_{ex,C}}$
- iv. $\dot{E}x_{des,C} = \frac{\dot{E}x_{P,C}}{\eta_{ex,C}} - \dot{E}x_{P,C}$

- v. $\dot{E}x_{des,C} = \dot{E}x_{P,C} \left(\frac{1}{\eta_{ex,C}} - 1 \right)$
- vi. $\dot{E}x_{P,C} = \dot{E}x_{P,tot}$
- vii. $\dot{E}x_{des,C} = \dot{E}x_{P,tot} \left(\frac{1}{\eta_{ex,C}} - 1 \right)$

Denklem (2.51)'den de açık bir şekilde görüldüğü üzere, C komponentindeki ekserji yıkımı sadece C komponenti içerisindeki tersinmezliklerden kaynaklıdır ($0 < \eta_{ex,C} < 1$). Bu yüzden C komponentindeki ekserji yıkımı komponentin içsel ekserji yıkımıdır ($\dot{E}x_{des,C} = \dot{E}x_{des,C}^{EN}$).

Komponent B;

$$\dot{E}x_{des,B} = \frac{\dot{E}x_{P,tot}}{\eta_{ex,C}} \left(\frac{1}{\eta_{ex,B}} - 1 \right) \quad (2.53)$$

dir. (2.53) aşağıdaki formülasyon sırasıyla çıkarılmıştır.

- i. $\eta_{ex,B} = \frac{\dot{E}x_{P,B}}{\dot{E}x_{F,B}}$
- ii. $\dot{E}x_{des,B} = \dot{E}x_{F,B} - \dot{E}x_{P,B}$
- iii. $\dot{E}x_{F,B} = \frac{\dot{E}x_{P,B}}{\eta_{ex,B}}$
- iv. $\dot{E}x_{des,B} = \frac{\dot{E}x_{P,B}}{\eta_{ex,B}} - \dot{E}x_{P,B}$
- v. $\dot{E}x_{des,B} = \dot{E}x_{P,B} \left(\frac{1}{\eta_{ex,B}} - 1 \right)$
- vi. $\dot{E}x_{P,B} = \dot{E}x_{F,C}$
- vii. $\dot{E}x_{des,B} = \dot{E}x_{F,C} \left(\frac{1}{\eta_{ex,B}} - 1 \right)$
- viii. $\dot{E}x_{F,C} = \frac{\dot{E}x_{P,C}}{\frac{\dot{E}x_{P,C}}{\dot{E}x_{F,C}}}$
- ix. $\dot{E}x_{P,C} = \dot{E}x_{P,tot}$
- x. $\dot{E}x_{des,B} = \frac{\dot{E}x_{P,tot}}{\eta_{ex,C}} \left(\frac{1}{\eta_{ex,B}} - 1 \right)$

Denklem (2.53)'de görüldüğü üzere, B komponentinin ekserji yıkımı hem B komponentindeki tersinmezliklerden hem de C komponentindeki tersinmezliklerden kaynaklıdır ($0 < \eta_{ex,B} < 1$). Bu yüzden, B komponenti hem içsel hem de dışsal ekserji yıkımına sahiptir. Eğer komponent C ideal kabul edilirse $\eta_{ex,C} = 1$ veya $\dot{E}x_{des,C} = 0$, B komponenti için ekserji yıkımı içsel ekserji yıkımı olarak tanımlanır ve belirlenebilir.

Komponent A;

$$\dot{E}x_{des,A} = \frac{\dot{E}x_{P,tot}}{\eta_{ex,B}\eta_{ex,C}} \left(\frac{1}{\eta_{ex,A}} - 1 \right) \quad (2.54)$$

dir. Denklem (2.54)'de görüldüğü üzere, A komponenti için ekserji yıkımı, hem A hem B hem de C komponentine bağlıdır ($0 < \eta_{ex,A} < 1$). Eğer B ve C komponentleri ideal kabul edilirse $\eta_{ex,B} = \eta_{ex,C} = 1$ veya $\dot{E}x_{des,B} = \dot{E}x_{des,C} = 0$, A komponenti için ekserji yıkımı içsel ekserji yıkımı olarak tanımlanır ve belirlenebilir (Kelly 2008; Morosuk ve Tsatsaronis 2009; Petrakopoulou 2011; Tsatsaronis ve Morosuk 2012).

2.3.2. Kaçınılabılır ve kaçınılamaz ekserji yıkımı

Bir komponent içerisinde meydana gelen ekserji yıkım miktarının sadece bir bölümünden kaçınılabılır. Üretim yöntemleri, malzemelerin maliyeti ve uygulanabilirliği gibi teknolojik sınırlandırmalardan dolayı ekserji yıkımının azaltılamaz parçasına kaçınılamaz ekserji yıkımı ($\dot{E}x_{des,k}^{UN}$) bileşeni denir. Ekserji yıkımının geriye kalan bileşimi ise ($\dot{E}x_{des,k}^{AV}$) kaçınılabılır ekserji yıkım bileşeni olarak adlandırılır. Böylece k 'inci komponent için ekserji yıkımının bir diğer ayrışma biçimi kaçınılabılır ve kaçınılamaz ekserji yıkımıdır. k 'inci komponent için toplam ekserji yıkımı (2.55)'deki gibi kaçınılabılır ve kaçınılamaz ekserji yıkımı olarak ayrılmaktadır (Kelly 2008; Morosuk ve Tsatsaronis 2009; Petrakopoulou 2011; Tsatsaronis ve Morosuk 2012; Açıkçalp 2013).

$$\dot{E}x_{des,k} = \dot{E}x_{des,k}^{AV} + \dot{E}x_{des,k}^{UN} \quad (2.55)$$

Kaçınılabilir ve kaçınılamaz ekserji yıkımı bir komponentin termodinamik verimliliğini geliştirmek için gerçekçi bir ölçü sağlar.

2.3.2.1. Kaçınılabilir ve kaçınılamaz ekserji yıkım hesabı

Sistemin bir komponentinin kaçınılabilir ve kaçınılamaz ekserji yıkımı hesabında öncelikle kaçınılamaz ekserji yıkımı hesaplanır. Kaçınılabilir ekserji yıkımı ise komponentin toplam ekserji yıkımından kaçınılamaz ekserji yıkım miktarı çıkartılarak elde edilir (2.55). Bu hesaplamada teknik ve ekonomik olarak gelecekte ulaşılamayacak şartlar her bir komponent için tanımlanır, kabuller gerçekleştirilir ve kaçınılamaz ekserji yıkım miktarı belirlenir. Örneğin; kompresör ve türbin komponenti için izantropik verim belirlenir.

İzantropik verim ekserji yıkım miktarını minimuma indirgeyen parametre olarak seçildikten sonra k 'nci komponent için öncelikle (2.56) hesaplanır (Kelly 2008; Morosuk ve Tsatsaronis 2009; Petrakopoulou 2011; Tsatsaronis ve Morosuk 2012; Açıklalp 2013).

$$\left(\frac{\dot{E}x_{des,k}}{\dot{E}x_{P,k}} \right)^{UN} \quad (2.56)$$

Daha sonra kaçınılamaz ekserji yıkım miktarı (2.57)'den bulunur.

$$\dot{E}x_{des,k}^{UN} = \dot{E}x_{P,k}^{real} \left(\frac{\dot{E}x_{des,k}}{\dot{E}x_{P,k}} \right)^{UN} \quad (2.57)$$

k 'nci komponentin kaçınılabilir ekserji yıkım miktarı için sahip olduğu toplam ekserji yıkım miktarından kaçınılamaz ekserji yıkım miktarı çıkartılarak elde edilir (2.58).

$$\dot{E}x_{des,k}^{AV} = \dot{E}x_{des,k} - \dot{E}x_{des,k}^{UN} \quad (2.58)$$

2.3.3. Birleşik ekserji yıkımı

k 'nci komponent üzerinde tüm sistemin birliktelik etkileşiminden doğan ekserji yıkımına birleşik ekserji yıkımı denir. Diğer bir deyişle, k 'nci komponentin dışsal ekserji yıkımına diğer komponentlerin etkileri belirlendikten sonra geriye kalan etki sistemin birleşik ekserji yıkımı etkisidir ve $(\dot{E}x_{des,k}^{MX})$ ile gösterilir (Kelly 2008; Morosuk ve Tsatsaronis 2009; Petrakopoulou 2011; Tsatsaronis ve Morosuk 2012; Açıkcalp 2013).

2.3.3.1. Birleşik ekserji yıkımı hesabı

Öncelikle k 'nci komponentin dışsal ekserji yıkım miktarı, içsel ve dışsal ekserji yıkım hesabı bölümünde anlatıldığı gibi belirlenir. Daha sonra k 'nci komponentin dışsal ekserji yıkım miktarındaki geriye kalan her bir komponentin etkisi belirlenir. Diğer komponentlerin toplam etkisi, k 'nci komponentin dışsal ekserji miktarından çıkartılarak birleşik ekserji yıkımı bulunur.

k 'nci komponentin birleşik ekserji yıkım hesabı (2.59)'da gösterilmiştir.

$$\dot{E}x_{des,k}^{MX} = \dot{E}x_{des,k}^{EX} - \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq k}}^n \dot{E}x_{des,k}^{EX,r} \quad (2.59)$$

2.3.4. Ekserji yıkımındaki iki ayrışmanın kombinasyonu

İçsel-dışsal ekserji yıkımı ve kaçınılabılır-kaçınılamaz ekserji yıkımı kavramlarını birleştirirsek, k 'nci komponent için ekserji yıkımının içsel-kaçınılamaz $(\dot{E}x_{des,k}^{EN,UN})$ ve dışsal-kaçınılamaz $(\dot{E}x_{des,k}^{EX,UN})$ ayrıca içsel-kaçınılabılır $(\dot{E}x_{des,k}^{EN,AV})$ ve dışsal-kaçınılabılır parçalarını $(\dot{E}x_{des,k}^{EX,AV})$ elde ederiz.

k 'inci komponentin ekserji yıkımının içsel-kaçınılamaz ($\dot{E}x_{des,k}^{EN,UN}$) parçası komponentle ilişkili olarak teknik sınırlandırmalardan dolayı azaltılamaz bölümdür.

k 'inci komponentin ekserji yıkımının dışsal-kaçınılamaz ($\dot{E}x_{des,k}^{EX,UN}$) parçası yapısal belirliliği olan tüm sistemin diğer komponentlerindeki teknik sınırlandırmalardan dolayı azaltılamaz bölümdür.

k 'inci komponentin ekserji yıkımının içsel-kaçınılabılır ($\dot{E}x_{des,k}^{EN,AV}$) parçası k 'inci komponentin verimliliğindeki iyileştirmelerle azaltılabilir.

k 'inci komponentin ekserji yıkımının dışsal-kaçınılabılır ($\dot{E}x_{des,k}^{EX,AV}$) parçası üç şekilde azaltılabilir. (i) Tüm sistemin yapısındaki bir iyileştirme ile (ii) diğer komponentlerin verimliliğinin iyileştirilmesi ile ve (iii) k 'inci komponentin verimliliğindeki bir iyileştirme ile azaltılabilir (Kelly 2008; Morosuk ve Tsatsaronis 2009; Petrakopoulou 2011; Tsatsaronis ve Morosuk 2012).

2.3.4.1. Ekserji yıkımındaki iki ayrışmanın kombinasyon hesabı

İçsel-kaçınılamaz ekserji yıkım miktarı ($\dot{E}x_{des,k}^{EN,UN}$), k 'inci komponentin maksimum ulaşılabilir verimlilikte çalıştığı durum ($\eta_{ex,k}^{UN}$) ile diğer komponentlerin ideal koşullarda çalıştığı durum birleştirilerek hesaplanır. Denklem (2.60), Şekil 2.7'de gösterilen sistemin A komponenti için içsel-kaçınılamaz ekserji yıkım miktarını veren formüldür (Tsatsaronis ve Morosuk 2012).

$$\dot{E}x_{des,A}^{EN,UN} = \dot{E}x_{P,tot} \left(\frac{1}{\eta_{ex,A}^{UN}} - 1 \right) \quad (2.60)$$

Komponent B için içsel-kaçınılamaz ekserji yıkım miktarı (2.61);

$$\dot{E}x_{des,B}^{EN,UN} = \dot{E}x_{P,tot} \left(\frac{1}{\eta_{ex,B}^{UN}} - 1 \right) \quad (2.61)$$

Komponent C için içsel-kaçınılamaz ekserji yıkım miktarı (2.62);

$$\dot{E}x_{des,C}^{EN,UN} = \dot{E}x_{P,tot} \left(\frac{1}{\eta_{ex,C}^{UN}} - 1 \right) \quad (2.62)$$

dır. Gerçek bir sistem için k 'inci komponentteki içsel-kaçınılamaz ekserji yıkım miktarı (2.63);

$$\dot{E}x_{des,k}^{EN,UN} = \dot{E}x_{P,k}^{EN} \left(\frac{\dot{E}x_{des,k}}{\dot{E}x_{P,k}} \right)^{UN} \quad (2.63)$$

k 'inci komponentin dışsal-kaçınılamaz ekserji yıkım miktarı ($\dot{E}x_{des,k}^{EX,UN}$) ise kaçınılamaz ekserji yıkım miktarından içsel-kaçınılamaz ekserji yıkım miktarının çıkarılması ile bulunur (2.64).

$$\dot{E}x_{des,k}^{EX,UN} = \dot{E}x_{des,k}^{UN} - \dot{E}x_{des,k}^{EN,UN} \quad (2.64)$$

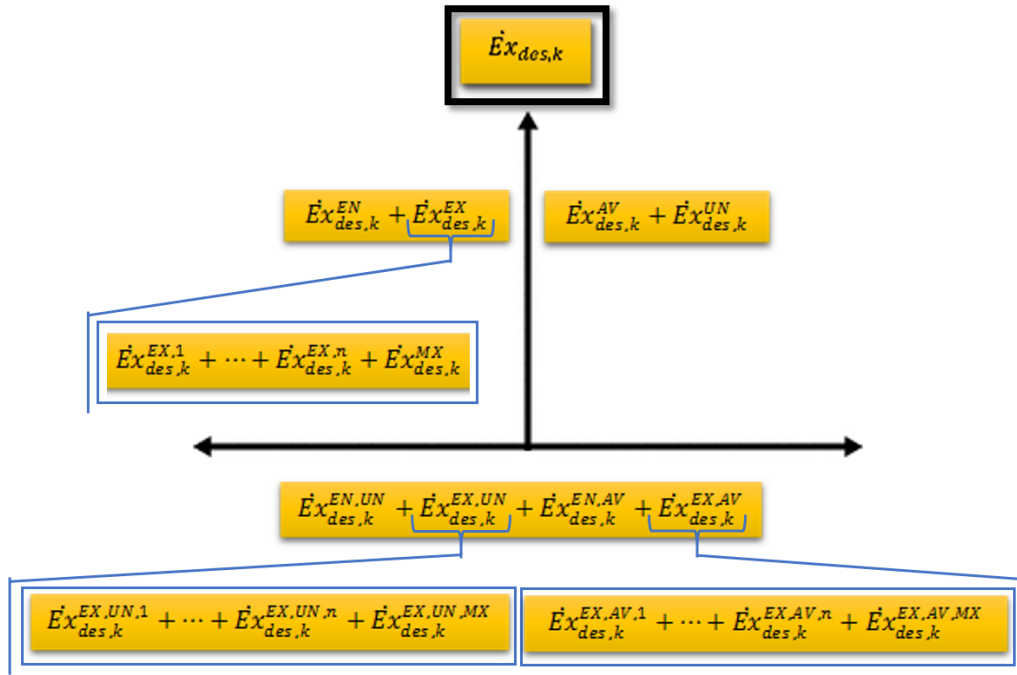
Geriye kalan terimler ise ($\dot{E}x_{des,k}^{EN,AV}$), ($\dot{E}x_{des,k}^{EX,AV}$) toplam içsel ekserji yıkımı ve toplam dışsal ekserji yıkımının kaçınılamaz parçalarından türetilir (2.65 ve 2.66).

$$\dot{E}x_{des,k}^{EN,AV} = \dot{E}x_{des,k}^{EN} - \dot{E}x_{des,k}^{EN,UN} \quad (2.65)$$

$$\dot{E}x_{des,k}^{EX,AV} = \dot{E}x_{des,k}^{EX} - \dot{E}x_{des,k}^{EX,UN} \quad (2.66)$$

2.3.5. Ekserji yıkım ayrışması özeti

Ekserji yıkım parçalarının şematik gösterimi Şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.8. Ekserji yıkım parçalarının şematik gösterimi

Ekserji yıkım parçalarının toplam formülleri Çizelge 2.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.8. Ekserji yıkım parçalarının toplam formülleri

$\dot{E}x_{des,k}$			
$\dot{E}x_{des,k}^{EN} + \dot{E}x_{des,k}^{EX}$		$\dot{E}x_{des,k}^{AV} + \dot{E}x_{des,k}^{UN}$	
$\dot{E}x_{des,k}^{EN}$	$\dot{E}x_{des,k}^{EX}$	$\dot{E}x_{des,k}^{AV}$	$\dot{E}x_{des,k}^{UN}$
$\dot{E}x_{des,k}^{EN,AV}$	$\dot{E}x_{des,k}^{EX,AV}$	$\dot{E}x_{des,k}^{EN,UN}$	$\dot{E}x_{des,k}^{EX,UN}$
$+ \dot{E}x_{des,k}^{EN,UN}$	$+ \dot{E}x_{des,k}^{EX,UN}$	$+ \dot{E}x_{des,k}^{EX,AV}$	$+ \dot{E}x_{des,k}^{EX,UN}$

Teorik bir enerji dönüşüm sisteminin (Şekil 2.7) ekserji yıkımı ve içsel ekserji yıkımı formülleri Çizelge 2.9’da görülmektedir.

Çizelge 2.9. Teorik bir enerji dönüşüm sisteminin (Şekil 2.7) ekserji yıkımı ve içsel ekserji yıkımı formülleri

Gaz türbinli motor için $\dot{E}x_{P,tot} = \text{sabit}$		
Komponent	$\dot{E}x_{des,k}$	$\dot{E}x_{des,k}^{EN}$
A	$\dot{E}x_{des,A} = \frac{\dot{E}x_{P,tot}}{\eta_{ex,B}\eta_{ex,C}} \left(\frac{1}{\eta_{ex,A}} - 1 \right)$	$0 < \eta_{ex,A} < 1$ $\eta_{ex,B} = \eta_{ex,C} = 1$ $\dot{E}x_{des,B} = \dot{E}x_{des,C} = 0$ $\dot{E}x_{des,A}^{EN} = \dot{E}x_{P,tot} \left(\frac{1}{\eta_{ex,A}} - 1 \right)$
B	$\dot{E}x_{des,B} = \frac{\dot{E}x_{P,tot}}{\eta_{ex,C}} \left(\frac{1}{\eta_{ex,B}} - 1 \right)$	$0 < \eta_{ex,B} < 1$ $\eta_{ex,C} = 1$ $\dot{E}x_{des,C} = 0$ $\dot{E}x_{des,B}^{EN} = \dot{E}x_{P,tot} \left(\frac{1}{\eta_{ex,B}} - 1 \right)$
C	$\dot{E}x_{des,C} = \dot{E}x_{P,C} \left(\frac{1}{\eta_{ex,C}} - 1 \right) = \dot{E}x_{P,tot} \left(\frac{1}{\eta_{ex,C}} - 1 \right) = \dot{E}x_{des,C}^{EN}$	

Teorik bir enerji dönüşüm sisteminin (Şekil 2.7) kaçınılmaz ve içsel-kaçınılmaz ekserji yıkımı formülleri Çizelge 2.10'da görülmektedir.

Çizelge 2.10. Teorik bir enerji dönüşüm sisteminin (Şekil 2.7) kaçınılmaz ve içsel-kaçınılmaz ekserji yıkımı formülleri

Gaz türbinli motor için $\dot{E}x_{P,tot} = \text{sabit}$

$$\dot{E}x_{des,tot}^{UN} = \dot{E}x_{des,A}^{UN} + \dot{E}x_{des,B}^{UN} + \dot{E}x_{des,C}^{UN}$$

$$\eta_{ex,k} = \frac{\dot{E}x_{P,k}}{\dot{E}x_{F,k}} \quad \eta_{ex,k}^{UN} = \left(\frac{\dot{E}x_{P,k}}{\dot{E}x_{F,k}} \right)^{UN}$$

$$\left(\frac{\dot{E}x_{des,k}}{\dot{E}x_{P,k}} \right)^{UN} = \left(\frac{\dot{E}x_{F,k} - \dot{E}x_{P,k}}{\dot{E}x_{P,k}} \right)^{UN} = \left(\frac{\dot{E}x_{F,k}}{\dot{E}x_{P,k}} - 1 \right)^{UN} = \frac{1}{\eta_{ex,k}^{UN}} - 1$$

$$\dot{E}x_{des,tot}^{UN} = \dot{E}x_{P,tot} \left[\frac{1}{\eta_{ex,B}^{UN} \eta_{ex,C}^{UN}} \left(\frac{1}{\eta_{ex,A}^{UN}} - 1 \right) + \frac{1}{\eta_{ex,C}^{UN}} \left(\frac{1}{\eta_{ex,B}^{UN}} - 1 \right) + \left(\frac{1}{\eta_{ex,C}^{UN}} - 1 \right) \right]$$

Komponent	$\dot{E}x_{des,k}^{UN}$	$\dot{E}x_{des,k}^{EN,UN}$
A	$\dot{E}x_{des,A}^{UN} = \frac{\dot{E}x_{P,tot}}{\eta_{ex,B}^{UN} \eta_{ex,C}^{UN}} \left(\frac{1}{\eta_{ex,A}^{UN}} - 1 \right)$	$0 < \eta_{ex,A}^{UN} < 1$ $\eta_{ex,B}^{UN} = \eta_{ex,C}^{UN} = 1$ $\dot{E}x_{des,A}^{EN,UN} = \dot{E}x_{P,tot} \left(\frac{1}{\eta_{ex,A}^{UN}} - 1 \right)$
B	$\dot{E}x_{des,B}^{UN} = \frac{\dot{E}x_{P,tot}}{\eta_{ex,C}^{UN}} \left(\frac{1}{\eta_{ex,B}^{UN}} - 1 \right)$	$0 < \eta_{ex,B}^{UN} < 1$ $\eta_{ex,C}^{UN} = 1$ $\dot{E}x_{des,B}^{EN,UN} = \dot{E}x_{P,tot} \left(\frac{1}{\eta_{ex,B}^{UN}} - 1 \right)$
C	$\dot{E}x_{des,C}^{UN} = \dot{E}x_{P,tot} \left(\frac{1}{\eta_{ex,C}^{UN}} - 1 \right)$	

2.4. Ekserji Tabanlı Sürdürülebilirlik Analizi

Literatürde ekserji tabanlı sürdürülebilirlik analizi altı adet indikatörle değerlendirilmektedir (Midilli ve Dincer 2009; Midilli ve Dincer 2010; Aydın 2013; Aydın ve ark. 2013).

- i. Ekserji verimi [η_{ex}]
- ii. Atık ekserji oranı (Waste exergy ratio) [r_{we}]
- iii. Geri kazanılabilir ekserji oranı (Recoverable exergy rate) [r_{re}]
- iv. Ekserji yıkım faktörü (Exergy destruction factor) [f_{exdf}]
- v. Çevresel etki faktörü (Environmental effect factor) [f_{eef}]
- vi. Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi (Exergetic sustainability index) [Θ_{esi}]

Sürdürülebilirlik indikatörlerinden ekserji verimi, “2.2. Ekserji Analizi” bölümünde Turbojet motor sistemi ve komponentleri için anlatılmıştır. Sırasıyla diğer indikatörler Turbojet motor için aşağıda incelenmiştir.

Atık ekserji oranı (Waste exergy ratio) [r_{we}]

Turbojet motor için atık ekserji oranı, toplam atık ekserji miktarının (egzoz ekserji miktarı ve her bir komponentin ekserji yıkım miktarı), sisteme giren toplam ekserji miktarına oranıdır (Midilli ve Dincer 2009; Midilli ve Dincer 2010; Aydın 2013; Aydın ve ark. 2013). Turbojet motor için atık ekserji oranı hesabı (2.67)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} r_{we} &= \frac{\sum \dot{E}x_{loss} + \sum \dot{E}x_{dest}}{\sum \dot{E}x_{in}} \\ &= \frac{(\dot{E}x_{exh} + \dot{E}x_{dest,ac} + \dot{E}x_{dest,cc} + \dot{E}x_{dest,gt})}{(\dot{E}x_{2a} + \dot{E}x_1)} \end{aligned} \quad (2.67)$$

Geri kazanılabilir ekserji oranı (Recoverable exergy rate) [r_{re}]

Havacılıkta kullanılan Turbojet motor egzozundan direk olarak atmosfere emisyon salmaktadır. Bu yüzden atmosfere salınan emisyon motorda geri dönüştürülebilir şekilde kullanılamamaktadır. Uçaklarda kullanılan Turbojet motorun geri kazanılabilir ekserji miktarı sıfırdır. Geri kazanılabilir ekserji oranı, geri kazanılan ekserji miktarının sisteme giren toplam ekserji miktarına oranıdır ve (2.68) ile hesaplanabilir (Midilli ve Dincer 2009; Midilli ve Dincer 2010; Aydın 2013; Aydın ve ark. 2013).

$$r_{re} = \frac{\sum \dot{E}x_{re}}{\sum \dot{E}x_{in}} = \frac{\dot{E}x_{exh}}{\dot{E}x_{2a} + \dot{E}x_1} \quad (2.68)$$

Ekserji yıkım faktörü (Exergy destruction factor) [f_{exdf}]

Turbojet motor için ekserji yıkım faktörü, sistemde meydana gelen toplam ekserji yıkım miktarının sisteme sağlanan toplam ekserji girdi miktarına oranıdır ve (2.69) ile hesaplanır.

$$f_{exdf} = \frac{\sum \dot{E}x_{dest}}{\sum \dot{E}x_{in}} = \frac{(\dot{E}x_{dest,ac} + \dot{E}x_{dest,cc} + \dot{E}x_{dest,gt})}{(\dot{E}x_{2a} + \dot{E}x_1)} \quad (2.69)$$

Çevresel etki faktörü (Environmental effect factor) [f_{eef}]

Çevresel etki faktörü enerji dönüşümü sağlayan sistemlerin çevresel etkilerinin olup olmadığını değerlendiren ekserji tabanlı parametredir. Çevresel etki faktörü atık ekserji miktarının ekserji verimine oranıyla hesaplanır (2.70).

$$f_{eef} = \frac{r_{we}}{\eta_{ex}} = \frac{(\dot{E}x_{exh} + \dot{E}x_{dest,ac} + \dot{E}x_{dest,cc} + \dot{E}x_{dest,gt})}{W_{GT}} \quad (2.70)$$

Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi (Exergetic sustainability index) [Θ_{esi}]

Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi, enerji dönüşümü sağlayan sistemlerin ekserji tabanlı olarak sürdürülebilirlik göstergesidir ve 0 ile 1 arasında değer almaktadır. Turbojet motor için ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi, çevresel etki faktörünün 1'e oranıdır (2.71).

$$\Theta_{esi} = \frac{1}{f_{eef}} = \frac{W_{GT}}{(\dot{E}x_{exh} + \dot{E}x_{dest,ac} + \dot{E}x_{dest,cc} + \dot{E}x_{dest,gt})} \quad (2.71)$$

3. TURBOJET MOTORUN DENEYSEL ÇALIŞMALARI VE BULGULARI

3.1. Turbojet Motorun Tanıtımı

Teze konu olan Turbojet motor Jet Cat USA firmasının Jet Cat P-60 ürün adına sahip devir aralığı 50 000 – 165 000 rpm, egzoz çıkış sıcaklığı 580 – 690 °C, yakıt türü kerosen olan bir Turbojet motordur.

Jet Cat P-60 turbojet motorun başlıca komponentleri kompresör, yanma odası ve türbindir. Motorun dahili ekipmanları arasında Jet-tronic ECU (yakıt kontrol elektroniği), GSU (görüntü ve programlama ünitesi), LED I/O kartı, minyatür yakıt pompası, elektronik başlangıç gaz valfi, boru bağlantı seti, filtreler, kablo seti, 2 hücre 2500mAh LiPoly pil paketi, başlangıç gaz tankı ve montaj kelepçesi bulunmaktadır.

3.2. Veriler, Kabuller ve Hesap Yöntemi

Deneysel Turbojet motorun kompresör ve türbin komponentlerinden sıcaklık ve basınç değerleri elde edilmiştir. Tam devirde (120,000 rpm) çalıştırılan motor üzerinden her bir komponenti için 152 tane veri kaydı yapılmıştır.

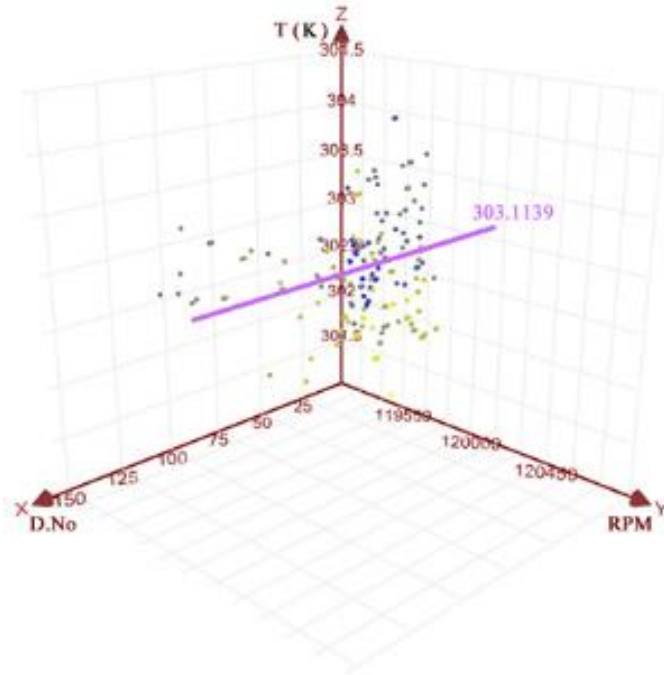
Deneysel Turbojet motorun kompresör komponenti üzerinden elde edilen giriş sıcaklık ve çıkış sıcaklık verileri ortalamaları sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de görülmektedir. Kompresör giriş sıcaklık verilerinin ortalaması olarak 303.1139 K ve çıkış sıcaklık verilerinin ortalaması olarak 502.4019 K elde edilmiştir.

Deneysel Turbojet motorun kompresör komponenti üzerinden elde edilen giriş basınç ve çıkış basınç verileri ortalamaları sırasıyla Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'de görülmektedir. Kompresör giriş basınç verilerinin ortalaması olarak 91.5601 kPa ve çıkış basınç verilerinin ortalaması olarak 357.9826 kPa elde edilmiştir.

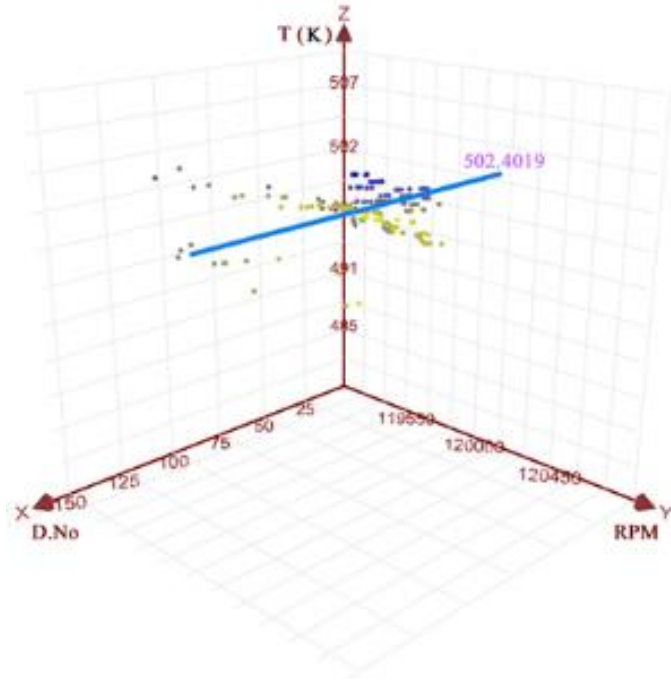
Deneysel Turbojet motorun türbin komponenti üzerinden elde edilen giriş sıcaklık ve çıkış sıcaklık verileri ortalamaları sırasıyla Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da görülmektedir. Türbin giriş sıcaklık verilerinin ortalaması olarak

1056.8253 K ve çıkış sıcaklık verilerinin ortalaması olarak 869.2252 K elde edilmiştir.

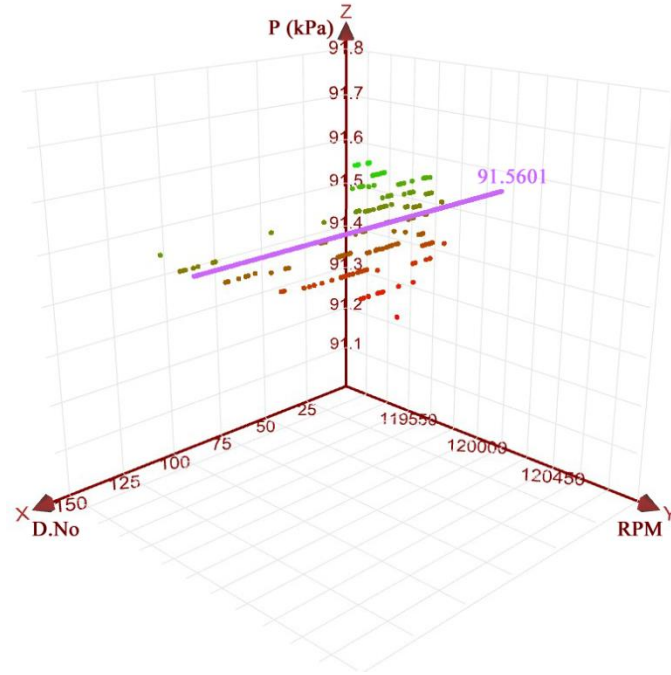
Deneysel Turbojet motorun türbin komponenti üzerinden elde edilen giriş basınç ve çıkış basınç verileri ortalamaları sırasıyla Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de görülmektedir. Türbin giriş basınç verilerinin ortalaması olarak 343.6633 kPa ve çıkış basınç verilerinin ortalaması olarak 146.8383 kPa elde edilmiştir.



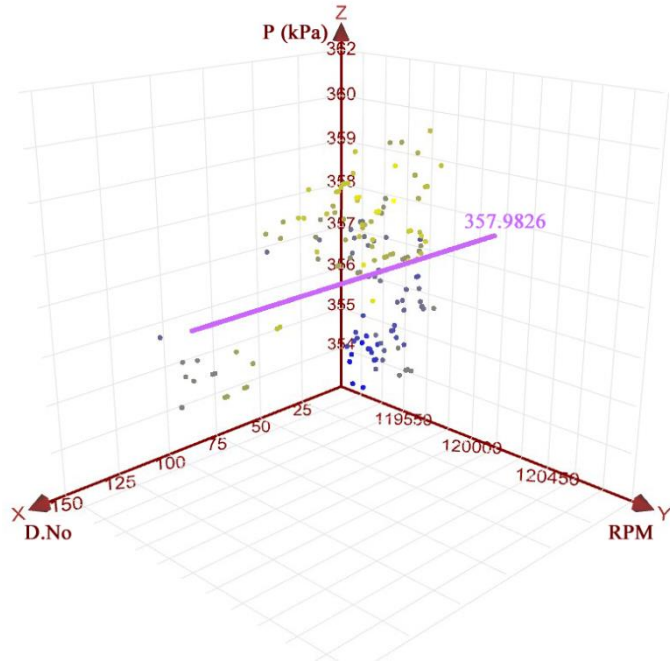
Şekil 3.1. Kompresör giriş sıcaklığı deney verilerinin ortalama değeri



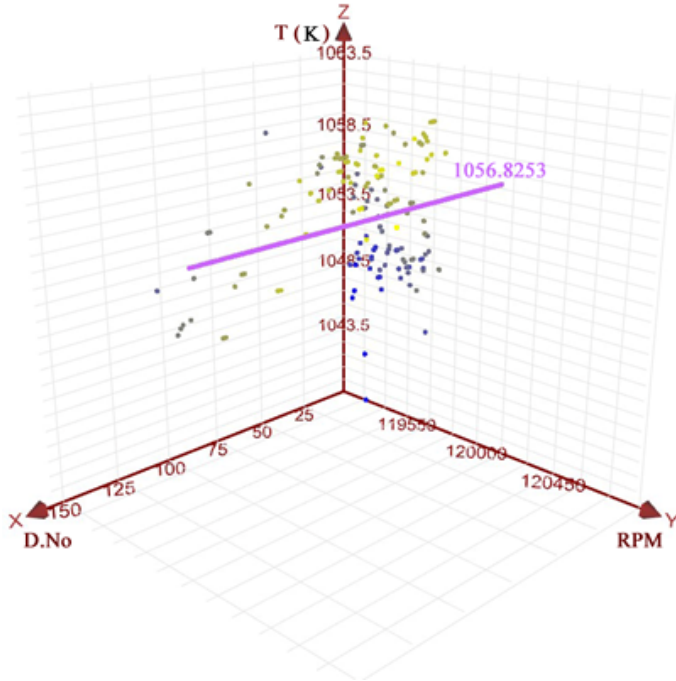
Şekil 3.2. Kompresör çıkış sıcaklığı deney verilerinin ortalama değeri



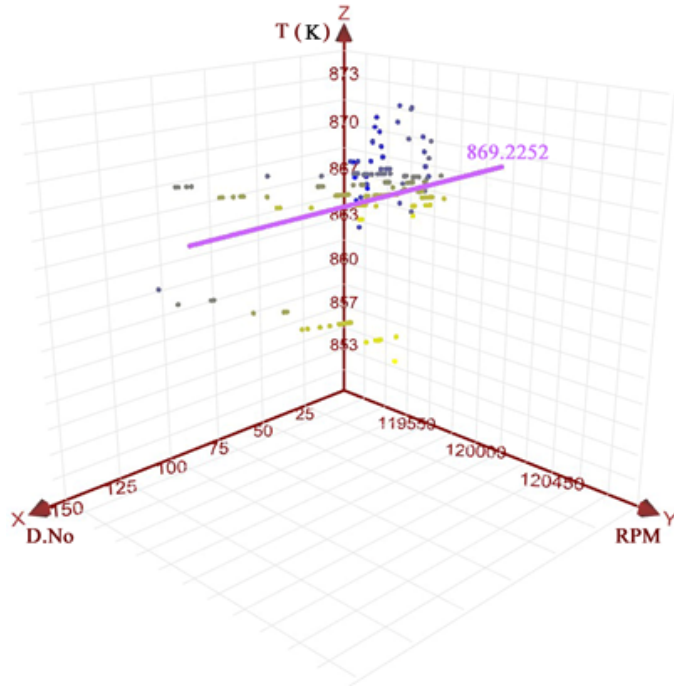
Şekil 3.3. Kompresör giriş basıncı deney verilerinin ortalama değeri



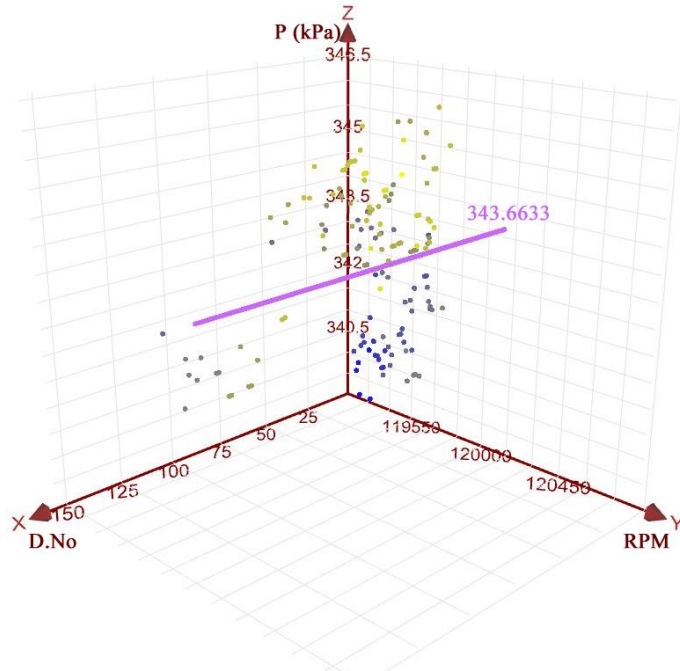
Şekil 3.4. Kompresör çıkış basıncı deney verilerinin ortalama değeri



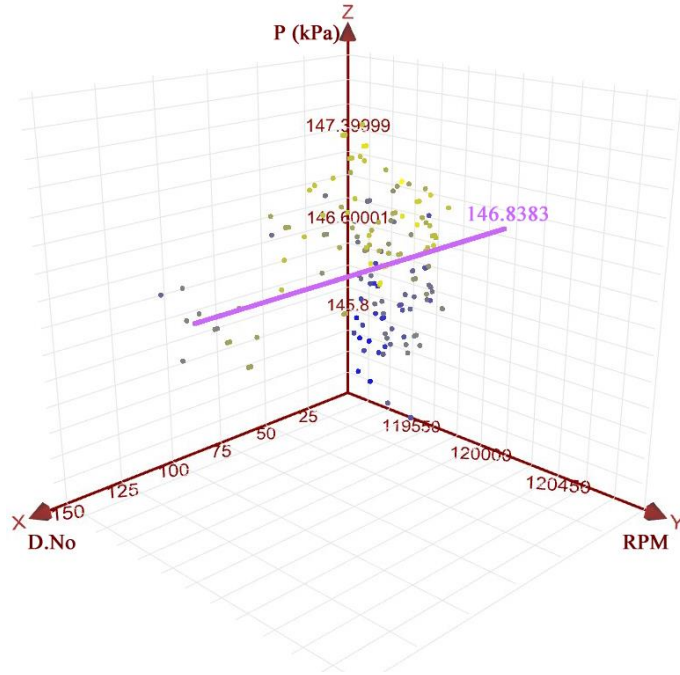
Şekil 3.5. Türbin giriş sıcaklığı deney verilerinin ortalama değeri



Şekil 3.6. Türbin çıkış sıcaklığı deney verilerinin ortalama değeri



Şekil 3.7. Türbin giriş basıncı deney verilerinin ortalama değeri



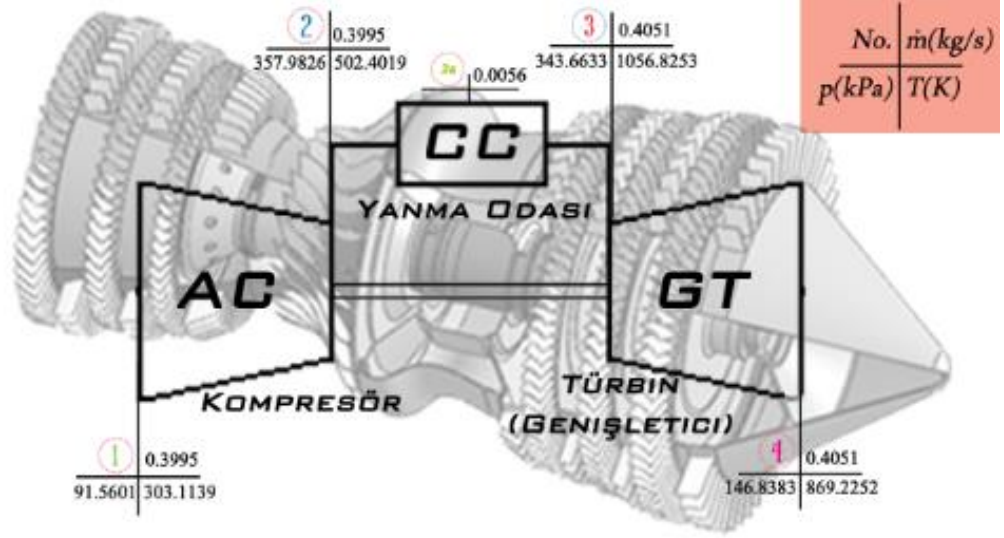
Şekil 3.8. Türbin çıkış basıncı deney verilerinin ortalama değeri.

Şekil 3.1-3.8’de komponent bazında grafik halinde verilen sıcaklık ve basınç verilerinin Çizelge 3.1’de komponentte giren madde ve kütleli debisiyle birlikte görülmektedir.

Çizelge 3.1. Sistem için kütleli debi, sıcaklık ve basınç verileri

No	Debi (kg/s)	Sıcaklık (K)	Basınç (kPa)
1 Hava	0.3995	303.1139	91.5601
2 Hava	0.3995	502.4019	357.9826
2a Yakıt	0.0056	303.1139	91.5601
3 Yanma Ürünleri	0.4051	1056.8253	343.6633
4 Yanma Ürünleri	0.4051	869.2252	146.8383

Deneysel Turbojet motorun sistem şeması Şekil 3.9’da verilmiştir. Sistem şeması üzerinde komponentlere verilen istasyon numaraları, giriş-çıkış sıcaklıkları ve debileri gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Deneysel Turbojet motorun sistem şeması

Deneysel Turbojet motorunda kullanılan yakıt türü, havacılık yakıtı olarak tanımlanan kerozen tipi JP-8 yakıttır. NATO kod numarası F-34 olarak tanımlanan, diğer bir adıyla JP-8; Amerika Birleşik Devletleri Savunma Bakanlığı tanımına göre (Department of Defense, United States of America 2013) statik dağıtıcı, korozyon önleyici, yağlama kabiliyeti iyileştirici, yakıt sistemi buzlanma önleyici ve antioksidan içeren kerozen tipi gaz türbin yakıtı olarak geçmektedir.

Literatürde kerozenin (JP-8) kabul gören kimyasal formülü $C_{11}H_{21}$ ve yakıtın alt ısıl değeri 43370.596 kJ/kg'dır (SAE ARP1533 2004). Edwards ve Maurice (2001) ve, Violi ve ark. (2002)'nin literatüre sunduğu makalelerde kerozenin sahip olduğu Hidrojen/Karbon (H/C) oranı 1.91 olarak belirtilmiştir. Yakıtın diğer özelliklerine “*Experimental formulation and kinetic model for JP-8 surrogate mixtures; Turbine fuel, aviation, kerosene type JP-8 (NATO F-34), NATO F-35, and JP-8+100 (NATO F-37); Surrogate Mixtures to Represent Complex Aviation and Rocket Fuels*” makalelerinden ulaşılabilir.

Testo 350 XL emisyon ölçüm cihazının ölçüm parametreleri ve birimleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Çizelge 3.2’de cihazın ölçebildiği maddeler ve ölçüm birimleri ayrıntısıyla belirtilmiştir.

Bu parametrelere ve ölçüm birimlerine göre, yanma ürünleri emisyon ölçümü analizinde elde edilen veriler Çizelge 3.3'de görülmektedir. Elde edilen verilerin düzenlenmesi (3.1-3.5)'e göre yapılmıştır. Geriye kalan su buharı (H₂O) ve nitrojen (N₂) gerçek yanma denkleminin denkleştirilmesi sonucu elde edilmiştir.

Çizelge 3.2. Emisyon ölçüm cihazının ölçüm parametreleri ve birimleri (Cihaz göstergesi resmi referanstan türetilmiştir)

Gösterge	Parametre	Birim
O ₂	Oksijen	%
CO	Karbon monoksit	ppm, %, g/GJ, mgm ³ , mgKW
NO	Nitrojen monoksit	ppm, %, g/GJ, mgm ³ , mgKW
SO ₂	Sülfür dioksit	ppm, %, g/GJ, mgm ³ , mgKW
NO ₂	Nitrojen dioksit	ppm, %, g/GJ, mgm ³ , mgKW
C _x H _y	Hidrokarbon	ppm, %, g/GJ, mgm ³ , mgKW
H ₂	Hidrojen	ppm
NO _x	Nitrojen oksit	ppm, %, g/GJ, mgm ³ , mgKW
FT	Baca gaz sıcaklığı	°C, °F
AmbT	Çevre havası sıcaklığı	°C, °F
deltaT	Sıcaklık farkı T ₁ - T ₂	°C, °F
T ₁	Sıcaklık T ₁	°C, °F
T ₂	Sıcaklık T ₂	°C, °F
qA	Baca gazı kayıp	%
CO ₂	Karbon dioksit	%
Lamb	Hava oranı	-
Eta	Verim	%
dCO	Karbon monoksit	ppm

Çizelge 3.3. Yanma ürünleri emisyon ölçümü analizinde elde edilen veriler

	Milyonda Bir Birim (Parts per million, ppm)	Hacimsel Oran (vol. frac.%)	Gerçek Yanma Denklemi Molar Miktar (kmol)	Yanma Ürünleri Karışım İçi Yüzde Değerleri (%)
H₂	13.8049	-	0.0047942162	0.001236533
H₂O			16.0812720046	4.14770966
HC (CH₄)	931.8537	-	0.3236175667	0.083468006
NO	6.6341	-	0.0023039146	0.00059423
NO₂	27.5946	-	0.0095831538	0.002471704
CO	1110.5415	-	0.3856729204	0.099473431
CO₂	-	2.9632	10.2907095129	2.654197706
O₂	-	15.77	63.5818937346	16.39915268
N₂	-	-	297.0346586072	76.61169605

Yanma ürünlerinden hidrojen (H₂), yanmamış hidrokarbon (HC, CH₄), nitrojen oksit (NO), nitrojen dioksit (NO₂), karbon monoksit (CO) yanma ürünleri madde miktarı karışımında milyonda bir birimlik madde olarak (ppm) ölçülmüş ve Çizelge 3.3’de verilmiştir. Yanma ürünlerinden karbon dioksit (CO₂) ve oksijen (O₂) hacimsel oran olarak ölçülmüş ve Çizelge 3.3’de gösterilmiştir. Bütün yanma ürünleri önce molar orana daha sonra mol sayılarına çevrilerek gerçek yanma denklemi denkleştirilmiştir. Milyonda bir birim madde cinsinden (ppm) molar orana geçiş (3.1)’de gösterilmiştir.

$$ppm_i = y_i \times 10^6 \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’de ppm_i , milyonda bir madde miktarını, y_i ise molar oranı ifade etmektedir. Bir maddenin verilen kütesinin kaç kmol içerdiği (3.2)’den hesaplanır.

$$m (kg) = N(kmol) \times M\left(\frac{kg}{kmol}\right) \quad (3.2)$$

Denklemler 3.2’de m kütle, N mol sayısı ve M moleküler ağırlıktır. Kütle oran (3.3)’den hesaplanır.

$$x_i = m_i/m_{tot} \quad (3.3)$$

Denklemler 3.3’de x_i maddenin kütle oranını, m_i i’ maddenin kütlesini ve m_{tot} toplam madde miktarını sembolize eder.

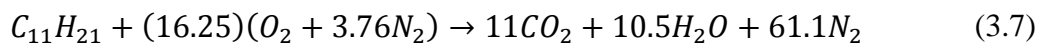
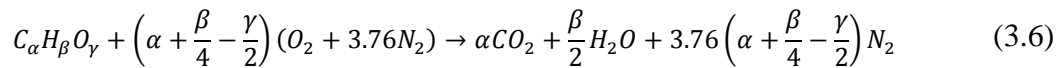
i maddenin toplam madde içerisindeki molar oranı (3.4)’den hesaplanır. y_i i maddenin molar oranını, N_i i maddenin mol miktarını ve N_{tot} toplam madde mol miktarını sembolize eder.

$$y_i = N_i/N_{tot} \quad (3.4)$$

İdeal gaz karışımları için Dalton’un toplanan basınçlar yasası ve Amagat’ın toplanan hacimler yasasına göre bir ideal gaz karışımı için molar oran ve hacimsel oran birbirine eşittir (3.5).

$$y_i = \frac{N_i}{N_{tot}} = \frac{V_i}{V_{tot}} = \frac{p_i}{p_{tot}} = vol. frac. \quad (3.5)$$

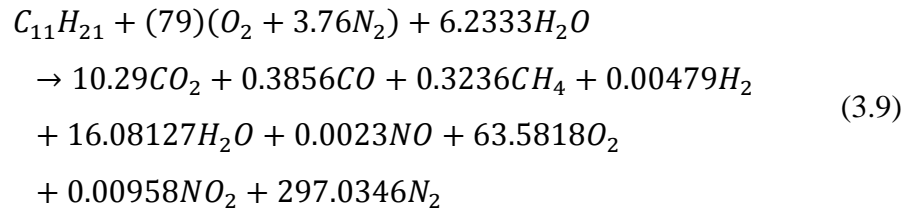
Deneysel Turbojet motorun stokiyometrik yanma denklemi (3.6) ve JP8-tanımından elde edilerek (3.7)’de gösterilmiştir.



Turbojet motordan elde edilen hava debisi ve yakıt debisi verileri doğrultusunda (3.8)’den hava-yakıt oranı 70.758 (kg hava/kg yakıt) bulunmuştur.

$$HY = \frac{m_{hava}}{m_{yakit}} \quad (3.8)$$

Turbojet motorda kullanılan yakıtın denkleştirilmiş gerçek yanma denklemi (3.9)'da görülmektedir. Denkleştirilmiş gerçek yanma denkleminde “(79)(O₂ + 3.76N₂)” bölümü kuru havayı, “6.2333H₂O” bölümü nem kısmını göstermektedir.



Çevre basıncı ve çevre sıcaklığı elde edilen veriler ortalaması doğrultusunda sırasıyla 91.1575 kPa ve 303.15 K'dir. Havanın bağıl nem oranı ise %35'dir. Nemli hava ile yanmada nem miktarının hesabı Cengel ve Boles (2008) örnek 15-3 mevcuttur. Bu doğrultuda havadaki nemin mol miktarı 6.2333 kmol olarak denkleştirilmiş gerçek yanma denkleminde yerini almıştır. Nemli hava içerisindeki bileşenler Çizelge 3.4'de görülmektedir. Çizelge 3.4'e göre hava %77.7 nitrojen, %20.66 oksijen, %1.63 su buharı ve eser miktarda diğer maddeleri içermektedir.

Çizelge 3.4. Atmosfer havasının bileşenleri

Bileşenler	Hava Bileşenleri Mol Miktarı (kmol)	Hava Bileşenleri Mol Oranları (%)
O₂	79.0001601440	20.66584361
N₂	297.0406021	77.70357196
H₂O	6.2333013542	1.630584428

Elde edilen veriler ışığında analizlerde kullanılan kabuller aşağıda belirtilmiştir.

- ✚ Turbojet motorun sürekli akışlı sürekli açık (steady-state, steady-flow) sistem olarak çalıştırılmıştır.
- ✚ Hava ve yanma ürünleri ideal gaz kabul edilmiştir.
- ✚ Turbojet motorun komponentleri olan kompresör, yanma odası ve türbinin adyabatik proses olarak çalıştığı kabul edilmiştir.
- ✚ Yanma odasındaki basınç düşümü %6'dır ((Boyce 2012; Lefebvre and Ballal 2010).
- ✚ Hava kompresöre çevre koşullarında girmektedir.
- ✚ Her bir komponent için kinetik enerji-ekserji ve potansiyel enerji-ekserji ihmal edilmiştir.
- ✚ Ekserji analizi değişken özgül ısılar (tam çözüm) yaklaşımıyla gerçekleştirilmiştir.
- ✚ İleri ekserji analizini gerçekleştirebilmek için net güç (\dot{W}_{net}) ve hava-yakıt oranı ($\frac{m_{hava}}{m_{yakıt}}$) sabit alınmıştır.

Ekserji ve ileri ekserji analizi için gerekli olan hava ve yanma ürünlerinin özgül ısıları, değişken özgül ısılar (tam çözüm) yaklaşımı ile Gordon ve McBride (1971), Heywood (1988), McBride ve ark. (1993) ve McBride ve ark. (2002) göre hesaplanmıştır. Shomate denklemleri olarak verilen bu matrisler havadaki ve yanma ürünlerindeki her bir bileşen için hazırlanmıştır. Değişen sıcaklığa bağlı olarak Çizelge 3.5'de katsayıları ve (3.10-3.12)'de sabit basınçta özgül ısı, entalpi ve entropi hesabı için formüller görülmektedir.

$$\frac{\tilde{c}_{p,i}}{R_u} = \alpha_{i1} + \alpha_{i2}T + \alpha_{i3}T^2 + \alpha_{i4}T^3 + \alpha_{i5}T^4 \quad (3.10)$$

$$\frac{\tilde{h}_i}{R_u T} = \alpha_{i1} + \frac{\alpha_{i2}}{2}T + \frac{\alpha_{i3}}{3}T^2 + \frac{\alpha_{i4}}{4}T^3 + \frac{\alpha_{i5}}{5}T^4 + \frac{\alpha_{i6}}{T} \quad (3.11)$$

$$\frac{\tilde{s}_i}{R_u} = \alpha_{i1} \ln T + \alpha_{i2}T + \frac{\alpha_{i3}}{2}T^2 + \frac{\alpha_{i4}}{3}T^3 + \frac{\alpha_{i5}}{4}T^4 + \alpha_{i7} \quad (3.12)$$

Çizelge 3.5. Maddelerin katsayıları (Heywood 1988)

Species	T range, K	$\alpha_{i,1}$	$\alpha_{i,2}$	$\alpha_{i,3}$	$\alpha_{i,4}$	$\alpha_{i,5}$	$\alpha_{i,6}$	$\alpha_{i,7}$
CO ₂	1000-5000	0.44608(+1)	0.30982(-2)	-0.12393(-5)	0.22741(-9)	-0.15526(-13)	-0.48961(+5)	-0.98636
	300-1000	0.24008(+1)	0.87351(-2)	-0.66071(-5)	0.20022(-8)	0.63274(-15)	-0.48378(+5)	0.96951(+1)
H ₂ O	1000-5000	0.27168(+1)	0.29451(-2)	-0.80224(-6)	0.10227(-9)	-0.48472(-14)	-0.29906(+5)	0.66306(+1)
	300-1000	0.40701(+1)	-0.11084(-2)	0.41521(-5)	-0.29637(-8)	0.80702(-12)	-0.30280(+5)	-0.32270
CO	1000-5000	0.29841(+1)	0.14891(-2)	-0.57900(-6)	0.10365(-9)	-0.69354(-14)	-0.14245(+5)	0.63479(+1)
	300-1000	0.37101(+1)	-0.16191(-2)	0.36924(-5)	-0.20320(-8)	0.23953(-12)	-0.14356(+5)	0.29555(+1)
H ₂	1000-5000	0.31002(+1)	0.51119(-3)	0.52644(-7)	-0.34910(-10)	0.36945(-14)	-0.87738(+3)	-0.19629(+1)
	300-1000	0.30574(+1)	0.26765(-2)	-0.58099(-5)	0.55210(-8)	-0.18123(-11)	-0.98890(+3)	-0.22997(+1)
O ₂	1000-5000	0.36220(+1)	0.73618(-3)	-0.19652(-6)	0.36202(-10)	-0.28946(-14)	-0.12020(+4)	0.36151(+1)
	300-1000	0.36256(+1)	-0.18782(-2)	0.70555(-5)	-0.67635(-8)	0.21556(-11)	-0.10475(+4)	0.43053(+1)
N ₂	1000-5000	0.28963(+1)	0.15155(-2)	-0.57235(-6)	0.99807(-10)	-0.65224(-14)	-0.90586(+3)	0.61615(+1)
	300-1000	0.36748(+1)	-0.12082(-2)	0.23240(-5)	-0.63218(-9)	-0.22577(-12)	-0.10612(+4)	0.23580(+1)
OH	1000-5000	0.29106(+1)	0.95932(-3)	-0.19442(-6)	0.13757(-10)	0.14225(-15)	0.39354(+4)	0.54423(+1)
	1000-5000	0.31890(+1)	0.13382(-2)	-0.52899(-6)	0.95919(-10)	-0.64848(-14)	0.98283(+4)	0.67458(+1)
O	1000-5000	0.25421(+1)	-0.27551(-4)	-0.31028(-8)	0.45511(-11)	-0.43681(-15)	0.29231(+5)	0.49203(+1)
	1000-5000	0.25(+1)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.25472(+5)	-0.46012

$$c_{p, \text{gen}} = c_p(T) = \frac{N_{\text{CO}_2} M_{\text{CO}_2} c_{p, \text{CO}_2} + N_{\text{CO}} M_{\text{CO}} c_{p, \text{CO}} + N_{\text{CN}_2} M_{\text{CN}_2} c_{p, \text{CN}_2} + N_{\text{H}_2} M_{\text{H}_2} c_{p, \text{H}_2} + N_{\text{H}_2\text{O}} M_{\text{H}_2\text{O}} c_{p, \text{H}_2\text{O}} + N_{\text{H}_2\text{O}} M_{\text{H}_2\text{O}} c_{p, \text{H}_2\text{O}} + N_{\text{H}_2\text{O}} M_{\text{H}_2\text{O}} c_{p, \text{H}_2\text{O}} + N_{\text{H}_2\text{O}} M_{\text{H}_2\text{O}} c_{p, \text{H}_2\text{O}} + N_{\text{H}_2\text{O}} M_{\text{H}_2\text{O}} c_{p, \text{H}_2\text{O}} + N_{\text{H}_2\text{O}} M_{\text{H}_2\text{O}} c_{p, \text{H}_2\text{O}}}{N_{\text{CO}_2} M_{\text{CO}_2} + N_{\text{CO}} M_{\text{CO}} + N_{\text{CN}_2} M_{\text{CN}_2} + N_{\text{H}_2} M_{\text{H}_2} + N_{\text{H}_2\text{O}} M_{\text{H}_2\text{O}} + N_{\text{H}_2\text{O}} M_{\text{H}_2\text{O}} + N_{\text{H}_2\text{O}} M_{\text{H}_2\text{O}} + N_{\text{H}_2\text{O}} M_{\text{H}_2\text{O}} + N_{\text{H}_2\text{O}} M_{\text{H}_2\text{O}} + N_{\text{H}_2\text{O}} M_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (3.13)$$

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

4.1. Ekserji Analizi Sonuçları

Deneysel Turbojet motorundan alınan veriler doğrultusunda gerçekleştirilen ekserji analizi sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Kompresöre giren havanın sıcaklık ve basınç değerleri çevre koşulları ile aynı olmasından dolayı fiziksel ekserji değeri sıfırdır. Ayrıca kompresöre giren havanın kimyasal ekserji değeri 0.7035 kW olarak hesaplanmıştır. Havanın kimyasal ekserji değeri ihmal edilebilir bir değer olduğu için genellikle literatürde göz önünde bulundurulmaz.

Kompresör çıkışı havanın fiziksel ekserjisi 66.9969 kW olarak hesaplanmıştır. Kompresör çıkışı havanın toplam ekserjisi, kimyasal ekserji ihmal edilmediği durum için, 67.7004 kW olarak bulunmuştur.

Yanma odasına giren yakıtın kimyasal formülü ve alt ısıl değerinden yola çıkarak hesapladığımız kimyasal ekserji değeri 335.5087 kW’dır.

Türbin girişi (yanma odası çıkışı) yanma ürünlerinin fiziksel ekserjisi 218.5473 kW iken kimyasal ekserjisi 17.3313 kW olarak hesaplanmıştır. Türbin girişi toplam ekserji miktarı 235.8786 kW’dır.

Çizelge 4.1. Sistemin ekserji sonuçları

Durum	Madde	Ekserji Miktarları (kW)		
		Fiziksel Ekserji	+ Kimyasal Ekserji	= Toplam Ekserji
1	Hava	0.0000	0.7035	0.7035
2	Hava	66.9969	0.7035	67.7004
2a	Yakıt	0.0000	335.5087	335.5087
3	Yanma Ürünleri	218.5473	17.3313	235.8786
4	Yanma Ürünleri	126.9203	17.3313	144.2516

Türbin çıkışı yanma ürünlerinin fiziksel ekserjisi 126.9203 kW ve kimyasal ekserji miktarı (kimyasal bileşim değişmediği için) 17.3313 kW'dır. Türbin çıkışı toplam ekserji miktarı 144.2516 kW olarak hesaplanmıştır.

Sistemin ekserji yıkım analizi “*Bölüm 2.2.2. Ekserji ile sistem değerlendirme parametreleri*” doğrultusunda Çizelge 4.2’de ve Şekil 4.1’de verilmiştir. Deneysel Turbojet motorun ekserji yıkım analiz çizelgesinde, gaz türbin sisteminde meydana gelen toplam ekserji yıkım miktarının bir yüzdesi olarak komponent bazında meydana gelen ekserji yıkım oranı, yakıt ile gaz türbin sistemine giren ekserji miktarının bir yüzdesi olarak komponent bazında meydana gelen ekserji yıkım oranı ve türbin çıkışındaki çevreye atılan ekserji kaybı oranı gösterilmiştir. Deneysel Turbojet motorda toplam ekserji yıkımı göz önünde bulundurulduğunda, %90.7046 ile yanma odası ekserji yıkım payının en yükseğine sahiptir. Geri kalan komponentlere bakıldığında %8.2078 ile kompresör ve %1.0876 ile türbin ekserji yıkımından sorumludur. Yakıt ile Turbojet motora giren ekserji miktarının bir yüzdesi olarak komponent bazında meydana gelen ekserji yıkım oranı değerlendirildiğinde yakıtın en yüksek ekserji yıkım oranı %49.7693 ile yanma odasında meydana gelmektedir. Yakıtın sisteme sağladığı ekserji miktarının %42.9949’u türbinden çevreye atılan ekserji kaybı oranıdır.

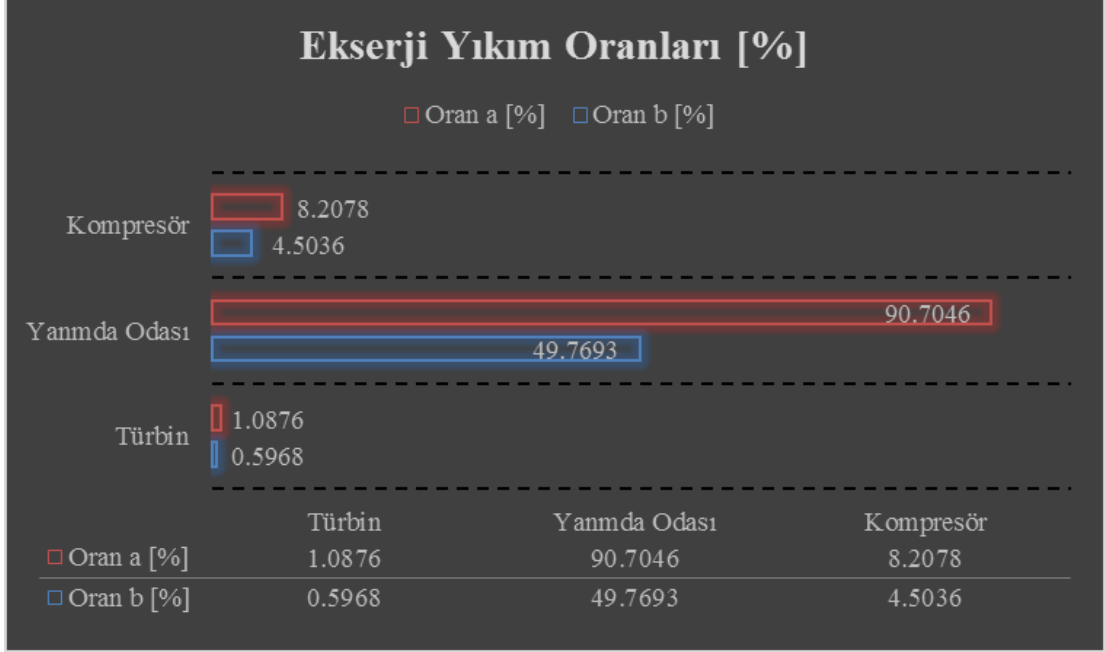
Çizelge 4.2. Sistemin ekserji yıkım analizi

Ekserji Yıkımı			
Komponent	Miktarı (kW)	Oran^a [%]	Oran^b [%]
Kompresör	15.1416	8.2078	4.5036
Yanma Odası	167.3305	90.7046	49.7693
Türbin	2.0064	1.0876	0.5968
Toplam	184.4784	100.0000	54.8697
^c Ekserji Kaybı			42.9949

^aGaz türbin sisteminde meydana gelen toplam ekserji yıkım miktarının bir yüzdesi olarak komponent bazında meydana gelen ekserji yıkım oranı (İzafi ekserji tüketim oranı [ϕ]).

^bYakıt ile gaz türbin sistemine giren ekserji miktarının bir yüzdesi olarak komponent bazında meydana gelen ekserji yıkım oranı (Yakıt ekserjisi tüketim oranı $[\phi]$).

^cTürbin çıkışındaki (durum 4) çevreye atılan ekserji kaybı oranı.



^aGaz türbin sisteminde meydana gelen toplam ekserji yıkım miktarının bir yüzdesi olarak komponent bazında meydana gelen ekserji yıkım oranı (İzafi ekserji tüketim oranı $[\phi]$).

^bYakıt ile gaz türbin sistemine giren ekserji miktarının bir yüzdesi olarak komponent bazında meydana gelen ekserji yıkım oranı (Yakıt ekserjisi tüketim oranı $[\phi]$).

Şekil 4.1. Sistem komponentlerin ekserji yıkım oranları [^a,^b]

Sistemin yakıt-ürün tabanlı ekserji miktarları Çizelge 4.3’de ve Şekil 4.2’de görülmektedir. Çizelge 4.3’de ayrıca sistemin değerlendirildiği iki farklı ekserji verimi (Ürün/Yakıt ve Çıkış/Giriş) sunulmuştur. Deneysel Turbojet motorun komponentlerinde yakıt ekserjisi olarak tanımlanan miktara bakıldığında (Çizelge 2.6) kompresöre sağlanan yakıt ekserjisi miktarı 82.1385 kW, yanma odasına sağlanan yakıt ekserji miktarı 335.5087 kW ve türbine sağlanan yakıt ekserji miktarı 91.6270 kW’dir. Sistem komponentlerinin ürün ekserji miktarlarına bakıldığında kompresörün ürün ekserji miktarı 66.9969 kW, yanma odası ürün ekserji miktarı 168.1782 kW ve türbin ürün ekserji miktarı 89.6206 kW’dir. Sistem komponentlerinin ekserji verimi “Bölüm 2.2.2.1. Ekserji verimi” de anlatılan hem ürün/yakıt tabanlı hem de çıkış/giriş tabanlı olarak

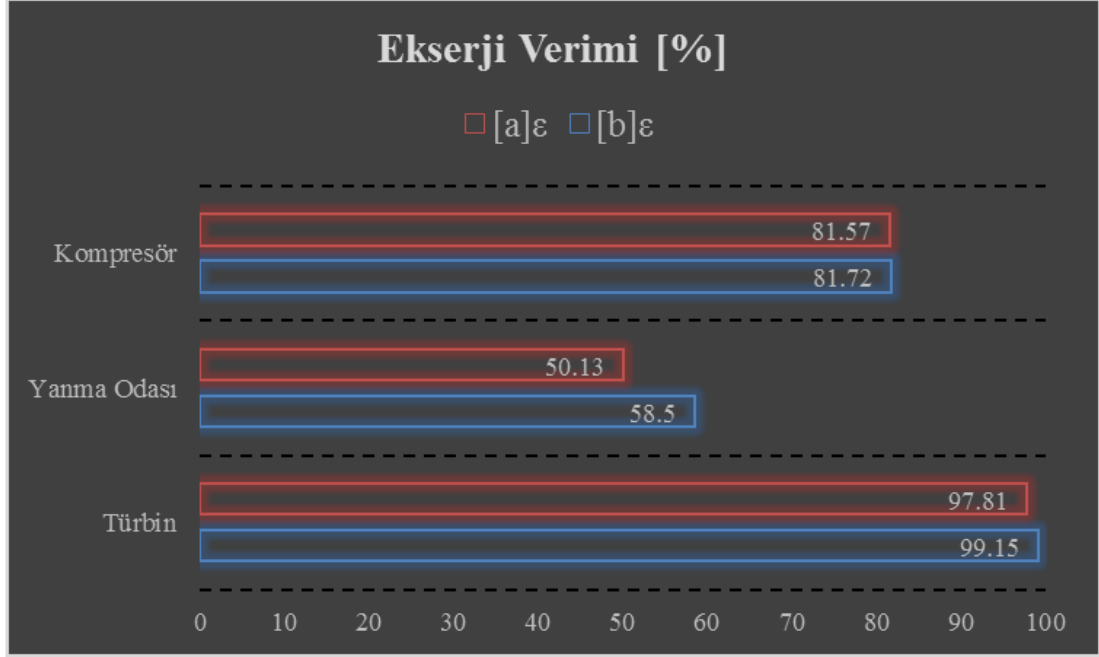
hesaplanmıştır. Ürün/Yakıt tabanlı sistem komponentleri ekserji verimliliğine bakıldığında kompresör %81.57, yanma odası %50.13 ve türbin %97.81'dir. Çıkış/Giriş tabanlı ekserji verimliliğine bakıldığında sırasıyla kompresör, yanma odası ve türbin için %81.72, %58.50, %99.15'dir. “Bölüm 2.2.2. Ekserji ile sistem değerlendirme” parametrelerinden biri olan ekserji iyileştirme potansiyelleri her bir komponent için bakıldığında sırasıyla kompresör, yanma odası ve türbin için 2.7905 kW, 83.4477 kW, 0.0439 kW'dır. En yüksek iyileştirme potansiyeli yanma odasında bulunmuştur. Ekserji analizi bize sistem komponentlerinin iyileştirme potansiyellerini sunarken ne kadarının kaçınılmaz olduğu hakkında bilgi vermemektedir. Bu yüzden ileri ekserji analizi ile birlikte iyileştirme potansiyeli hakkında detaylı bilgiye sahip olunmaktadır.

Çizelge 4.3. Sistemin yakıt-ürün tabanlı ekserji miktarları

Komponent	Gerçek Operasyon Durumu					$\dot{E}x_{IP}$ [kW]
	$\dot{E}x_{F,k}$ [kW]	$\dot{E}x_{P,k}$ [kW]	$\dot{E}x_{D,k}$ [kW]	$\eta_{ex,k}^a$ [%]	$\eta_{ex,k}^b$ [%]	
Kompresör	82.1385	66.9969	15.1416	81.57	81.72	2.7905
Yanma Odası	335.5087	168.1782	167.3305	50.13	58.50	83.4477
Türbin	91.6270	89.6206	2.0064	97.81	99.15	0.0439

^aÜrün/Yakıt (product/fuel) temelli ekserji verimi.

^bÇıkış/Giriş (outlet/inlet) temelli ekserji verimi.



*[a] Ürün/Yakıt (product/fuel) temelli ekserji verimi.

*[b] Giriş/Çıkış (outlet/inlet) temelli ekserji verimi.

Şekil 4.2. Sistem komponentlerinin ekserji verimleri (*[a],[b])

4.2. İleri Ekserji Analizi Sonuçları

Deneysel Turbojet motorun ileri ekserji analizi sonucunda sistem ve komponentleri için içsel ekserji yıkım miktarı, dışsal ekserji yıkım miktarı, kaçınılmaz ekserji yıkım miktarı ve kaçınılabılır ekserji yıkım miktarı Çizelge 4.4'de görülmektedir.

Turbojet motorun kompresör komponenti için, toplam ekserji yıkım miktarının (15.1416 kW) büyük bir çoğunluğu içsel ekserji yıkım miktarı (13.5473 kW) olarak hesaplanmıştır. Dışsal ekserji yıkım miktarı ise 1.5943 kW olarak bulunmuştur. Kompresör komponentinin kaçınılmaz ve kaçınılabılır ekserji yıkım miktarlarına bakıldığında; 8.8805 kW kaçınılmaz ekserji yıkım miktarı ve 6.2611 kW kaçınılabılır ekserji yıkım miktarına sahip olduğu belirlenmiştir.

Turbojet motorun yanma odası komponenti için, toplam ekserji yıkım miktarının içsel ve dışsal ekserji yıkım miktarı olarak incelenmesi sonucu içsel ekserji yıkım miktarının (94.3725 kW) dışsal ekserji yıkım miktarından (72.9580)

daha fazla olduğu bulunmuştur. Yanma odasının kaçınılmaz ekserji yıkım miktarı ise 101.5428 kW olarak hesaplanmıştır. Turbojet motorun yanma odasında meydana gelen ekserji yıkım miktarının büyük bir bölümünden kaçınılamayacağı belirlenmiştir.

Turbojet motorun türbin komponentine bakıldığında, ekserji yıkım miktarının içsel-dışsal olarak ayrıştığı bölümde içsel ekserji yıkım miktarının 1.6366 kW ile dışsal ekserji yıkım miktarından (0.3698) fazla olduğu bulunmuştur. Türbin komponentinin kaçınılabılır-kaçınılamaz ekserji yıkım miktarı ayrışmasında ise 1.1189 kW ile kaçınılabılır ekserji yıkım miktarının fazla olduğu hesaplanmıştır.

Çizelge 4.4. Sistem komponentlerinin ileri ekserji analiz sonuçları (içsel, dışsal, kaçınılabılır, kaçınılamaz ekserji yıkım miktarları)

Komponent	$\dot{E}x_{D,k}$ [kW]	$\dot{E}x_{D,k}^{EN}$ [kW]	$\dot{E}x_{D,k}^{EX}$ [kW]	$\dot{E}x_{D,k}^{UN}$ [kW]	$\dot{E}x_{D,k}^{AV}$ [kW]
Kompresör	15.1416	13.5473	1.5943	8.8805	6.2611
Yanma Odası	167.3305	94.3725	72.9580	101.5428	65.7877
Türbin	2.0064	1.6366	0.3698	0.8875	1.1189
Sistem	184.4784	109.5563	74.9222	111.3109	73.1676

Çizelge 4.5. Her bir komponent için ürün ekserji başına kaçınılamaz ekserji yıkım miktarı

Komponent	$\left(\frac{\dot{E}x_D}{\dot{E}x_P}\right)_k^{UN}$	Kabuller
Kompresör	0.1325	Kompresör kaçınılmaz verimi (unavoidable efficiency) %90
Yanma Odası	0.6038	Adyabatik durumlar altında yanma odasında tam yanma, adyabatik alev sıcaklığı 2100K
Türbin	0.0099	Türbin kaçınılmaz verimi (unavoidable efficiency) %94

Turbojet motorun kaçınılmaz ekserji yıkım miktarı hesabında yapılan kabuller Çizelge 4.5’de verilmiştir. Kompresör komponenti kaçınılmaz verimi %90 ve türbin kaçınılmaz verimi %94 seçilmiştir.

Çizelge 4.6. Sistem komponentlerinin dışsal ekserji yıkım analizi

<i>k-th</i> Komponent	$\dot{E}x_{D,k}^{EX}$ [kW]	<i>r-th</i> komponent	$\dot{E}x_{D,k}^{EX,r}$ [kW]
Kompresör	1.5943	CC	1.0421
		GT	0.2684
		mexogenous	0.2838
Yanma odası	72.9580	AC	18.2196
		GT	32.2839
		mexogenous	22.4545
Türbin	0.3698	AC	0.0543
		CC	0.2384
		mexogenous	0.0771

Turbojet motorun her bir komponentinin dışsal ekserji yıkım miktarı ayrışması Çizelge 4.6’da gösterilmiştir.

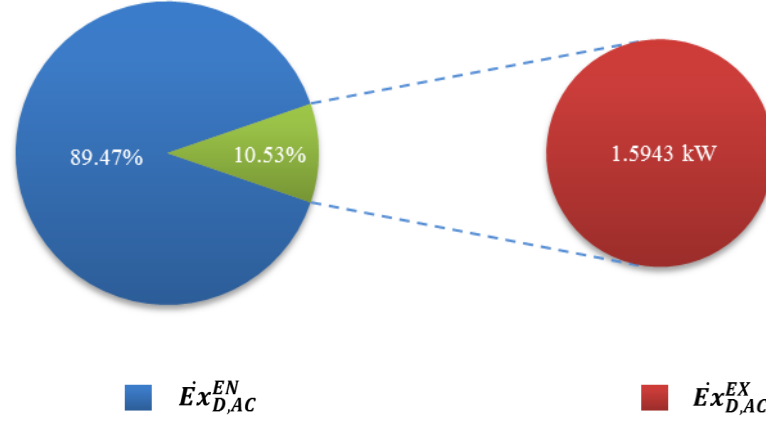
Kompresör komponentinin sahip olduğu dışsal ekserji yıkım miktarının büyük bir kısmı yanma odasından (1.0421 kW) kaynaklıdır. Türbin ve birleşik ekserji yıkımı etkisi ise sırasıyla 0.2684 kW ve 0.2838 kW olarak bulunmuştur.

Yanma odası dışsal ekserji yıkım miktarının büyük bir kısmını türbin komponenti oluşturmaktadır. Yanma odası dışsal ekserji yıkım miktar ayrışması için kompresör, türbin ve birleşik ekserji yıkım miktarı sırasıyla, 18.2196 kW, 32.2839 kW ve 22.4545 kW olarak hesaplanmıştır.

Türbin komponentinin dışsal ekserji yıkım miktarında büyük payı yanma odası sahiplenmiştir. Türbin komponenti üzerinde kompresörün etkisi 0.0543 kW ve birleşik ekserji yıkımının etkisi 0.0771 kW olarak bulunmuştur.

Şekil 4.3’de Turbojet motorun kompresör komponentinin dışsal ekserji yıkım miktarı ve içsel dışsal ekserji yıkım yüzdeleri görülmektedir. Kompresör

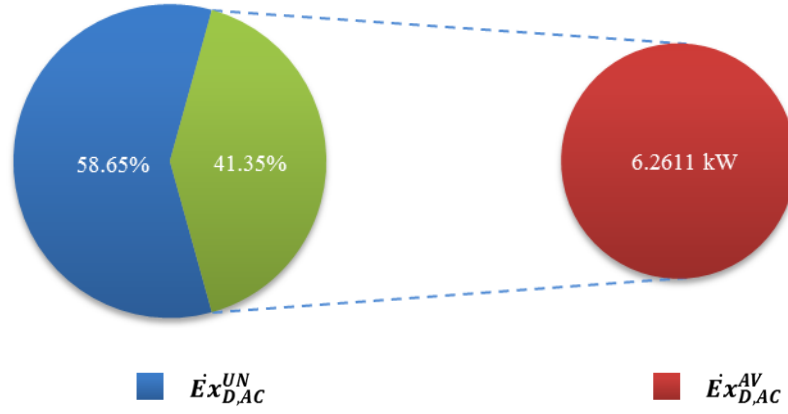
komponentinin toplam ekserji yıkımının %89.47'si içsel ekserji yıkımı ve %10.53 dışsal ekserji yıkımıdır. Şekil 4.3'den de anlaşıldığı üzere diğer komponentlerin kompresör komponenti üzerine etkisi 1.5943 kW'tır.



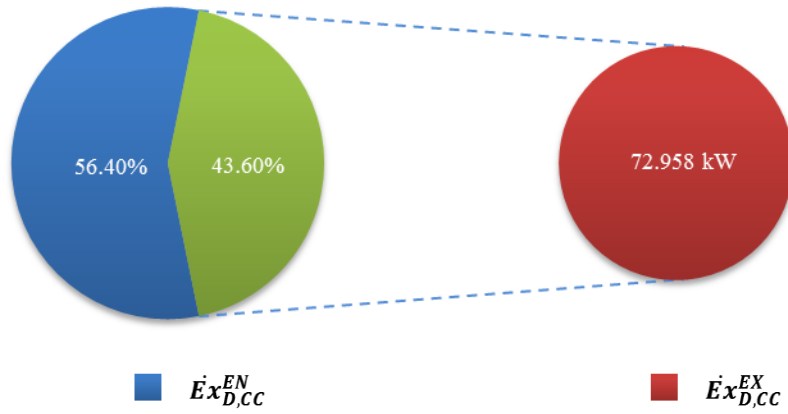
Şekil 4.3. Kompresör dışsal ekserji yıkım miktarı ve içsel-dışsal ekserji yıkım oranları

Şekil 4.4'de kompresör komponentinin kaçınılabılır ekserji yıkım miktarı ve kaçınılabılır-kaçınılamaz ekserji yıkım yüzdeleri görülmektedir. Kompresörün %58.65'i kaçınılamaz ekserji, %41.35'i kaçınılabılır ekserji yıkımdır. Kompresör komponentinin kaçınılabılır ekserji yıkım miktarı 6.2611 kW'tır.

Turbojet motorun yanma odası dışsal ekserji yıkım miktarı ve içsel-dışsal ekserji yıkım oranları Şekil 4.5'de görülmektedir. Yanma odasının sahip olduğu ekserji yıkım miktarının %56.4'ü içsel ekserji yıkımı, %43.6'sı dışsal ekserji yıkımıdır. Diğer komponentlerden kaynaklı ekserji yıkım miktarı 72.958 kW'tır.

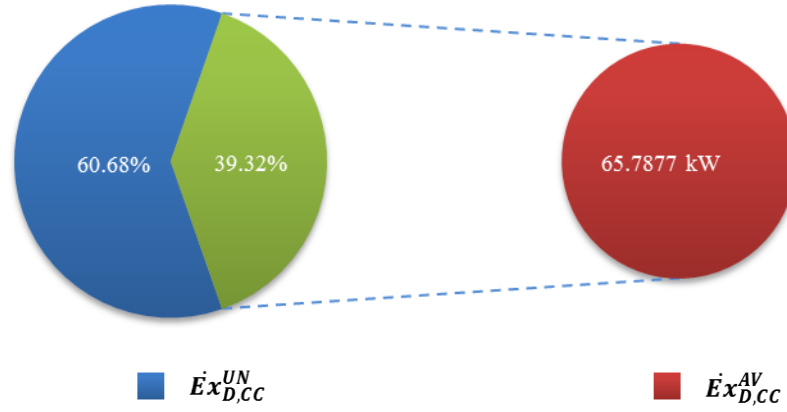


Şekil 4.4. Kompresör kaçınılabilir ekserji yıkım miktarı ve kaçınılabilir-kaçınılamaz ekserji yıkım oranları



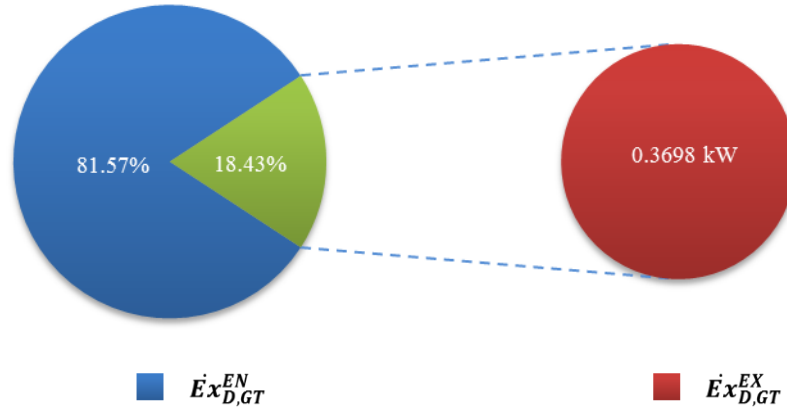
Şekil 4.5. Yanma odası dışsal ekserji yıkım miktarı ve içsel-dışsal ekserji yıkım oranları

Yanma odasının kaçınılabilir ekserji yıkım miktarı ve kaçınılabilir-kaçınılamaz ekserji yıkım oranları Şekil 4.6'da görülmektedir. Yanma odasının ekserji yıkım miktarının %60.68'si kaçınılamaz ekserji yıkım miktarıdır. Yanma odasının kaçınılabilir ekserji yıkım bölümü 65.7877 kW'tır.



Şekil 4.6. Yanma odası kaçınılabilir ekserji yıkım miktarı ve kaçınılabilir-kaçınılamaz ekserji yıkım oranları

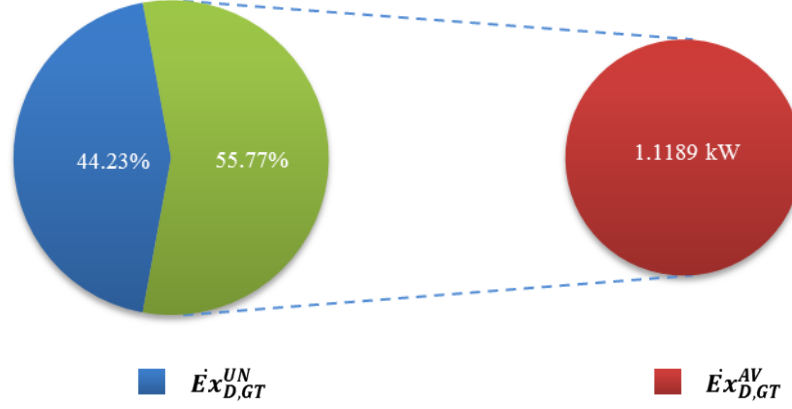
Şekil 4.7’de türbin komponenti dışsal ekserji yıkım miktarı ve içsel-dışsal ekserji yıkım oranı verilmiştir. Türbin komponenti ekserji yıkım miktarının büyük bir bölümü içsel ekserji yıkım miktarıdır. Dışsal ekserji yıkım miktarı ise %18.43 ile 0.3698 kW’lık miktarı kapsar.



Şekil 4.7. Türbin dışsal ekserji yıkım miktarı ve içsel-dışsal ekserji yıkım oranları

Türbin komponenti kaçınılabilir ekserji yıkım miktarı ve kaçınılabilir-kaçınılamaz ekserji yıkım oranları Şekil 4.8’de görülmektedir. Türbinin ekserji

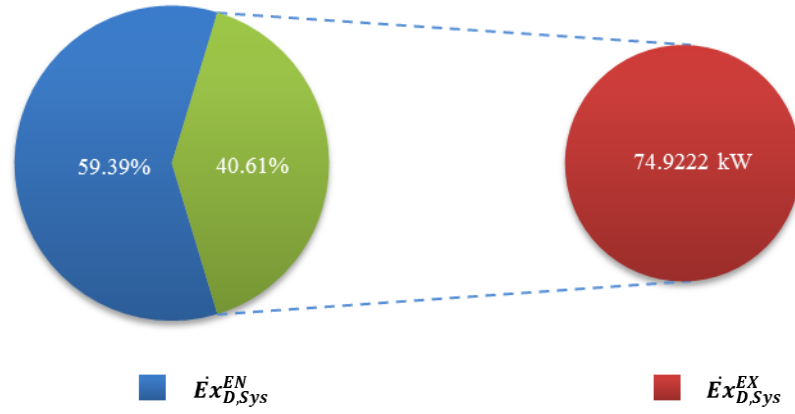
yıkımının %55.77'si kaçınılabilir ekserji yıkımıyken, %44.23'ü kaçınılamaz ekserji yıkımıdır.



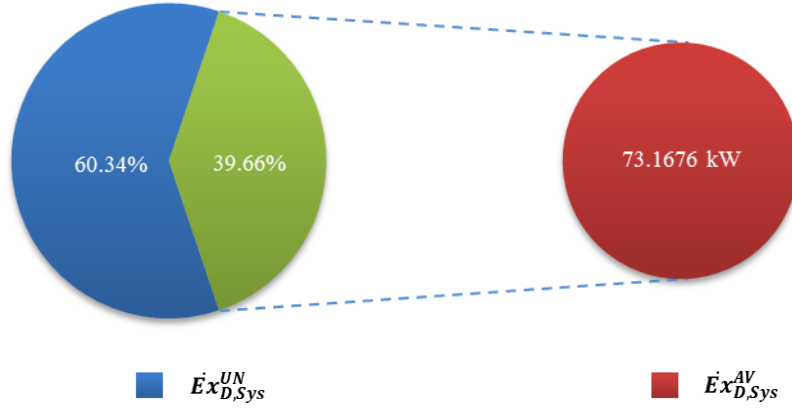
Şekil 4.8. Türbin kaçınılabilir ekserji yıkım miktarı ve kaçınılabilir-kaçınılamaz ekserji yıkım oranları

Tüm sistemin içsel-dışsal ekserji yıkım oranlarına bakıldığında, sistemin %59.39'nun içsel ekserji yıkımı olduğu geriye kalan %40.61'nin dışsal ekserji yıkımı olduğu Şekil 4.9'da verilmiştir. Sistemin dışsal ekserji yıkımı miktarı 74.9222 kW'tır.

Tüm sistemin kaçınılabilir – kaçınılamaz ekserji yıkım oranları Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Sistemin ekserji yıkımının sadece %39.66'sından kaçınılabilir olduğu ve kaçınılamaz bölümün %60.34'ünü içerdiği tespit edilmiştir.

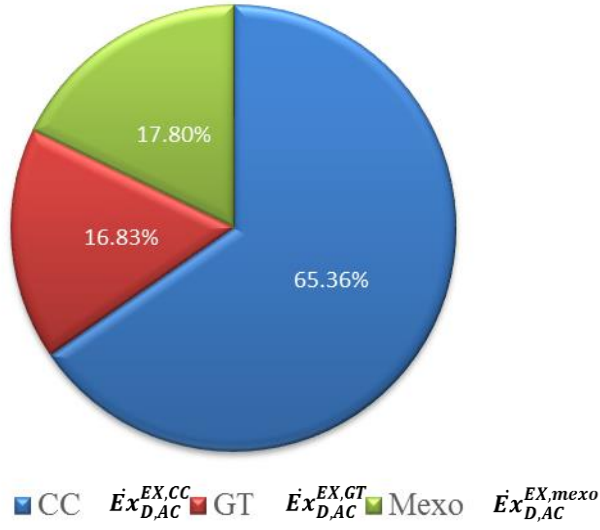


Şekil 4.9. Sistemin dışsal ekserji yıkım miktarı ve içsel-dışsal ekserji yıkım oranları



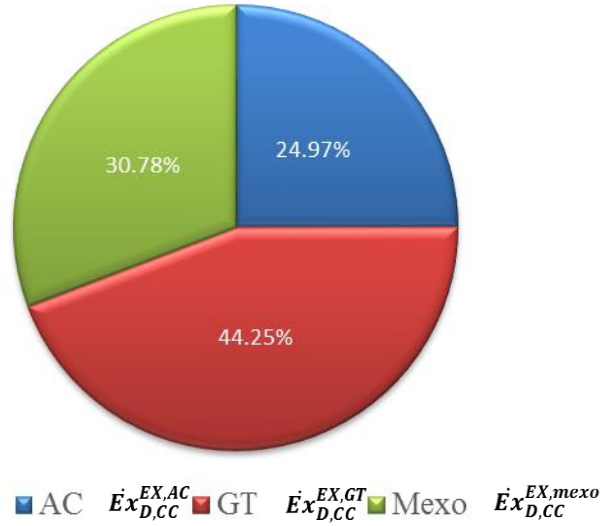
Şekil 4.10. Sistemin kaçınılabilir ekserji yıkım miktarı ve kaçınılabilir-kaçınılamaz ekserji yıkım oranları

Sistem komponentlerinin kompresör dışsal ekserji yıkımı üzerindeki oranları incelendiğinde, yanma odasının %65.36 ile en büyük paya sahip olduğu Şekil 4.11'den görülmektedir. Türbin komponentinin, kompresör dışsal ekserji yıkımı üzerine etkisi %16.83, birleşik ekserji yıkımı etkisi ise %17.80'dir.



Şekil 4.11. Sistem komponentlerinin kompresör dışsal ekserji yıkımı üzerindeki oranları

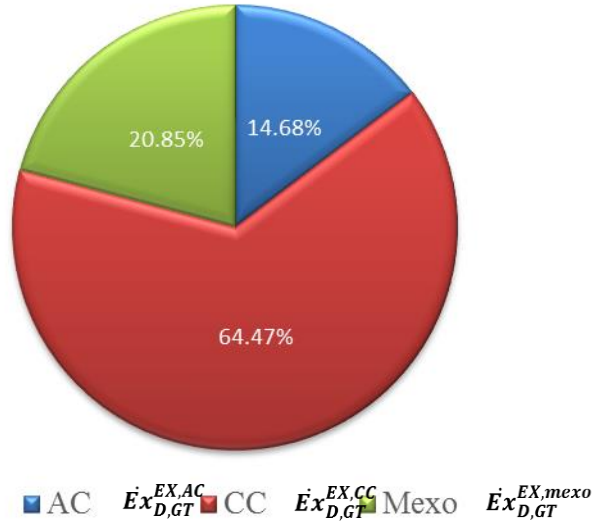
Yanma odası dışsal ekserji yıkımı üzerine diğer sistem komponentlerinin etkisi oransal olarak Şekil 4.12’de verilmiştir. Yanma odası dışsal ekserji yıkımı üzerine %44.25 türbin, %30.78 birleşik ekserji yıkımı ve %24.97 kompresörün etkisi vardır.



Şekil 4.12. Sistem komponentlerinin yanma odası dışsal ekserji yıkımı üzerindeki oranları

Türbin dışsal ekserji yıkımı üzerine diğer komponentlerin etkisine bakıldığında, yanma odasının etkisinin en büyük paya sahip olduğu görülmektedir

(Şekil 4.13). Kompresörün etkisi %14.68, birleşik ekserji yıkımı etkisi ise %20.85'dir.



Şekil 4.13. Sistem komponentlerinin türbin dışsal ekserji yıkımı üzerindeki oranları

Çizelge 4.7'de sistem için iki ayrışmanın kombinasyonu görülmektedir. Kompresör komponentinin kaçınılamaz dışsal ekserji yıkım miktarında en büyük paya yanma odası sahiptir. Kaçınılabılır dışsal ekserji yıkım miktarında ise yanma odası 0.2098 kW ile en yüksek değere sahiptir. Yanma odası dışsal kaçınılamaz ekserji yıkım miktarında türbinin etkisi diğer komponentlerin etkisinden daha fazladır. Kaçınılabılır dışsal ekserji yıkım miktarında türbindeki bir iyileştirme ile dışsal ekserji yıkım miktarı azaltılabilir. Türbin kaçınılamaz dışsal ekserji yıkım miktarında yanma odasının etkisi en yüksek paya sahiptir. Kaçınılabılır bileşende ise yanma odasındaki bir iyileştirme ile yıkım miktarı azaltılabilir. Tüm sistemde dışsal ekserji miktarının sadece 50.1803 kW'ından kaçınılabılırken, içsel kaçınılabılır miktar 22.9873 kW'dır.

Çizelge 4.7. Sistem için iki ayrışmanın kombinasyonu

Komponent	$\dot{E}_{D,k}^{UN,EN}$	$\dot{E}_{D,k}^{UN,EX}$			$\dot{E}_{D,k}^{AV,EN}$	$\dot{E}_{D,k}^{AV,EX}$		
	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	
Kompresör	7.5856	1.2949	CC	0.9235	5.9617	0.2994	CC	0.2098
			GT	0.0945			GT	0.0329
			mexo	0.2769			mexo	0.0567
Yanma Odası	78.2578	23.2850	AC	5.7661	16.1147	49.6730	AC	12.5874
			GT	15.5254			GT	32.4512
			mexo	1.9935			mexo	4.6344
Türbin	0.7256	0.1619	AC	0.0196	0.9110	0.2079	AC	0.0348
			CC	0.1069			CC	0.1216
			mexo	0.0354			mexo	0.0515
Sistem	86.5690	24.7419			22.9873	50.1803		

4.3. Sürdürülebilirlik İndikatörleri Analiz Sonuçları

Deneysel Turbojet motorunun sürdürülebilirlik indikatör sonuçları Çizelge 4.8’de verilmiştir. Tüm sistemin ekserji verimi %27.25 hesaplanmıştır. Ekserji verim değeri literatürde mevcut olan diğer Turbojet motorlarla karşılaştırıldığında yakın bir değer olduğu görülmüştür. Sistemin atık ekserji oranına bakıldığında 0.9756 olduğu bulunmuştur. Dolayısıyla sistemin sürdürülebilir bir sistem olmadığı ve geliştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Daha öncede bahsedildiği üzere havacılık Turbojet motorun emisyonları tekrar motorda kullanılamamasından dolayı geri kazanılabilir ekserji oranı sıfır olarak bulunmuştur. Sistemin ekserji yıkım faktörü 0.5466’dır. Yani sisteme yakıt tarafından sağlanan ekserji miktarının yaklaşık olarak yarısı kullanılamamaktadır. Kullanılmayan bu miktar hem atık ekserji miktarını dolayısıyla sistemin çevresel etki faktörünü arttırmakta ve sistemin sürdürülebilirlik indeksini azaltmaktadır. Sistemin sürdürülebilirlik indeksi 0.2793 bulunmuştur.

Çizelge 4.8. Sistemin sürdürülebilirlik indikatör sonuçları

Sürdürülebilirlik İndikatörleri	Değer
Ekserji verimi [η_{ex}]	0.2725
Atık ekserji oranı (Waste exergy ratio) [r_{we}]	0.9756
Geri kazanılabilir ekserji oranı (Recoverable exergy rate) [r_{re}]	0.0000
Ekserji yıkım faktörü (Exergy destruction factor) [f_{exdf}]	0.5466
Çevresel etki faktörü (Environmental effect factor) [f_{eef}]	3.5800
Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi (Exergetic sustainability index) [Θ_{esi}]	0.2793

4.4. Yapılması Planlanan Çalışmalar

Gelecekte yapılması planlanan ilk çalışma Turbojet motor test düzeneğinin Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) ve Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı (ÖYP) kapsamında destek alınarak Anadolu Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi bünyesinde kurulmasıdır.

Test düzeneği tüm altyapısıyla birlikte Anadolu Üniversitesi bünyesine kurularak farklı Turbojet motorların test verilerinin alınmasına olanak sağlayacaktır. Turbojet motor enstrümantasyonu doktora sürem içerisinde gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

Planlanan bir başka çalışma ise, Anadolu Üniversitesi bünyesine kurulacak olan motor test düzeneği ile farklı tip yakıtların verilerinin elde edileceği olacaktır. Literatürde aero-türevli gaz türbinli motorlarda sınınan mevcut alternatif ve yenilebilir yakıtlar, kurulacak olan test düzeneğinde sınınanarak termodinamik veriler elde edilebilecektir.

KAYNAKLAR

- Açikkalp, E. (2013), *Doğal gaz yakıtlı bir elektrik üretim tesisi ve bir trijenerasyon sisteminin ileri ekserji ve eksergoekonomik yöntemleri kullanarak analizi*, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Açikkalp, E., Aras, H. ve Hepbasli, A. (2014), “Advanced exergy analysis of a trigeneration system with a diesel–gas engine operating in a refrigerator plant building,” *Energy and Buildings*, 80, 268-275.
- Açikkalp, E., Aras, H. ve Hepbasli, A. (2014), “Advanced exergy analysis of an electricity-generating facility using natural gas,” *Energy Conversion and Management*, 82, 146-153.
- Ahern, J.E. (1980), *The Exergy Method of Energy Systems Analysis*, Wiley, New York, USA.
- Ahrendts, J. (1980), “Reference States,” *Energy – The International Journal*, 5, 667-677.
- Airbus (2009), “The Global Market Forecast 2009-2028”.
https://www.faa.gov/news/conferences_events/aviation_forecast_2010/agenda/media/CF%20Oliver%20Von%20Tronchin.pdf
- Altayib, K. (2011), *Energy, exergy and exergoeconomic analyses of gas-turbine based systems*, Ontario Üniversitesi, Makine Mühendisliği Programı.
- Aravind, P.V. (2010), *Exergy analysis*, Delft University of Technology, TU Munich.
https://campus.tum.de/tumonline/LV_TX.wbDisplayTerminDoc?pTerminDocNr=2557
- Atılğan, R., Turan, O., Altuntas, O., Aydın, H. ve Synylo, K. (2013), “Environmental impact assessment of a turboprop engine with the aid of exergy,” *Energy*, 58, 664-671.
- Aydın, H., Turan, O., Karakoç, T.H. ve Midilli, A. (2013), “Exergo-sustainability indicators of a turboprop aircraft for the phases of a flight,” *Energy*, 58, 550-560.

- Aydın, H., Turan, O., Midilli, A. ve Karakoc, T.H. (2012a), “Exergetic and exergo-economic analysis of a turboprop engine: a case study for CT7-9C,” *International Journal of Exergy*, Vol. 11, No. 1, 69-88.
- Aydın, H. (2013), “Exergetic sustainability analysis of LM6000 gas turbine power plant with steam cycle,” *Energy*, 57, 766-774.
- Aydın, H., Turan, O., Karakoc, T.H. ve Midilli, A. (2012b), “Component-based exergetic measures of an experimental turboprop/turboshaft engine for propeller aircrafts and helicopters,” *Int. J. Exergy*, Vol. 11 No. 3, 322-348.
- Bahiraeei, F., Saray, R.K. ve Salehzadeh, A. (2011), “Investigation of potential of improvement of helical coils based on avoidable and unavoidable exergy destruction concepts,” *Energy*, 36, 3113-3119.
- Ballı, Ö. (2008), Kojenerasyon sistemlerinin enerji, kullanılabilirlik (Ekserji) ve ekserjiekonomik analiz yöntemleri kullanılarak performansının değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Ballı, B. (2014), “Afterburning effect on the energetic and exergetic performance of an experimental turbojet engine (TJE),” *International Journal of Exergy*, Vol. 14, No. 2, 212-243.
- Ballı, O. ve Hepbaslı, A. (2013), “Energetic and exergetic analyses of T56 turboprop engine,” *Energy Conversion and Management*, 73, 106-120.
- Ballı, O. ve Hepbaslı, A. (2014), “Exergoeconomic, sustainability and environmental damage cost analyses of T56 turboprop engine,” *Energy*, 64, 582-600.
- Ballı, O., Aras, H., Aras, N. ve Hepbaslı, A. (2008), “Exergetic and exergoeconomic analysis of an Aircraft Jet Engine (AJE),” *Int. J. Exergy*, Vol. 5, No. 5/6, 567-581.
- Bejan, A. (1996), *Entropy Generation Minimization*, CRC Press, Florida, USA.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G. ve Moran, M. (1996), *Thermal Design & Optimization*, John Wiley & Sons Inc., A.B.D.
- Boyana, A., Blanco-Marigorta, A.-M., Morosuk, T. ve Tsatsaronis, G. (2012), “Steam Methane Reforming System for Hydrogen Production: Advanced

- Exergetic Analysis,” *International Journal of Thermodynamics*, Vol. 15, No. 1, 1-9.
- Boyce, M.P. (2012) *Gas Turbine Engineering Handbook*, 4nd ed., Elsevier.
- Cassetti, G. ve Colombo, E. (2012), “Comparison between traditional methodologies and advanced exergy analyses for evaluating efficiency and externalities of energy systems,” *Proceedings Of Ecos 2012 - The 25th International Conference On Efficiency, Cost, Optimization, Simulation And Environmental Impact Of Energy Systems*, June 26-29, 2012, Perugia, Italy.
- Cengel, Y.A. ve Boles, M.A. (2008), *Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, Güven Bilimsel, Türkiye*.
- Cornelissen, R. L. (1997), *Thermodynamics and sustainable development; the use of exergy analysis and the reduction of irreversibility*. Universiteit Twente, Netherlands.
- Cziesla, F., Tsatsaronis, G. ve Gao, Z. (2006), “Avoidable thermodynamic inefficiencies and costs in an externally fired combined cycle power plant,” *Energy*, 31, 1472-1489.
- Çallak, M. (2013), *Akışkan yatak yanma sisteminin dinamik ve ileri ekserji analizi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bornova, İzmir*.
- Department of Defense, United States of America (2013), “Turbine fuel, aviation, kerosene type JP-8 (NATO F-34), NATO F-35, and JP-8+100 (NATO F-37), 25.
- Dincer, I. (2002), “The role of exergy in energy policy making,” *Energy policy*, 30 (2), 137-149.
- Dincer, I. ve Rosen, M.A. (2007), *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*, Elsevier, A.B.D.
- Edwards, T. ve Maurice, L.Q. (2001), “Surrogate Mixtures to Represent Complex Aviation and Rocket Fuels,” *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 17, No. 2, 461-466.

- Ehyaiei, M.A., Anjiridezfuli, A. ve Rosen, M.A. (2013), "Exergetic analysis of an aircraft turbojet engine with an afterburner," *Thermal Science*, Vol. 17, No. 4, 1181-1194.
- Erbay, Z. ve Hepbasli, A. (2013), "Advanced exergy analysis of a heat pump drying system used in food drying," *Drying Technology: An International Journal*, Vol. 31, No. 7, 802-810.
- Erbay, Z. ve Hepbasli, A. (2014), "Application of conventional and advanced exergy analyses to evaluate the performance of a ground-source heat pump (GSHP) dryer used in food drying," *Energy Conversion and Management*, 78, 499-507.
- Etele, J. ve Rosen, M.A. (2001), "Sensitivity of exergy efficiencies of aerospace engines to reference environment selection," *Exergy Int. J.*, Vol. 1, No. 2, 91-99.
- Gordon, S. ve McBride, B.J. (1971), "Computer program for the calculation of complex chemical equilibrium composition, rocket performance, incident and reflected shocks and Chapman Jouguet detonations," NASA Publication SP-273, NTIS number N71-37775.
- Gundersen, T. (2011), An introduction to the concept of exergy and energy quality.
<http://www.ivt.ntnu.no/ept/fag/tep4120/innhold/Exergy%20Light%20Version%204.pdf>
- Gungor, A., Erbay, Z., Hepbasli, A. ve Gunerhan, H. (2013), "Splitting the exergy destruction into avoidable and unavoidable parts of a gas engine heat pump (GEHP) for food drying processes based on experimental values," *Energy Conversion and Management*, 73, 309-316.
- Hassan, H.Z. (2013), "Evaluation of the local exergy destruction in the intake and fan of a turbofan engine," *Energy*, 63, 245-251.
- 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.
- Heywood, J.B. (1988) *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, New York.

- Hu, Y. (2012), Advanced exergy analysis for a solar double stage absorption chiller, Doktora Tezi, Carnegie Mellon University, School of Architecture, Pittsburgh, PA.
- Junior, S.O. (2012), Exergy: Production, Cost and Renewability (Green Energy and Technology), Springer, London.
- Karakoc, T.H., Turgut, E.T. ve Hepbasli, A. (2007), "A study on exergy analysis of a hydrogen fuelled turbofan engine," 3rd International Green Energy Conference, Sweden.
- Karakoç, T.H. (2008), Uzman gözüyle termodinamik uygulamaları, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Kay, J.M. (2002), On uncertainty, information and predictability. The relationship between exergy, entropy and information and uncertainty. <http://www.jameskay.ca/musings/info.html>
- Kelly, S. (2008), Energy systems improvement based on endogenous and exogenous exergy destruction, Doktora Tezi, Berlin Teknik Üniversitesi, Berlin.
- Kelly, S., Tsatsaronis, G. ve Morosuk, T. (2009), "Advanced exergetic analysis: Approaches for splitting the exergy destruction into endogenous and exogenous parts," Energy, 34, 384-391.
- Kotas, T.J. (1995), The Exergy Method of Thermal Plant Analysis, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida.
- Lefebvre, A.H. and Ballal, D.R. (2010) Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions, 3rd ed., CRC Press, London.
- Mahashabde, A., Wolfe, P., Ashok, A., Dorbian, C., He, Q., Fan, A., Lukachko, S., Mozdzanowska, A., Wollersheim, C., Barrett, S.R.H., Locke, M. ve Waitz, I.A. (2011), "Assessing the environmental impacts of aircraft noise and emissions," Progress in Aerospace Sciences, 47 (1), 15-52.
- McBride, B.J., Gordon, S. ve Reno, M.A. (1993), "Coefficients for calculating thermodynamic and transport properties of individual species," NASA Technical Memorandum 4513.

- McBride, B.J., Zehe, M.J. ve Gordon, S. (2002), "NASA Glenn coefficients for calculating thermodynamic properties of individual species," NASA/TP—2002-211556.
- Mert, M.S., Erdönmez, M.U., Dilmaç, Ö.F., Özkan, S. ve Bolat, E. (2009), "Advanced exergy analysis of a cogeneration plant in an iron and steel factory," 15Th International Energy and Environment fair and Conference.
- Midilli, A. ve Dincer, I. (2009), "Development of some exergetic parameters for PEM fuel cells for measuring environmental impact and sustainability," International Journal of Hydrogen Energy, 34 , 3858-3872.
- Midilli, A. ve Dincer, I. (2010), "Effects of some micro-level exergetic parameters of a PEMFC on the environment and sustainability," International Journal of Global Warming, 2, 65-80.
- 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.
- Morosuk, T. ve Tsatsaronis, G. (2008), "A new approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines," Energy, 33, 890-907.
- Morosuk, T. ve Tsatsaronis, G. (2009), "Advanced exergetic evaluation of refrigeration machines using different working fluids," Energy, 34, 2248-2258.
- Morosuk, T. ve Tsatsaronis, G. (2009), "Advanced exergy analysis for chemically reacting systems - Application to a simple open gas-turbine system," Int. J. of Thermodynamics, Vol. 12, No. 3, 105-111.
- Morosuk, T. ve Tsatsaronis, G. (2011), "Comparative evaluation of LNG e based cogeneration systems using advanced exergetic analysis," Energy, 36, 3771-3778.
- Morosuk, T., Tsatsaronis, G. ve Zhang, C. (2012), "Conventional thermodynamic and advanced exergetic analysis of a refrigeration machine using a Voorhees' compression process," Energy Conversion and Management, 60, 143-151.
- Morosuk, T., Tsatsaronis, G., Boyano A. ve Gantiva, C. (2012), "Advanced exergy-based analyses applied to a system including LNG regasification

- and electricity generation,” *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, Vol. 3, No. 1, 1-9.
- Penner, E. J. (1999), *Aviation and The Global Atmosphere*, Cambridge University Press, UK.
- Petrakopoulou, F. (2011), *Comparative evaluation of power plants with CO₂ capture: thermodynamic, economic and environmental performance*, Doktora Tezi, Berlin Teknik Üniversitesi, Fakultät III Prozesswissenschaften, Berlin.
- Petrakopoulou, F., Tsatsaronis, G. ve Morosuk, T. (2013), “CO₂ capture in a chemical looping combustion power plant evaluated with an advanced exergetic analysis,” *Environmental Progress & Sustainable Energy*, DOI 10.1002/ep.11848.
- Petrakopoulou, F., Tsatsaronis, G., Morosuk, T. ve Carassai, A. (2012), “Conventional and advanced exergetic analyses applied to a combined cycle power plant,” *Energy*, 41, 146-152.
- Ranasinghe, C. (2013), *Development of a program to determine hidden performance parameters of a gas turbine*, Yüksek Lisans Tezi, KTH Industrial Engineering and Management.
- Rant, Z. (1964), “Thermodynamische Bewertung der Verluste bei technischen Energieumwandlungen,” *Brennstoff-Wärme-Kraft*, 16 (9), 453-457.
- Razmara, N. ve Saray, R.K. (2010), “A simple gas turbine system and co-generation power plant improvement based on endogenous and exogenous exergy destruction,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 224, 433-447.
- Riggins, D. (2003), “The thermodynamic continuum of jet engine performance: The principle of lost work due to irreversibility in aerospace systems,” *Int. J. Thermodynamics*, Vol. 6, No. 3, 107-120.
- Rivero, R. ve Garfias, M. (2006), “Standard chemical exergy of elements updated,” *Energy*, 31, 3310-3326.

- Roth, B.A. ve Mavris, D.N. (2000), "A comparison of thermodynamic loss models applied to the J-79 turbojet engine," Joint Propulsion Conference and Exhibit, 36th, Huntsville, July, Alabama, USA, AIAA2000-3715.
- Russel, L.D. ve Adebisi, G.A. (1993), Classical Thermodynamics, Saunders College Publishers, Philadelphia.
- Soltani, S., Yari, M., Mahmoudi, S.M.S., Morosuk, T. ve Rosen, M.A. (2013), "Advanced exergy analysis applied to an externally-fired combined-cycle power plant integrated with a biomass gasification unit," Energy, 59, 775-780.
- Szargut, J., David, R.M. ve Steward, F. (1988), Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes, Hemisphere Publishing, New York.
- Taheri, K., Gadow, R. ve Killinger, A. (2014), "Exergy analysis as a developed concept of energy efficiency optimized processes: The case of thermal spray processes," Procedia CIRP, 17, 511-516.
- Tona, C., Raviolo, P.A., Pellegrini, L.F. ve Junior, S.O. (2010), "Exergy and thermoeconomic analysis of a turbofan engine during a typical commercial flight," Energy, 35, 952-959.
- Tsatsaronis, G. (1999), "Strengths and limitations of exergy analysis," Thermodynamic optimization of complex energy systems (Ed: Bejan, A. ve Mamut, E.), Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 93-100.
- Tsatsaronis, G. (2007), "Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics," Energy, 32, 249-253.
- Tsatsaronis, G. Kelly, S.O. ve Morosuk T.V. (2006), "Endogenous and exogenous exergy destruction in thermal systems," Proceedings of IMECE2006, 2006 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 5-10, 2006, Chicago, Illinois, USA, IMECE2006-13675.
- Tsatsaronis, G. ve Morosuk, T. (2010), "Advanced exergetic analysis of a novel system for generating electricity and vaporizing liquefied natural gas," Energy, 35, 820-829.

- Tsatsaronis, G. ve Morosuk, T. (2010), "Advanced exergetic analysis of a refrigeration system for liquefaction of natural gas," *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, Vol. 1, No. 1, 1-17.
- Tsatsaronis, G. ve Morosuk, T. (2012), "Advanced thermodynamic (exergetic) analysis," *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 395, doi:10.1088/1742-6596/395/1/012160.
- Tsatsaronis, G. ve Park, M.H. (2002), "On avoidable and unavoidable exergy destructions and investment costs in thermal systems," *Energy Conversion and Management*, 43, 1259-1270.
- Turan, O. (2012), "Effect of reference altitudes for a turbofan engine with the aid of specific-exergy based method," *Int. J. Exergy*, Vol. 11, No. 2, 252–270.
- Turan, O. (2012), "Exergetic effects of some design parameters on the small turbojet engine for unmanned air vehicle applications," *Energy*, 46, 51-61.
- Turan, O., Aydın, H., Karakoc, T.H. ve Midilli, A. (2014), "Some exergetic measures of a JT8D turbofan engine," *Journal of Automation and Control Engineering*, Vol. 2, No. 2, 110-114.
- Turgut, E.T., Karakoc, T.H. ve Hepbasli, A. (2007), "Exergetic analysis of an aircraft turbofan engine," *International Journal of Energy Research*, 31, 1383-1397.
- Turgut, E.T., Karakoc, T.H. ve Hepbasli, A. (2007), "Exergetic analysis of a turbofan engine: CF6-80," 3rd International Green Energy Conference, Sweden.
- Turgut, E.T., Karakoc, T.H., Hepbasli, A. ve Rosen, M.A. (2009), "Exergy analysis of a turbofan aircraft engine," *International Journal of Exergy*, Vol. 6, No. 2, 181-199.
- United States Environmental Protection Agency (EPA), Energy and Environmental Analysis (an ICF International Company) (2008), *Technology Characterization Steam Turbines*. http://www.epa.gov/chp/documents/catalog_chptech_steam_turbines.pdf

- Van Gool, W. (1997), "Energy policy: fairly tales and factualities," *Innovation and Technology-Strategies and Policies*, Reis AJPS (eds). Kluwer: Dordrecht; 93–105.
- Violi, A., Yan, S., Eddings, E.G., Sarofim, A.F., Granata, S., Faravelli, T. ve Ranzi, E. (2002), "Experimental formulation and kinetic model for JP-8 surrogate mixtures," *Combustion Science and Technology*, 174, 399-417.
- Vuckovic', G.D., Stojiljkovic', M.M., Vukic', M.V., Stefanovic', G.M. ve Dedic', E.M. (2014), "Advanced exergy analysis and exergoeconomic performance evaluation of thermal processes in an existing industrial plant," *Energy Conversion and Management*, 85, 655-662.
- Vuckovic', G.D., Vukic', M.V., Stojiljkovic', M.M. ve Vuckovic', D.D. (2012), "Avoidable and unavoidable exergy destruction and exergoeconomic evaluation of the thermal processes in a real industrial plant," *Thermal Science*, Vol. 16, No. 2, 433-446.
- Wang, L., Yang, Y., Morosuk, T. ve Tsatsaronis, G. (2012), "Advanced thermodynamic analysis and evaluation of a supercritical power plant," *Energies*, 5, 1850-1863.
- Wei, Z., Zhang, B., Wu, S., Chen, Q. Ve Tsatsaronis, G. (2012), "Energy-use analysis and evaluation of distillation systems through avoidable exergy destruction and investment costs," *Energy*, 42, 424-433.
- Xiang, J.Y., Cali, M., Santarelli, M. (2004), "Calculation for physical and chemical exergy of flows in systems elaborating mixed-phase flows and a case study in an IRSOFC plant," *International Journal of Energy Research*, 28, 101–115.

YAYINLAR

- ✚ **Ekici, S.**, Coban, K., Altuntas, O., & Karakoc, T. H. (2015). Sustainability Indicators As A Cornerstone Of Sustainable Aviation For Experimental Small Turbojet Engine. International Symposium on Sustainable Aviation.
- ✚ **Ekici, S.**, Altuntas, O., Acikkalp, E., & Karakoc, T. H. (2015). Endogenous and Exogenous Exergy Destruction of Experimental Small Turbojet Engine. International Symposium on Sustainable Aviation.
- ✚ **Ekici, S.**, Altuntas, O., Acikkalp, E., & Karakoc, T. H. (2015). Avoidable and Unavoidable Exergy Destruction of Experimental Small Turbojet Engine. International Symposium on Sustainable Aviation.
- ✚ **Ekici, S.**, Altuntas, O., Acikkalp, E., Sogut, M. Z., & Karakoc, T. H. (2015). Assessment of Thermodynamic Performance and Exergetic-Sustainability of Turboprop Engine Using Mixture of Kerosene and Methanol. International Journal of Exergy (in press)
- ✚ **Ekici, S.**, Coban, K., Altuntas, O., & Karakoc, T. H. (2015). Experimental and Numerical Investigations of a Small Turbojet Engine with the Aid of Exergy. 7th International Exergy, Energy and Environment Symposium (IEEEES-2015).
- ✚ Altuntas, O., **Ekici, S.**, Yalin, G., & Karakoc, T. H. (2014, October). Comparison of Auxiliary Power Unit (APU) and Ground Power Unit (GPU) with Life Cycle Analysis in Ground Operations: A Case Study for Domestic Flight in Turkey. In Applied Mechanics and Materials (Vol. 629, pp. 219-224).
- ✚ Yalin, G., **Ekici, S.**, Akyuz, M. K., Altuntas, O., & Karakoc, T. H. (2014). Life Cycle Assessment comparison, SOFC-GT APU with Traditional APU During Ground Operations for Domestic Flights in Turkey. The 2nd Biennial Conference on Sustainable Business, Energy and Development in Asia.
- ✚ **Ekici, S.**, Yalin, G., Altuntas, O., & Karakoc, T. H. (2013). Calculation of HC, CO and NOx from civil aviation in Turkey in 2012. International Journal of Environment and Pollution, 53(3), 232-244.

- ✚ Yalın, G., **Ekici, S.**, Altuntas, O., & Karakoc, T. H. (2013). The Life Cycle Assessment of a Pilot's Training Process. 8th International Green Energy Conference IGEC-8.