

**AIRBUS A-320 İKLİMLENDİRME SİSTEMİNDE
EKSERJİ VE İLERİ EKSERJİ ANALİZİ**

Süleyman Kağan AYAZ
Yüksek Lisans Tezi

Uçak-Gövde-Motor-Bakım Anabilim Dalı
Ağustos 2015

**Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir. Proje No: 1502F086**

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Süleyman Kağan AYZAZ'ın "Airbus A-320 İklimlendirme Sisteminde Ekserji ve İleri Ekserji Analizi" başlıklı Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 03.08.2015 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	: Yard. Doç. Dr. EMİN AÇIKKALP
Üye	: Prof. Dr. T.HİKMET KARAKOÇ
Üye	: Doç. Dr. HASAN YAMIK
Üye	: Yard. Doç. Dr. ALPER ULUDAĞ

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

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AIRBUS A-320 İKLİMLENDİRME SİSTEMİNDE EKSERJİ VE İLERİ EKSERJİ ANALİZİ

Süleyman Kağan AYAZ

**Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Uçak-Gövde-Motor-Bakım Anabilim Dalı**

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. Önder ALTUNTAŞ
II. Danışman: Yrd. Doç. Dr. Emin AÇIKKALP
2015, 49 Sayfa**

Bu tezde Airbus A-320 iklimlendirme sisteminde yer alan bir hava çevrim sistemi için 5 farklı yükseklikte enerji, ekserji ve ileri ekserji analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen değerler kıyaslanmıştır. 2007 yılında 16,800 olan hava aracı sayısı günümüzde 19,600'dür ve bu rakamın 2024 yılı itibariyle 35,300 olması beklenmektedir; yani gelecekte daha az enerji tüketen araçların ve sistemlerin varlığı günümüzden daha önemli olacaktır. Enerji kavramı, verim ifadelerinin belirlenmesinde gerekli olmasına karşın, verimsizliklerin tanımlanmasında ve ölçülmesinde yeterli değildir. Verimsizlikler ise ekserji kavramıyla açıklanır, ancak ekserji bir sistemin bileşenleri arasındaki etkileşimleri ve geliştirme potansiyellerini açıklamakta yetersizdir. Bu nedenle sistem içerisinde yer alan bileşenlerin birbirlerine olan etkileşimlerinin anlaşılabilmesi için ileri ekserji analizinin yapılmasına ihtiyaç vardır. İleri ekserji analizi sayesinde geliştirme potansiyeli en yüksek olan bileşenler ve meydana gelen ekserji yıkımlarının nedenleri bu tez kapsamında değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ekserji Analizi, İleri Ekserji Analizi, Verimsizlik, Hava Çevrim Sistemi.

ABSTRACT

Master of Science Thesis

EXERGY AND ADVANCED EXERGY ANALYSIS OF THE AIRCONDITIONING SYSTEM OF AIRBUS A-320

Süleyman Kağan AYAZ

**Anadolu University
Graduate School of Sciences
Department of Airframe and Powerplant Maintenance**

**Supervisor: Asst. Prof. Dr. Önder ALTUNTAŞ
Co-Supervisor: Asst. Prof. Dr. Emin AÇIKKALP
2015, 49 Pages**

In this thesis, energy, exergy and advanced exergy analysis at five different altitude have been performed for an air cycle machine that stands in the air conditioning system of Airbus A-320 and the values obtained have been compared.

In 2007 there were 16,800 aircrafts, today this number is 19,600 and by the year of 2024 it is expected to be 35,300, that is; presence of less energy consuming systems and devices are going to be more important in the future than today. Though the concept of energy is necessary for describing inefficiencies, it not accurate measuring and identifying them. The inefficiencies are explained by the concept of the exergy but exergy is not sufficient to represent interactions between the components of a system. Therefore, to understand the interactions between the components of the system, application of advanced exergy analysis is mandatory. The components which have the highest potential for improvement and the reasons of exergy destructions have been evaluated in this thesis thanks to the advanced exergy analysis.

Keywords: Exergy Analysis, Advanced Exergy Analysis, Inefficiency, Air Cycle Machine.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
1.1. Havacılıkta Daha Verimli Enerji Kullanımı.....	2
1.2. Literatür Özeti	4
1.3. Tezin Önemi	7
2. SİSTEM TANIMI	8
2.1. Tanım	8
2.2. Neden Hava Çevrim Sistemi?	10
2.2.1. Aerotoksik sendrom ve hipoksi	11
2.3. Kompresör, Isı Değiştirici ve Türbin	12
2.3.1. Düz uçuşta sistem	13
3. METODOLOJİ	15
3.1. Değerlerin Tüm Noktalar İçin Elde Edilmesi	18
4. EKSERJİ VE İLERİ EKSERJİ ANALİZİ	23
4.1. Ekserji Analizi.....	23
4.2. İleri Ekserji Analizi	25
4.2.1. İleri ekserji analizinin avantajları	27
4.3. Ekserji Yıkımının Ayrılması	27
4.3.1. Kaçınılamaz ve kaçınılabılır ekserji yıkımının ayrılması.....	30
4.4. İleri Ekserji Analizi İçin Sistem	31
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	35

5.1. Ekserji Analizi Sonuçları	35
5.2. İleri Ekserji Analizi Sonuçları.....	41
KAYNAKLAR	46

ŞEKİLLER DİZİNİ

1.1 Bir hava aracı için ekserjinin dağılımı	3
2.1 Hava çevrim sistemi	9
2.2 Sistem şeması	10
3.1 Ekserjinin disiplinler arası üçgeni	17
4.1 Ekserji bileşenleri	23
4.2 Değerlerin ayrılması	26
4.3 Adım adım bileşenlerin bağlantısı	28
4.4 Bölüm I	31
4.5 Bölüm II	32

ÇİZELGELER DİZİNİ

3.1 Enerji ve ekserji.....	16
3.2 Gerçek çevrim verileri.....	18
3.3 Hesaplanan değerler	22
3.4 İ.I.D. ve B.I.D. h ve s değerleri	22
5.1 11,789 m ³ de ekserji değerleri.....	35
5.2 11,789 m ³ de ekserji parametreleri.....	36
5.3 11,289 m ³ de ekserji değerleri.....	37
5.4 11,289 m ³ de ekserji parametreleri.....	37
5.5 10,789 m ³ ekserji değerleri	38
5.6 10,789 m ³ de ekserji parametreleri.....	39
5.7 10,289 m ³ de ekserji değerleri.....	39
5.8 10,289 m ³ de ekserji parametreleri.....	40
5.9 9,789 m ³ de ekserji değerleri.....	40
5.10 9,789 m ³ de ekserji parametreleri.....	41
5.11 11,789 m ³ de ileri ekserji değerleri	41
5.12 11,289 m ³ de ileri ekserji değerleri	42
5.13 10,789 m ³ de ileri ekserji değerleri	43
5.14 10,289 m ³ de ileri ekserji değerleri	43
5.15 9,789 m ³ de ileri ekserji değerleri	44

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

β	: Sıcaklık gradyanı (-0.0065 °/m)
B.I.D.	: Birincil ısı değiştirici
C_p	: Sabit basınçta özgül ısı (kJ/(kg.K))
ε	: Verim
\dot{E}	: Enerji (kW)
E_x	: Ekserji (kW)
g	: Yer çekimi ivmesi (9.80665 m/s ²)
\hat{h}	: Yükseklik (m)
h	: Entalpi (kJ/kg)
\dot{H}	: Entalpi akışı (kW)
İ.I.D.	: İkincil ısı değiştirici
\dot{m}	: Kütlesel debi (kg/s)
p_0	: Deniz seviyesinde atmosfer basıncı (101.325 kPa)
p	: Dış hava basıncı
P	: Basınç (kPa)
\dot{Q}	: Isı enerjisi (kW)
R	: Havanın gaz sabiti (287.05287 m ² /s ² °K)
s	: Entropi (kJ/(kg.K))
S	: Toplam entropi (kJ/K)
\dot{S}	: Entropi akışı (kW/K)
t_0	: Deniz seviyesi sıcaklığı (15 °C)
t	: Dış hava sıcaklığı
T_0	: Deniz seviyesi sıcaklığı (288.15 K)
T_k	: Sınır sıcaklığı
T	: Sıcaklık (K)
\dot{W}	: İş (kW)
V	: Hacim (m ³)
\dot{V}	: Hacimsel debi (m ³ /s)
Ψ	: Akış ekserjisi (kW)

Alt ve Üst İndisler

0	: Atmosfer
a	: Ortalama
AV	: Kaçınılabılır
c	: soğuk
\check{c}	: Çıkan
D	: Yıkım
EN	: Dahili
EX	: Harici
F	: Yakıt
g	: Giren
h	: Sıcak
k	: k ıncı bileşen
K	: Kompresör
L	: Kayıp
min	: En az
P	: Ürün
q	: Isı geçişı
$R, \check{c}1$: Birincil ısı değiştiriciden çıkan ram havası
$R, \check{c}2$: İkincil ısı değiştiriciden çıkan ram havası
$R, g1$: Birincil ısı değiştiriciye giren ram havası
$R, g2$: İkincil ısı değiştiriciye giren ram havası
T	: Türbin
UN	: Kaçınılamaz

1. GİRİŞ

Havacılık dünya ekonomisinin öncü sektörlerinden bir tanesidir ve Birleşmiş Milletler Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneline (IPCC) göre insan kaynaklı CO₂ emisyonlarının %2 si havacılıktan kaynaklanmaktadır. Airbus, Boeing, Bombardier ve Embraer’inde aralarında olduğu birkaç ana üretici önümüzdeki yirmi yıl boyunca hava taşımacılığına olan talebin yıllık %5 artacağını öngörmektedirler. IPCC 2050 yılı itibariyle havacılığın insan kaynaklı CO₂ emisyonlarındaki payının %3 olacağını öngörmektedir (Anonim 2015e; Anonim 2015f).

Hava araçları tarafından salınan sera etkisi yaratan tek emisyon CO₂ değildir. Hava araçlarının emisyonlarının %8 kadarı CO₂ den oluşmaktadır, %0.03 kadarı yanmamış hidrokarbonlar, su buharı, karbonmonoksit ve sülfür oksitten oluşmaktadır. Emisyonların %91.5 kadarı normal atmosferik oksijen ve nitrojendir (Anonim 2015e; Anonim 2015g).

Hava taşımacılığı dolayısıyla oluşan emisyonların çevresel etkisi meydana geldikleri yükseklik nedeniyle diğer sektörlere göre daha büyük olmaktadır. CO₂ ‘in yükseklikle değişen etkisi yoktur ancak azot oksit ve su buharının etkisi 1.9 çarpanıyla ifade edilmektedir. Kara yolu taşımacılığında bu çarpan değeri 1.5 olarak ifade edilmektedir (Anonim 2015f; Anonim 2015g).

Havacılığın çevresel etkisinin azaltılmasında hava araçlarının sahip olduğu sistemlerde önemli rol oynamaktadırlar. Bu sistemler arasında İklimlendirme Sistemleri ikinci sıradadır.

Hava araçlarının operasyonları sırasında mürettebat ve yolcular konforlu ve belirli şartlar altında olmalıdır. İstenilen şartların karşılanması oldukça zor olmasına rağmen, iç ortamın havasının uygun sıcaklık, hava ve atmosferik basınç şartlarında tutulması gerekmektedir (Moir ve Seabridge, 2001).

İnsanoğlunun uçuşları gerçekleştirilmeye başladığı günlerde, pilotlar ve yolcular uçmanın getirdiği zorlukları yenmek için cesur olmak zorundaydılar. Geçmişte, düşük hızdaki hava araçlarının soğuk atmosfere kaybettiği ısıyı telafi etmek için büyük ısıtma sistemleri gerekiyordu. Hava araçlarının performansının iyileşmesiyle birlikte Çevresel Kontrol Sistemi (Environmental Control System) ihtiyacı doğmuştur. Günümüzde hava araçlarının iklimlendirilmesi tamamen bu

sistem sayesinde yapılmaktadır. Bu günün yüksek ses altı ve ses üstü hızlarda hareket eden hava araçları için, halen soğuk hava şartlarında ısıtmanın gerekli olmasına karşın, ihtiyaç daha çok soğutma içindir. Çünkü sıcak hava her zaman motorlarda mevcut olmaktadır (Moir ve Seabridge, 2001).

Bu çalışmada bahsi geçen Airbus A-320 serisi uçakları 180 yolcu kapasiteli, tek koridorlu, çift motorlu, maksimum 77,000 kg boş ağırlığa sahip ve günümüze kadar 5,632 adet ile Boeing 737 serisinden sonra (8,000 adet) dünyanın ikinci en çok sipariş teslimi yapılmış uçaklarıdır. Günümüzde bu iki büyük üretici tarafından üretilmiş ve kullanılmakta olan 16,905 hava aracı olduğu düşünüldüğünde Airbus A 320 serisi uçakları toplam sayının %33'üne denk gelmektedir (Anonim, 2015a).

Bu çalışmada yukarıda bahsedilenler çerçevesinde Airbus A-320 serilerinde kullanılan hava çevrim sistemi için ekserji ve ileri ekserji analizleri yapılacaktır.

1.1. Havacılıkta Daha Verimli Enerji Kullanımı

Maliyet ve enerji verimliliği açısından daha iyi sistemlerin tasarlanması mühendisler için devam eden bir meydan okunma sürecidir. Artan küresel enerji talepleriyle birlikte, sistemlerden elde edilen atıkların etkisinin azaltılması ihtiyacı özellikle gelişmekte olan ülkeler için günümüzdeki süreçlerden daha verimli ve etkili enerji sistemlerinin tasarlanmasını aşırı derecede önemli yapmaktadır.

Tüm havacılık endüstrisine bu açıdan bakıldığında, 2007 yılında 16,800 olan hava aracı sayısı günümüzde 19,600'dür ve bu rakamın 2024 yılı itibariyle 35,300 olması beklenmektedir; yani gelecekte daha az enerji tüketen araçların ve sistemlerin varlığı günümüzden daha önemli olacaktır (Turgut ve ark., 2007). Son yıllarda artan küresel ısınma nedeniyle enerji tüketen cihazların verimliliği ve emisyonlarının çevreye olan etkilerinin büyük önem taşıyacaktır.

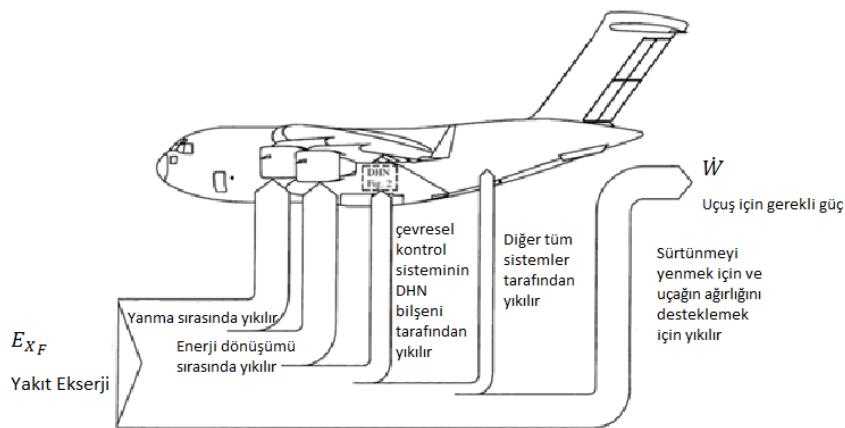
Çevresel problemler ve endişeler bölgeleri ve tüm dünyayı etkileyen ve gittikçe artan kirleticileri kapsayan olgulardır. Bu problemlerin bazıları insan sağlığındaki olumsuz ve gözlemlenebilir etkilerinden, bazıları ise zararlı maddelerin gerçek artışlarından doğmaktadır. Birçok çevresel problem enerjinin üretimine, kullanımına ve dönüşümüne dayanmaktadır (Dincer, 2002).

Bir hava aracının güç ve soğutma sistemlerinin optimizasyonunu sağlamak, bu sistemlerin hava aracının performansına olumsuz etkilerinin azaltılması için

gereklidir. Bu sistemler tarafından kullanılan enerji (iş) hava aracının motorları tarafından sağlanmalıdır, bu durum belli bir uçuş için gerekli yakıt miktarını artırmaktadır. Sonuçta bu durum da hava aracının kalkış ağırlığını ve işletme maliyetini artırmakta, faydalı yük ve menziline azaltmaktadır (Bejan ve Siems 2001).

Bir sistem tasarlayan mühendisten, yürürlükte olan teknik, ekonomik ve yasal şartlar altında, aynı zamanda etik, çevresel sonuçları da göz önünde bulundurarak, minimum maliyetle mümkün olan en yüksek verimi amaçlaması beklenir. Ekserji ise bütün bunları kolaylaştıran bir düşünce sistemidir (Dincer, 2002).

Vargas ve Bejan (2001)'in yaptığı çalışmaya göre, bir hava aracında yakıt tarafından sağlanan ekserjinin er geç yıkılmasına yol açan birçok sistem vardır. Bu sistemler Şekil 1.1 ile gösterilmiştir. Buna göre, en büyük ekserji yıkımı yaklaşık %30 ile yanma sürecinde ve diğeri ise motorun tersinmez çalışma süresinde meydana gelmektedir. Kalan ekserji miktarı motor tarafından üretilen güçtür, ki bu güç tüm alt sistemlerin ve hava aracının ihtiyaç duyduğu fonksiyonların ihtiyacını karşılar. Bu fonksiyonların arasında en büyüğü uçuşu sürdürmek için gerekli güçtür. Bu güç sayesinde sürüklenme kuvvetine karşı gelinir ve hava aracı istenilen yükseklikte uçuşunu sürdürür. Motor tarafından üretilen gücün kalan kısmı yardımcı sistemlerde tüketilir. Bu yardımcı sistemler arasında Çevresel Kontrol Sistemi en fazla ekserji kullanan sistemdir. Düz uçuş sırasında bu oran yaklaşık %64'e denk gelmektedir (Ordenez ve Bejan, 2003).



Şekil 1.1 Bir hava aracı için ekserjinin dağılımı (Kaynak: Vargas ve Bejan, 2001)

1.2. Literatür Özeti

Ekserji analizini hava araçlarının tasarım, analiz ve optimizasyonuna uygulayan araştırmacılardan Roth (2003), termodinamiğin ikinci yasasının hava aracı tasarımında umut vaat eden bir yaklaşım olmasının sebebini termodinamik iş potansiyeli, yani ekserji içermesi olarak açıklamıştır. Aslında tüm araçların hareket etmek için bir iş potansiyeli tüketmesi gerektiğini ve tüm bu araçların performans ve dizayn değerlerini etkileyen parametrelerin termodinamik iş potansiyelinin kullanımı (ekserji) ve kayıpların (ekserji yıkımları) olduğunu belirtmiştir. Roth (2003)'un bu çalışmasında, bir F-5E hava aracı için toplam ekserjinin %90'ı itki sisteminde yıkıma uğramış, kalan %10'u itki işine çevrilmiş ve sürüklenme kuvvetini yenmek için kullanılmıştır. De Oliveira (2013) daha fazla ekserji yıkımı meydana gelen bileşenlerin daha tersinmez olduğunu belirtmiş, aynı zamanda ekserji yıkımının itki kuvvetiyle alakalı olduğunu söylemiştir.

Roth (2001) aerodinamik kayıpların da ekserji kayıplarıyla alakalı olduğunu ve bu iki kayıp arasında kıyaslama yapılabileceğini göstermiştir.

Markell (2005) ekserji temelli bir metodolojiyi daha geleneksel bir yöntemle, hipersonik bir hava aracında sentez/tasarım ve operasyonel optimizasyon yöntemlerinin her ikisini de uygulayarak kıyaslamıştır. Bu optimizasyonun sonuçları ekserji metodlarının standart performans ölçme yöntemlerine göre daha verimli olduğunu, belirli bir görev için daha iyi yakıt kütleli debi oranları sunduğunu göstermiştir.

Leo ve Pérez-Grande (2005) bir hava aracının Çevresel Kontrol Sistemi (Environmental Control System)'nde yer alan hava çevrim sisteminin farklı motor havası değerlerinde termo-ekonomik analizini gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak tüm sistemin en az enerji maliyetinin motor havasının gerçek basınç değerinde olduğunu ve bu basınç değerinin diğer sistemlerinde motor havasını kullanması nedeniyle çok fazla değiştirilmesinin mümkün olmadığını, ancak sistemin hala optimize edilmesinin mümkün olduğunu belirtmiştir.

Bir başka çalışmada Pérez-Grande ve Leo (2002) Çevresel Kontrol Sistemi'nde yer alan ısı değiştiricilerin hem ağırlığını hem de ısı değiştiriciler tarafından sebep olunan entropi üretimini en aza indirmek amacıyla geometrik olarak optimizasyonunu yapmışlardır. Ancak Çevresel Kontrol Sistemi'nin toplam

verimini göz önünde bulundurmayarak yalnızca ısı değiştiricilerin verimine odaklanmışlardır. Zhao ve ark. (2009) ise Çevresel Kontrol Sistemi'nin dinamik yanıtı üzerinde deneysel çalışma gerçekleştirmiş ve sistemin çalışma şartları değiştiğinde, sistem içerisinde yer alan türbinin veriminin ve çıkış basıncının değiştiğini belirlemişlerdir.

Zilio ve Patricelli (2013) motor havasının kütleli debisinin ve sıcaklığının, motorun yakıt tüketimini artırdığını, Evans (1991) ise motor havasının %1 kullanımının, bir ardyanmalı turbo fan motorunun özgül yakıt tüketimini aynı oranda artırdığını belirtmiştir.

Bejan (1994) entropi üretiminin azaltılmasını enerji politika uygulamalarını formülize etmek için çalışmıştır. Bu çalışmasında Bejan'ın birincil hedefleri üç aşamalıdır: Entropi üretimi azaltılmasını daha önce keşfedilmemiş şekilde kullanmak, enerji politikaları önermek ve bu politikaları analiz etmek amacıyla, süreç boyunca akılcı teorik temellerle birlikte bütünlük çerçeve sunmak, akademik ya da profesyonel, farklı disiplinler arasındaki diyalogların potansiyel faydalarını göstermektir. Bejan (1994) bu çalışmasında entropi üretimi azaltılmasının ısı sistemler için tasarım felsefesi olarak değerlendirilmesi gerektiğini ve bu düşüncenin uzun vadede enerji politikaları geliştirmek için uygulanması gerektiğini belirtmiştir. Böyle bir enerji politikası tüm bilinen enerji kaynakları ve yakıtlar için etkili yönetim envanteri oluşturacaktır.

Vargas ve Bejan (2001), bir Çevresel Kontrol Sisteminde yer alan ısı değiştiricisinin geometrisini optimize ederek, ısı değiştiricinin ait olduğu Çevresel Kontrol Sisteminin termodinamik optimizasyonunu gerçekleştirerek hava aracının enerji tüketim performansını arttırmışlardır. Bu yaklaşım ısı değiştiricinin sistemden bağımsız olarak izole ortamda olduğu düşünülerek optimize edildiği diğer yaklaşımlardan ayrılmaktadır. Çevresel Kontrol Sisteminin performansının hava aracının yakıt tüketimini ve ekserji yıkım oranlarını iki yoldan etkilediği göstermişlerdir. Bunlar; Çevresel Kontrol Sisteminin kendi tersinmezliği ve Çevresel Kontrol Sisteminin ağırlığıdır.

Çevresel Kontrol Sisteminde çalışma geliştiren araştırmacılardan Al-Garni ve ark. (2009) hava çevrim sisteminin alan arızalarında bilgi edinmeyi sağlayan alet geliştirmiştir. Teknikleri hatalı sistemleri, en son hata meydana gelen bileşenleri,

farklı davranan bileşenleri ve çevresel şartların, bakı uygulamalarının bileşenler üzerinde etkilerini tanımlaya izin vermektedir. Yoo ve ark. (2011). bir hava aracı hava çevrim sisteminde bulunan ısı değiştiricisinin kalkış, dönüş, düz uçuş ve iniş gibi değişen uçuş şartlarında sistem üzerindeki etkilerini incelemek için modelleme programı geliştirmiştir.

Shiba ve Bejan (2001) bir hava aracının Çevresel Kontrol Sisteminde yer alan karşı akışlı ısı değiştiricisinin termodinamik optimizasyonunu, sistemin tamamı için gerekli gücü ya da toplam entropi üretimini düşürerek gerçekleştirmişlerdir.

Paulus ve Gaggioli (2000) bir deneysel hava aracında bulunan sistemlerin tasarımı ve bu sistemlerin alt sistemlere ayrılması için kullanmıştır. Optimum tasarım için ekserji analizi ve termo ekonomik analiz yöntemlerini kullanmıştır.

Figliola ve ark. (2003) bir askeri hava aracının Çevresel Kontrol Sistemi için yedi adet entegre alt sistem içeren model geliştirmiştir. Tüm alt sistemlerde temel hedef askeri hava aracı görev gerekliliklerini ve kalkış ağırlığı şartlarını sağlarken Çevresel Kontrol Sisteminin entropi üretimini azaltmaktır. Bu koşulları sağlamak için buharlaştırıcı verimi ve kütleli debi gibi ana değişkenleri kalkış ağırlığı cinsinden açıklamıştır.

Moorhouse (2003) kalkış, tırmanma, düz uçuş, iniş gibi uçuş safhaları için gerekli ekserji miktarlarını belirlemiş ve meydana gelen ekserji yıkımlarını dağıtmak için için analiz yapmıştır.

Butt (2005) ekserji ve enerji analizini bir kanat şekli değişebilen savaş uçağının entegre sentez/ dizaynı için kullanmıştır. Şekil değiştiren kanatlı ve sabit kanatlı hava aracı dört farklı hedef fonksiyon kullanarak optimize edilmiştir, bu fonksiyonlar tüketilen yakıtın azaltılması, toplam yıkılan ekserjinin azaltılması, itki sistemi tarafından yıkıma uğrayan ve kaybolan ekserjinin azaltılması ve itki veriminin artırılmasıdır. Bu dört hedef fonksiyon arasından yakıt tüketiminin azaltılması ve yıkıma uğrayan toplam ekserjinin azaltılması optimizasyon çalışmaları arasında en iyi sonuçları vermiştir. Bunun nedeni bu iki hedef fonksiyonun hava aracında mevcut olan iş potansiyelinin minimum seviyede kullanımını hedeflemesidir.

Brewer (2006) bir hipersonik hava aracı için üç farklı hedef fonksiyonu belirleyerek hava aracının görev şartlarını optimize etmiştir. Bu fonksiyonlar en az

yakıt tüketimi, en fazla itki verimi ve en az ekserji yıkımı ile birlikte yakıt ekserjisi kaybıdır. Üç hedef fonksiyon için de en az yakıt kütlesi ve en az ekserji yıkımı ile birlikte yakıt ekserjisi kaybı hava aracının görevi için gerekli kısıtlamaları sağlamalıdır. Optimize edilmiş itki verimi fonksiyonu diğer fonksiyonlardan daha fazla ekserji yıkımı meydana gelmesini sağlamıştır.

Periannan (2005) üç farklı sistemin optimizasyonunu sağlamak amacıyla farklı hedef fonksiyonları çalışmıştır. Sonuç olarak ekserji temelli analizin sadece en büyük verimsizliklerin nerede olduğunu belirlemekle kalmadığını, aynı zamanda alt sistemlerde meydana gelen tersinmezliklerin yakıt tüketiminden kaynaklandığını belirlemiş, ekserji temelli analizlerin ise optimize edilmiş bir hava aracı tasarlamayı mümkün kıldığını belirtmiştir.

1.3. Tezin Önemi

Yukarıda bahsedilenler çerçevesinde, ekserjinin hava aracı sistemleri için önemli olduğu açıktır. Ekserji yıkım oranları sistemlerin teorik verimden daha az verime sahip olmasını sağlar. Ekserji hesapları yaparak hangi sistemin daha fazla optimizasyon fırsatı içerdiğini belirlemek Bejan (2002)'ında belirttiği gibi mümkündür. Aynı zamanda sistemleri optimize ederek hava aracının işletme maliyetlerini azaltacağını ve faydalı yük/mesafe oranını olumlu katkıda bulunacağını Bejan ve Siems (2001) tarafından belirtilmiştir.

Bu tezde yukarıda bahsedilenler çerçevesinde bir Airbus A-320'de bulunan hava çevrim makinesi (Air cycle machine) için beş farklı yükseklikte aşağıdakiler yapılmıştır.

- Enerjinin korunumu ilkesine göre hava çevrim makinesinin bilinmeyen noktalardaki verileri elde edilmiştir.
- Elde edilen veriler kullanılarak ekserji analizi gerçekleştirilmiş ve ekserji analizine göre bileşenlerin verimsizlikleri ve geliştirme potansiyelleri değerlendirilmiştir.
- İleri ekserji analizi sayesinde bileşenlerin birbirleriyle olan etkileşimleri incelenmiş ve tüm yüksekliklerde bileşenlerde meydana gelen ekserji yıkımları irdelenmiştir.

2. SİSTEM TANIMI

Çevresel Kontrol Sistemi'nin görevi; belirli yük, basınç, sıcaklık gibi çalışma şartları altında sıcaklık kontrolü ve hayat desteği sağlamaktır (Martinez, 2015). Çevresel Kontrol Sistemi hava araçlarının iklimlendirilmesini hava çevrim sistemi (Air cycle machine) sayesinde yapmaktadır. Çevresel Kontrol Sistemi'ne ve dolayısıyla bir hava çevrim sistemi sahip araçlar denizaltılar, hava ve uzay araçlarıdır.

Hava araçlarında kullanılan hava çevrim sisteminin amacı, kokpitte pilotun belirlediği sıcaklığa ve basınca göre, yolcu ve mürettebat güvenliği için, havayı kabin ve kokpiti sağlamaktır. Hava çevrim sistemi aynı zamanda hava araçlarında bulunan elektronik cihazlar için de soğutma sağlar. Hava çevrim makinelerinin motor havası kullanması, hava araçlarının tükettikleri enerji miktarını artırmaktadır, aynı zamanda motor performansını etkilemektedir.

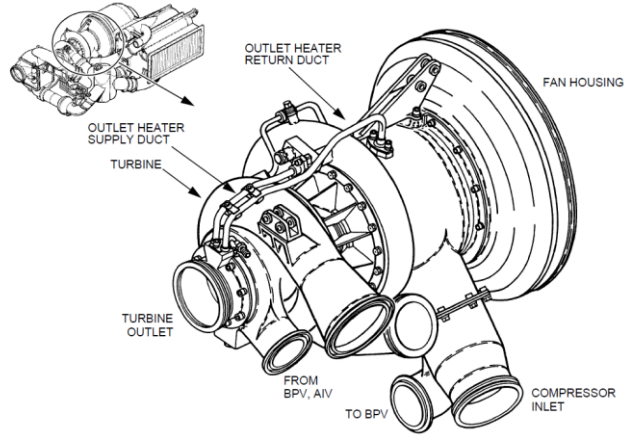
Bir hava aracının motorlarının itki kuvveti üretmek dışında diğer sistemlere elektrikli, pnömatik ve hidrolik güç üretmek gibi işlevleri vardır. Hava araçlarının bu sistemlerine oranla Çevresel Kontrol Sistemi %75 daha fazla güç tüketmektedir ve bu güç üretilen itki kuvvetinin yaklaşık %1'ine denk gelmektedir (Martinez, 2015).

2.1. Tanım

Her ticari hava aracı bir ya da iki adet hava çevrim sistemine sahiptir. Bu makinelerdeki çalışma akışkanı havadır. Dolayısıyla havanın buharlaşması ya da yoğunlaşması söz konusu değildir. Akış kontrol valfleri sayesinde motorlardan elde edilen hava motorlarda meydana gelen adyabatik sıkıştırma nedeniyle çok sıcaktır, yaklaşık olarak 200°C sıcaklığa ve 250 kPa basınca sahiptir. Havanın sıcaklığı ve basıncı motor kompresörlerinin hangi kademesinden havanın alındığına bağlıdır, bu basıncı sağlamak için ise kontrol valfleri vasıtasıyla birkaç kademedan birden hava alınmaktadır. Airbus A-320 serilerinde kullanılan hava çevrim sistemi Şekil 2.1'de gösterilmiştir.

Sıcak hava kabine girmeden önce her zaman soğutulmalıdır. Soğutma işlemi basit bir ısı değiştiriciyle yapılamadığı için, motordan alınan hava bir ön soğutucuyla (precooler) soğutulur ve sıcaklığı yaklaşık olarak 180°C'ye düşer.

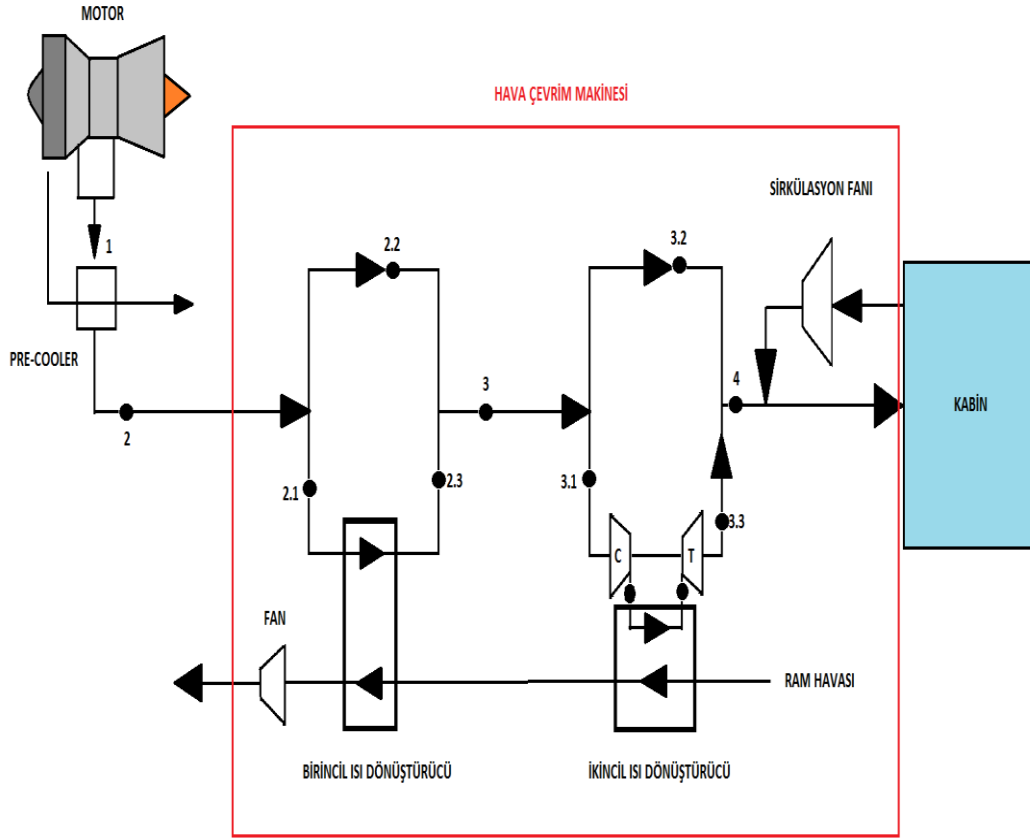
Daha sonra bu hava birincil ısı değiştiricide (B.I.D.) 110°C'ye soğutulur. Soğutulan hava kompresörden geçerek sıcaklığı 210°C'ye yükselir. İkincil ısı değiştiriciden (İ.I.D.) geçen havanın sıcaklığı 100°C'ye düşer.



Şekil 2.1 Hava çevrim sistemi (Kaynak: Anonim, 2015b)

Son olarak türbinden geçen hava 5°C sıcaklığa sahiptir ve 100°C'deki havayla karışarak kabine 35°C'de sıcaklıkla ulaşır.

Ram havası tüm ısı değiştiricilerde ısıl kuyu gibi davranmaktadır. Ram havasının kütleli debisi motordan alınan havanın kütleli debisinin 2 veya 3 katı olmaktadır. Bu çalışmada ısı değiştiricilerden geçen ram havasının 2 kg/s debiye sahip olduğu kabul edilmiştir. Ram havasının bu yüksek kütleli debi değerlerine rağmen halen çıkış sıcaklığında artış gözlemlenmektedir. Hava çevrim sistemine giren hava her zaman sıcak olduğu için (350–450K) kabine ulaşmadan önce mutlaka soğutulması gerekmektedir. Sistem şeması Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Sistem şeması

2.2. Neden Hava Çevrim Sistemi?

Hava yolu taşımacılığında hava çevrim sistemi kullanılmasının avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Anonim, 2015b).

Hava çevrim sistemi, hava aracının kabin büyüklüğüne dayanarak 4 farklı büyüklükte olabilir. En küçük olanı bir türbin ve kompresör içermektedir. Hava çevrim sisteminin boyutunu büyütme için daha fazla kompresör, ısı değiştirici ve kompresör eklenebilir. En karmaşık olanları iki türbin, bir fan, bir kompresör, iki ısı değiştirici içermektedir.

- Hava çevrim sistemi iş akışkanı olarak freon gibi zararlı gazlar yerine hava kullanması dolayısıyla daha çevrecidir.
- Sistemde buhar ya da nem üretilmez, dolayısıyla geleneksel klimalardan daha uzun süre işletme ömrüne sahiptir.

- Motor havasını kullanarak harici bir ısıtma sistemine olan ihtiyacı yok etmektedir ve böylece hava aracı için gerekli olacak fazla ağırlıktan kurtulma şansını tanımaktadır.
- Elektrikli ısıtma sistemlerine göre daha verimlidir, çünkü motor havasını kullanmaktadır.

2.2.1. Aerotoksik sendrom ve hipoksi

Aerotosik sendrom ilk kez 2000 yılında Chris Winder ve Jean-Christophe Balouet tarafından uçuş sırasında hava aracında bulunan atomize olmuş yakıt ve diğer zehirli kimyasallarla kirlenmiş kabin havasının solunması nedeniyle kısa ve uzun vadede sağlık problemine yol açan durumdur (Anonim, 2015c).

Modern hava araçları kabine giden havayı yöneten Çevresel Kontrol Sistemine sahiptir. Dış hava motorlara alınır ve kabine gidecek havada yanma gazları oluşmaması için yanma sürecinden önce sıkıştırılır ve kabine gönderilir. Çevresel Kontrol Sistemi kabinde bulunan havanın bir kısmını sirküle eder ve filtrelerden geçirir. Kalan kısmı ise dışarı atılır, böylece kabine her zaman taze hava alınmış olur.

Bazı durumlarda ise kirleticilerin kabine Çevresel Kontrol Sistemi sayesinde ulaşması mümkündür. Bakım sırasında kullanılan maddelerden motor yağları, hidrolik sıvısı, temizlik sıvıları, buzlanma önleyici sıvılar Çevresel Kontrol Sistemindeki havanın kirlenmesine yol açabilirler. Yer personeli ve uçuş personeliyle birlikte yolcularda virüsler, bakteriler, mantarlar gibi bulaşıcılar için kaynak teşkil edebilirler.

Kirli kabin havasının diğer muhtemel sebepleri şunalar olabilir (Anonim, 2015c):

- Motor ve yardımcı güç ünitesi sızıntıları
- Kabin altı hidrolik sızıntıları
- Yardımcı güç ünitesine buz önleyici sıvı uygulanması
- Ön galleydeki periyodik bakımlar
- Kargo kompartımanındaki sızıntılar
- Yemek şirketleri tarafından kuru buzun yanlış ve aşırı kullanımı
- Yağmur önleyici sıvısının kabine sızıntısı

- Tuvalet sıvısı sızıntısı

5 Kasım 2000 tarihinde, Jersey European Havayollarının bir uçuşu sırasında kaptan ve yardımcı pilotta mide bulantısı, kaptanda çift görme ve yüksekliği algılama zorlanma meydana geldi ancak uçağı güvenli bir şekilde indirmeyi başardılar. Her iki pilotta da hastalıkları için bir sebep bulunmadı. Daha sonraki incelemeler Çevresel Kontrol Sisteminin sağladığı havanın yardımcı güç ünitesindeki yağ sızıntısından kirlendiğini ve uçuş mürettebatının etkilendiğini belirlemiştir (Anonim, 2015c).

Hipoksi; vücudun ya da vücudun bazı bölgelerinin yeterli oksijenden muhaf kılmasıdır (Anonim, 2015d). Genellikle hipoksi, sağlıklı insanların yüksek irtifada bulunması dolayısıyla az olan oksijen konsantrasyonuna maruz kalmaları sonucu meydana gelir. Aynı zamanda hipoksi, düşük oksijen oranına sahip gaz karışımlarının solunmasıyla da meydana gelebilir. Semptomları yorgunluk, hissizlik, baş dönmesi, parmak uçlarının karıncalanması, halüsinasyon, davranış değişikliği, baş ağrısı, bilinç kaybı, nefessiz kalma, kalp hızında yavaşlama, düşük kan basıncıdır.

25 Ekim 1999'da Orlando'dan Texas'a uçan bir hava aracı düz uçuş sırasında otopilotta iken aniden kabin basıncında düşüş yaşanmış ve kabinde bulunan herkeste oksijen eksikliği dolayısıyla bilinç kaybı başlamıştır. Hava aracı ise yapması gereken dönüşü yapamamış ve yaklaşık 4 saat boyunca 2400 km mesafe kat etmiştir. Hava aracının yakıtı bittiğinde kontrol bir alçalma gerçekleştirerek boş bir araziye çakılmıştır. Amerikan Ulusal Taşımacılık Güvenliği gerçekleştirdiği incelemelerde bu kazanın muhtemel probleminin, kabin basıncındaki azalmaya bağlı olarak uçuş personelinin oksijensiz kalması olarak açıklamıştır (Anonim, 2015d).

2.3. Kompresör, Isı Değiştirici ve Türbin

Hava çevrim sisteminde kompresör, ısı değiştirici ve türbinin yer almasının sebebi, sıcak atmosfer şartlarında havanın atmosferden daha düşük sıcaklıklara soğutulması gerekliliğidir. Hava kompresörde sıkıştırıldığı zaman, sıcaklığı ve basıncı yükselir. Daha sonra bu sıcak hava, atmosfer havasına karşın soğutulabilir, ki bu durum da İ.I.D'de meydana gelmektedir. Aslında, havanın sıcaklığı

kompresörde sıkıştırılmadan sonra ne kadar yüksek olursa, ide de o kadar fazla ısı transferi meydana gelecektir. İ.I.D.'de soğuyan hava daha sonra türbinde genişler ve sıcaklığı düşer. Ancak, hava zaten daha önce İ.I.D.de soğutulduğu için, kompresöre giriş yaptığı sıcaklıktan daha düşük sıcaklıkta türbine giriş yapacaktır. Bu durum İ.I.D.de enerji kaybı meydana geldiği için mantıklıdır. Böylece hava, yalnızca İ.I.D.de soğutulmasıyla ulaşacağı sıcaklıktan daha düşük sıcaklıklara ulaşır.

Bu durumun iki avantajı vardır: Birincisi havanın sıcaklığı atmosfer sıcaklığından daha düşük sıcaklıklara ulaşabilir, yani sıcak iklim şartlarında (düşük irtifa ve yer şartlarında) kabin ve kokpiti soğutmak mümkündür. İkinci avantaj ise, kompresörde sıkıştırılan havanın daha küçük ve hafif bir ısı değiştirici ile soğutmaktır, yani ağırlıktan tasarruf etmektir.

2.3.1. Düz uçuşta sistem

Düz uçuşta hava aracının beş farklı yükseklikte olduğu varsayılmıştır. Bu yükseklikler 9,789 m ve 11,789 m arasında 500 m aralıklarla belirlenmiştir. Bu yüksekliklerde hava aracının halen troposferde olduğu kabul edilmiş, buradan hareketle dış hava sıcaklığı ve basıncı;

$$t = t_0 + \beta \hat{h} \quad (2.1)$$

$\beta = -0.0065 \text{ }^\circ/\text{m}$ ve $t_0 = 15^\circ\text{C}$ alınarak hesaplanmıştır (Bertin ve Cummings, 2002). Bu yükseklikteki havanın basıncı ise;

$$p = p_0 \left(1 + \frac{\beta}{T_0} \hat{h}\right)^{-g/\beta R} \quad (2.2)$$

ile bulunur (Bertin ve Cummings, 2002). Burada, deniz seviyesinde atmosfer basıncı $p_0 = 101.325 \text{ kPa}$, deniz seviyesi sıcaklığı $T_0 = 288.15 \text{ K}$, gaz sabiti $R = 287.05287 \text{ m}^2/\text{s}^2\text{ }^\circ\text{K}$, yer çekimi ivmesi $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$ dir. Denklem (1.2)'ye göre hava basınçları 9,789 m'de 27.3 kPa, 10,289 m'de 25.25 kPa, 10,789 m'de 23.40 kPa, 11,289 m'de 21.62 kPa ve 11,789 m'de 19.96 kPa olarak bulunur.

Sistem akışkanı olan havanın ideal gaz olduğu varsayılmıştır. Çevrime giren hava debisi 1 noktasında 1kg/s 'dir.

3. METODOLOJİ

Ekserji; kütle, ısı ve iş geçişleri altında, bir sisteme verilebilecek minimum ya da sistemden alınabilecek maksimum miktarda kullanışlı enerjiyi, diğer bir deyişle işi temsil eder. Ekserji yıkımı entropi üretimiyle orantılıdır. Ekserji termodinamiğin ikinci yasasına bağlı olarak her zaman yıkılır. Yıkılan ekserji ya da üretilen entropi, sistemin teorik verimden daha düşük verime sahip olmasına yol açar. Ekserji hesapları yaparak, ilgilenilen sistemin ekserjisinin nasıl dağıldığı belirlenir. Böylelikle bileşenlerin ve mekanizmaların hangisinde ekserji yıkımının en fazla olduğu ortaya çıkar. Bu durum sistemleri ve süreçleri geliştirme açısından büyük avantaj sağlar (Bejan, 2002).

Diğer bir deyişle ekserji, enerjinin değerinde düşüşe ve çevreye atılan enerjinin değerinde artışa neden olan verimsizlikleri tanımlamada ve ölçmede kullanışlı olan, enerjinin termodinamiksel kalitesinin standardıdır (De Oliveira, 2013). Bu durum, ekserjinin termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarının birlikte uygulanmasını gerektirmesindedir.

Termodinamiğin birinci yasası, yani enerji kavramı, verimlerin belirlenmesinde gerekli olmasına karşın, verimsizliklerin tanımlanmasında ve ölçülmesinde yeterli değildir. Verimsizlik, entropi üretiminin meydana geldiği tersinmez bir sürecin sonucudur. Bu anlamda entropi dengesinin, yani termodinamiğin ikinci yasasının enerji dengesine uygulanması enerji dönüşüm sistemlerinin verimsizliklerinin tanımlanmasında ve ölçülmesinde asli öneme sahiptir (De Oliveira, 2013).

Enerji ve ekserji arasındaki De Oliveira (2013)'nın bahsettiği farklılığı Dincer (2002) çizelge 3.1'deki gibi sıralamıştır.

Çizelge 3.1 Enerji ve ekserji (Kaynak: Dincer, 2002)

Enerji	Ekserji
Sadece enerji akışı ya da maddeye bağlıdır.	Hem çevreye hem de enerji akışı ve madde miktarına bağlıdır.
Sıfırdan farklı değerleri vardır(Einstein denkleminde belirttiği gibi mc^2 ye eşittir).	Sıfıra eşittir (Çevreyle denge durumunda).
Tüm süreçlerde termodinamiğin birinci yasasına tabidir.	Sadece tersinir süreçlerde termodinamiğin birinci yasasına tabidir (Tersinmez süreçlerde kısmen ya da tamamen yıkılır.)
Hareket üretmek için gerekli hareket ya da kabiliyettir.	İş üretmek için gerekli olan iş ya da kabiliyettir.
Bir süreçte tamamen korunur, üretilemez ya da yıkılamaz.	Bir tersinir süreçte her zaman korunur ancak tersinmez süreçlerde her zaman tüketilir.
Miktarın ölçüsüdür.	Entropi sayesinde miktar ve kalitenin ölçüsüdür.

Belirli iki durum arasında gerçekleşen hal değişimindeki en fazla iş eldesi tersinir hal değişimiyle mümkündür. Bu nedenle iş potansiyeli, yani ekserji analizinde tersinmezlikler göz önüne alınmaz. Hal değişimi sırasında en fazla iş elde edebilmek için sistemin ölü halde olması gereklidir. Ölü haldeki bir sistem çevresi ile aynı sıcaklığa ve basınca sahiptir, çevresi ile kimyasal tepkimeye girmez, çevresine göre kinetik ve potansiyel enerjiye sahip değildir ve aynı zamanda çevresi ile dengelenmemiş manyetik, elektrik ve yüzeysel gerilme etkileri yoktur (Çengel ve Boles, 2012).

Çevre, normal şartlar altında, kendisini meydana getiren maddelerin kararlı halde bulunduğu, bu maddelerin etkileşimiyle (fiziksel ya da kimyasal) iş elde etmenin mümkün olmadığı, tersinmezliklerden yoksun, sistem sınırları dışında kalan ortamın tamamıdır (Bejan ve ark., 1996).

Güç ve soğutma sistemlerinin akış ve donanımların bileşenleri olmasından dolayı, bu sistemlerin yapısında akışların birbirleriyle ve bileşenlerle etkileşmesinden dolayı ekserji yıkımı meydana gelmektedir. Bu sistemlerin tasarım amaçları: en az ekserji yıkımını elde edebilmek için bileşenleri ve akışları en iyileştirmektir (Bejan ve Siems, 2001).

Ekserji analizinin önemi şu şekilde sıralanabilir (Dincer, 2002):

- Enerji kaynaklarının kullanımının çevreye olan etkilerinin en iyi şekilde belirlenmesinde ana bir araçtır.
- Enerji sistemlerinin tasarımı ve analizi için termodinamiğin ikinci yasasıyla birlikte kütle ve enerjinin korunumu prensiplerini kullanan etkin bir yöntemdir.
- Daha fazla verimli kaynak kullanılma amacını destekleyen uygun bir tekniktir. Belirlenmesi gereken atık ve kayıpların yerleri, tipleri ve gerçek büyüklükleri ortaya çıkarılır.
- Mevcut sistemlerdeki verimsizlikleri azaltarak, daha verimli enerji sistemleri tasarlanmanın nasıl mümkün olup olmayacağını gösteren etkin bir tekniktir.
- Sürdürülebilir gelişmenin elde edilmesinde anahtar rol oynar.
- Enerji politikalarının oluşturulmasında kullanılabilir önemli bir araçtır.

Yukarıda bahsedilenler çerçevesinde ekserjinin çevre, enerji ve sürdürülebilirlik arasında yer alan, disiplinler arası bir kavram olduğu açıktır. Bu durum Dincer (2002) tarafından da Şekil 3.1 ile aşağıdaki gibi örneklendirilmiştir.



Şekil 3.1 Ekserjinin disiplinler arası üçgeni (Kaynak: Dincer, 2002)

Bu çalışmada enerji ve ekserji analizlerinin uygulanmasında Dincer ve Rosen (2013) tarafından belirtilen aşağıdaki yöntem uygulanmıştır.

- İlgilenilen süreç mümkün olduğu kadar çok bölüme ayrılmıştır.
- Süreç üzerinde enerji ve kütle dengelerini uygula ve iş, ısı gibi tüm temel bileşenleri belirlenmiştir.
- Sürecin doğasına uygun olarak, cevapların arandığı ve analizin karmaşıklığına ve doğruluğuna uygun referans bir çevre modeli belirlenmiştir.
- Referans çevre modeline uygun olarak enerji ve ekserji miktarlarını değerlendirilmiştir.
- Ekserji dengesi gerçekleştirilmiştir.
- İstenilen faydaya uygun olarak verim tanımları yap ve verimleri değerlendirilmiştir.
- Sonuçları değerlendirilmiş ve uygun tavsiye ve neticeler çıkarılmıştır.

Hava çevrim sisteminin gerçek çevrimine göre T-S değerleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir (Martinez 2015; Anonim 2015b).

Çizelge 3.2 Gerçek çevrim verileri

Nokta	ṁ (kg/s)	S (kJ/(kg.K))	T (K)	P (kPa)
1	1	0.35	478.15	250
2.3	-	0.2	377.7	-
C	-	0.25	483.15	-
T	-	0.05	373.15	-
3.3	-	0.13	278.15	-
4	1	0.18	308.15	>42

3.1. Değerlerin Tüm Noktalar İçin Elde Edilmesi

Hava çevrim sisteminin çevrim dışında kalan tüm noktaların entropi, basınç, enerji ve ekserji değerlerinin elde edilmesi için şu kabuller yapılmıştır:

- Hava çevrim sisteminin iş akışkanı olan hava ideal gazdır.

- Birincil ısıl değiştirici ve İ.I.D. için ram havasının kütlelel debisi 2 kg/s'dir.
- Precooler için motor fanından gelen hava çevre şartlarındadır ve 0.3 kg/s kütlelel debiye sahiptir.
- 2 noktasında $\dot{m}_{2,1} = 0.4$ kg/s, $\dot{m}_{2,2} = 0.6$ kg/s debiye sahiptir.
- Kısılma vanalarında sıcaklık düşüşü olmamaktadır. Sıcaklık değerleri Çizelge 2.2'deki gibidir.
- B.I.D. ve İ.I.D.'ye giren atmosfer havasının çıkışta basıncı değişmemektedir.
- Kompresör ve türbinde 5 kW'lık ısı geçişleri vardır. Birincil ve İ.I.D.'de ısı geçişleri 3 kW'tır.

İdeal gaz denklemleri,

$$P\dot{V} = \dot{m}RT \quad (3.1)$$

ve havanın kompresör ve türbin hariç diğer tüm noktalarda sabit hacimsel debiye sahip olduğu kabul edilmiştir. Yani,

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 = \dot{V}_3 = \dots = \frac{V}{s} = c \quad (3.2)$$

dir. Bu durumda basınç değerleri için,

$$P_1\dot{V}_1 = \dot{m}_1RT_1 \quad (3.3)$$

yazılırsa, $\dot{m}_1 = 1$ kg/s, $P_1 = 250$ kPa ve $T_1 = 478.15$ K için

$$\dot{V}_1 = c = 0.5489162 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.4)$$

bulunur. Denklem (2.6) kullanılarak diğer noktalar için basınç değerleri elde edilmiştir. Bu değerler elde edilirken kullanılan kompresörün sıkıştırma katsayısı

$\Pi=1.8$ 'dir ve türbinde genleşme oranı 0.25'tir. Entropi değerlerinin elde edilmesinde (2.7) ve (2.8) kullanılmıştır (Çengel ve Boles, 2012).

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{C_p(T)dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (3.5)$$

$$\int_1^2 \frac{C_p(T)dT}{T} = s_2^0 - s_1^0 \quad (3.6)$$

alınırsa,

$$s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (3.7)$$

elde edilir. s^0 değerleri Çengel ve Boles (2012) tarafından çizelgeler halinde oluşturulmuştur.

Sistemdeki tüm noktalar için sürekli akış ve sanki dengeli sistem şartlarında enerji dengesi,

$$E_{giren} - E_{çıkan} = \frac{dE}{dt} = 0 \quad (3.8)$$

denklemleriyle elde edilir. Bu durumda,

$$\dot{E}_1 = \dot{m}_1 h_1 \quad (3.9)$$

$$\dot{E}_2 = \dot{E}_{2,1} + \dot{E}_{2,2} \quad (3.10)$$

$$\dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_{2,1} h_{2,1} + \dot{m}_{2,2} h_{2,2} \quad (3.11)$$

$$\dot{E}_3 = \dot{E}_{2,2} + \dot{E}_{2,3} \quad (3.12)$$

$$\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_{2,2} h_{2,2} + \dot{m}_{2,3} h_{2,3} \quad (3.13)$$

$$\dot{E}_4 = \dot{E}_{3,2} + \dot{E}_{3,3} \quad (3.14)$$

$$\dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_{3,2} h_{3,2} + \dot{m}_{3,3} h_{3,3} \quad (3.15)$$

$$\dot{E}_{3,1} + \dot{E}_{Kompresör} = \dot{E}_C \quad (3.16)$$

$$\dot{E}_T = \dot{E}_{Türbin} + \dot{E}_{3,3} \quad (3.17)$$

$$\dot{E}_{Türbin} = \dot{m}_{3.3}(h_T - h_{3.3}) \quad (3.18)$$

$$\dot{E}_C + \dot{E}_{R,g2} = \dot{E}_T + \dot{E}_{R,\zeta2} \quad (3.19)$$

$$\dot{m}_C h_C + \dot{m}_R h_{R,g2} = \dot{m}_T h_T + \dot{m}_R h_{R,\zeta2} \quad (3.20)$$

$$\dot{E}_{2.1} + \dot{E}_{R,g1} = \dot{E}_{2.3} + \dot{E}_{R,\zeta1} \quad (3.21)$$

$$\dot{m}_{2.1} h_{2.1} + \dot{m}_R h_{R,g1} = \dot{m}_{2.3} h_{2.3} + \dot{m}_R h_{R,\zeta1} \quad (3.22)$$

$$h_{R,\zeta2} = h_{R,g1} \quad (3.23)$$

denklemleri yazılmalıdır. 2.1 ve 2.2 noktaları için kütleli debi değerlerinin sırasıyla 0.4 ve 0.6 kg/s olduğu kabul edilmişti. 3.2 ve 3.3 noktaları için kütleli debi değerleri denklem (3.17) kullanılarak elde edilir. Bu durumda enerji denklemleri kullanılarak elde edilen değerler;

$$\dot{m}_{3.2} = 0.315 \text{ kg/s} \quad (3.24)$$

$$\dot{m}_{3.3} = 0.685 \text{ kg/s} \quad (3.25)$$

$$\dot{E}_{Kompresör} = 76.63 \text{ kW} \quad (3.26)$$

$$\dot{E}_{Türbin} = 65.47 \text{ kW} \quad (3.27)$$

şeklindedir. Hesaplanan entropi, basınç ve kütleli debi değerleri Çizelge 3.3 ile verilmiştir. İkincil ve birincil ısı değiştirici için giriş ve çıkış havasının değerleri (yükseklik değiştiğinden) çizelge 3.4 ile verilmiştir.

Çizelge 3.3 Hesaplanan değerler

Nokta	\dot{m} (kg/s)	s (kJ/kg.K)	T (K)	P (kPa)
2	1	0.311	453.15	236.93
2.1	0.4	0.574	453.15	94.77
2.2	0.6	0.458	453.15	142.16
2.3	0.4	0.2	377.7	79
3	1	0.189	383.15	200.33
3.1	0.685	0.237	363.15	133.64
3.2	0.315	0.501	373.15	61.46
3.3	0.685	0.125	278.15	33.41
C	0.685	0.25	483.15	240.56
T	0.685	0.05	373.15	133.64
4	1	0.175	308.15	161.12
Çevre	-	0.181	218.15	28.65

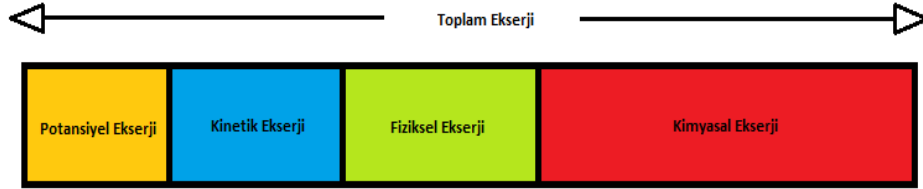
Çizelge 3.4 İ.I.D. ve B.I.D. h ve s değerleri

	9,789		10,289		10,789		11,289		11,789	
	h	s	h	s	h	s	h	s	h	s
İ.I.D. Çıkış	261.33	0.355	258.08	0.377	254.83	0.4	251.585	0.422	248.335	0.445
B.I.D. Çıkış	295.21	0.484	291.96	0.506	288.71	0.528	285.46	0.56	282.21	0.574

4. EKSERJİ ve İLERİ EKSERJİ ANALİZİ

4.1. Ekserji Analizi

Sistemin sahip olduğu ekserji bileşenleri Şekil 4.2 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Ekserji bileşenleri

Sistemde bulunan kompresör ve türbin ısı değıştiricilerde meydana gelen ısı geçişleri Başlık 2.4.1’de bahsedildiği gibidir. Sistemde sürekli akış mevcuttur, yani ekserji dengesi (3.1) deki gibidir (Çengel ve Boles, 2012).

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum_{\text{giren}} \dot{m}\Psi - \sum_{\text{çıkan}} \dot{m}\Psi - E_{x_{yokolan}} = 0 \quad (4.1)$$

Akış halindeki bir maddenin ekserjisi, maddenin durağan ekserjisiyle ve akış işiyle alakalı ekserjisinin toplamına (3.2)’de gösterildiği gibi eşittir.

$$E_{x_{akış}} = E_{x_{durağan}} + (P - P_0)V \quad (4.2)$$

Diğer bir deyişle,

$$e_{x_{Akış}} = \Psi = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (4.3)$$

$$E_{x_{Akış}} = \dot{m}\Psi = \dot{m}\{h - h_0 - T_0(s - s_0)\} \quad (4.4)$$

akış ekserjisi tanımlanır (Çengel ve Boles, 2012). Sistemde ısı geçişi ve iş etkileşimi olmayan noktalarda ekserji dengesi,

$$\sum_{\text{giren}} \dot{m}\Psi - \sum_{\text{çıkan}} \dot{m}\Psi = E_{X_D} \quad (4.5)$$

şeklinde olur (Çengel ve Boles, 2012). Sistemdeki kinetik ve potansiyel ekserjiler ve yanma işlemi olmamasından dolayı kimyasal ekserji ihmal edilmiştir. Ekserji verimleri ve yıkımları aşağıdaki formüllere göre hesaplanmıştır (Bejan ve ark., 1996).

Ekserji Verimi:

$$\varepsilon = \frac{E_{X_{\text{ürün}}}}{E_{X_{\text{yakıt}}}} = \frac{E_{X_P}}{E_{X_F}} \quad (4.6)$$

Kompresör:

$$\varepsilon = \frac{E_{X_{\text{çıkış}}} - E_{X_{\text{giriş}}}}{\dot{W}_{\text{Kompresör}}} \quad (4.7)$$

Türbin:

$$\varepsilon = \frac{\dot{W}_{\text{Türbin}}}{E_{X_{\text{giriş}}} - E_{X_{\text{çıkış}}}} \quad (4.8)$$

Sistem:

$$\varepsilon = \frac{E_{X_4}}{E_{X_2}} \quad (4.9)$$

Ekserji Yıkımları:

$$E_{X_D} = E_{X_F} - E_{X_P} \quad (4.10)$$

Kompresör:

$$E_{X_{D,K}} = E_{X_F} - E_{X_P} = \dot{W}_K - (E_{X_C} - E_{X_{3.1}}) \quad (4.11)$$

Türbin:

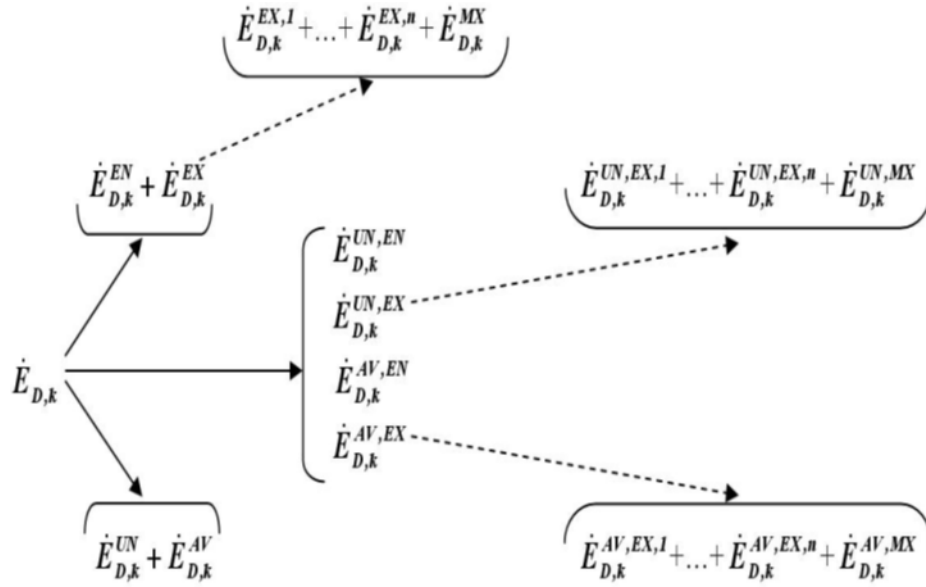
$$E_{X_{D,T}} = E_{X_F} - E_{X_P} = (E_{X_T} - E_{X_{3.3}}) - \dot{W}_T \quad (4.12)$$

4.2. İleri Ekserji Analizi

Konvansiyonel ekserji temelli analizlerle, tersinmezliklerin yeri, büyüklüğü ve sebepleri, maliyetleri ve çevresel etkileri belirlenir ve geliştirme seçenekleri için genel bir yön belirlenir. Ancak konvansiyonel analizlerin hiç birisi bileşenler arasındaki etkileşimleri belirleyemez ya da geliştirme için gerçek potansiyeli tahmin edemez. Özellikle çok sayıda bileşen içeren karmaşık sistemler göz önüne alındığında bileşenler arasındaki etkileşimleri göz önüne alınmadan optimizasyon stratejileri yanlış yönlendirilebilir. İleri ekserji temelli analizler bu problemleri çözmektedir (Petrakopoulou, 2011).

Bir sistemin ekserji yıkımının bir kısmından ve maliyet ve çevresel etkisinin bir bölümünden bileşenlerde bağımsız olarak gerçekleştirilen yapısal iyileştirmelerle, maliyet azaltılmasıyla ve verim iyileştirmeleriyle kaçınmak mümkündür. Teknik olarak iyileştirilmesi mümkün ekserji yıkımı, maliyet ve çevresel etkilere kaçınılabılır (AV) denilmektedir. Kaçınılabılır nicelikler iyileştirme aşamalarının kararlaştırılmasında ve sistemin iyileştirme potansiyelinin tahmin edilmesinde ana rolü oynamaktadırlar. Fiziksel, teknolojik ve ekonomik faktörlerle sınırlı kalan ekserji yıkımı, maliyet ve çevresel analizler, yani mümkün olmayanlar, kaçınılamaz (UN) olarak adlandırılır. Ek olarak, ekserji yıkımı, maliyetler ve çevresel etkiler kaynaklarına dayanarak da ayrılabilir. Eğer bu değerler bileşenin kendi faaliyetinden kaynaklanıyorsa dahili (EN), diğer bileşen faaliyetlerinden kaynaklanıyorsa harici (EX) olarak adlandırılır. Dahili ve harici değerleri kullanılarak bileşenler arasındaki etkileşimler ve geliştirme seçenekleri belirlenir. Dahası, kaçınılabılır ve kaçınılamaz değerler dahili ve harici değerlere

ayrılarak daha detaylı analiz etme imkanı doğmaktadır (Petrakopoulou, 2011). Şekil 4.1'te ekserji yıkımı için değerlerin ayrılması gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Değerlerin ayrılması (Kaynak: Petrakopoulou, 2011)

Tsatsaronis ve Morosuk (2012)'un belirttiği gibi, ekserji analizi bir enerji sistemini geliştirmek, değerlendirmek ve iyileştirmek için güçlü bir araçtır. Ancak, ekserji analizinden elde edilen sonuçların kullanım alanındaki eksikliği, enerji alanında çalışan profesyoneller için bu yöntemi daha az popüler hale getirmektedir. Bu kullanım alanındaki eksiklik, bir enerji sistemi içerisinde bileşenler arasındaki etkileşimler bilinmeden düzeltilemez. Bir bileşende ekserji yıkımlarının kaçınılabilir ve kaçınılamaz olarak ayrılması, bu bileşenin termodinamik performansının geliştirilmesi için gerçekçi bir ölçü sunmaktadır. Bununla birlikte ekserji yıkımının dahili ve harici olarak ayrılması ise bileşenler arasındaki etkileşimler hakkında bilgi vermektedir. Ekserji yıkımının bir taraftan kaçınılabilir ve kaçınılamaz olarak diğer taraftan da dahili ve harici olarak ayrılması, araştırmacıların termodinamiksel olarak düzeltilebilecek verimsizliklere ve bileşenler arasındaki etkileşimlere odaklanmasını mümkün kılmaktadır. Kaçınılabilir dahili ve kaçınılabilir harici ekserji yıkımları enerji sistemlerinin termodinamik performansının iyileştirilmesi için en iyi rehberliği sunmaktadır.

4.2.1. İleri ekserji analizinin avantajları

Ekserji analizinin avantajları birçok araştırmacı tarafından tartışılmıştır. Ancak geleneksel bir ekserji analizi sistem bileşenleri arasındaki ortak bağılıkları değerlendiremez ve durum sistemin geliştirilmesi için potansiyellerin yanlış değerlendirilmesine yol açar. İleri ekserji analizi ile geleneksel ekserji analizlerinde meydana gelen bu olumsuz durum ortadan kalkar. İleri ekserji analizinde ekserji yıkımları dahili, harici ve kaçınılabilir, kaçınılamaz bölümlere ayrılır. Daha sonra bu iki ayırım birleştirilmesi, tüm sistemin iyileştirilmesi için işletmeciye ve tasarımcıya sistemde yapılması gereken iyileştirmelerle ve potansiyellerle ilgili açık, belirsizlikleri giderilmiş bilgi sunar. Bu ayırım ekserji analizinin ve termodinamik verimsizliklerin oluşumunun anlaşılmasının doğruluğunu artırmaktadır. Ayrıca eksergoekonomik ve eksergoçevresel analizler için daha iyi bir temel sunmaktadır (Tsatsaronis ve Morosuk, 2012).

4.3. Ekserji Yıkımının Ayrılması

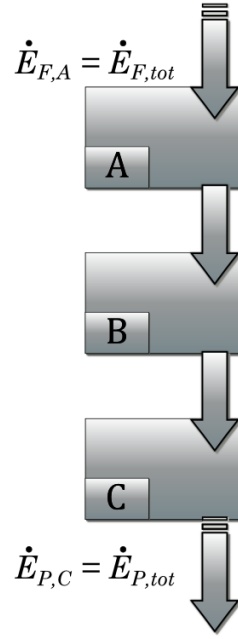
Bir bileşende meydana gelen ekserji yıkımının bileşenin kendi faaliyetinden (E_{XD}^{EN}) mi yoksa diğer bileşenlerin faaliyetinden (E_{XD}^{EX}) mi meydana geldiğini anlamak için sistemin çalışma şartları değiştirilmelidir. Bir bileşende meydana gelen dahili ekserji yıkımını hesaplamak için, ilgilenilen bileşen gerçek çalışma şartlarında faaliyetini sürdürmeli, diğer bileşenler ise teorik olarak tersinmezliklerden yoksun olarak, yani ideal şartlarda faaliyetlerini sürdürmelidirler. Tüm durumlarda sistemin güç çıkışı gerçek durumdaki güç çıkışına eşit olmalıdır (Petrakopoulou 2011; Kelly 2008).

Harici ekserji yıkımı (E_{XD}^{EX}) ise gerçek ekserji yıkımdan (E_{XD}) dahili ekserji yıkımını (E_{XD}^{EN}) çıkararak bulunur.

$$E_{XD} = E_{XD}^{EN} + E_{XD}^{EX} \quad (4.13)$$

Harici ekserji yıkımı bu yüzden, ilgili bileşen dışında kalan tüm sistemin oluşturan bileşenlerin faaliyetleri dolayısıyla meydana gelen ekserji yıkımıdır.

Dahili ve harici ekserji yıkımları Kelly (2008) tarafından da Şekil 4.2’de belirtildiği gibi örneklendirilmiştir.



Şekil 4.3 Adım adım bileşenlerin bağlantısı (Kaynak: Kelly, 2008)

Sistemin tamamı A, B ve C bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu durumda bir bileşenin ürün ekserjisi diğer bileşenin yakıt ekserjisidir. A bileşeninin ürün ekserjisi B bileşeninin yakıt ekserjisi, B bileşeninin ürün ekserjisi ise C bileşeninin yakıt ekserjisidir. A bileşeninin yakıt ekserjisi sistemin yakıt ekserjisi, C bileşeninin ürün ekserjisi ise sistemin ürün ekserjisidir ve bu analizde sabit kalmaktadır (Kelly, 2008; Petrakopoulou 2011). Bu yüzden tüm sistemde ekserji kayıpları E_{X_L} yoktur. Tüm sistem için ekserji dengesi şu şekilde yazılabilir (Kelly, 2008):

$$E_{X_{F,tot}} = E_{X_{P,toplam}} + \sum_k E_{X_{D,k}} + E_{X_{L,toplam}} \quad (4.14)$$

$$\sum_k E_{X_{D,k}} = E_{X_{D,A}} + E_{X_{D,B}} + E_{X_{D,C}} \quad (4.15)$$

$$E_{X_{L,toplam}} = 0 \quad (4.16)$$

Bu durumda, her bir bileşen için ekserji yıkımları aşağıdaki gibi tanımlanır:

C Bileşeni

$$E_{X_{D,C}} = E_{X_{P,toplam}} \left(\frac{1}{\varepsilon_C} - 1 \right) \quad (4.17)$$

Yukarıdaki eşitlikten anlaşılacağı üzere C bileşenindeki ekserji yıkımı sadece bileşenin kendisine bağlıdır. Bu yüzden bu bileşendeki ekserji yıkımı sadece dahili ekserji yıkımıdır, yani $E_{X_{D,C}} = E_{X_{D,C}}^{EN}$ 'dir (Kelly, 2008).

B Bileşeni

$$E_{X_{D,B}} = E_{X_{P,toplam}} \varepsilon_C \left(\frac{1}{\varepsilon_B} - 1 \right) \quad (4.18)$$

Denklem (4.6) dan görüleceği üzere B bileşenindeki ekserji yıkımı hem B bileşenindeki hem de C bileşenindeki tersinmezliklere bağlıdır. Bu yüzden bu bileşende hem dahili hem de harici ekserji yıkımları meydana gelmektedir. C bileşenin ideal çalışması durumunda B bileşeninde meydana gelen dahil ekserji yıkımı hesaplanabilir (Kelly, 2008).

A Bileşeni

$$E_{X_{D,A}} = E_{X_{P,toplam}} \varepsilon_C \varepsilon_B \left(\frac{1}{\varepsilon_A} - 1 \right) \quad (4.19)$$

A bileşeninde meydana gelen ekserji yıkımı A, B ve C bileşenindeki tersinmezliklere bağlıdır. Eğer sistemde bulunan diğer bileşenler ideal olarak çalışsaydı A bileşeninde meydana gelen dahili ekserji yıkımı hesaplanabilirdi.

Bir bileşende meydana gelen ekserji yıkımı sistemin diğer bileşenlerindeki tersinmezliklere bağlı ise, diğer bileşenlerin ideal şartlarda çalışması durumunda o bileşendeki dahili ekserji yıkımı hesaplanabilir (Kelly, 2008).

Bir bileşende meydana gelen dahili ve harici ekserji yıkımlarının belirlenmesi tüm sistemin ve o bileşenin optimizasyonunun sağlanması için yol göstermektedir. Bir bileşendeki dahili ekserji yıkımı değerinin azaltılması (bileşenin kendisinde iyileştirme sağlayarak) aynı zamanda diğer bileşenlerde meydana gelen harici ekserji yıkımı değerlerinin azalmasını sağlayacaktır. Yani diğer bileşenler otomatik olarak daha az ekserji yıkımı değerlerine sahip olacaklardır (Kelly ve ark., 2009).

Teknolojik ve ekonomik sınırlamalar minimum değerde bir ekserji yıkımı belirler. Bu değer kaçınılmaz ($E_{X_D}^{UN}$) ekserji yıkımıdır. Kaçınılmaz ekserji yıkımı değeri ($E_{X_D}^{UN}$) her bir bileşenin yalıtımlı olduğu ve sistemden ayrıldığı varsayılarak hesaplanmıştır. Herhangi bir bileşen için bu şartlarda $(E_{X_D}/E_{X_P})_k^{UN}$ oranı ise yüksek verim ve düşük kayıp oranları varsayarak hesaplanmıştır. Herhangi bir k bileşeni için, gerçek çalışma şartlarında bileşenin sahip olduğu ürün ekserjisi (E_{X_P}) yardımıyla kaçınılmaz ekserji yıkımı ($E_{X_D}^{UN}$) şu şekilde hesaplanmıştır (Petrakopoulou, 2011) :

$$E_{X_{D,k}}^{UN} = E_{X_{P,k}} (E_{X_D}/E_{X_P})_k^{UN} \quad (4.20)$$

Kaçınılmaz ekserji yıkımını hesaplamak için kullanılan $(E_{X_D}/E_{X_P})_k^{UN}$ ifadesi mevcut olan en iyi bileşenin seçilerek günümüz teknolojisinin sınırları içerisinde en az ekserji yıkımını elde etmek amacıyla belirlenmiştir (Kelly, 2008).

Kaçınılmaz ekserji yıkımı ($E_{X_D}^{UN}$) bilindiğinde kaçınılabılır ekserji yıkımı ($E_{X_D}^{AV}$) ise aşağıdaki şekilde gerçek ekserji yıkımından çıkarılarak hesaplanır.

$$E_{X_D} = E_{X_D}^{AV} + E_{X_D}^{UN} \quad (4.21)$$

4.3.1. Kaçınılmaz ve kaçınılabılır ekserji yıkımının ayrılması

Herhangi bir k bileşeni için kaçınılmaz dahili ve harici ekserji yıkımları ($\dot{X}_{D,k}^{UN,EN}$ ve $\dot{X}_{D,k}^{UN,EX}$) aşağıdaki formüllerdeki gibi hesaplanır (Petrakopoulou, 2011):

$$E_{X_{D,k}}^{UN,EN} = E_{X_{P,k}}^{EN} (E_{X_D}/E_{X_P})_k^{UN} \quad (4.22)$$

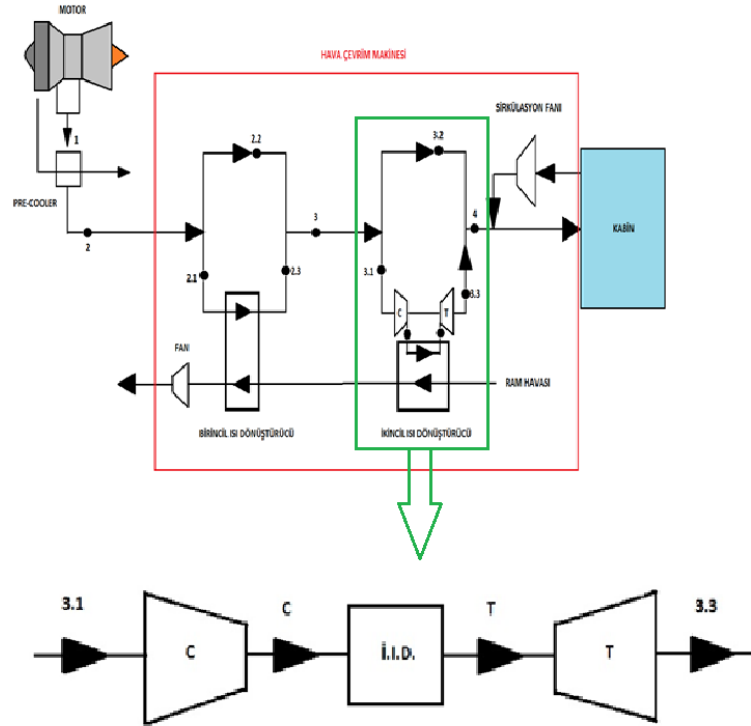
$$E_{X_{D,k}}^{UN,EX} = E_{X_{D,k}}^{UN} - E_{X_{D,k}}^{UN,EN} \quad (4.23)$$

Herhangi bir k bileşeni için kaçınılmaz dahili ve harici ekserji yıkımları ($E_{X_{D,k}}^{AV,EN}$ ve $E_{X_{D,k}}^{AV,EX}$) ise aşağıdaki gibidir (Petraopoulou, 2011):

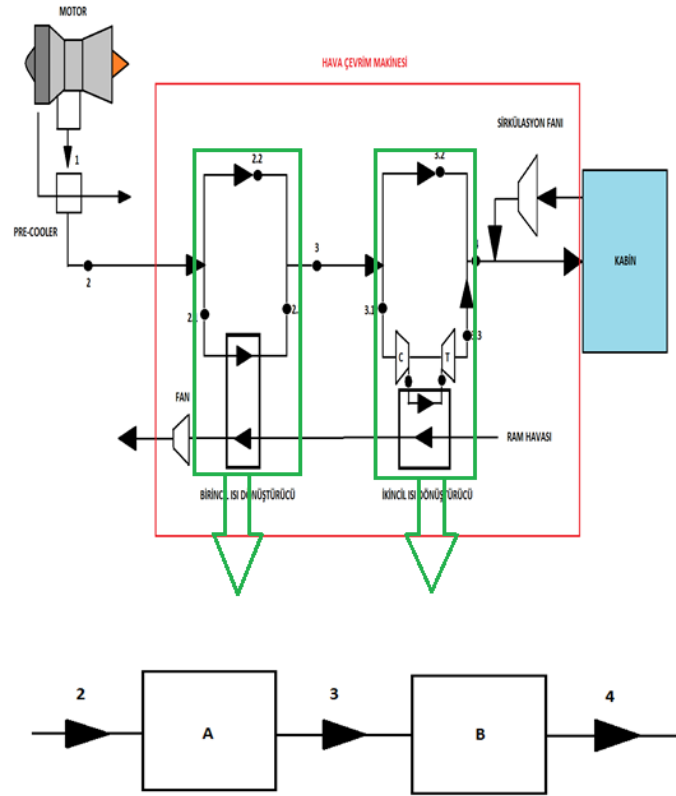
$$E_{X_{D,k}}^{AV,EN} = E_{X_{D,k}}^{EN} - E_{X_{D,k}}^{UN,EN} \quad (4.24)$$

4.4. İleri Ekserji Analizi İçin Sistem

İleri ekserji analizinin gerçekleştirilebilmesi için bölüm 3.3'te bahsedildiği gibi Petraopoulou (2011) tarafından belirtilen sistem kullanılmıştır. Bunun için hava çevrim sistemi iki ayrı bölüme ayrılmıştır. Şekil 3.4 ve 3.5'te Bölüm I ve Bölüm II gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Bölüm I



Şekil 4.5 Bölüm II

Bölüm I için ileri ekserji analizi uygulanırken $\dot{W}_{Türbin}$, Bölüm II için ise E_{X_4} sabit tutulmuştur. Sistemin iki bölüme ayrılması sonucu, Bölüm I için ileri ekserji parametreleri elde edildiğinden, Bölüm I kullanılarak yalnızca A bileşeni için ileri ekserji parametreleri elde edilmiştir.

Bölüm I'de bulunan türbin ve kompresör için kaçınılabilir ve kaçınılamaz ekserji değerleri hesaplanması için, türbinin izantropik verimi 0.96, kompresörün izantropik verimi ise 0.93 kabul edilmiştir (Morosuk ve Tsatsaronis, 2009).

Bölüm I'de bulunan İkincil Isı Değiştirici (İ.I.D.) için kaçınılabilir ve kaçınılamaz ekserji yıkımlarının belirlenmesi için öncelikle sıcak ve soğuk akışlar için termodinamik ortalama sıcaklık belirlenmiştir. Sıcak akış için termodinamik ortalama sıcaklık $T_{h,a}$ ile, soğuk akış için termodinamik ortalama sıcaklık $T_{c,a}$ ile gösterilmiştir. Bejan ve ark.(1996)'nın belirttiği gibi bu değerler;

$$T_{c,a} = \frac{\dot{H}_\zeta - \dot{H}_G}{\dot{S}_\zeta - \dot{S}_G} \quad (4.25)$$

$$T_{h,a} = \frac{\dot{H}_\zeta - \dot{H}_G}{\dot{S}_\zeta - \dot{S}_G} \quad (4.26)$$

şeklindedir. Burada ζ ve g indisleri sıcak ve soğuk akışlar için kendi giriş ve çıkış değerlerini temsil etmektedir, örneğin sıcak akış için \dot{H}_ζ değeri soğuk akış için olan \dot{H}_g değerinden farklıdır. Ayrıca giriş ve çıkış basınçları birbirine eşit kabul edilmiştir ($P_G = P_\zeta$).

Isı değiştiricilerinde sıcak ve soğuk akışlar arasındaki ısı transferinden dolayı meydana gelen ekserji yıkımı bu değerler kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilebilir (Bejan ve ark., 1996).

$$E_{XD} = T_0 \dot{Q} \frac{T_{h,a} - T_{c,a}}{T_{h,a} T_{c,a}} \quad (4.27)$$

Ancak İ.I.D.'de sıcak ve soğuk akış için ortalama sıcaklıkların çarpımının çok yüksek olmasından dolayı ısı transferinden nedeniyle meydana gelen ekserji yıkımı sifıra yaklaşmaktadır.

Cziesla ve ark. (2006) bir ısı değiştirici için kaçınılmaz ekserji yıkımı değerinin belirlenmesi amacıyla, yukarıda bahsedilen sıcak akış için ortalama termodinamik sıcaklık ve soğuk akış için ortalama termodinamik sıcaklık arasındaki farkın minimum olması gerektiğini belirtmiştir. Yani;

$$T_{h,a} = T_{c,a} + \Delta T_{\min} \quad (4.28)$$

olmalıdır. ΔT_{\min} değeri yine Cziesla ve ark. (2006) tarafından 50 K olarak belirtilmiştir, bu çalışmada da bu değer kullanılacaktır. Sıcak ve soğuk akışların ısı transferi ile ilgili ekserji oranları aşağıdaki gibidir.

$$E_{X_{q,c}} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{c,a}}\right)\dot{Q} \quad (4.29)$$

$$E_{X_{q,h}} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{h,a}}\right)\dot{Q} \quad (4.30)$$

Böylece İ.I.D. için kaçınılmaz ekserji yıkımı şu formülle elde edilir:

$$E_{X_D}^{UN} = E_{X_{q,h}} - E_{X_{q,c}} \quad (4.31)$$

İ.I.D. için belirlenen soğuk akış için ortalama termodinamik sıcaklık 229.61 K, sıcak akış için belirlenen ortalama termodinamik sıcaklık 279.61 K değerindedir. Bu sıcaklık değerlerinde sıcak akıştan soğuk akışa $\dot{Q} = 25.64$ kW değerinde ısı geçişi olmaktadır.

İkinci ısı değiştirici için $(E_{X_D}/E_{X_P})_k^{UN}$ değeri yüksek sıcaklık seramik ısı değiştiricileri için Cziesla ve ark. (2006) tarafından kabul edilen 0.0125 değeri kullanılmıştır.

5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

5.1. Ekserji Analizi Sonuçları

Ekserji analizinin sonuçları 5.1'den 5.10'a kadar olan çizelgeler ile bu bölümün sonunda sıralanmıştır.

Çizelge 5.1'de görüldüğü üzere hava çevrim makinesine motor tarafından 237.665 kw ekserji sağlanmaktadır ve bu değer 150.375 kW'lık kısmı ile kabine ısıtma sağlanmaktadır. Sistem için verim tanımına bağlı olarak en yüksek verim 11,789 m'dedir. Ekserji yıkımı ise diğer bileşenlerden farklı olarak en fazla yine bu yükseklikte meydana gelmiştir ve yüksekliğin azalmasıyla birlikte azalmaktadır.

Çizelge 5.1 11,789 m'de ekserji değerleri

Nokta	E_X (kJ/s)
2	237.655
2.1	72.812
2.2	123.987
2.3	38.656
3	191.955
3.1	115.758
3.2	36.719
3.3	31.864
C	176.271
T	112.16
4	150.375
Çevre	0
İ.İ.D. Çıkış	5.802
B.İ.D. Çıkış	19.11

Kompresör, türbin, İ.I.D. ve A bileşeni için ekserji verimleri Çizelge 5.2’de görüldüğü gibi en yüksek 11,789 m de gözlemlenmiş ve yükseklik değişimiyle paralel seyretmiştir. Bu bileşenler için ekserji yıkımları ekserji verimleriyle paralel şekilde en yüksek 9,789 m’de meydana gelmiş ve yükseklik artışıyla azalmıştır.

Çizelge 5.2 11,789 m’de ekserji parametreleri

Bileşen	ϵ	E_{XD} (kW)
B.İ.D.	0.735	22.116
Kompresör	0.804	17.313
İ.İ.D.	0.669	59.363
Türbin	0.753	21.581
Sistem	0.633	87.28
A Bileşeni	0.867	32.392

B.İ.D.’de 10,789 m ve 10,289 m’de aynı ekserji verimi gözlemlenmiş, artan yükseklikle birlikte ekserji verimi artmakta, yüksekliğin azalmasıyla ise azalmaktadır.

Çizelge 5.3’te görüldüğü gibi 11,289 m’de hava çevrim sistemine 229.38 kW ekserji akışı vardır. Kabine ise 143.007 kW ekserji girişi vardır. Sistemde meydana gelen toplam ekserji yıkımı 86.373 kW’tır.

Çizelge 5.3 11,289 m’de ekserji değerleri

Nokta	E_X (kJ/s)
2	229.38
2.1	69.16
2.2	118.736
2.3	35.579
3	184.077
3.1	110.12
3.2	33.918
3.3	26.04
C	170.483
T	106.564
4	143.007
Çevre	0
İ.İ.D. Çıkış	4.76
B.İ.D. Çıkış	17.231

11,289 m’de ekserji parametreleri Çizelge 5.4 ile gösterilmiştir. Bu yükseklikte en yüksek verime sahip bileşen diğer yüksekliklerde olduğu gibi A bileşenidir.

Çizelge 5.4 11,289 m’de ekserji parametreleri

Bileşen	ϵ	E_{XD} (kW)
B.İ.D.	0.714	22.351
Kompresör	0.802	17.425
İ.İ.D.	0.653	60.183
Türbin	0.751	21.759
Sistem	0.623	86.373
A Bileşeni	0.86	32.832

10,789 m’de hava aracından hava çevrim sistemine Çizelge 5.5’te görüldüğü gibi 221.031 kW ekserji akışı vardır. Kabinde istenilen sıcaklığa (35 °C) ulaşmak için 4 noktasında ekserji değeri 135 kW’tır. Sitemde en çok ekserji yıkımı öncelikle İ.I.D.’de, daha sonra A bileşeninde meydana gelmiştir. Yükseklik artışıyla birlikte 2 ve 4 noktalarında daha fazla ekserji değerlerine ulaşılmaktadır.

Çizelge 5.5 10,789 m’ ekserji değerleri

Nokta	E_X (kJ/s)
2	221.031
2.1	65.479
2.2	113.44
2.3	32.472
3	176.125
3.1	104.431
3.2	31.094
3.3	20.166
C	164.645
T	100.918
4	135.565
Çevre	0
İ.I.D. Çıkış	3.717
B.I.D. Çıkış	15.353

10,789 m’de hava çevrim sisteminin bileşenlerinin ekserji parametreleri Çizelge 5.6 ile gösterilmiştir. Bu yükseklikte sistemde 85.47 kW ekserji yıkımı meydana gelmektedir.

Çizelge 5.6 10,789 m’de ekserji parametreleri

Bileşen	ε	E_{XD} (kW)
B.İ.D.	0.69	22.59
Kompresör	0.8	17.537
İ.İ.D.	0.64	61.003
Türbin	0.75	21.94
Sistem	0.613	85.47
A Bileşeni	0.852	33.27

Çizelge 5.7 10,289 m’de ekserji değerleri

Nokta	E_X (kJ/s)
2	212.609
2.1	61.768
2.2	108.101
2.3	29.336
3	168.1
3.1	98.692
3.2	28.246
3.3	14.242
C	158.756
T	95.222
4	128.05
Çevre	0
İ.İ.D. Çıkış	2.675
B.İ.D. Çıkış	13.474

10,289 m’de ekserji parametreleri Çizelge 5.8 ile verilmiştir. En yüksek ekserji yıkımı sistemde meydana gelmektedir. Yükseklikle ekserji yıkımları doğru orantılıdır.

Çizelge 5.8 10,289 m’de ekserji parametreleri

Bileşen	ε	E_{XD} (kW)
B.İ.D.	0.69	22.821
Kompresör	0.798	17.65
İ.İ.D.	0.617	61.823
Türbin	0.747	22.115
Sistem	0.602	84.559
A Bileşeni	0.843	33.710

Çizelge 5.9 9,789 m’de ekserji değerleri

Nokta	E_X (kJ/s)
2	204.115
2.1	58.029
2.2	102.719
2.3	26.171
3	160.003
3.1	92.904
3.2	25.376
3.3	8.269
C	152.818
T	89.476
4	120.463
Çevre	0
İ.İ.D. Çıkış	1.633
B.İ.D. Çıkış	11.595

Ekserji yıkımlarının en az olduğu yükseklik 9,789 m’dir ve parametreleri Çizelge 5.10 ile verilmiştir.

Çizelge 5.10 9,789 m³'de ekserji parametreleri

Bileşen	ϵ	E_{XD} (kW)
B.İ.D.	0.633	23.0566
Kompresör	0.796	17.762
İ.İ.D.	0.596	62.643
Türbin	0.745	22.293
Sistem	0.59	83.652
A Bileşeni	0.834	34.149

Ekserji analizi değerlendirildiğinde, hava çevrim sisteminin bileşenlerinde en fazla geliştirme potansiyeli olan bileşenler sırasıyla İ.İ.D., A bileşeni ve B.İ.D.'dir. Yükseklik artışıyla birlikte tüm bileşenlerde ekserji verimleri artmaktadır ve ekserji yıkımları azalmaktadır.

5.2. İleri Ekserji Analizi Sonuçları

Türbinde meydana gelen ekserji yıkımının büyük çoğunluğu türbinin kendi yapısından kaynaklanmaktadır, yani diğer bileşenlerin etkisi çok azdır. Aynı ekserji yıkımının büyük çoğunluğundan daha iyi bir türbin (daha tersinir) sayesinde kaçınılabilir. Tüm yüksekliklerde yalnızca 2.52 kW ekserji yıkımı kaçınılamazdır.

Çizelge 5.11 11,789 m³'de ileri ekserji değerleri

	$E_{XD,k}^{EN}$	$E_{XD,k}^{EX}$	$E_{XD,k}^{UN}$	$E_{XD,k}^{AV}$	$E_{XD,k}^{UN,EN}$	$E_{XD,k}^{UN,EX}$	$E_{XD,k}^{AV,EN}$	$E_{XD,k}^{AV,EX}$	$(E_{XD}/E_{XP})_k^{UN}$	E_{XD}
Türbin	19.825	1.756	2.52	19.062	2.52	0	17.305	1.756	0.041667	21.581
İ.İ.D.	48.51	10.854	4.224	55.14	1.227	2.997	47.283	7.857	0.0125	59.363
Kompresör	14.747	2.566	4.555	12.758	4.555	0	10.192	2.566	0.07527	17.313
A	26.901	5.491	-	-	-	-	-	-	-	32.392

İ.İ.D.'de meydana gelen ekserji yıkımı çoğunlukla ısı değiştiricinin tersinmez yapısından kaynaklanmaktadır. Diğer bileşenlerin etkisi ısı değiştiricinin kendisine

göre daha azdır ancak diğer bileşenlerde sağlanacak iyileştirmelerin ısı değiştirici üzerinde hala hatırı sayılır bir etkisi olacaktır (10.854 kW-14.979 kW). Tüm yüksekliklerde meydana gelen toplam ekserji yıkımından (59 kW-62 kW) yalnızca yaklaşık 4 kW'lık kısmı kaçınılmazdır. Daha iyi bir ısı değiştirici kullanarak ısı değiştiricide meydana gelen ekserji yıkımı büyük ölçüde kaçınılabilmektedir (46.785 kW-47.283 kW).

Çizelge 5.12 11,289 m'de ileri ekserji değerleri

	$E_{X_{D,k}}^{EN}$	$E_{X_{D,k}}^{EX}$	$E_{X_{D,k}}^{UN}$	$E_{X_{D,k}}^{AV}$	$E_{X_{D,k}}^{UN,EN}$	$E_{X_{D,k}}^{UN,EX}$	$E_{X_{D,k}}^{AV,EN}$	$E_{X_{D,k}}^{AV,EX}$	$(E_{X_D}/E_{X_P})_k^{UN}$	E_{X_D}
Türbin	20.053	1.706	2.52	19.24	2.52	0	17.533	1.706	0.041667	21.759
İ.I.D.	48.503	11.68	4.289	55.9	1.141	3.148	47.362	8.533	0.0125	60.183
Kompresör	14.897	2.528	4.544	12.881	4.543	0	10.353	2.528	0.07527	17.425
A	26.91	5.922	-	-	-	-	-	-	-	32.831

Kompresörde meydana gelen ekserji yıkımının büyük çoğunluğu kompresörden kaynaklanmaktadır. Daha iyi bir kompresör kullanarak meydana gelen yıkımdan büyük ölçüde kurtulmak mümkündür. Ancak tüm yüksekliklerde yaklaşık 4.5 kW kaçınılmaz ekserji yıkımı mevcuttur ki kompresörün kendi yapısından kaynaklanmaktadır.

A bileşeninde ise ekserji yıkımının büyük çoğunluğu dahili olarak gerçekleşmiştir. Diğer bileşenlerin (kompresör, türbin ve ikincil ısı değiştirici) bu bileşen üzerindeki etkisi yaklaşık yüzde yirmi civarındadır.

Tüm bileşenler arasında (A bileşeni hariç) en fazla geliştirme potansiyeli İ.I.D.'dedir. İ.I.D.'yi sırasıyla türbin ve kompresör takip etmektedir. Diğer bileşenlerdeki tersinmezliklerin etkisi yine en fazla İ.I.D. üzerinde olmuştur. Dolayısıyla diğer bileşenler üzerinde yapılacak iyileştirmelerin en fazla etkisi bileşenin kendisi dışında İ.I.D.'ye olacaktır. İ.I.D.'de meydana gelen diğer bileşen etkilerinin büyük çoğunluğu kaçınılabilmektedir. Ayrıca bu değerler yüksekliğin azalmasıyla birlikte artmaktadır.

Çizelge 5.13 10,789 m’de ileri ekseri değerleri

	$E_{XD,k}^{EN}$	$E_{XD,k}^{EX}$	$E_{XD,k}^{UN}$	$E_{XD,k}^{AV}$	$E_{XD,k}^{UN,EN}$	$E_{XD,k}^{UN,EX}$	$E_{XD,k}^{AV,EN}$	$E_{XD,k}^{AV,EX}$	$(E_{XD}/E_{XP})_k^{UN}$	E_{XD}
Türbin	20.281	1.656	2.52	19.42	2.52	0	17.761	1.656	0.041667	21.937
İİD	48.378	12.625	4.353	56.65	1.0544	3.299	47.324	9.3262	0.0125	61.003
Kompresör	15.047	2.491	4.532	13.005	4.532	0	10.514	2.491	0.07527	17.537
A	26.869	6.402	-	-	-	-	-	-	-	33.271

Yükseklik artışıyla birlikte, türbinde meydana gelen dahili ekserji yıkımı, kaçınılabılır ekserji yıkımı ve kaçınılabılır dahili ekserji yıkımı azalmakta, harici ekserji yıkımı ve kaçınılabılır harici ekserji yıkımı artmakta, kaçınılamaz ekserji yıkımı ise sabit kalmaktadır.

Çizelge 5.14 10,289 m’de ileri ekseri değerleri

	$E_{XD,k}^{EN}$	$E_{XD,k}^{EX}$	$E_{XD,k}^{UN}$	$E_{XD,k}^{AV}$	$E_{XD,k}^{UN,EN}$	$E_{XD,k}^{UN,EX}$	$E_{XD,k}^{AV,EN}$	$E_{XD,k}^{AV,EX}$	$(E_{XD}/E_{XP})_k^{UN}$	E_{XD}
Türbin	20.51	1.605	2.52	19.596	2.52	0	17.989	1.605	0.041667	22.115
İİD	48.12	13.714	4.418	57.405	0.967	3.451	47.142	10.263	0.0125	61.823
Kompresör	15.197	2.453	4.521	13.129	4.521	0	10.676	2.453	0.07527	17.65
A	26.771	6.939	-	-	-	-	-	-	-	33.71

İ.İ.D.’de ise yükseklik artışıyla birlikte dahili ekserji yıkımı ve kaçınılabılır ekserji yıkımı azalmakta, ancak kaçınılabılır dahili ekserji yıkımı 11,289 m ‘den 11,789 m’ye azalmakta, diğer tüm yükseklik artışlarında artmaktadır. Harici ekserji yıkımı, kaçınılabılır ekserji yıkımı, kaçınılabılır harici ve kaçınılamaz harici ekserji yıkımı ise yükseklik artışıyla azalmakta, kaçınılamaz dahili yükseklik artışıyla artmaktadır.

Kompresör için yükseklik artışıyla birlikte dahili, kaçınılabılır ve dahili kaçınılabılır ekserji yıkımı değerleri azalmaktadır. Harici, kaçınılamaz, kaçınılamaz harici ve kaçınılabılır harici artmaktadır.

Çizelge 5.15 9,789 m’de ileri ekserji değerleri

	$E_{XD,k}^{EN}$	$E_{XD,k}^{EX}$	$E_{XD,k}^{UN}$	$E_{XD,k}^{AV}$	$E_{XD,k}^{UN,EN}$	$E_{XD,k}^{UN,EX}$	$E_{XD,k}^{AV,EN}$	$E_{XD,k}^{AV,EX}$	$(E_{XD}/E_{XP})_k^{UN}$	E_{XD}
Türbin	20.736	1.557	2.52	19.774	2.52	0	18.217	1.557	0.041667	22.293
İİD	47.664	14.979	4.483	58.16	0.88	3.604	46.785	11.376	0.0125	62.643
Kompresör	15.346	2.416	4.5097	13.252	4.5097	0	10.837	2.416	0.07527	17.762
A	26.606	7.544	-	-	-	-	-	-	-	34.15

A bileşeni için ise yükseklik artışıyla birlikte dahili ekserji yıkımı yalnızca 11,289 m.’den 11,789 m’ye geçerken azalmakta, diğer tüm yükseklik artışlarında artmaktadır. Harici ekserji yıkımı ise yükseklik artışıyla birlikte azalmaktadır.

İleri ekserji analizine göre en fazla geliştirme potansiyeli tüm yüksekliklerde İ.I.D.’dedir. Yani daha verimli ısı değiştirici kullanarak bu ekserji yıkımının büyük çoğunluğundan kaçınmak mümkündür. Aynı durum türbin ve kompresör için de söz konusudur ancak bu bileşenlerde dahili kaçınılabılır miktarı İ.I.D.’ye göre daha azdır. Bu bileşenler yerine daha yüksek izantropik verimli bileşenlerin kullanılması A bileşeninde meydana gelen harici ekserji yıkımını azaltacak ve hava çevrim makinesinin toplam verimini artıracaktır.

5.3. Tartışma

Ekserji ve ileri ekserji analizlerine göre aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Ekserji analizine göre sistem için verim tanımına bağlı olarak en yüksek verim 11,789 m’dedir.
- Sistemin ekserji yıkımı en fazla 11,789 m de meydana gelmiştir ve yükseklik artışıyla paralel seyretmiştir.

- Kompresör, türbin, İ.I.D. ve A bileşeni için 11,789 m en uygun yüksekliktir (Yüksek ekserji verimi düşük ekserji yıkımı). Bu bileşenler için 9,879 m de en fazla ekserji yıkımı ve en düşük ekserji verimi meydana gelmiştir.
- B.I.D.'da için diğer bileşenlerde olduğu gibi en uygun yükseklik 11,789 m dir.
- .A bileşeni tüm yüksekliklerde en yüksek ekserji verimine sahiptir.
- Ekserji analizine göre en fazla geliştirme potansiyeline sahip bileşenler sırasıyla İ.I.D., B.I.D., türbin, kompresör ve A bileşenidir.
- Bileşenlerde ve sistemde yükseklik artışıyla birlikte geliştirme potansiyeli azalmaktadır.
- İleri ekserji analizine göre, türbinde, İ.I.D.'de ve kompresörde meydana gelen ekserji yıkımlarının büyük çoğunluğu bileşenlerin kendi tersinmez yapısından kaynaklanmaktadır. Daha iyi (daha tersinir) bir türbin sayesinde kaçınılabılır ekserji yıkımı oranı yükectir. Türbinde bütün yüksekliklerde yalnızca 2.52 kW, İ.I.D.'de 4 kW, kompresörede 4.5 kW ekserji yıkımı kaçınılamazdır.
- Diğer bileşenlerdeki tersinmezliklerin etkisi yine en fazla İ.I.D. üzerinde olmuştur.
- İleri ekserji analizine göre en fazla geliştirme potansiyeli İ.I.D.'dedir.
- Bileşenlerin tersinmez yapılarından dolayı meydana gelen ekserji yıkımı diğer ekserji yıkımlarına göre tüm yüksekliklerde en fazladır.

KAYNAKLAR

- Al-Garni, A. Z., Tozan, M., ve Abdelrahman, W. G. (2009), “Graphical techniques for managing field failures of aircraft systems and components,” *Journal of Aircraft*, 46(2), 608–616.
- Anonim (2015a), *Competition between airbus and boeing*.
http://en.wikipedia.org/wiki/Competition_between_Airbus_and_Boeing#References.
- Anonim (2015b), *A319/320/321 Environmental control system*.
<http://www.csner.com/temp/amm/pack.pdf>
- Anonim (2015c), *Aerotoxic syndrome*.
https://en.wikipedia.org/wiki/Aerotoxic_syndrome
- Anonim (2015d), *Hypoxia (medical)*.
[https://en.wikipedia.org/wiki/Hypoxia_\(medical\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Hypoxia_(medical))
- Anonim (2015e), *Environmental impact of aviation*.
https://en.wikipedia.org/wiki/Environmental_impact_of_aviation
- Anonim (2015f), *Environmental efficiency*.
<http://aviationbenefits.org/environmental-efficiency>
- Anonim (2015g), *Aviation*.
https://en.wikipedia.org/wiki/Aviation#Environmental_impact
- Bejan, A. (1994), *Entropi generation through heat and fluid flow*, Wiley.
- Bejan, A. (1996), “Entropy generation minimization: the new thermodynamics of finite-size devices and finite-time processes,” *Journal of Applied Physics*, 79, 1191-1218.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G. Ve Moran M. (1996), *Thermal design and optimization*, John Wiley & Sons, Inc.
- Bejan, A. ve Siems, D.L. (2001), “The need for exergy analysis and thermodynamic optimization in aircraft development,” *Exergy, An International Journal*, 1, 14–24.
- Bejan, A. (2002), “Fundamentals of exergy analysis, entropy generation minimization, and the generation of flow architecture,” *International Journal of Energy Research*, 26(7), 545–565.

- Bertin, J. J. ve Cummings, R.M. (2002), *Aerodynamics for engineers*, Pearson Education International.
- Brewer, K.M. (2006), *Exergy methods for the mission level analysis and optimization of generic hypersonic vehicles*, Master Dissertation, Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.
- Butt, J.R. (2005), *A study of morphing wing effectiveness in fighter aircraft using exergy analysis and global optimization techniques*, Master dissertation, Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.
- 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.
- Çengel, Y.A. ve Boles, M.A. (2012), *Termodinamik*, Güven Bilimsel, İzmir.
- De Oliveira, S. (2013), *Exergy: production, cost and renewability*, Springer.
- Dincer, I. (2002), “The role of exergy in energy policy making,” *Energy Policy*, 30, 137–149.
- Dincer, I. ve Rosen M.A. (2013), *Exergy*, Elsevier, 21–30.
- Evans, A. B. (1991), *The effects of compressor seventh-stage bleed air extraction on performance of the f100-pw-220 afterburning turbofan engine*, NASA Contractor Report.
- Figliola, R.S., Tipton, R. ve Li, H. (2003) “Exergy approach to decision-based design of integrated aircraft thermal systems,” *Journal of Aircraft*, 40, 49–55.
- Kelly, S. (2008), *Energy systems improvement based on endogenous and exogenous exergy destruction*, Dissertation, 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.
- Leo, T. J. ve Pérez-Grande, I. (2005), “A thermoeconomic analysis of a commercial aircraft environmental control system,” *Applied Thermal Engineering*, 25, 309–325.
- Markell, K. C. (2005), *Exergy methods for the generic analysis and optimization of hypersonic vehicle concepts*, Master of Science Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.

- Martinez, I. (2015), *Aircraft environmental control*.
<http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/tc3/Aircraft%20ECS.pdf>
- Moir, I. ve Seabridge, A. (2001), *Aircraft Systems*, Professional Engineering Publishing, UK.
- Moorhouse, D.J. (2003), “Proposed system-level multidisciplinary analysis technique based on exergy methods,” *Journal of Aircraft*, 40, 11–15.
- Morosuk, T. ve Tsatsaronis, G. (2009) “Advanced exergy analysis for chemically reacting systems - application to a simple open gas-turbine system,” *International Journal of Thermodynamics* 12(3), 105–111.
- Ordóñez, J. C. ve Bejan, A. (2003) “Minimum power requirement for environmental control of aircraft,” *Energy*, 28, 1183–1202.
- Paulus, D., Gaggioli, R. (2000) “Rational objective functions for vehicles,” *In: Proceedings of 8th AIAA/USAF/NASA/ISSMO symposium on multidisciplinary analysis and optimization*, Long Beach.
- Pérez-Grande, I. ve Leo, T. J. (2002) “Optimization of a commercial aircraft environmental control system,” *Applied Thermal Engineering*, 22, 1885–1904.
- Periannan, V. (2005), *Investigation of the effects of various energy and exergy-based objectives/figures of merit on the optimal design of high performance aircraft system*, Master Dissertation, Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.
- Petrakopoulou, F. (2011), *Comparative evaluation of power plants with CO₂ capture: thermodynamic, economic and environmental performance*, Dissertation, Berlin.
- Roth, B. (2001) “Aerodynamic drag loss chargeability and its implications in the vehicle design process,” 1st AIAA Aircraft Technology, Integration and Operations Forum, Los Angeles.
- Roth, B. (2003) “The role of thermodynamic work potential in aerospace vehicle design” ISABE Conference, Cleveland.
- Shiba, T. ve Bejan, A. (2001) “Thermodynamic optimization of geometric structure in the counterflow heat exchanger for an environmental control system,” *Energy*, 26, 493–511.

- Tsatsaronis, G. ve Morosuk, T. (2012) “Advanced thermodynamic (exergetic) analysis.” *Journal of Physics: Conference Series*, 395, 1-8.
- 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.
- Vargas, J. V. C. ve Bejan, A. (2001) “Integrative thermodynamic optimization of the environmental control system of an aircraft,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 3907–3917.
- Yoo, Y., Lee, H., Min, S., Hwang, K. ve Lim, J. (2011) “A study and a modeling and simulation program of an environmental control system with a phase change heat exchanger,” *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*, Portland, Oregon.
- Zhao, H., Hou, Y., Zhu, Y., Chen, L. ve Chen, S. (2009) “Experimental study on the performance of an aircraft environmental control system,” *Applied Thermal Engineering*, 29(16), 3284–3288.
- Zilio, C. ve Patricelli, L. (2013) “Aircraft anti-ice system: evaluation of system performance with a new time dependent mathematical model,” *Applied Thermal Engineering*, 63(1), 40–51.