

Hava Aracı İklimlendirme Sistemlerinin Termodinamik Analizi

Seda Tüzemen

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2018

Thermodynamic Analysis of the Air Conditioning Systems of Air Vehicles

Seda Tüzemen

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

May 2018

Hava Aracı İklimlendirme Sistemlerinin Termodinamik Analizi

Seda Tüzemen

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji - Termodinamik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Necati Mahir
İkinci Danışman: Prof. Dr. T. Hikmet Karakoç

Mayıs 2018

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Seda Tüzemen'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Hava Aracı İklimlendirme Sistemlerinin Termodinamik Analizi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Necati Mahir

İkinci Danışman : Prof. Dr. T. Hikmet Karakoç

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Necati Mahir

Üye : Prof. Dr. T. Hikmet Karakoç

Üye : Doç Dr. Önder Altuntaş

Üye : Doç Dr. M. Ertunç Tat

Üye : Dr.Öğr.Üyesi. Yasin şöhret

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

Prof. Dr. Hürriyet ERşAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Necati Mahir ve Prof. Dr. T. Hikmet Karakoç danışmanlığında hazırlamış olduğum “Hava Aracı İklimlendirme Sistemlerinin Termodinamik Analizi” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 08/05/2018

Seda Tüzemen

İmza

ÖZET

Endüstrinin gelişmesi nedeniyle ve sektörlerdeki artan talebi en iyi şekilde karşılayabilmek için, teknoloji de artan bir ivmeyle gelişmektedir. Havacılık sektörü de bunlardan biridir. Yakıt tasarrufu sağlayan, daha hafif ve kompakt yapılar oluşturmanın yanı sıra performansın en üst düzeyde olduğu ve yüksek verimle çalışan motorlar ve ekipmanların tasarım çalışmaları halen devam etmektedir. Bu nedenle sistemlerin ekserji açısından incelenmesi önem kazanmıştır. Bu çalışmada, uçaklarda bulunan çevresel kontrol sisteminin sabit uçuş hızı için ($M=0,8$) 0 – 11 000 m irtifa değerleri için termodinamik analizi yapılmış ve ekserji verimleri hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalara göre, en yüksek ekserji verimi %44,45 olarak 11 000 m. 'de hesaplanırken, en düşük ekserji verimi ise %44,05 olarak 0 m.'de elde edilmiştir. En yüksek ekserji yıkımı 144,17 kW ile 0 m. irtifada, en düşük ekserji yıkımı ise 106,56 kW ile 11 000 m için hesaplanmıştır. Entropi üretimleri incelendiğinde ise en düşük entropi üretiminin 0,492 kW/K'lik değeri ile 11 000 m irtifada hesaplandığı, en yüksek entropi üretiminin ise yine 0 m. için 0,5 kW/K olarak hesaplandığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Çevresel kontrol sistemleri, havacılık, termodinamik, ekserji verimi

SUMMARY

Due to the development of the industry and to meet the growing demand in the sectors, technology is developing with an increasing momentum. The aviation sector is one of them. In addition to manufacturing fuel-saving, lighter and more compact structures, the design work of motors and equipment with the highest performance and high efficiency continues. For this reason, examination of the systems in terms of exergy has become important. In this study, thermodynamic analysis was performed for 0 –11 000 m altitude values for the constant flight speed ($M = 0,8$) of the environmental control system in the aircraft and the exergy efficiencies was calculated. According to calculations made, the highest rate of efficiency was found 44,45% at 11 000 m. while the lowest exergetic efficiency was obtained at 0 m. as 44,05%. The highest exergy destruction was 144,17 kW at 0 m., and the lowest exergy destruction of the system was found as 106,56 kW for 11 000 m. When entropy production is examined, the lowest entropy production is calculated at 11 000 m altitude with a value of 0,492 kW / K, and the highest entropy production is at 0 m. was calculated as 0,5 kW / K.

Keywords: Environmental control systems, aviation, thermodynamic, efficiency of exergy

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmam boyunca, bana yol gösteren, bıkmadan destekleyen, anlayışını ve yardımlarını benden esirgemeyen değerli danışmanlarım Prof. Dr. T. Hikmet Karakoç'a ve Prof. Dr. Necati Mahir'e; tez ve yayın aşaması boyunca değerli fikirlerine başvurduğum hocalarım Doç. Dr. M. Ziya Söğüt ve Doç. Dr. Önder Altuntaş'a; hesaplamalar sırasında yardımlarını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Yasin Şöhret'e; eğitim hayatım boyunca bana her türlü imkanı sağlayan, manevi desteklerini esirgemeyen değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Seda Tüzemen

İÇİNDEKİLER

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. ÇEVRESEL KONTROL SİSTEMLERİ	14
3.1. Pnömatik Sistem	17
3.2. Hava Çevrim Makinaları	19
3.2.1. Basit (simple) çevrim	19
3.2.2. Ön yüklemeli (Boostrap) çevrim sistemi	20
3.2.3. Buhar çevrimi	21
3.3. Uçak Soğutma Sistemlerinde Hava Çevriminin Avantajları	22
4. TERMODİNAMİK ÇÖZÜMLEMELER	24
4.1. Termodinamiğin Birinci Yasası	25
4.2. Termodinamiğin İkinci Yasası	26
5. YÖNTEM	30
5.1. Sistemin Tanımı	30
5.2. Sistemin Modellenmesi	34
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	433
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	499
KAYNAKLAR DİZİNİ	50

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Sıcaklık ve basıncın irtifa ile değişimi	2
3.1. Kabin içinde enerji taşınımı.....	15
3.2. İrtifaya bağlı olarak kabin içi basınçlandırma ve soğutma için gerekli güç miktarının değişim grafiği.....	16
3.3. Çevresel Kontrol Sisteminin genel akış diyagramı	17
3.4. Pnömatik sistem.....	18
3.5. Basit çevrim sistemi	20
3.6. Ön yüklemeli (Boostrap) çevrim sistemi.....	21
3.7. Buhar çevrim sistemi.....	22
4.1. Dört politropik işlemin basınç-hacim diyagramı üzerinde gösterimi.....	24
5.1. Çevresel kontrol sisteminin şematik görünümü	33
6.1. Sistem bileşen sıcaklıklarının irtifa ile değişimi	44
6.2. Sistem bileşen basınçlarının irtifa ile değişimi.....	45
6.3. Sistemdeki motor kompresörü (W_{mk}), kompresör (W_k), türbin (W_t) ve ram (W_r) işinin irtifa ile değişimi	46
6.4. Sistemdeki ekserji yıkımının irtifa ile değişimi.....	47
6.5. Sistemdeki entropi üretiminin irtifa ile değişimi.....	48
6.6. Sistemdeki ekserji veriminin irtifa ile değişimi.....	48

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Kabin için konfor şartları.....	3
4.1. Enerji ve Ekserji terimlerinin kıyaslanması.....	29
5.1. Standart atmosfer hesaplamalarında kullanılan sabitler	36
5.2. Çalışmada yapılan kabuller ve kullanılan sabitler	42

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
Q	Isı akımı veya birim zamandaki ısı miktarı (kW)
E	Toplam enerji (kW)
U	İç enerji (kW)
KE	Kinetik enerji
PE	Potansiyel enerji
W	Güç (kW)
m	Kütle (kg)
\dot{m}	Kütlesel debi (kg/s)
g	Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
T	Sıcaklık ($^{\circ}C$ veya K)
V	Hız (m/s)
P	Basınç (kPa)
h	Yükseklik (m) ve özgül entalpi (kJ/kg)
z	Yükseklik (m)
R	Gaz sabiti ($287,04 m^2/Ks^2$)
k	Özgül ısı oranı
M	Mach sayısı
c	Ses hızı (m/s)
ex	Fiziksel ekserji (kJ/kg)
Cv	Sabit hacimde özgül ısı (kJ/kgK)
Cp	Sabit basınçta özgül ısı (kJ/kgK)
S	Entropi (kJ/K)
ε	Etkinlik
η	Verim

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
0	Referans yada ölü hal
a	Deniz seviyesi
i	İzentropik hal
b1d	Birincil ısı değiştiricisi
i1d	İkincil ısı değiştiricisi
k	Kompresör
mk	Motor kompresörü
r	Ram havası

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Günümüzde zaman, insanlar için her geçen gün daha da önemli bir hal almıştır ve yolculukta geçen zaman insanlar için kayıp olmaya başlamıştır. Bu nedenle hava taşımacılığı kısa mesafeler için bile önem kazanmaya başlamıştır. Dünya genelinde hava taşımacılığındaki yolcu miktarının her yıl %5,1 oranında artması beklenmektedir (Atılğan vd., 2013). Tüm bu artan talep nedeniyle yolcu konforunu iyileştirme çalışmaları havacılık endüstrisinde sürekli gelişmelerin yapıldığı bir alan olmuştur. Büyük hava şirketleri halen yeni yatırımlar ve geliştirmeler yapmaya devam etmektedir.

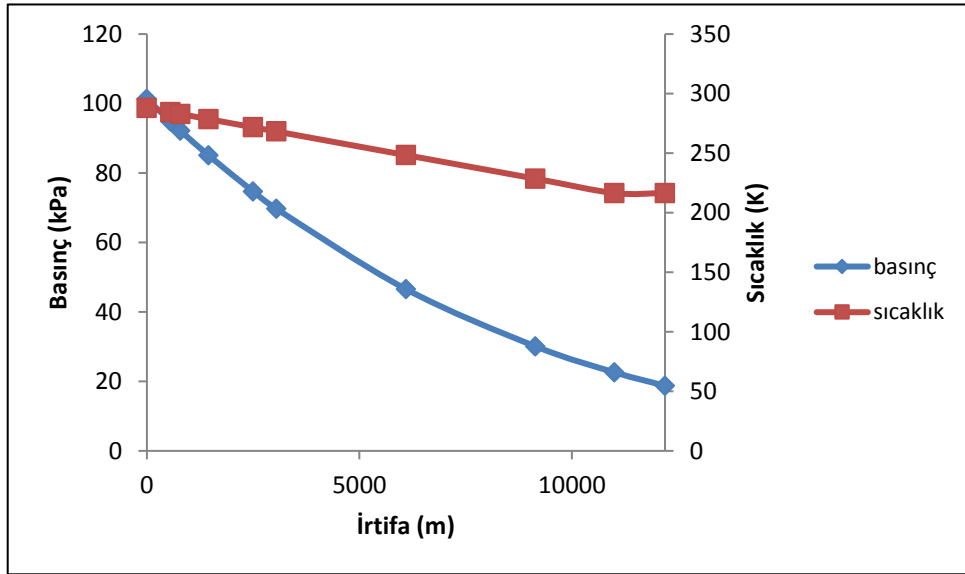
Uçakların iç mekan hava kalitesini kontrol ederek yolcu ve uçuş ekibi için güvenli, sağlıklı ve konforlu bir uçuş ortamı yaratan sisteme Çevresel Kontrol Sistemi (ECS) denir. Çevresel Kontrol Sistemleri, sadece yolcular için konforlu bir ortam yaratmakla kalmaz, aynı zamanda elektronik ekipmanın maksimum verimle çalışması için uygun ortamı sağlar (Ordenez ve Bejan, 2003). Gelişen teknoloji ile, uçaklar geniş bir irtifa aralığında çeşitli değişken hava koşullarına maruz kalmaktadır (Karakoç ve Işıklı, 2007). Çevresel Kontrol Sistemleri, tüm değişen koşullarda havalandırma, basınçlandırma, ısıtma, soğutma ve nemlendirme yaparak kabin hava koşullarının kalitesini sabit bir durumda devam ettirmeyi amaçlamaktadır (Bulgurcu, 2002). Bu nedenle, iklimlendirme sistemleri, belirtilen basınçlandırma ve sıcaklık kontrol gerekliliklerini karşılamak için uçak kabinine uygun sıcaklıkta, akış hızında ve basınçta kuru, mikroptan ve tozdan arındırılmış hava sağlamalıdır.

Uçağı çevreleyen ortam, irtifalar ve iklimler nedeniyle uçuşlarda değişiklik göstermektedir. Örneğin dış ortam sıcaklığı -55°C 'den 50°C 'ye, dış basınç yaklaşık 10 kPa'dan 100 kPa'ya ve bağıl nem oranı kurudan doymuş duruma kadar değişkenlik gösterebilir (Aliabadi, 2009).

Havacılık uygulamalarında kullanılan çevresel faktörlere bağlı iklimlendirme sistemlerinde, konfor şartlarının sağlanması için Çevresel Kontrol Sistemleri (ECS) geliştirilmiştir. Çevresel Kontrol Sistemlerinin temel işlevleri şunlardır:

- Sıcaklık kontrolü,
- Basınçlandırma,
- Havalandırma,
- Havada asılı alerjenlerin yok edilmesi,
- Nem kontrolü.

Örneğin, hava basıncı irtifa ile azaldığından, yüksek irtifalarda çalışan bir uçağın kabini için basınçlandırma yapılması gerekmektedir. Sıcaklık ise troposferde, yükselen irtifa ile azalır. 11 000 m (36 089 ft) üzerindeki stratosferde, hava sıcaklığı sabit $-56,5^{\circ}\text{C}$ 'dir. Sıcaklığı 18°C ve 30°C arasında tutmak için ısıtma ve soğutma gereklidir (Akdemir ve Güngör, 2006). Yüksekliğe bağlı olarak basınç ve sıcaklık dağılımları Şekil 1.1'de görülebilir. Yolcular ve kabin ekibi için konfor şartları ise Çizelge 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.1. Sıcaklık ve basıncın irtifa ile değişimi (Tuzemen vd., 2015)

Çizelge 1.1. Kabin İçi Konfor Şartları (Astori, 2009).

Parametreler	Aralıklar
Basınç	750 mb
Sıcaklık	18-23 °C
Bağıl Nem	50-70%
CO ₂ konsantrasyonu	< 0,5%
CO konsantrasyonu	< 0,005%
O ₃ konsantrasyonu	< 0,25 parçacık/milyon

Ayrıca, uçak sistemleri hafif, hızlı inceleme ve servis için erişilebilir, yüksek güvenilirliğe sahip, çok çeşitli çevresel koşullara toleranslı, hava taşıtı titreşimine ve manevra yüklerine dayanabilen ve uçuş sırasında meydana gelebilecek arızaları karşılayabilen bir şekilde olmalıdır. Bu nedenle, uçak içi iklimlendirme amaçlarına yönelik tasarım koşulları diğer iklimlendirme uygulamalarından çeşitli şekillerde farklılık gösterir.

Yukarıda da belirtildiği gibi uçak üreticilerinin yolcu konforunu artırmak için teknoloji geliştirme çalışmaları yükselen bir ivmeyle devam etmektedir. Ancak sadece konfor koşullarını elde etmek yeterli olmamaktadır, geliştirmelere yön verirken aynı zamanda yakıt tüketimini ve olumsuz çevresel etkileri azaltmak için gerekli olan gücü de en aza indirmeye çalışmaktadırlar. Bu nedenle çevresel kontrol sistemlerinin enerji ve ekserji analizleri uçak endüstrisinde gittikçe daha çok önem kazanmaktadır.

Enerji çoğunlukla iş ya da iş üretme yeteneği olarak tanımlanır. Enerjiyi hareket veya hareket üretme yeteneği olarak tanımlamak daha doğru olacaktır (Akdemir ve Güngör, 2006). Sistemlerin incelenmesi için temel yöntem, Termodinamiğin 1. yasasına bağlı olan enerji analizidir. Ancak enerji analizi, sistemlerin verimliliğini değerlendirirken gerçekçi değerler vermez. Bu koşullarda, verimlilik analizi, hesaplamalara ortam koşullarını da katan Termodinamiğin 2. yasasına dayalı olarak hesaplanmalıdır.

Ekserji, belirtilen çevresel koşullardaki bir sistemden elde edilen maksimum iş olarak tanımlanmaktadır (Balkan vd., 2004). Enerji ve ekserji politikasında çevre ile ekserji, ekserji ve enerji arasındaki bağlantı vurgulanmaktadır (Bilal vd., 2003; Çomaklı vd., 2004).

Bu çalışmada, uçak soğutma sistemlerinin ekserjetik yöntemler kullanılarak analizinin yapılması ve bu analizler çerçevesinde hesaplanan parametrelerle sistemin performansının değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde sadece araç soğutma veya uçak soğutma sistemi içindeki bir elemanın ekserji analizi üzerine çalışmaların yapılması ve uçağın soğutma sisteminin ekserji analizine yer verilmemiş olması bu çalışmanın motivasyon kaynağını ve özgün yönünü oluşturmaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Santos vd. (2014) uçaklarda iklimlendirme sebebiyle kullanılan hava çevrim makinalarının çeşitli parametrelere bağlı olarak termodinamik analizini yapmıştır. Kullandığı parametrelerden bazıları Mach sayısı, kabinden gelen hava sıcaklığıdır. Bu parametrelerin soğutma katsayısı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Leo ve Perez-Grande (2005) ticari uçaklarda kullanılan çevresel kontrol sistemlerini termoekonomik açıdan incelemiştir. Motordan tahliye edilen havanın (bleed air) basıncındaki değişimin maliyete etkisi değerlendirilmiş ve minimum maliyetin, nominal basınca yakın basınçlarda elde edildiği görülmüştür.

Zhao vd. (2009) uçaklarda kullanılan çevresel kontrol sisteminin tasarım dışı performans ve dinamik yanıtı üzerine bir deneysel çalışma hazırlamıştır. Deneyde yüksek basınç seperatörüne sahip Ön yüklemeli (bootstrap) hava çevrim makinası kullanılmıştır. Ön soğutucu, ısı değiştirici, kompresör ve türbin gibi ana bileşenlerin performansı araştırılmış ve çalışma koşulları değiştiğinde çıkış basıncı, türbin verimliliği ve dönme hızı gibi bazı parametrelerin açıkça değişebildiği görülmüştür.

Bender (2017) yapmış olduğu çalışmada, modele dayalı tasarım yaklaşımı ile birleştirilmiş geleneksel uçak çevresel kontrol sistemlerine uygulanan enerji ve ekserji analizlerine odaklanmıştır. Bu çerçevede, standart bir uçuşun dört aşaması için ekserji analizi gerçekleştirmiştir: Kalkış, uçuş, iniş ve taksit. Detaylı ekserji analizinden elde edilen sonuçlar, farklı simülasyon durumlarındaki bileşenler için oldukça değişken performans göstermektedir. Ekserji verimliliği % 1 ila % 88 arasındadır.

Perez-Grande ve Leo (2002) çalışmalarında, ticari uçakların çevresel kontrol sisteminde bulunan iki kanatlı çapraz akışlı ısı değiştiricisinin ana geometrik özelliklerini ortaya çıkarmak için eş zamanlı olarak iki optimizasyon kriteri, minimum ağırlık ve minimum entropi üretimi uygulamışlardır.

Bijalwan ve Pratihari (2015) açık çevrim önyüklemeli (bootstrap) model çevresel kontrol sisteminin EES programını kullanarak termodinamik analizini yapmışlar ve irtifa, uçuş hızı ve basınç oranı değişimlerinin etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonunda soğutma katsayısının, irtifanın 5km'den 9 km'ye çıkması ile %34,38 oranında arttığı görülmüştür.

Ehyaei vd. (2013) J85-GE-21 tipi turbojet motoru komponentleri için deniz seviyesi ve 11000 m. olmak üzere iki irtifada ekserji analizi yapmışlardır. Ard yanmalı turbojet motoru için yapılan bu çalışma sonucunda, deniz seviyesinde en yüksek ekserji verimliliğine sahip komponentin kompresör olduğu, her iki yükseklik içinde motora giren havanın hızının düşürülmesiyle tüm komponentlerde ekserji verimliliğinin düştüğü gözlemlenmiştir.

Çoban vd. (2015) mini sınıf bir gaz türbini için ekserji tabanlı bir performans değerlendirmesi yapmışlardır. Küçük deneysel uçaklarda yada küçük boy İHA'larda kullanılan motor için enerji ve ekserji analizleri yapılarak, testlerden elde edilen dataların yorumlanabilmesi için bir yaklaşım geliştirilmiştir. Buna göre kompresör, yanma odası ve yüksek basınç türbininin ekserjetik verimleri sırasıyla, %74,04, %56,06 ve %98,98 olarak hesaplanmıştır.

Turgut vd. (2007) çalışmalarında CF6-80 tipi turbofan motorunun deniz seviyesi için ekserji analizini yapmışlardır. Hesaplamaların sonuçlarına göre motordaki en tersinmez ünitenin 35,76 MW ile yanma odası olduğu görülmüştür.

Yin vd. (2016), ticari uçaklarda kullanılan çevresel kontrol sistemleri ile kabinin termal durumu arasındaki bağlantıyı ticari bir yazılım olan ANSYS ile incelemişlerdir. Çalışmaların sonunda çevresel kontrol sisteminin istenilen sıcaklığı $\pm 0,6K$ tolerans ile sağlayabildiği görülmüştür.

Mahindru ve Mahendru (2011) çalışmalarında sivil ve askeri uçaklarda kullanılan çevresel kontrol sistemlerini incelemiş ve tiplerine göre detaylı bir anlatım yapmışlardır.

Bejan ve Siems (2001) modern uçakların enerji sistemlerinin tasarımında ekserji analizi ve termodinamik optimizasyonun gerekliliğinden bahsetmişlerdir. Ekserji analizinin teorik performans sınırını belirlediği bildirilmiş ve ekserji yıkımının en aza indirilmesi ile tasarımın teorik sınırlara yaklaştığı anlatılmıştır.

Vargas ve Bejan (2001) modern uçakların iklimlendirme sistemlerindeki ısı değiştiricilerin termodinamik optimizasyonunu ele almışlardır. Kanatçıklı ve düz paralel plakalar olmak üzere iki ısı transfer yüzeyi üzerinde çalışılmış ve nümerik sonuçlar elde edilmiştir. Optimize edilen geometrilerin hem kanatçıklı hem de düz paralel plakalar için neredeyse aynı olduğu görülmüştür.

Arslan vd. (2009) çalışmalarında çevresel kontrol sistemlerini genel yapısıyla incelemiş ve basınç, sıcaklık, nem ve hava kirleticiler bakımından uçaklardaki iç hava kalitesinin önemine değinilmiştir. Ağırlıklı olarak Boeing 737-800 Bakım ve eğitim kitaplarının kullanıldığı çalışmada çevresel kontrol sistemine bağlı filtrelerin, cihazların ve ekipmanlarının gerek bakımları gerekse değişme aralıklarına uyulmasının önemine bir kez daha değinilmiştir.

Adolfo vd. (2017) Boeing 777-200 uçağına güç veren GE90-94B motorunun uçuş esnasındaki koşullara göre termodinamik analizini yapmış ve performansını incelemiştir. Motor, modüler bir kod olan ESMS kodu ile modellenmiş ve simüle edilmiştir. Ayrıca bu model kullanılarak kalkış ve iniş esnasındaki NOx emisyonları da hesaplanmıştır. ICAO ölçülen değerleri ile karşılaştırıldığında hatanın %0,7 olduğu görülmüştür.

Porto Neves vd. (2009) çalışmalarında türbin ve kompresör verimi ve ısı değiştirici etkililiğinin etkisi gibi hava çevrim makinasının performansını etkileyen bazı tasarım özelliklerini incelemişlerdir. Sonuçlar, hava çevrim makinası için oluşturulan matematiksel modelde kullanılan parametrelerin optimize edilmiş bir konfigürasyon tasarımı elde etmek için değiştirildiği zaman performansının anlaşılmasına olanak sağladığını göstermektedir.

Ordenez ve Bejan (2003) çevresel kontrol sistemlerinin termodinamik optimizasyonu için önemli olan iki temel konuyu incelemiştir. Bunlar; minimum güç gerekliliği için ihtiyaç duyulan limitler ve sistemin elde edilen minimum güç ile doğru bir şekilde çalışabilmesi için gerekli olan tasarım özellikleridir. Bu çalışma ile termodinamik optimizasyonun daha karmaşık ve gerçekçi tasarımlar yapmakta kullanılabileceği gösterilmiştir.

Vargas ve Bejan (2001) çalışmasında, uçaklarda bulunan çevresel kontrol sistemi içindeki donanımın geometrik konfigürasyonunun optimize edilmesi amaçlanmıştır. Bunu yaparken de bütünleştirici bir yaklaşım olarak ekipmanın içinde bulunduğu sistemin termodinamik performansı maksimize edilmiştir.

Chang (2001) çalışmasına etilen prosesinin ekserji ve ekserjoekonomik analizini yapmıştır. Ekserji analizi sonuçları en düşük ekserjetik verime sahip bölümlerin demethanizasyonun ve debutanizasyon bölümleri olduğunu göstermiştir. Ekserjoekonomik analiz sonuçlarına göre birim thermoekonomik maliyet artışı en fazla sıkıştırma ve demethanizasyon bölümlerindedir. Bu çalışma, ekserjoekonomik analizin ekserji analizinden daha fazla bilgi sağlayabileceğini ve analiz sonuçlarının süreç iyileştirme için potansiyel yerleri öneren maliyete dayalı bilgi sağladığını göstermektedir.

Dikici vd. (2005) hava kaynaklı ısı pompası sisteminin enerji ve ekserji analizini yapmışlardır. Deneysel olarak yapılan bu çalışmada amaç ısı pompası sisteminin Elazığ ilinde konut ısıtmasında kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. Sonuç olarak sistemin tüm bileşenleri için enerji ve ekserji analizi sonuçları bir tabloda toplanmıştır. Bu tabloda buharlaştırıcıda meydana gelen ekserji kaybının yoğuşturucuda meydana gelenden daha fazla olduğu görülmektedir.

Esen ve Hosoz (2007), R134a soğutucu akışkanı kullanılan bir otomobil klima sisteminde enerji ve ekserji analizi yapmışlardır. Klima sisteminin her bir bileşeni için ekserji analizi yapılmış ve kompresör devrinin artması ile sistem performansının azaldığı ortaya çıkmıştır. Ayrıca ekserji yıkımı da incelenmiştir, buna göre ekserji yıkımındaki en büyük artışın kompresörde meydana geldiği görülmüştür.

Kabul vd. (2010) gövde borulu bir ısı değiştiricisinin kullanıldığı soğutma sisteminde enerji ve ekserji analizi çalışmaları yapmışlardır. Bu alışma için evaporatör olarak gövde borulu bir ısı değiştiricisinin kullanıldığı bir deney seti hazırlanmış ve evaporatör sıcaklığı, soğutucu akışan debisi ve soğutma suyu debisi değiştirilerek ölçümler yapılmıştır. Çalışma sonunda en büyük tersinmezlik değerlerinin sırasıyla kompresör, kondenser, evaporatör ve genleşme valfinde ortaya çıktığı görölmüştür.

Akbulut ve Kıncay (2006) buhar sıkıştırmalı soğutma çevrimlerini inceleyerek enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır. Bu analizler için kolay kullanılabilir ifadeler türetilmiştir. İkinci yasa verimi Carnot soğutma etkinlik katsayısı ile o çevrimin soğutma etkinlik katsayısının çarpımı şeklinde bulunmuş ve gösterilmiştir.

Rosen (1999) literatürdeki 2. yasa analizleri üzerindeki yaklaşımların karşılaştırmasını yapmıştır. 5 tip 2. yasa analizi göz önüne alınmıştır: ekserji, fiziksel ekserji, ekserji tüketimi, negentropi (negatif entropi) ve entropi analizleri.

Wu ve Zmeureanu (2011) Montreal'daki bir evin iklimlendirme sisteminin tasarımı ve çalışma koşullarına göre enerji, entropi ve ekserji analizlerini yapmışlardır. Çalışmaya göre, ısıtıcı olarak elektrikli süpürgelik ısıtıcısı ve havalandırma için elektrikli havalandırmayı kullanan iklimlendirme sistemi en düşük ekserji verimine, ısıtıcı olarak radyant yer ısıtma sistemi, ısı pompası, ısı değiştiricisi ve gaz ateşlemeli su ısıtma sisteminin kullanıldığı iklimlendirme sistemi ise en yüksek ekserji verimine sahip oldukları görölmüştür.

Mborah ve Gbadam (2010) 500 kW'lık buhar güç sisteminin performansını maksimuma çıkarmak amacıyla enerji ve ekserji analizi yaparak kayıpların yerlerini ve büyüklüklerini hesaplamışlardır. Sonuçlar, yanma odasında elde edilen ısı enerjisinin %50'sinin yok olduğunu göstermiştir.

Paulus (2003) uçaklarda kaldırma kuvveti ekserjisi için tüm uçuş modlarında kullanılabilen bir ifade geliştirmiştir. Hafif bir uçak için biri seviye uçuşu diğeri ise tırmanma modu olmak üzere iki ekserji akış diyagramı gösterilmiştir.

Sanjay vd. (2014) bir hibrid gaz türbin çevriminin enerji ve ekserji analizi üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada Brayton dizel çevriminin termodinamik özellikleri dikkate alınmıştır. Herhangi bir türbin giriş sıcaklığı için basınç oranının artması ile spesifik işin arttığı görülmüştür. Ancak basınç oranının çok fazla artması, spesifik işte düşüğe neden olmuştur. Ekserji analizi, en yüksek ekserji kaybının yanma sırasında meydana geldiğini göstermiştir.

Söğüt vd. (2011) soğutucu akışkanları referans alarak, konut tipi soğutucular, ticari soğutucular, endüstriyel soğutucular, araç iklimlendirme sistemlerinin ekserji analizlerini yapmış ve çevresel etkileri incelemiştir. Buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimi model alınmış ve çalışma sonunda, soğutucu akışkan seçiminin, sistem tasarımının ve sistem seçiminde ekserji analizlerinin tercih edilme nedenleri değerlendirilmiştir.

Atılğan vd. (2013) bölgesel uçaklarda kullanılan bir turboprop motorunun termodinamik ve ekserjetik açıdan çevreye olan etkisini incelemiştir. Sonuçlar motorun toplam çevreye olan etkisinin %9'unun kompresör, %69'nun yanma odası, %13'ünün gaz türbini, %7'sinin güç türbini ve %2'sinin nozzledan geldiğini hesaplamışlardır. Sonuçlara göre ilk olarak yanma odası ve gaz türbininde yapılacak iyileştirmelerin çevresel etkiye ciddi anlamda katkı sağlayacağı görülmüştür. Ayrıca turboprop motoru için komponent bazlı çevresel etki, yapısal faz için 2,26 mPts/s, operasyon/bakım fazı için 2,34 mPts/s olarak hesaplanmıştır.

Aydın vd. (2012) çalışmalarında deneysel bir turboprop/turboshaft motorunun farklı güç ve tork ayarları için bileşenlerin verimlerinin, geliştirme potansiyellerinin, ekserji yıkımlarının karşılaştırılmalarına olanak sağlayan bileşen bazlı ekserjetik bir değerlendirme yapmışlardır. Çalışmanın sonunda en büyük ekserji yıkımının iç tersinmezlikleri nedeniyle yanma odasında, en düşük ekserji yıkımlarının ise gaz türbini, güç türbini ve kompresörde olduğu görülmüştür. Aydın vd. (2013) yaptıkları diğer bir çalışmada ise, bir turboprop motorunun tam yada kısmi yükleme esnasındaki termodinamik analizi yapılmıştır. Çalışmanın sonunda maksimum enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %30,7 ve %29,2 olarak bulunmuş, minimum yakıt tüketimi ve maksimum shaft gücü de yine sırasıyla $0,2704 \text{ kg (kWh)}^{-1}$ and 1948 shp olarak

hesaplanmıştır. Yine Aydın vd. (2015) başka bir çalışmalarında ise sabit referans bir ortam ve yer çalışma koşulları için orta menzilli bir ticari uçak motorunun sürdürülebilirlik göstergelerine odaklanmışlardır. Çalışmada turbofan motorunun ayrıntılı bir ekserji analizi, motor test hücresi parametrelerine dayanarak gerçekleştirilmiştir. Burada ekserjetik analiz ve sürdürülebilir gelişme ile birlikte geliştirilen turbofan motorunun göstergeleri; ekserji verimliliği, atık ekserji oranı, ekserji imha faktörü, geri kazanılabilir ekserji oranı, çevresel etki faktörü ve dışsal sürdürülebilirlik endeksidir. Çalışmanın sonunda, turbofan motorunun ekserji verimi, atık ekserji oranı, ekserji yok etme faktörü, geri kazanılabilir ekserji oranı, çevresel etki faktörü ve ekserji sürdürülebilirlik indeksi sırasıyla 0,315, 0,685, 0,408, 0, 2,174 ve 0,460 olarak hesaplanmıştır.

Ballı (2014), askeri uçaklarda kullanılan deneysel turbojet motorundaki arдынmanın enerjetik ve ekserjetik performansına etkisini incelemiştir. Çalışmanın sonucunda arдынma durumunun seçilmesiyle enerji ve ekserji verimlerinin düştüğü görülmüştür. Askeri durum seçildiğindeki enerji verimliliği %31,64 olarak hesaplanırken ard yanma durumu seçildiğinde be değerin %24,18'e düştüğü görülmüştür. Yine ekserji verimlilikleri de askeri durum için %29,81, ard yanma durumu için ise %22,77 olarak hesaplanmıştır. Ballı ve Hepbaşı (2013) bir başka çalışmada T56 model turboprop motorunun farklı güç yükleme durumları için enerjetik ve ekserjetik analizlerini yapmışlardır. Maksimum ekserji yıkımının yanma odasında olduğu görülmüştür. Farklı operasyon durumları için 4846,3 kW ile 6234,1 kW arası değerler hesaplanmıştır.

Bastani vd. (2015) çalışmasında farklı Mach sayıları için J85-GE-21 motorunun çeşitli bölümlerinde ekserji analizi yapmıştır ve en büyük ekserji kaybının ard yanma kısmında meydana geldiğini görmüştür. En büyük ekserji verimi ise Mach sayısının 0,4 olduğu durumda elde edilmiştir. Yakıt tüketiminin ise Mach sayısı arttıkça arttığı gözlemlenmiştir.

Forster (2009) yüksek lisans tezinde, hava çevrimli çevresel kontrol sistemlerinin otomotiv sektörüne uygulanabilirliğini incelemiştir. Kapladığı alan ve ağırlık gereklilikleri minimize edilirken, soğutmanın maksimum olduğu koşullarda, motora performansına olan etkisinin minimum olması istenmiştir. Bileşenlerin performanslarının ölçülebilmesi için

bir test düzeneği oluşturulmuştur. Herhangi bir şekilde değiştirilmemiş bir otomotiv turboşarj ekipmanı Ters-Brayton çevriminde çalıştırılmış ve elde edilen datalar karşılaştırmalar için kullanılmıştır. Ardından ticari turboşarj bileşenlerinden oluşan hava çevrim makinasında bileşenlerin performanslarının optimize edilmesi ve genel çevrim veriminin artırılması için çeşitli testler yapılmıştır. Son adım olarak sistem, daha gerçekçi koşullar ve performansı simule edebilmek için gerçek bir motorda denemiştir.

Çoban vd. (2016) çalışmasında askeri helikopterde kullanılan turboşaft motorunun enerji ve ekserji analizini farklı yük değerleri için yapmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucu ekserji yıkım değerinin toplam ekserji yıkım değerine oranı için en yüksek değer %88,81 ile yanma odasında elde edilirken, en düşük değer ise %0,75 ile yüksek basınç türbininde elde edilmiştir.

Grönstedt vd. (2014) çalışmasında turbofan motorunda termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarını kullanarak kayıpların analizini yapmıştır. Bu analizlerin amacı gelecekte kullanılması planlanan radikal motor konseptleri için bir temel oluşturmaktır. Bu analizlerin ışığında kayıpların düşürülmesi adına üç adet motor konsepti tanıtılmıştır. Bunlar açık rotorlu motor, ara soğutuculu geri kazanılmış motor ve yanma odasında titreşimli patlama ile çalışan motordur.

Güngör vd. (2017) çalışmasında ısıtma modundaki geri dönüş havalı iklimlendirme santralinin enerji ve ekserji analizini yapmıştır. Çalışmanın en önemli amacı iklimlendirme sistemlerinin tasarımının yapılması esnasında sadece termodinamiğin birinci yasasına göre değil, termodinamiğin ikinci yasasının da kullanılarak analizlerin tamamlanması gerekliliğinin önemini vurgulamaktır.

Hassan (2013) çalışmasında bir turbofan motorunun girişinde ve fan kısmındaki lokal entropi üretimini ve ekserji yıkımını araştırmıştır. Çözümlemeler uçuş şartları için yapılmıştır ve sonuç olarak fanadaki kaybın 1,95 MW olduğu görülürken, giriş için bulunan değer (4,6kW) fana göre ihmal edilebilir seviyede olduğu görülmüştür.

Linares (2016) yüksek lisans tez çalışmasında, Bombardier C300 serisi uçağın çevresel kontrol sisteminin uçuş datalarına dayanarak Flowmaster programında modellemesini yapmıştır. Her bir bileşen için ayrı performans haritaları çıkarılmıştır. Kabullerin düzenlenmesinde ise uçuş datalarından yararlanılmıştır.

Long vd. (2014), enerji geri kazanım ünitesi olan iki kademeli önyükleme sistemine dayalı konsept bir çevresel kontrol sistemini incelemiştir. Çalışmanın sonunda hali hazırda kullanılmakta olan sistem ile yeni konsept sistem karşılaştırılmış ve yeni konsept sistemin tüm dizayn gerekliliklerini sağlamakla birlikte enerji tüketimini de düşürdüğü, performansında ise %36,39'luk bir artış görülmüştür.

Ma vd. (2015) ram havası için kapalı simülasyon yer testi metodu ile ticari uçaklardaki çevresel kontrol sistemlerinin performansı incelenmiştir. Analizlerin sonucunda sunulan methodun, kompresör basınç oranı 1,2 ve türbin genişleme oranı 5 olan bir sistem için 0-10 km arası uçuş irtifası için farklı sıcaklık ve basınçları simule edebildiği görülmüştür. Geleneksel fan simülasyon modeline göre enerji tüketiminde %35 azalma olduğu görülmüştür.

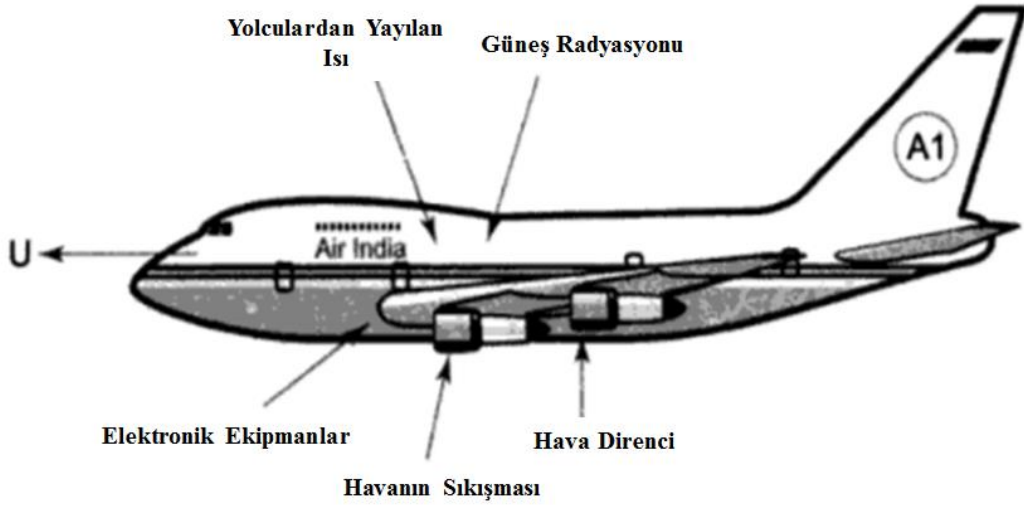
3. ÇEVRESEL KONTROL SİSTEMLERİ

Hava araçlarındaki çevresel kontrol sistemleri yerde park halinden yüksek irtifalı uçuşlara kadar tüm işletim koşullarında güvenli, sağlıklı ve konforlu bir kabin ortamı sağlamalıdır. Tüm uçaklar, temel bir hava ısıtıcısından daha karmaşık yapılı olan ve iklimlendirme, basınçlandırma, havalandırma ve havadan gelen kontaminasyonlara karşı filtreleme gibi özelliklere de sahip olan çevresel kontrol sistemlerine sahiptirler.

Hava araçlarında soğutma sistemlerinin gerekli olmasının nedenleri;

- Sıcaklık,
- Nem,
- Atmosferik basınç olmak üzere 3 temel başlık altında özetlenebilir.

Modern uçaklarda kabin konfor şartlarını sağlamak için çevresel kontrol sistemleri, motordan çektikleri sıkışmış havayı, basınç, sıcaklık ve nemi ayarlayan termodinamik bir çevrimde proses ederek, elde edilen havayı kabinde gelen filtrelenmiş hava ile karıştırıp homojen bir dağılım ve havalandırma için kabinin belirli yerlerine gönderir (Astori, 2009). Uçuş esnasında kabin sıcaklığı; yolculardan yayılan ısı, hava direnci, havanın sıkışması, güneşten yayılan radyasyon, elektronik ekipmanlar, vb. nedenlerden dolayı artmaktadır. Uçuş sırasında kabin içi sıcaklığının yükselmesine sebep olabilecek başlıca nedenler şematik olarak Şekil 3.1’de gösterilmiştir (Prasad, 2003).



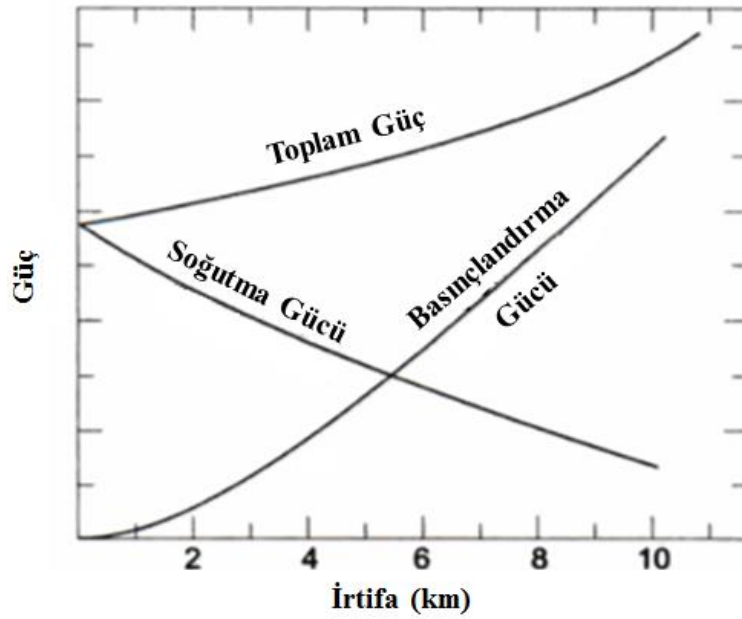
Şekil 3.1. Kabin içinde enerji taşınımı (Prasad, 2003)

Bu faktörleri ayrı ayrı inceleyecek olursak, örneğin, bir insan dinlenirken bile 300 kJ/saat bir enerji açığa çıkarır. Üstelik bu değer, stres altında açığa çıkarılan enerjinin çok altında bir değerdir. Yolculardan yayılan ısının yanı sıra uçağın hareketine kıyasla daha hızlı hareket eden havanın (yaklaşık 300m/s) yayılması ile de ısı açığa çıkmaktadır. Havanın sıkışması kabin içine gelen havanın sıcaklığının artmasına neden olur. 300m/s hızla hareket eden bir uçak için ortam basıncı 0,3 bar ve sıcaklığı 10°C ise %90 sıkıştırma verimi için kabin içine gelen havanın sıcaklığı 40 °C'yi bulmaktadır. Uçuş sırasında güneş tarafından yayılan radyasyon kaynaklı meydana gelen ısı transferi de kabin sıcaklığını artırır. Son olarak ise uçak içerisinde bulunan elektrik ile çalışan ekipmanların ısı yayması da kabin sıcaklığının artmasında önemli rol oynamaktadırlar. Elektronik ekipmanların güç gerekliliği, uçakların boyutlarına bağlı olarak değişmektedir. Orta büyüklükteki uçaklar ekipmanlar için 10-15kW enerjiye ihtiyaç duyarlar, bu da kabin sıcaklığının konfor sıcaklığının oldukça üstünde değerler olan 40-50 °C değerlerine yükselmesi için yeterli olabilecek bir enerji miktarıdır (Prasad, 2003).

Uçaklar genellikle 8000-12000 m arasında bir irtifada seyir halinde olurlar. Bu yükseklikteki çevre şartları (basınç, sıcaklık ve nem) yerdeki şartlardan oldukça farklıdır. Yüksek irtifalarda havanın yoğunluğu daha düşüktür ve barındırdığı oksijen miktarı vücudumuz için yeterli değildir. Günlük hayatımızda vücut basıncımız standart atmosferik

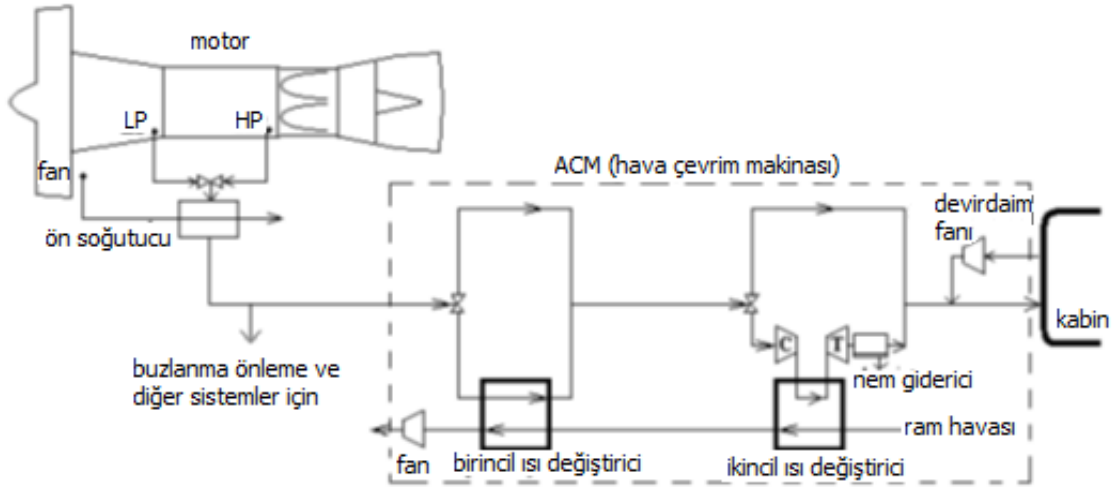
basınç ile denge halindedir. Vücudumuzun etrafındaki basıncın düşmesi normal şekilde çalışan organlarda düzensizliklere neden olur. Bu nedenle kabin basıncı standart atmosferik basınca yakın olmalıdır (Prasad, 2003).

Şekil 3.2’de verilmiş olan irtifaya bağlı olarak kabin içi basınçlandırma ve soğutma için gerekli güç miktarlarını gösteren grafik incelendiğinde yükseklik arttıkça basınçlandırma sistem için gerekli güç arttığı anlaşılmaktadır (Prasad, 2003).



Şekil 3.2. İrtifaya bağlı olarak kabin içi basınçlandırma ve soğutma için gerekli güç miktarının değişim grafiği (Prasad, 2003)

Çevresel kontrol sistemlerinde kabin içerisine gönderilen havanın kontrolü temelde sıcaklık kontrolü ile sağlanmaktadır. Hava soğutma sistemlerinde tahliye edilen havanın (bleed air) sıcaklığı kabin sıcaklığına bağlı olarak kontrol edilir. Çevresel kontrol sistemlerinde (Enviromental control system-ECS) şartlandırılmış hava çevresel faktörlere bağlı olarak ısıtılır veya soğutulur. Uçakta iklimlendirme sisteminin temel elemanları pnömatik sistem ve hava çevrim makinası (Air Cycle Machine-ACM) olmak üzere 2 grupta incelenmektedir (Astori, 2009).

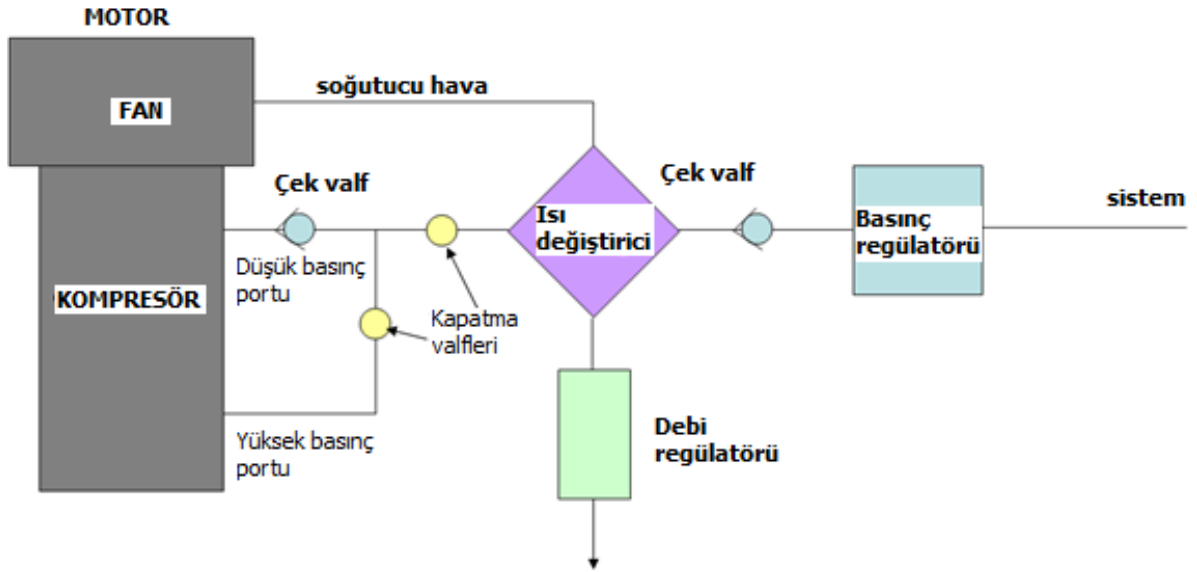


Şekil.3.3. Çevresel Kontrol Sisteminin genel akış diyagramı (Martinez,2012)

3.1. Pnömatik Sistem

Hava araçlarında motorlar yalnızca itiş gücü sağlamanın yanı sıra aynı zamanda uçaktaki elektrikli, pnömatik ve hidrolik sistemlere de ikincil güç sağlamaktadırlar. Bu sistemlerin içerisinde en fazla güç ve ilave yakıt tüketimine çevresel kontrol sistemleri neden olmaktadır. Bu sebeple iklimlendirme sistemi ve motorun başlatılması için gerekli olan hava ve elektriksel gücü sağlayan yardımcı güç üniteleri (ing. Auxiliary Power Unit-APU) bulunmaktadır (Martinez, 2012)

Şekil de bir turbofan motorunda bulunan pnömatik sistemin şematik gösterimi verilmiştir. Pnömatik sistemlerde genellikle orta kademede düşük basınçta ve son kademe yüksek basınçta olmak üzere kompresörün 2 farklı bölümünden hava çekişi olmaktadır. Hava çekişi sırasında yüksek basınçtan düşük basınca hava kaçıışının önlenmesi için bir çek valf kullanılır. Düşük basınç kademesindeki hava çekiş portu normal şartlar altında açık tutulmaktadır, fakat motor kritik koşullar altında çalışıyor ise bir valf yardımıyla kontrolü sağlanır. Ya da düşük basınçta gelen hava miktarı yeterli değil veya basıncı az ise yüksek basınç portu açık tutulabilir.



Şekil 3.4. Pnömatik sistem (Tuzemen vd., 2015)

Motordan işlenen toplam akış oranının % 2 ila 8'i arasında düşük bir akış oranı çıkarılabilir, ancak bu yine de önemli miktarda enerji demektir. APU'dan çıkarılan sıkıştırılmış hava ile aynı miktarda enerji elde edilir, ancak burada tahliye edilen hava toplam akış oranının % 70-80'i kadardır. Çünkü APU'nun, egzoz gazlarıyla itki oluşturma işlemi sonlandırılmamıştır. Bu durum, uçaklar yerde ve motorları kapalıyken de tüm pnömatik sistemlerin özellikle de çevre kontrol sistemi ve motor çalıştırma sistemlerini de çalışmasına izin verir.

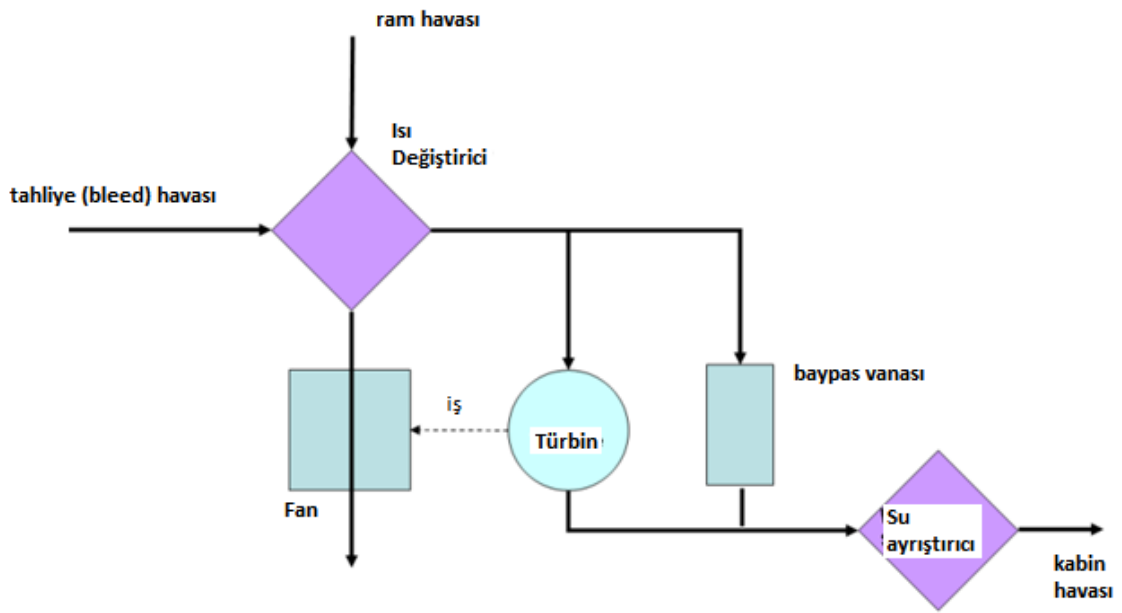
Kompresör kademelerinden gelen tahliye havasının akış koşulları irtifa ve motor hızına bağlı olarak modern bir turbofan motorunda basınç için 0,2 ila 1 MPa, sıcaklık için ise 180° C 350 ° C arasındadır. Üretilen hava, kullanım tarafından talep edilenden daha yüksek bir sıcaklıkta olduğundan ve uçağın diğer bölgelerine güvenli bir şekilde kanalize edilemeyecek kadar sıcak olabileceğinden, pnömatik sistemden çıkmadan önce taze harici hava ile bir ısı değiştirici vasıtasıyla soğutulur. (bkz. şekil 3.4). Taze soğutma havası bir akış hızı regülatörü ile ölçülür, sıkıştırılmış hava sıcaklığı genellikle 175 ° C civarında bir nihai sıcaklık için kontrol edilir. Ayrıca, sıkıştırılmış hava hattı üzerindeki bir regülatör, basıncı yaklaşık 0.3 MPa'da tutar.

3.2. Hava Çevrim Makinaları

Çevresel kontrol sistemleri genellikle yüksek verimli hava çevrim makinelerini kullanmaktadır. Bunlar santrifüj kompresör ve radyal türbin veya radyal / aksenal fan ve aynı şaft üzerinde bulunan radyal / aksenal türbinlerden oluşan 2 kademeli ünitelerdir. Son yıllarda ise gelişen teknoloji ile birlikte ise türbin, kompresör ve fandan oluşan 3 kademeli ve iki türbin, kompresör ve fandan oluşan 4 kademeli hava çevrim makineleri de özellikle ticari uçaklarda / helikopterlerde daha yüksek soğutma kapasitesi sağlamak amacıyla geliştirilmiştir (Mahindru ve Mahendru, 2011). Uçaklarda kullanılan basit çevrim, önyükleme çevrimi ve buhar çevrimi olmak üzere 3 tip hava soğutma sistemi bulunmaktadır.

3.2.1. Basit (simple) çevrim

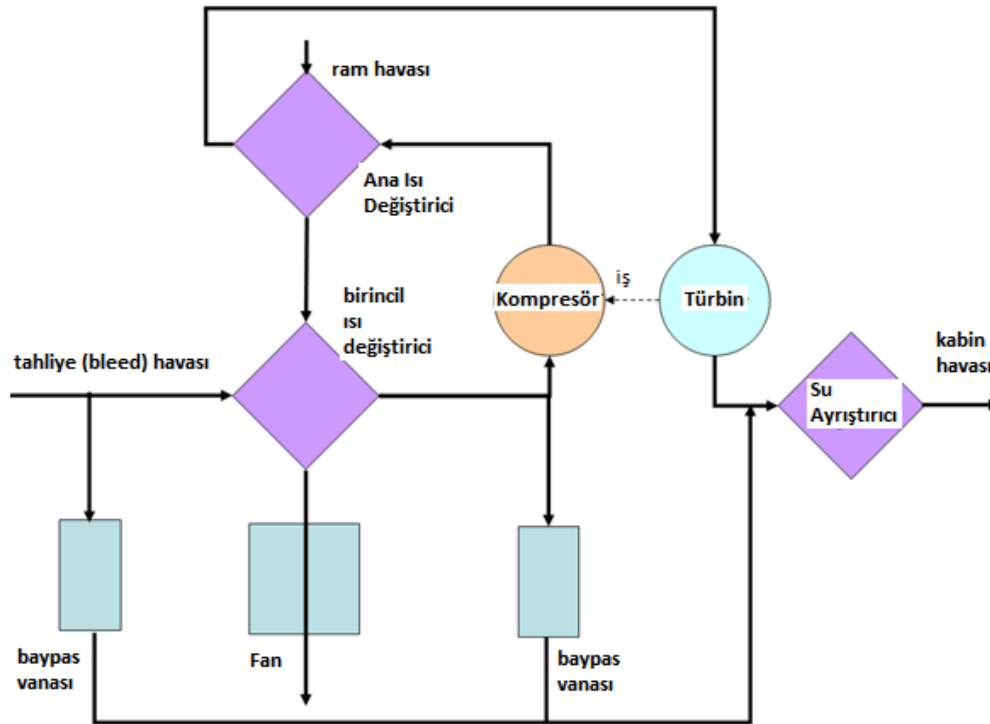
Basit hava çevriminde, uçak motorundan çekilen tahiye havası, ram havasının kullanıldığı bir ısı değiştiricisinde soğutulur. Tahliye havası, kabin basıncı ve tahliye havası basıncı arasındaki farktan dolayı türbini çalıştırır ve türbindeki genişleme esnasında soğur. Türbinden elde edilen iş, fanı çalıştırır, böylece ısı değiştiricisindeki akış sağlanır. Türbinden çıkan hava yoğuşur. Türbini takiben düşük basınçlı nem ayırıştırıcı vasıtası ile çıkan hava içerisindeki nem ayırıştırılır ve kabine gönderilir. Basit çevrim sisteminin şematik görünümü Şekil 3.5 'de verilmiştir.



Şekil 3.5. Basit çevrim sistemi (Tuzemen vd., 2015)

3.2.2. Ön yüklemeli (Bootstrap) çevrim sistemi

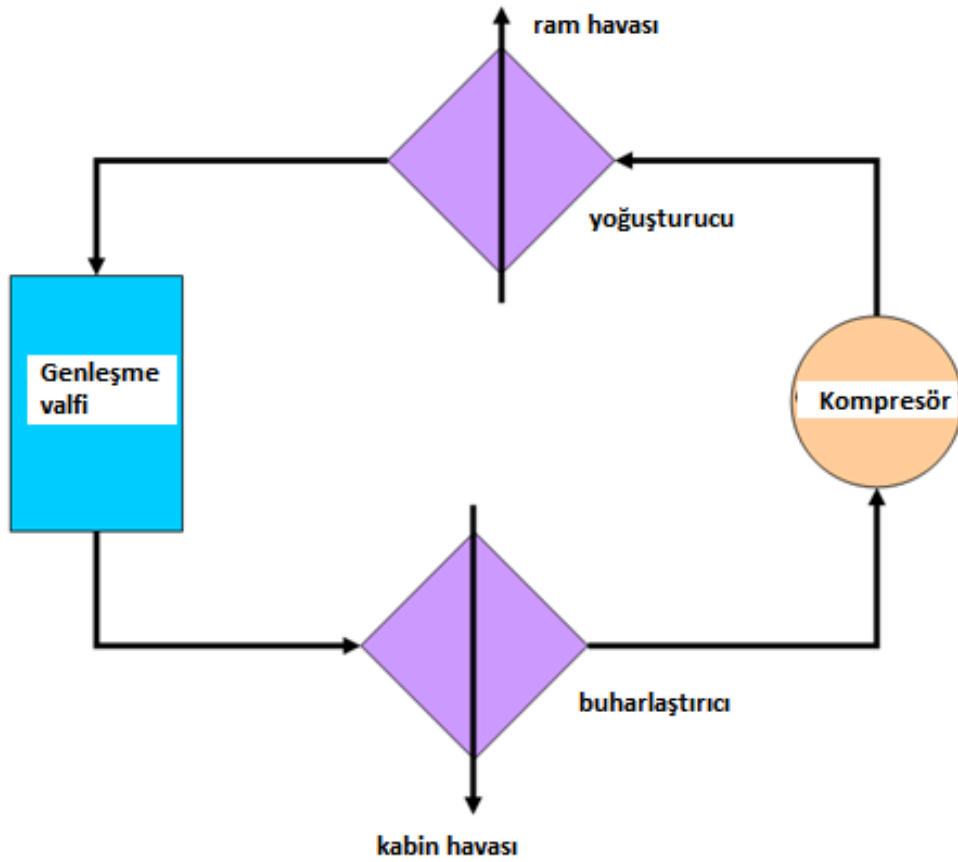
Ön yüklemeli çevrim sistemlerinde motordan tahliye edilen hava doğrudan birincil ısı değiştiricisine yönlendirilir ve ardından sıkıştırılır. Sıkıştırılan hava ikincil ısı değiştiricisine gönderilir. İkincil ısı değiştiricisinden geçen hava ise türbinden geçerek kabin basıncına genişletilir ve nem ayırıcısından geçirilerek içindeki su miktarı azaltılan hava daha sonra kabine beslenir. Elde edilen ısı şaft işine dönüştürülür kompresörü çalıştırmakta kullanılır. Birinci ve ikinci ısı değiştiricilerde soğutma ram havası ile yapılır. Sıcaklık kontrolü için baypas hatları sisteme entegre edilmiştir. Ön yüklemeli (Bootstrap) Çevrim sisteminin şematik görünümü Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Ön yüklemeli (Bootstrap) çevrim sistemi (Tuzemen vd., 2015)

3.2.3. Buhar çevrimi

Buhar çevrim sistemleri buzdolaplarında kullanılan sistemler olup oldukça yüksek verimlidir. Fakat hem ağır hem de kısıtlı sıcaklık aralığında çalışmaya olanak sağlamaktadırlar. Buhar çevrim sistemlerinde ilk olarak soğutucu gaz halinde bir kompresörden geçirilir ve burada soğutucu akışkanın sıcaklık ve basıncı yükselir. Sıcaklığı ve basıncı yükselen soğutucu akışkan yoğuşturucu da denilen bir ısı değiştiricisinden geçer, burada sıkıştırılmış soğutucu akışkandan ısı açığa çıkar. Bir miktar soğuyan akışkan sıvı forma dönüşür. Ardından soğutucu akışkan genleşme vanasından geçer, burada basınç azalır. Düşen basınç ile birlikte sıcaklıkta önemli ölçüde düşer. Evaporatör olarak da bilinen buharlaştırıcı, sistemdeki ikinci ısı değiştiricidir. Evaporatörden geçen hava yeniden gaz formuna dönüşür ve yeniden kompresöre girerek çevrimi tekrar başlatmış olur. Buhar çevrimi, gazdan sıvıya ve sıvıdan gaza olan bir faz değişimi ile çalışan kapalı bir dögüdür. Faz değişiminde yer alan gizli ısı, buhar dögüsünü çok verimli hale getirir. Buhar çevriminin şematik görünümü Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Buhar çevrim sistemi (Tuzemen vd., 2015)

3.3. Uçak Soğutma Sistemlerinde Hava Çevriminin Avantajları

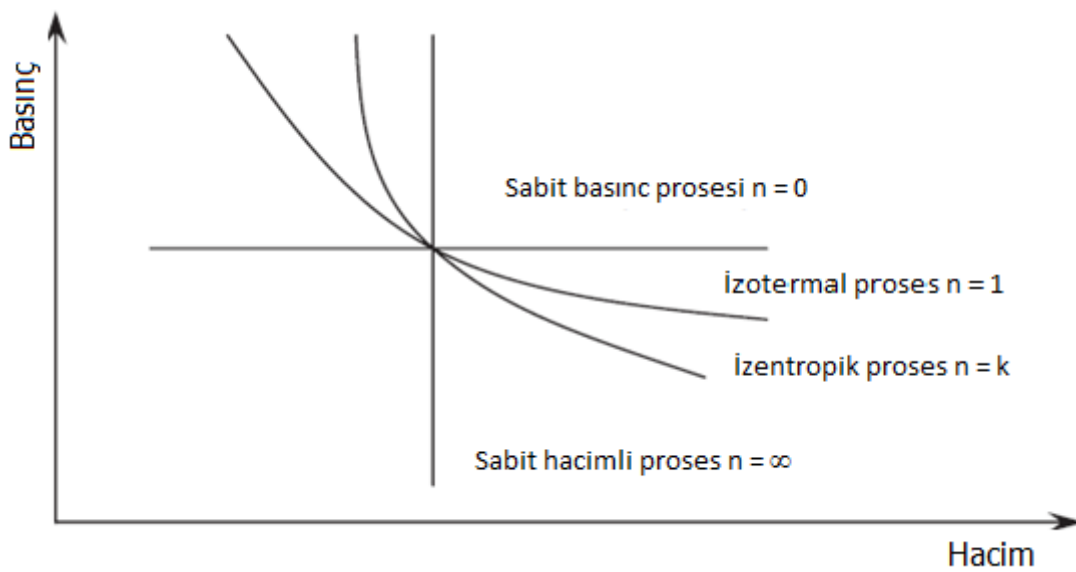
Uçaklarda, soğutma katsayısı (Coefficient of Performance - COP) değeri buhar sıkıştırımlı çevrimlere göre daha düşük olmasına rağmen iklimlendirme sistemi olarak genellikle Hava Soğutma Çevrimi tercih edilmektedir. (Arora, 2006) Hava çevriminin buhar sıkıştırımlı çevrimlere göre avantajları aşağıda listelenmiştir: (Arora, 2006)

- Soğutucu olarak hava kullanılması nedeniyle sistem oldukça ucuzdur
- Sıkıştırılmış hava kaynağı olarak ana kompresörün kullanılması nedeniyle çok fazla yer kaplamaz. Ayrıca ekstra titreşim oluşmaz.

- Soğutulmuş havanın direkt olarak kullanılması nedeniyle ayrıca bir buharlaştırıcıya gerek yoktur.
- Diğer soğutma sistemleri ile karşılaştırıldığında daha hafiftir ve daha az yer kaplar.
- Sistem içindeki basınç nispeten düşüktür. Bu nedenle sistemi kurmak ve dizayn etmek zor değildir.
- Buhar sıkıştırırmalı sistemlerin aksine hava soğutmalı sistemlerde sistemde sızıntı meydana gelmesi sorunu ile karşılaşılmaz veya risk oluşturmaz.
- Hava yanıcı bir gaz olmaması nedeniyle yangın tehlikesi söz konusu değildir.
- Bakım maliyeti düşüktür.
- Hava soğutma sistemlerinde, sistem içerisindeki herhangi bir eleman kolaylıkla çıkartılabilir ve tamir edilebilir.
- Buhar sıkıştırırmalı sistemlere göre daha hafiftir

4. TERMODİNAMİK ÇÖZÜMLEMELER

Enerji, iş yapma kapasitesi olarak bilinir. Enerji, transfer sırasında termal (ısı), mekanik (iş), elektrik ve kimyasal gibi çeşitli şekillerde olabilir. Termal enerji, işlemi tersine çevirmek için harici enerji eklenmediği sürece sadece daha yüksek bir sıcaklıktan daha düşük bir sıcaklığa doğru geçer. Birim zaman başına enerji transfer oranına ise güç denir. (Dinçer ve Rosen, 2005)



Şekil 4.1. Dört politropik işlemin basınç-hacim diyagramı üzerinde gösterimi (Dinçer ve Rosen, 2005)

Isının başka biçimlere dönüştürülebilen bir enerji biçimi olduğunu gösteren kesin deney, İskoç fizikçi James Joule tarafından gerçekleştirildi. Isı, enerjinin termal formudur ve bir ortam içinde veya farklı ortamlar arasında bir sıcaklık farkı olduğunda ısı transferi gerçekleşir. Daha yüksek sıcaklık farklılıkları daha yüksek ısı transfer oranları sağlar. Termodinamik hesaplamalarda, bir sisteme ısı transferi pozitif kabul edilirken, sistemden ısı transferi negatiftir. Bir işlemde ısı transferi yoksa, adyabatik denir.

İş, herhangi bir basınç veya kuvvet farkı ile aktarılan enerjidir ve şaft işi ve akış işi olarak alt bölümlere ayrılabilir. Şaft işi, pompa, kompresör veya türbin gibi bir mekanizmayı çalıştırmak için kullanılan mekanik enerjidir. Akış işi ise, sisteme giren veya sistemden çıkan akışkan ile bir sisteme aktarılan enerjidir. Genel kural olarak, bir sistem tarafından yapılan iş pozitif kabul edilirken, sistem üzerinde yapılan iş (iş girdisi) negatif kabul edilir.

4.1. Termodinamiğin Birinci Yasası

Termodinamik, enerji ve entropi bilimidir ve termodinamiğin temeli deneysel gözlemdir. Termodinamikte, bu gözlemler dört temel yasaya dönüşmüştür: termodinamiğin sıfır, birinci, ikinci ve üçüncü yasaları. Enerji transferleri ve dönüşümleri termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları tarafından yönetildiğinden, pratikte en çok kullanılan yasalardır. Bu çalışmada da bu iki yasaya odaklanılmıştır. Termodinamiğin 1. yasası, enerjinin korunum yasası olarak tanımlanabilir ve kapalı bir sistemde enerjinin yoktan var edilemeyeceğini yada var olan enerjinin yok edilemeyeceğini belirtir. Bir başlangıç durumundan (1), sabit madde miktarına sahip bir nihai hale (2) geçiş için, ilk yasa aşağıdaki gibi formüle edilebilir (Dinçer ve Rosen, 2005) :

$$Q_{1-2} = (E_2 - E_1) + W_{1-2} = (U_2 - U_1) + (KE_2 - KE_1) + (PE_2 - PE_1) + W_{1-2} \quad (4.1)$$

Burada,

$$(U_2 - U_1) = mc_v(T_2 - T_1) \quad (4.2)$$

$$(KE_2 - KE_1) = m \frac{(V_2^2 - V_1^2)}{2} \quad (4.3)$$

$$(PE_2 - PE_1) = mg(Z_2 - Z_1) \quad (4.4)$$

olarak tanımlanır.

Denklem 4.1’de de açıkça görüldüğü üzere, enerji tanımı, iç enerjiye ek olarak kinetik ve potansiyel enerjileri de içerecek şekilde genişletilebilir. Birinci yasanın önemli sonuçlarından biri, bir süreçten kaynaklanan içsel enerji değişiminin, sistemin takip ettiği termodinamik yoldan ve süreçlerin izlediği yollardan, örneğin ısı transferi ve işten bağımsız olmasıdır. Buna karşılık, sistemin iç enerjisinin değiştiği oran, sadece sıcaklığın eklendiği ve işin yapıldığı oranlara bağlıdır (kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edildiğinde).

4.2. Termodinamiğin İkinci Yasası

Daha önce de belirtildiği gibi, birinci yasa enerji koruma ilkesidir. Termodinamiğin ikinci yasası ise pratik termodinamik sistemlerin verimsizliklerinin belirlenmesinde etkilidir ve enerji dönüşümde %100 verimliliğe sahip olmanın imkânsız olduğunu gösterir. Kelvin-Plank ifadesi ve Clausius ifadesi gibi klasik ifadeler, ikinci yasanın formüle edilmesine yardımcı olur (Dinçer ve Rosen, 2005):

- **Kelvin-Plank ifadesi.** Bir kaynaktan ısı çıkarımını sağlayan ve bunu tamamen işe dönüştüren bir çevrimde çalışan bir ekipmanın (örneğin, ısı makinası) yapılması imkansızdır. Bu ifade, termal verimliliği %100 olan bir ısı makinasının olma ihtimalinin mümkün olmadığını açıklamaktadır.
- **Clausius ifadesi.** Düşük sıcaklık alanından yüksek sıcaklık alanına ısı transferi sağlayan bir çevrimde çalışan bir cihaz (buzdolabı, ısı pompası) yapabilmek mümkün değildir.

Hem birinci hem de ikinci yasaların sonuçları, birbirleriyle temas halinde olan birkaç sarkaçtan (metal toplardan yapılmış) oluşan bir masaüstü oyunu ile anlatılabilir. Topların ilkini yükseltildiğinde, sisteme potansiyel enerji biçiminde enerji verilir. Bu topu serbest bırakmak, topun potansiyel enerjisi kadar kinetik enerji kazanmasına sebep olur. Bu top ikinci topa çarptığında, küçük bir elastik deformasyon kinetik enerjiyi tekrar bir potansiyel enerji biçimine dönüştürür. Enerji bir toptan diğerine aktarılır. Son top yine kinetik enerji kazanır ve bu da topun yükselmesini sağlar. Döngü, top duruncaya kadar her seferinde biraz daha düşük bir seviyeye yükselerek devam eder. Birinci yasa, topların niçin

hareket etmeye devam ettiğiyle ilgilidir. İkinci yasa ise neden bunu sonsuza kadar yapmadıklarını açıklamaktadır. Bu oyunda enerji, hareket azaldıkça ses ve ısı biçiminde kaybolur. (Dinçer ve Rosen,2005)

İkinci yasa, evrendeki entropinin daima arttığını belirtmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, entropi düzensizlik derecesinin bir ölçüsüdür ve evrende meydana gelen her süreç evrenin entropisini daha yüksek bir seviyeye çıkarır. Bir sistemin entropisi, kendi olasılık durumu ile orantılıdır. Bir kapalı sistemin entropisi, herhangi bir ısı transferinde veya enerji dönüşümünde artar ve bu nedenle enerji transferleri veya dönüşümlerinin tümü geri döndürülemezdir.

Entropi perspektifinden, ikinci yasanın temelini özetlersek, bir sistemdeki ve sistemin çevresindeki entropi değişimlerinin toplamı daima pozitif olmalıdır. Son zamanlarda, termodinamik sistem ve uygulamalarda entropi oluşumunu (tersinmezlikleri) en aza indirmek için bir çok çalışma yapılmaktadır.

Termodinamik sistem ve uygulamalarda ikinci kanunun incelenmesi aşağıdaki nedenlerden dolayı önemlidir;

- süreçlerin yönünü tahmin etmek,
- denge koşulları oluşturmak
- termodinamik sistemlerin ve uygulamaların en iyi performansını belirlemek
- en iyi teorik performans seviyesinin elde edilmesini engelleyen faktörleri sayısal olarak değerlendirmek,
- maddenin özelliklerinden bağımsız olarak bir sıcaklık ölçeği tanımlamak,
- mevcut deneysel verileri kullanarak, örneğin, iç enerji ve entalpi gibi bazı termodinamik özellikleri değerlendirmek için araçlar geliştirmek.

Sonuç olarak, ikinci yasa entropi ile enerjinin yararı arasındaki bağlantıdır. İkinci yasa analizi, mühendislik termodinamiği uygulamalarından çok uzak olan, örneğin kimya, ekonomi, ekoloji, çevre ve sosyoloji gibi çok çeşitli disiplinlerde yer bulmuştur.

Tersinirlik ve tersinmezlik kavramları termodinamik süreçler ve sistemler için son derece önemlidir. Tersinirlik, yalnızca tersinir bir proses için hem sistemin hem de çevresinin ilk durumlarına geri dönebileceği ifadesiyle tanımlanır. Böyle bir süreç sadece teoriktir. Bir süreçteki tersinmezlik ise, yararlı enerjinin veya kullanılabilirliğin yok edilmesi olarak tanımlanır. Yeni girdiler olmaksızın, hem sistem hem de çevresi, örneğin sürtünme, ısı transferi veya çıkışı ve elektriksel ve mekanik etkiler gibi meydana gelen tersinmezlikler nedeniyle ilk durumlarına geri döndürülemez. Örneğin, gerçek bir sistem ideal tersinir işten daha az olan bir iş miktarı sağlar, bu nedenle bu iki değer arasındaki fark o sistemin tersinmezliğini verir. Gerçek uygulamalarda, her zaman böyle farklılıklar vardır ve bu nedenle gerçek süreçler ve döngüler her zaman tersinmezdir.

Ekserji, madde akışı veya enerji (ısı, iş, vb.) tarafından bir referans ortamı ile dengeye gelene kadar, üretilebilecek maksimum çalışma miktarı (kullanılabilirlik) olarak tanımlanır. Ekserji, bir referans ortamına göre tam stabil dengede olmamanın bir sonucu olarak değişime neden olacak bir akış veya sistemin potansiyelinin bir ölçüsüdür. Ekserji analizi için referans ortamının durumu veya bir referans durum belirtilmelidir. Bu genellikle referans ortamının sıcaklığı, basıncı ve kimyasal bileşimi belirtilerek yapılır.

Ekserji bir korunum yasasının konusu değildir. Herhangi bir süreçte tersinmezlikler nedeniyle daha çok ekserji tüketilir veya yok edilir. Ekserji analizi, sistem ve süreçlerin tasarımı ve analizi için kütlenin korunumu ve enerjinin korunumu prensiplerini termodinamiğin ikinci kanunu ile birlikte kullanan bir yöntemdir. Enerji ve ekserjinin karşılaştırılması aşağıdaki çizelgede (Çizelge 4.1) verilmiştir. (Dinçer ve Rosen,2005)

Çizelge 4.1. Enerji ve Ekserji terimlerinin kıyaslanması (Dinçer ve Rosen,2005)

Enerji	Ekserji
Sadece madde veya enerji akışının parametrelerine bağlı ve çevre parametrelerinden bağımsızdır.	Hem maddenin veya enerji akışının parametrelerine hemde çevre parametrelerine bağlıdır.
Sıfırdan farklı değerleri vardır (Einstein denklemine göre mc^2 'ye eşittir).	Ölü durumda çevre ile dengede olmasından dolayı sıfıra eşittir.
Tüm süreçler için termodinamiğin birinci kanunu tarafından yönlendirilir.	Sadece tersinir süreçler için termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları tarafından yönlendirilir.
Tersinir olanlarda dahil olmak üzere tüm süreçler için termodinamiğin ikinci yasası ile sınırlandırılmıştır.	Termodinamiğin ikinci yasası nedeniyle tersinir süreçler ile sınırlı değildir.
Tüm süreçlerde korunur.	Tüm süreçlerde korunmaz.

5. YÖNTEM

Sistemin tasarımı ve analizler için gerekenler, varılacak hedef belirlendikten sonra tanımlanır ve bunlar iki ana maddeye ayrılır. Birincisi, uygun cihazların seçilmesi ve şartlarının belirlenmesi, ihtiyaçların (bu durumda belirli bir sıcaklık ve basınçta hava akışı sağlamak) mevcut kaynaklar kullanılarak karşılanabilecek şekilde sağlanması gerekmektedir. İkincisi, bu şartları yerine getirmek için istenen çıktıları sağlayacak çalışma koşulları aralığı tanımlanmalıdır. Benzersiz bir çözüm yoktur, bu yüzden bir dizi kabul edilebilir yapılandırma arasından seçim yapmak gerekir. Tüm tasarım süreçlerinde güvenlik, çevre ve diğer hususlar tarafından getirilen kısıtlamalar dikkate alınmalıdır.

Bu çalışmada ön yüklemeli (bootstrap) tip çevresel kontrol sisteminin farklı irtifalar için termodinamik analizleri yapılmış ve ekserji verimliliği değerlendirilmiştir. Termodinamik analiz yapılan bu gibi işlemlerde, termodinamik kayıplardan sorumlu olan mekanizmaları, termal tersinmezlikleri ve sürtünme etkilerini ve esas olarak meydana geldikleri sistem bileşenlerini tanımlamak gerekir.

5.1 Sistemin Tanımı

Çalışmanın ilk bölümünde de belirtildiği gibi, çevresel kontrol sistemlerinin amacı kabini belirli bir basınç ve sıcaklıkta belli bir miktar taze hava ile beslemektir. Hava miktarı kabin içinde gerekli havalandırma oranları ile verilir. Hava kalitesini korumak, kötü kokuları önlemek ve sıcaklık değişimlerini kontrol etmek için, yolcu başına akışın 9.4 l/s olması gerekir, bunun yarısı kabinden gelen ve filtrelenen havadan elde edilir (Hunt vd, 1995). Diğer yarısı çevresel kontrol sistemi tarafından tedarik edilen, taze ve önceden şartlandırılmış havadır. Taze havaya eşdeğer bir kabin havası miktarı ise, yani yolcu başına yaklaşık 4.7 l/s hava, sistemden atılır.

Kabin basıncına göre belirlenen taze havanın basıncı, tırmanma, seyir veya iniş modu gibi uçuş moduna bağlıdır. Kabin basıncının mümkün olduğu kadar deniz seviyesine yakın tutulması istenmektedir, ancak yapısal kısıtlamalar nedeniyle içten dışa basınç

farkının ise yaklaşık 62 kPa'yı geçmemesi gerekmektedir (Perez-Grande ve Leo, 2002). Bu, yaklaşık 11 km'lik tipik bir seyir yüksekliğinde kabin basınçlarının 84 kPa'dan daha yüksek olmaması anlamına gelir.

Taze havanın sıcaklığını belirlemek için kabinin ısı transfer analizinin yapılması gereklidir. Bunun için yolculardan ve elektrikli cihazlardan çıkan ısı transferi, güneşten gelen radyasyon ve yüksek Reynolds sayılarında uçağın yüzeyinden taşınım ile transfer olan ısı gibi termal yüklerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu tip çalışmalar yapılırken, eşdeğer ısı iletkenliğini belirlemek amacıyla, ısı akısı yollarını yapı boyunca tanımlamak da gerekli olacaktır. Bu parametrenin değeri, her bir uçak için, montaj ve uçakta kullanılan malzemelere bağlı olduğundan farklıdır. Parametreleri doğru bir şekilde belirlemenin en iyi yolu deneysel ölçümler yapmaktır. Gerçek çalışmalarda ise, sıcaklık kontrol sistemi, kabine giren havanın sıcaklığını düzenler.

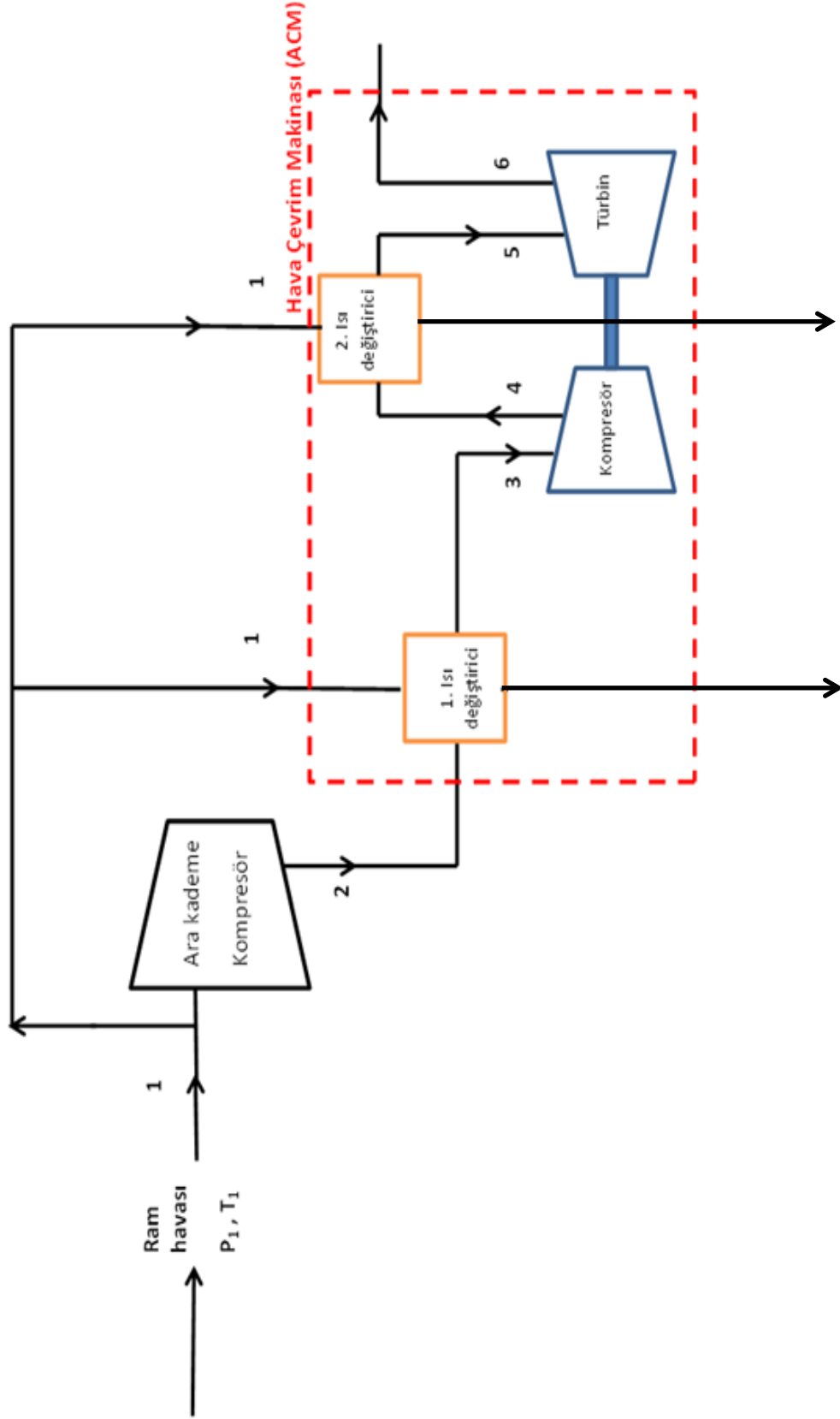
Bir uçakta taze hava kaynağı atmosferik havadır. Dış havanın basıncı, kabin basıncı için gerekli olandan çok daha düşük olduğundan gelen havanın basıncını yükseltmek gereklidir. Sadece bu amaçla ek bir kompresör koyarak uçağın yapısal ağırlığında ekstra bir artışa neden olmamak için, taze hava, motordan akan ve kompresörden geçen bir miktar havanın tahliye edilmesi ile elde edilir (Şekil 5.1). Motordan tahliye edilen hava, yakıt eklenmeden önce motor çekirdeğinden çekilen temiz havadır. Hava, difüzörden motora girer, hafifçe sıkıştırıldığı fandan geçer ve kompresöre girer. Atmosferik hava basınçlı hale geldikçe sıcaklığı artar, bu nedenle tahliye edildikten sonra havanın soğutulması gerekir.

Kabine girmeden önce yüksek sıcaklıktaki havayı soğutmak için kullanılan en yaygın çözüm, bir ters Brayton döngüsüne (hava önyüklemeye) dayanır. Her ne kadar buhar çevrimleri hava çevrimlerinden daha yüksek verime sahip olsa da, buhar çevrim makinaları genellikle daha ağırdır, bu nedenle ticari uçakların kabin iklimlendirilmesinde nadiren kullanılırlar. Hava çevrimine dayalı sistemler, düşük verime sahip olmalarına ve deniz seviyesinde soğutma oranlarının çok düşük olmasına rağmen, düşük kütleleri, kompakt boyutları ve yüksek güvenilirlikleri gibi avantajları nedeniyle en uygun çözüm olarak bilinirler.

Analiz edilecek ticari uçaklar için çevresel kontrol sistemleri temel olarak iki alt sistemden oluşur: pnomatik sistem olarak da bilinen hava tahliye sistemi ve hava çevrim makinesi (ACM). Ana durumların gösterildiği sistemin bir çizimi, Şekil 5.1'de görülebilir.

Hava tahliye sistemi olarak da bilinen pnömatik sistem birkaç valfden oluşur. Kimi çalışmalar ön soğutma yapan birincil ısı değiştiricisini tahliye hava sistemine dahil ederken, kimi çalışmalar hava çevrim makinası sistemine dahil ederler. Bu çalışmada Şekil 5.1'de de görüldüğü üzere birincil ısı değiştirici hava çevrim makinası sistemine dahil edilmiştir. Yukarıda tarif edildiği gibi, kompresörden geçen havanın bir kısmı, motorun (2) bir tarafına yerleştirilmiş olan port açıklıklarından birinden çıkarılır. Motordan tahliye edilen havanın sıcaklığı, genellikle yakıt tutuşma sıcaklığı tarafından belirlenen güvenlik seviyelerini aşar. Bu nedenle, havayı yakıt tutuşma sıcaklığının (işlem (2) - (3)) altına soğutmak için bir ön soğutucu veya birincil ısı değiştirici kullanılır. Bu, pnömatik manifolddaki havanın, bir yakıt sızıntısı durumunda herhangi bir risk olmadan, daima güvenli bir sıcaklıkta olmasını sağlar.

Burada çalışılan sistemde, soğutucu akışkan, doğrudan dışarıdan alınan ram havasıdır (Şekil 5.1). Isı değiştiriciden geçtikten sonra, ram havası atmosfere atılır. Gerçek sistemlerde, ram havasını çekmek için küçük bir fan bulunmaktadır, bu sistem sadece uçak hızı, ram havasının ısı değiştiricilerden geçmesi için yeterince yüksek olmadığı zaman gereklidir.



Şekil.5.1. Çevresel kontrol sisteminin şematik görünümü

Ön soğutucuyu geçen basınçlı hava kabinde çalışabilmek için hala çok sıcaktır, bu nedenle aynı anda basıncının da istenen seviyeye indirilmesi için soğutulması gereklidir. İstenen koşulları elde etmek için, hava, basıncının ve sıcaklığının tekrar yükseltildiği başka bir kompresörden geçer (işlem (3) - (4)). Daha sonra, havayı tekrar soğutmak için (4) - (5) ikincil bir ısı değiştirici (Şekil 5.1.'deki Isı Değiştirici 2) kullanılır. Aynı zamanda, her iki akışkanın da karıştırılmadığı, soğutucu akışkan olarak, ram girişine giren dış havayı kullanan kompakt çapraz akışlı bir ısı değiştiricidir. Son olarak, hava istenen basınca ulaşmak için bir türbin içinden genişler. Hava basıncı azaldıkça sıcaklığı da T6'ya düşer. Türbindeki genişleme, hava akışının soğutulmasındaki asıl sorumludur. Bu türbin, kompresörü ve gerekirse, soğutucu akışkan olarak kullanılan ram havasını çeken fanı tahrik eder.

Kabin girişinde istenen sıcaklığın elde edilmesi için, uçak motorunun tahliye hava portundan gelen sıcak hava bir baypas kanalı ile, türbinden çıkan hava ile karıştırılır (Santos vd,2014). Simetri ve güvenlikle ilgili gereklilikler nedeniyle, ticari uçaklar genellikle yukarıda tarif edilen çevresel kontrol sistem donanımlarından iki adet taşır. Hatta daha büyük uçaklar söz konusu olduğunda, bu sayı üçe bile çıkabilir. Dolayısıyla, havalandırma oranları, her bir sistemdeki hava akış kütle oranını belirlemek için sistem sayısına bölünmelidir.

5.2. Sistemin Modellenmesi

Bu çalışmanın nihai amacı, sistemin genel entropi üretimini ve ekserji verimini bulmaktır. Bu nedenle seçilen parametrelerin farklı değerleri için, termodinamik değerlerin belirlenmesi amacıyla bir analitik model geliştirilmiştir.

Model aşağıdaki varsayımlara dayanmaktadır:

- Tüm cihazların sabit durum koşullarında çalıştığı ve adyabatik olduğu kabul edilmiştir. Adyabatiklik varsayımı tam olarak doğru değildir, ancak bu tür cihazlarda tasarım sürecinin ilk aşamasında ısı transferi genellikle ihmal edilir. Eğer bu etkileşimler dikkate alınsaydı, entropi üretim oranı belirlenirken bunların da analize eklenmesi gerekirdi.

- Akışın bir boyutlu olduğu varsayılmıştır, yani her bir kesitte özellikler aynıdır.
- Hava, ideal bir gaz olarak modellenmiştir. Özgül ısının (C_p) sıcaklık bağımlılığı dikkate alınmıştır.
- Ram etkisinin olduğu difüzör hariç tüm cihazlarda kinetik enerjinin değişimleri ihmal edilmiştir.
- Uçağın uçuş modu, irtifa ve Mach sayısı ile belirlenmiştir.
- Sistemdeki tüm vanalar tamamen açıktır, bu nedenle modelleme yapılırken sisteme dahil edilmemişlerdir. Gerçek sistemlerde, sistemdeki vanalar kısmen kapatılabilir. Bu durumda, valflerdeki basınç düşüşleri entropi üretim oranını arttıracaktır.

Çevresel kontrol sisteminin kendisini analiz etmeden önce, uçak motorundan tahliye edilen havanın (2) hava koşullarını belirlemek gerekir. Belirli bir uçuş koşulu seti için, yükseklik h ve Mach numarası M , dış hava koşulları T_0 ve P_0 , standart atmosfer kuralları kullanılarak belirlenir.

Standart atmosfer kurallarına göre irtifaya bağlı olarak değişen sıcaklık formülü 11000m'ye kadar aşağıdaki gibi yazılmaktadır (Cavcar, 2000),

$$T_0 = T_a - 6,5 \frac{h(m)}{1000} \quad (5.1)$$

11 000 m'den sonra 20 000 m'ye kadar ise sıcaklık sabittir ve $-56,5^\circ\text{C}$ 'dir.

Yine standart atmosfer kurallarına göre 11 000 m'ye kadar basınç denklemini irtifaya bağlı olarak yazacak olursak (Cavcar, 2000),

$$P_0 = P_a \left(1 - 0,0065 \frac{h}{T_a}\right)^{5,2561} \quad (5.2)$$

11 000 m'den sonra ise basınç denklemi aşağıdaki şekilde yazılmaktadır (Cavcar, 2000);

$$P_0 = P_{11} e^{-\frac{g}{RT_{11}}(h-h_{11})} \quad (5.3)$$

Bu denklemde 11 alt indisi ile gösterilenler 11 000 m'deki basınç ve sıcaklık değerleridir.

Dış havanın sıcaklık ve basıncını hesaplariken kullanılan tüm parametreler Çizelge 5.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.1. Standart atmosfer hesaplamalarında kullanılan sabitler (Cavcar, 2000)

Deniz seviyesinde hava basıncı	$P_a = 101325 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1013.25 \text{ hPa}$
Deniz seviyesinde hava yoğunluğu	$\rho_a = 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Deniz seviyesinde hava sıcaklığı	$T_a = 288,15 \text{ K} = 15^\circ\text{C}$
Deniz seviyesinde ses hızı	$c_a = 340,294 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Deniz seviyesinde yerçekimi ivmesi	$g_a = 9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
11000 m.'deki hava basıncı	$P_{11} = 226,32 \text{ hPa}$
11000 m.'deki hava sıcaklığı	$T_{11} = 216,65 \text{ K}$

Havanın sabit basınçtaki özgül ısı ise sıcaklığa bağlı olarak aşağıdaki formüle göre hesaplanır (Turan, 2012);

$$C_p(T) = 1,04841 - 0,000383719T + 9,45378 \cdot 10^{-7}T^2 - 5,49031 \cdot 10^{-10}T^3 + 7,92981 \cdot 10^{-14}T^4 \quad (5.4)$$

Uçağın uçtuğu esnada ortam havasının ilk sıkıştırılması ram nedeniyle oluşur. 0. durumdan 1. duruma geçerken ram etkisiyle olan sıkıştırma gerçekleşir. 0 ortam havasının sıcaklık ve basınç değerlerini belirtirken 1i izentropik sıkıştırma sonrası sıcaklık ve basıncı belirtir.

Buna göre enerji denkleminde (Perez – Grande ve Leo, 2002);

$$h_1 = h_0 + \frac{V_0^2}{2} \quad (5.5)$$

Burada V_0 uçağın hızıdır (Perez – Grande ve Leo, 2002).

Havanın ideal gaz olduğu kabul edilirse (Perez – Grande ve Leo, 2002);

$$T_1 = T_{1i} = T_0 + \frac{V_0^2}{2C_p} \quad (5.6)$$

Yukarıdaki denklem Mach sayısına göre yeniden düzenlenirse;

$$\frac{T_1}{T_0} = 1 + \frac{(k-1)M^2}{2} \quad (5.7)$$

olur. Burada $k = C_p/C_v$ özgül ısı oranı, $M = V_0/c$ Mach sayısı, c ise ses hızıdır.

İzentropik sıkıştırmadan sonraki durma (stagnation) basıncı ise (P_{1i}) (Perez – Grande ve Leo, 2002),

$$\left(\frac{P_{1i}}{P_0}\right) = \left(\frac{T_{1i}}{T_0}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (5.8)$$

Ram havasının verimi;

$$\eta_r = \frac{P_1 - P_0}{P_{1i} - P_0} \quad (5.9)$$

olarak verilir.

Direkt olarak motordan gelen ram işi ise;

$$\dot{W}_r = \dot{m}C_p(T_1 - T_0) \quad (5.10)$$

olarak bulunur.

Hava çevrim makinasını çalıştırabilmek için gerekli sıkıştırılmış hava motordan tahliye (bleed air) edilir. Motor kompresöründe gerçekleştirilen sıkıştırma 1-2 olarak gösterilir. İdeal izentropik proses 1-2i olarak belirtildiğinde 2i noktasındaki sıcaklık aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır (Perez – Grande ve Leo, 2002).

$$\left(\frac{T_{2i}}{T_1}\right) = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (5.11)$$

Burada P_2 kompresör tahliye hava portunun basıncıdır.

Kompresör verimi;

$$\eta_{mk} = \frac{T_{2i} - T_1}{T_2 - T_1} \quad (5.12)$$

Kompresör işi;

$$\dot{W}_{mk} = \dot{m}C_p(T_2 - T_1) \quad (5.13)$$

2. ve 3. durumların arasında hava, hava çevrim makinasının birincil ısı değiştiricisinde soğutulur. Akışkan sürtünmeleri ihmal edildiğinde $P_2 = P_3$ yazılabilir (Perez – Grande ve Leo, 2002). Buna göre ısı değiştiricisinden çıkan ısı;

$$\dot{Q}_{bld} = \dot{m}C_p(T_3 - T_2) \quad (5.14)$$

Birincil ısı değiştirici için etkinlik bağıntısından;

$$\varepsilon_{bid} = \frac{T_2 - T_3}{T_2 - T_1} \quad (5.15)$$

Bu bağıntıdan ram hava sıcaklığının ısı değiştiricide T_1 sıcaklığına eşit olduğu kabul edilir.

4i noktasındaki sıcaklık, hava çevrim makinasının kompresördeki izentropik sıkıştırma sonrası aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır (Perez – Grande ve Leo, 2002).

$$\left(\frac{T_{4i}}{T_3}\right) = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (5.16)$$

İzentropik verim ise;

$$\eta_k = \frac{T_{4i} - T_3}{T_4 - T_3} \quad (5.17)$$

Çıkış sıcaklığı (T_4) yukarıdaki bağıntıdan hesaplandıktan sonra, kompresör işi de aşağıdaki şekilde hesaplanabilir (Perez – Grande ve Leo, 2002);

$$\dot{W}_k = \dot{m}C_p(T_4 - T_3) = \dot{m} \frac{C_p T_4}{\eta_k} \left[\left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (5.18)$$

4. ve 5. durumlar arasında hava ikinci ısı değiştiricide yeniden soğutulur. Burada da bir önceki ısı değiştiricide olduğu gibi sürtünmeler ihmal edilir. Böylece $P_4=P_5$ yazılabilir. İkinci ısı değiştiricisinden çıkan ısı miktarı ise;

$$\dot{Q}_{id} = \dot{m}C_p(T_4 - T_5) \quad (5.19)$$

ısı değiştiricisinin etkinlik bağıntısı;

$$\varepsilon_{iid} = \frac{T_4 - T_5}{T_4 - T_1} \quad (5.20)$$

En büyük sıcaklık düşüşü hava türbinde genişlediğinde meydana gelir. İzentropik proseste, genişlemenin sonundaki durum 6i ile gösterilebilir. Geręek koşullarda $P_{6i}=P_6$ kabin basıncının biraz üzerindedir.

6i noktasındaki sıcaklık ise yine izentropik bağıntıdan hesaplanır (Santos vd., 2014).

$$\left(\frac{T_{6i}}{T_5}\right) = \left(\frac{P_{6i}}{P_5}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (5.21)$$

İzentropik verim ise;

$$\eta_t = \frac{T_5 - T_6}{T_5 - T_{6i}} \quad (5.22)$$

Türbinden elde edilen iş ise aşağıdaki formülden hesaplanmaktadır (Santos vd., 2014);

$$\dot{W}_t = \dot{m}C_p(T_5 - T_6) = \dot{m}C_pT_5 \left[1 - \left(\frac{P_6}{P_4}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \eta_t \quad (5.23)$$

Özgül fiziksel ekserji ise aşağıdaki formülden hesaplanabilir (Aydın vd.,2012);

$$ex = C_p \left(T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right) + RT_0 \ln \frac{P}{P_0} \quad (5.24)$$

Sistemin ekserji veriminin gösterimi için birden fazla yol vardır. Bu çalışmada ekserji verimi çıkan ekserji değerinin giren ekserji değerine oranı olarak verilmiştir (Aydın vd, 2012; Söğüt vd., 2008).

$$\eta_{ex} = \frac{ex_{çıkan}}{ex_{giren}} \quad (5.25)$$

Sistemin entropi üretim oranını hesaplamak için, hava, ortam koşullarından (0) türbin çıkışında (6) elde edilen duruma göre değerlendirilir.

Buna göre sistemin entropi üretimi aşağıdaki gibi yazılabilir (Bejan ve Siems, 2001);

$$\dot{S} = \dot{m} \left(C_p \ln \frac{T_6}{T_0} - R \ln \frac{P_6}{P_0} \right) \quad (5.26)$$

Sistemin hesaplanmasında kullanılan sabit parametreler aşağıdaki çizelgede özetlenmiştir;

Çizelge 5.2. Çalışmada yapılan kabuller ve kullanılan sabitler

Mach sayısı	$M = 0,8$
Uçak motor kompresörü sıkıştırma oranı	$P_2/P_1 = 12,5$
Uçak motoru kompresör verimi	$\eta_{mk} = 0,90$
Ram verimi	$\eta_r = 0,95$
1. Isı değiştirici etkinliği	$\varepsilon_{bid} = 0,8$
kompresör sıkıştırma oranı	$P_4/P_3 = 1,2$
kompresör verimi	$\eta_k = 0,75$
2. Isı değiştirici etkinliği	$\varepsilon_{iid} = 0,8$
Türbin genişleme oranı	$P_5/P_6 = 5$
Türbin verimi	$\eta_k = 0,8$
Akış debisi	$\dot{m} = 0,7kg/s$

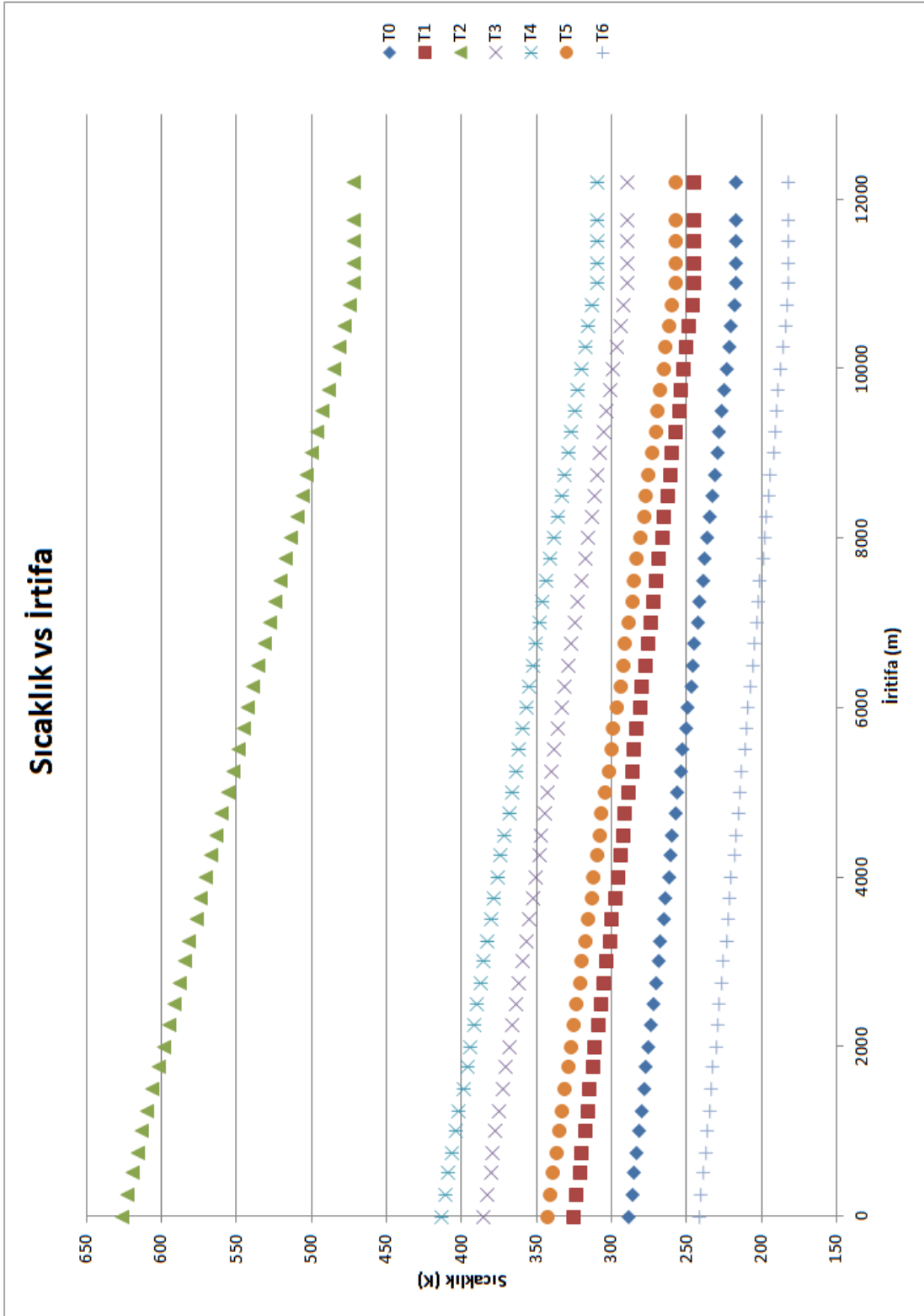
6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada 0 ile 11 000 m arasında değişen irtifalarda her bir sistem için giriş çıkış basınçları ve sıcaklıkları hesaplanmış, elde edilen verilere göre enerji verimi, ekserji verimi, ekserji yıkımı ve entropi üretimi hesaplanarak yorumlanmıştır.

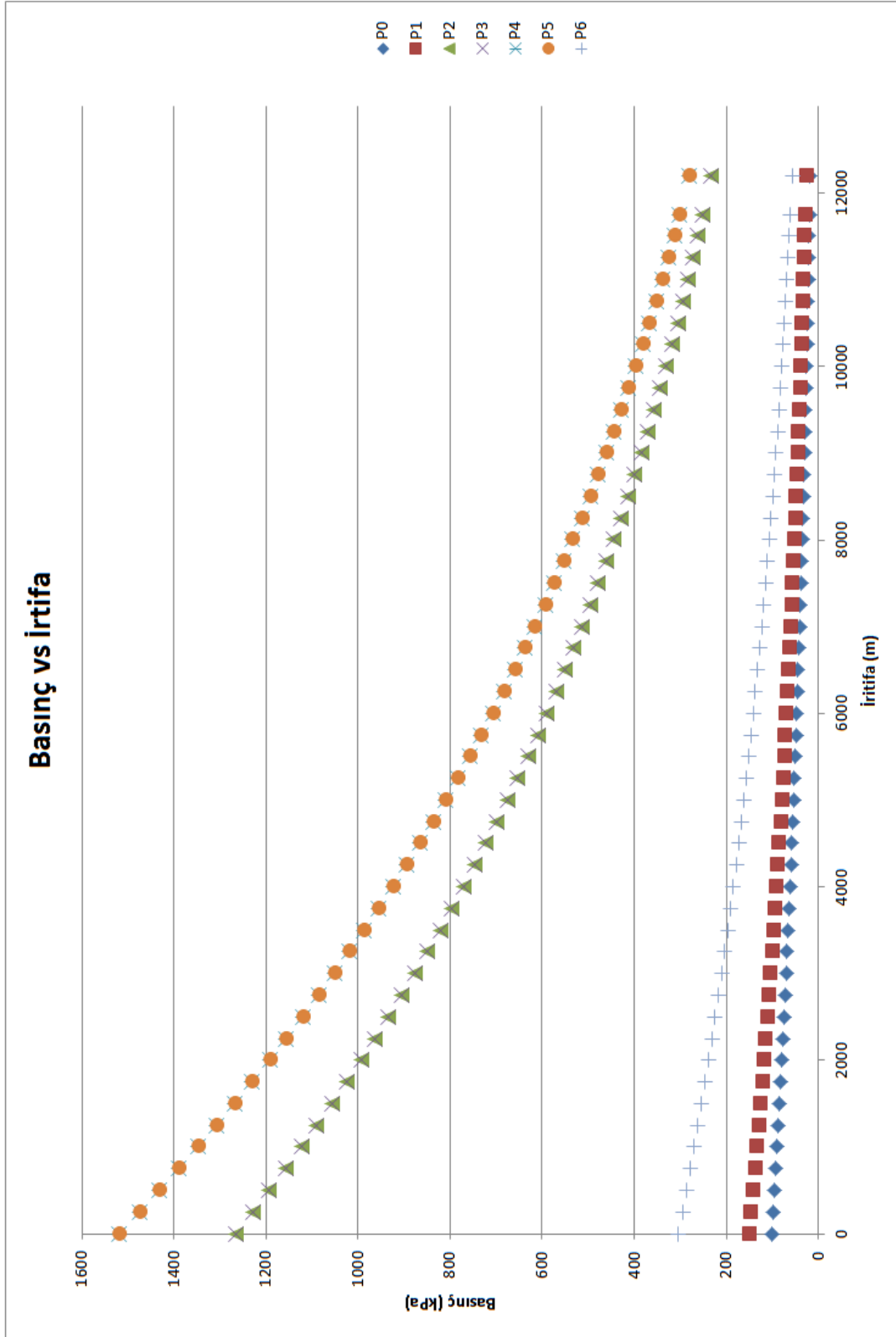
5. bölümde detaylı bir şekilde anlatılan yöntem ve formüllere göre her bir bileşen için giriş çıkış sıcaklıkları hesaplanmıştır. Aşağıdaki grafikte de görüldüğü üzere çevre havayla doğru orantılı olarak irtifa arttıkça tüm sistemlerde sıcaklıkların düştüğü görülmektedir. Sistem içinde en yüksek sıcaklığa uçak motor kompresöründen ara kademedeki çekilen tahliye havasının (bleed air) sahip olduğu görülmüştür. Uçak motor kompresörünün ardından en yüksek sıcaklıklara ise sırasıyla hava çevrim makinasının kompresör çıkışı ve kompresör girişinde rastlanmaktadır. Yine irtifaya bağlı olarak sistemin bileşenleri incelendiğinde, grafikteki eğimden de kolayca anlaşılacağı üzere, en yüksek sıcaklık farkına uçak motor kompresöründen ara kademedeki çekilen tahliye havasının (bleed air) sahip olduğu görülmüştür.

Yine sıcaklık ile aynı şekilde, verilen formül ve yöntemlerle basınç değerlerinin de irtifaya bağlı grafikleri çizilmiştir. Bu grafikte de basıncın dış ortam basıncı ile doğru orantılı bir yapıda olduğu görülmektedir. Genel olarak sistem incelendiğinde, sistemde en yüksek basınca hava çevrim makinasının türbin girişinde rastlanırken, onu uçak motor kompresöründen ara kademedeki çekilen tahliye havasının (bleed air) izlediği görülmektedir. İrtifaya göre en fazla basınç değişiminin türbin girişinde gerçekleştiği de yine grafikten görülmektedir.

İrtifaya göre sıcaklık ve basınç grafikleri karşılaştırıldığında sıcaklık değişiminin sistemdeki her bir bileşen için lineer olduğu görülürken, basınçtaki değişimin ise 3. dereceden polinomik bir ifadeyle hesaplanabileceği görülmektedir

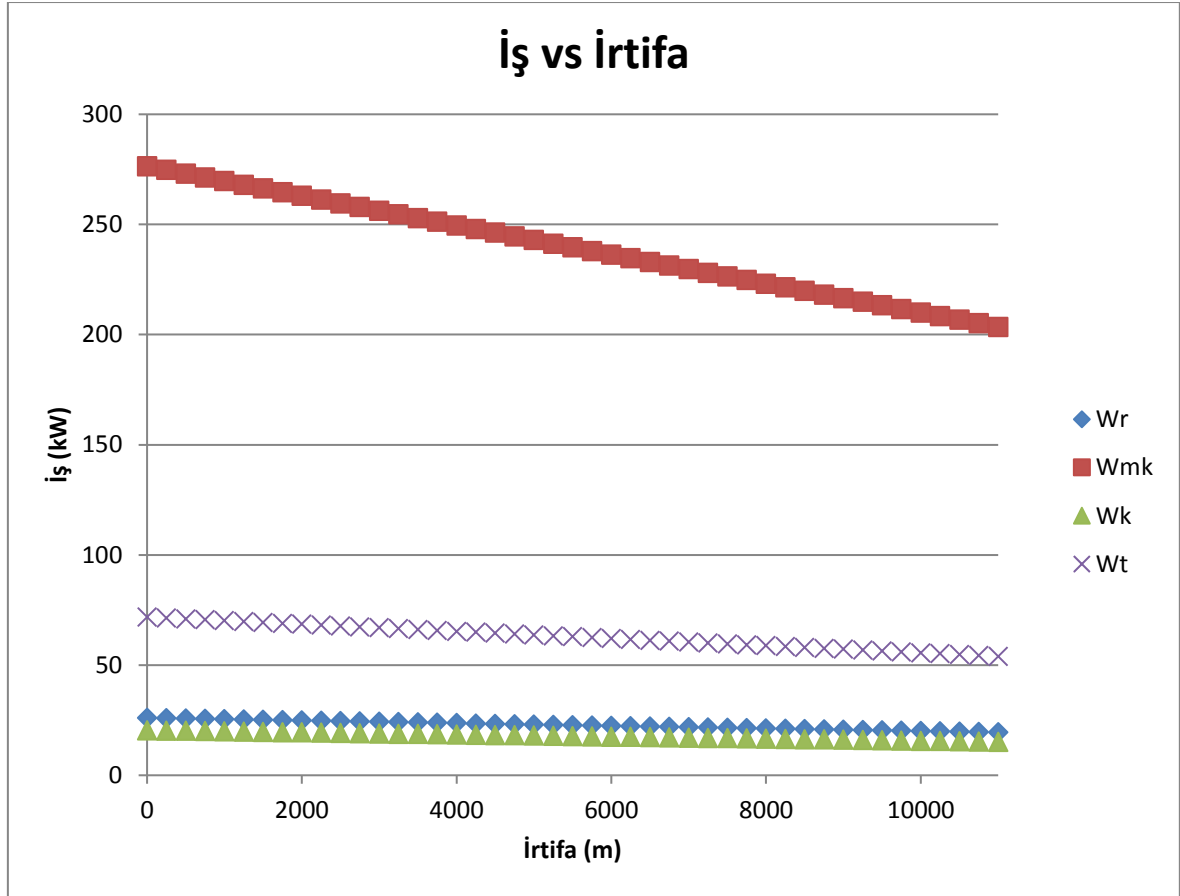


Şekil 6.1. Sistem bileşen sıcaklıklarının irtifa ile değişimi



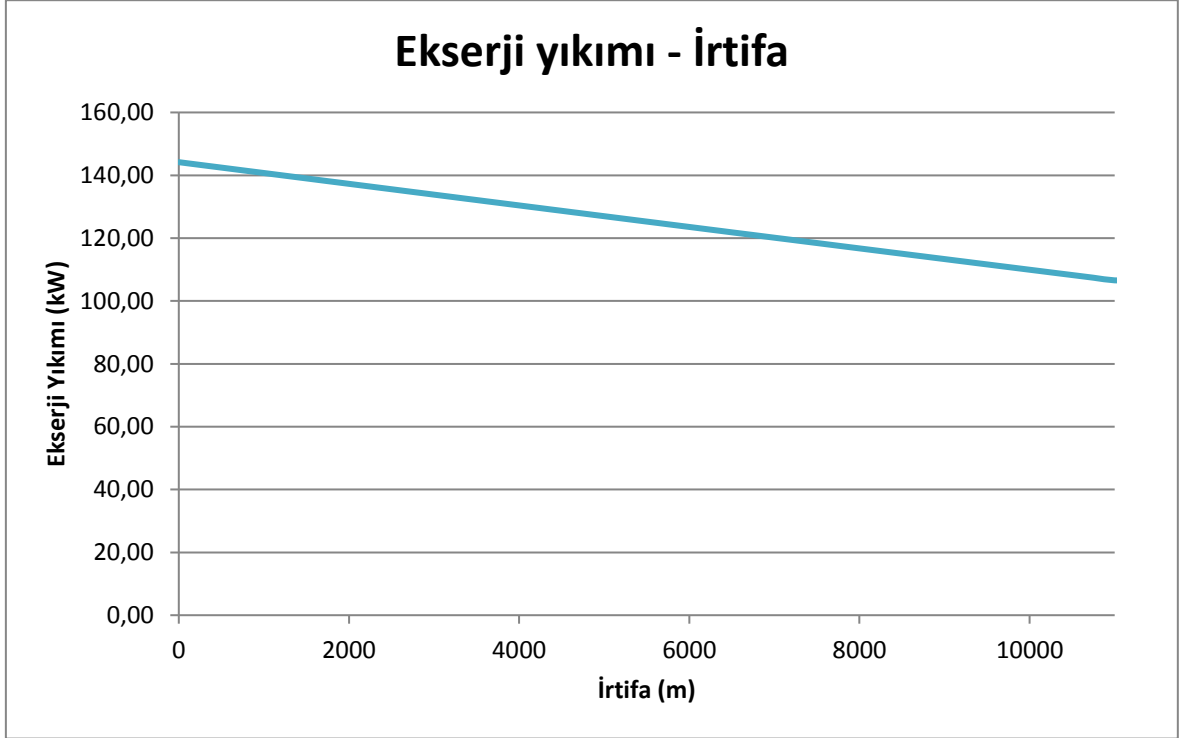
Şekil 6.2. Sistem bileşen basınçlarının irtifa ile değişimi

Sistemdeki bileşenler tarafından üretilen ya da sistemdeki bileşenler için gerekli olan iş/enerji miktarlarını inceleyecek olursak, şaşırtıcı olmamakla birlikte en çok işe uçak motorunun ara kademe kompresörünün ihtiyaç duyduğunu anlayabiliriz. İkinci en çok iş üreten bileşenin ise hava çevrim makinasında bulunan türbinin olduğu yine grafikten görülmektedir. Türbinden çıkan işin bir kısmı hava çevrim makinasında bulunan kompresörü döndürmek için harcanmakta iken geri kalan kısmı ise mekanik işler ve kayıplara gitmektedir. Sistemden en iyi verimi alabilmek için kayıpların en aza indirilmesi ve türbinden elde edilen işin kompresörün ihtiyaç duyduğu işe olabildiğince eşitlenmesi gerekmektedir (Şekil 6.3).



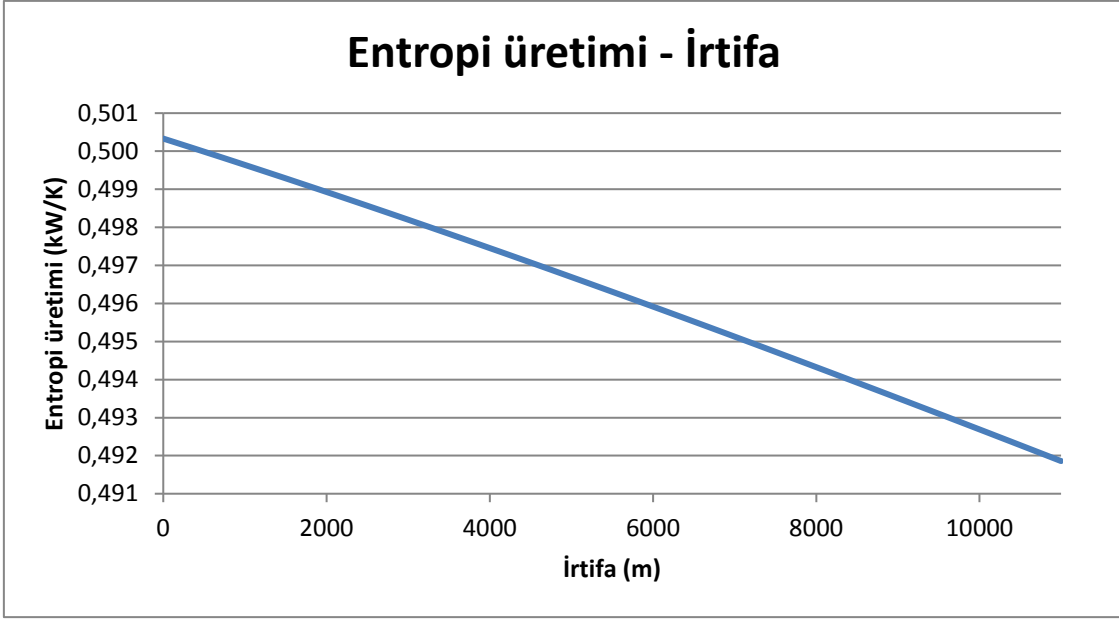
Şekil 6.3. Sistemdeki motor kompresörü (W_{mk}), kompresör (W_k), türbin (W_t) ve ram (W_r) işinin irtifa ile değişimi

Çalışmanın genelinde de bahsedildiği üzere bir sistemin etkinliğini inceleyebilmek için sadece termodinamiğin 1. yasasını çözümlmek yetmeyecektir. Sistem ekserji açısından incelendiğinde, irtifanın artmasıyla ekserji yıkımının azaldığı görülmüştür. Sistemin tersinmezliklerinin yüksek irtifalarda daha az olduğu, böylece sistemin daha efektif kullanılabildiği analiz edilmiştir (Şekil 6.4).



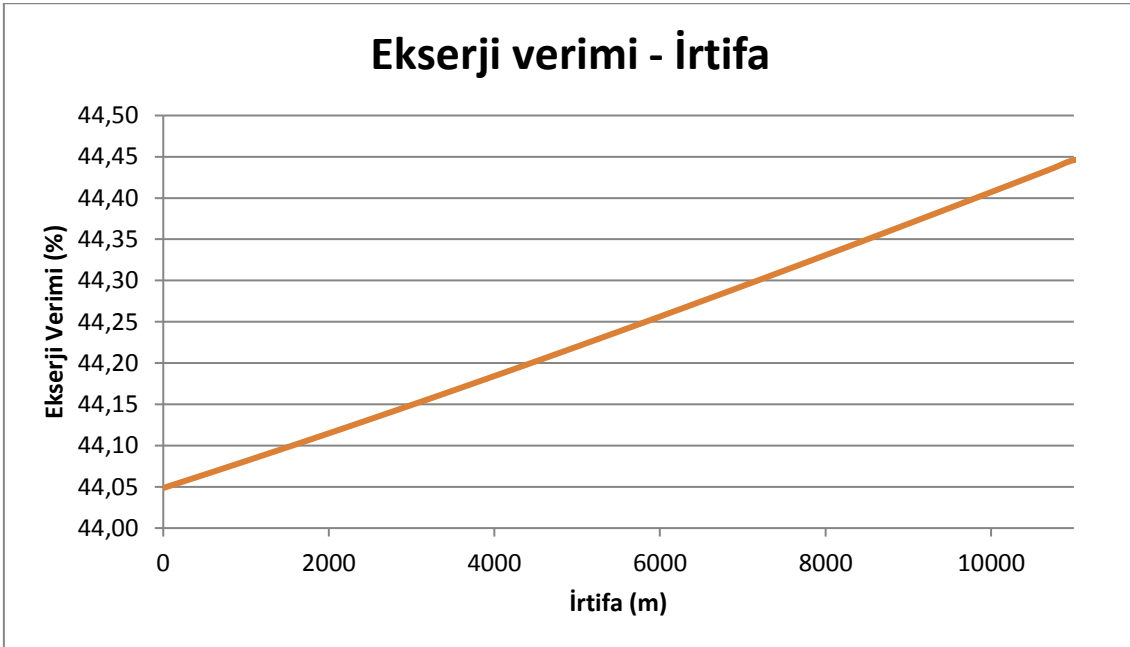
Şekil 6.4. Sistemdeki ekserji yıkımının irtifa ile değişimi

İrtifaya göre entropi üretiminin değişkenliği incelendiğinde ise yine ekserji yıkımı gibi entropi üretiminin de irtifanın artmasıyla azaldığı Şekil 6.5’de görülmektedir. Entropi üretimi ve ekserji yıkımı incelendiğinde ise ekserji yıkımının entropi üretimine göre daha agresif bir şekilde azaldığı görülmüştür.



Şekil 6.5. Sistemdeki entropi üretiminin irtifa ile değişimi

Ekserji verimi ise önceki grafiklerinde analiz edilmesiyle beklendiği gibi irtifayla birlikte doğru orantılı bir şekilde artmaktadır. 0 m. İrtifada %43,5218 olan ekserji verimi, 12192 m.'de %43,5224 olmuştur (Şekil 6.6).



Şekil 6.6. Sistemdeki ekserji veriminin irtifa ile değişimi

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, uçaklarda bulunan çevresel kontrol sisteminin sabit uçuş hızı için ($M=0,8$) 0 - 11000 m irtifa değerleri için termodinamik analizi yapılmış ve ekserji verimleri hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalara göre;

- En yüksek ekserji verimi %44,45 olarak 11 000 m. 'de hesaplanırken, en düşük ekserji verimi ise %44,05 olarak 0 m.'de elde edilmiştir.
- En yüksek ekserji yıkımı 144,17 kW ile 0 m. irtifada, en düşük ekserji yıkımı ise 106,56 kW ile 11 000 m için hesaplanmıştır.
- Entropi üretimleri incelendiğinde ise en düşük entropi üretiminin 0,492 kW/K'lık değeri ile 11 000 m irtifada hesaplandığı, en yüksek entropi üretiminin ise yine 0 m. için 0,5 kW/K olarak hesaplandığı görülmüştür.

Yukarıdaki verilerden de görüleceği üzere sabit bir hızda seyir halinde olan bir hava aracında, irtifanın artmasıyla tersinmezliklerin azaldığı ve sistemin daha verimli bir şekilde çalıştığı görülmüştür. Ancak irtifanın değişmesinin sistem üzerinde tek başına yüksek bir etkiye sahip olmadığı hesaplanan değerlerdeki farkların az olmasından anlaşılmaktadır. Bunun sebebi olarak, irtifanın sadece ortam sıcaklık ve basıncı ile ilişkili olduğu ve bu parametrelerin de belirli bir oran doğrultusunda değiştiği düşünülmektedir.

Bu çalışma, ileride yapılacak çalışmalar için bir başlangıç niteliğinde olup, sistemin modellenmesi ve yine sadece ekipmanın değil, sistemin ekserji veriminin hesaplanması açısından önem taşımaktadır. İleriki çalışmalarda, sabit irtifada uçuş hızı değiştirililerek yapılacak hesaplamada daha uygun sonuçlar elde edilmesi öngörülmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Adolfo, D., Bertini, D., Gamannosi, A., Carcasci, C., 2017, Thermodynamic analysis of an aircraft engine to estimate performance and emissions at LTO cycle, *Energy Procedia*, 126, 915-922.
- Akbulut, U., Kıncay, O., 2006, Buhar sıkıştırılmalı soğutma çevrimlerinde enerji ve ekserji analizi, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 94, 24-32.
- Akdemir Ö., Güngör A., 2006, Energy and exergy analysis of the humidifiers on the air conditioning systems, 3. Aegean Energy Symposium
- Aliabadi, M.H (2009) Smart Technologies for stress free air travel (SEAT), http://cordis.europa.eu/publication/rcn/11300_en.html, erişim tarihi: 21.08.2014
- Arora, C. P., 2006, Refrigeration and air conditioning, 2nd edition, Tata McGraw-Hill Publishing Company, p.73
- Arslan, B., Karakoç, T. H., Yörü, Y., Altuntaş, Ö., 2009, Uçak iklimlendirme sistemleri ve iç hava kalitesi üzerine etkisi, *Mühendis ve Makina*, 51, 607, 9-19
- Astori, P., 2009, Numerical models for aircraft systems – lecture notes chapter 6, <http://www.aero.polimi.it/~ls072645/bacheca/dispense/01-AircSyst.pdf>, erişim tarihi: 21.08.2014
- Atılğan, R., Turan, Ö., Altuntaş, Ö., Aydın, H., Synylo, K., 2013, Environmental impact assessment of a turboprop engine with the aid of exergy, *Energy*, 58, 664-671
- Aydın, H., Turan, O., Karakoc, T. H., Midilli, A., 2012, Component-based exergetic measures of an experimental turboprop/turboshaft engine for propeller aircrafts and helicopters, *International Journal of Exergy*, 11, 3, 322-348
- Aydın, H., Turan, O., Karakoc, T. H., Midilli, A., 2015, Exergetic sustainability indicators as a tool in commercial aircraft: a case study for a turbofan engine, *International Journal of Green Energy*, 12, 28-40
- Aydın, H., Turan, O., Midilli, A., Karakoc, T. H., 2013, Energetic and exergetic performance assessment of a turboprop engine at various loads, *International Journal of Exergy*, 13, 4, 543-564
- Balkan F., Çolak N., ve Hepbaşı A., 2004, Performance evaluation of a triple-effect evaporator with forward feed using exergy analysis, *International Journal of Energy Research*, 29, 12, 1079-1094
- Balli, O., 2014, Afterburning effect on the energetic and exergetic performance of an experimental turbojet engine (TJE), *International Journal of Exergy*, 14, 2, 212-24

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Balli, O., Hepbasli, A., 2013, Energetic and exergetic analyses of T56 turboprop engine, *Energy Conversion and Management*, 73, 106-120
- Bastani, M., Jafari, R., Ghasemi, H., 2015, Exergy analysis of an aircraft turbojet engine, *International Journal of Engineering Sciences and Research Technology*, 4, 380-386
- Bejan, A., Siems, D. L., 2001, The need for exergy analysis and thermodynamic optimization in aircraft development, *Exergy an International Journal*, 1, 1, 14-24
- Bender, D., 2017, Integration of exergy analysis into model-based design and evaluation of aircraft environmental control systems, *Energy*, 137, 739-751
- Bijalwan, A., Pratihari, A. K., 2015, Thermodynamic study on the performance of an aircraft bootstrap system, *All India Seminar on Advances in Engineering and Technology for Sustainable Development*, 293-298
- Bilal A., Qureshi, Syed M. Z., 2003, Application of exergy analysis to various psychometric processes, *International Journal of Energy Research*, 27:1079-1094.
- Bulgurcu H., 2002, Air conditioning systems-lecture notes, Balıkesir MYO., Balıkesir.
- Cavcar M., 2000, The international standard atmosphere (ISA), Anadolu University
- Chang H., 2001, Exergy analysis and exergoeconomic analysis of an ethylene process, *Tamkang Journal Of Science And Engineering*, 4, 2, 105-110
- Coban, K., Sohret, Y., Colpan., C. O., Karakoc, T. H., 2015, Exergy-based performance evaluation of a mini class gas turbine, *7th International Exergy, Energy and Environment Symposium*
- Çoban, K., Çolpan., C. Ö., Karakoç, T. H., 2016, Bir helikopter motorunun enerji ve ekserji analizi, *Sürdürülebilir Havacılık Araştırmaları Dergisi*, 1, 1, 26-38
- Çomaklı K., Karşlı S., Çomaklı Ö., Yılmaz M., 2004, Exergetic Analysis of Thermal Systems, *Thermodynamic*, page 94-99.
- Çomaklı, K., Karşlı, S., Yılmaz, M., Çomaklı, Ö., 2007, Termal sistemlerde ekserji verimi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2, 25-34
- Dikici, A., Akbulut, A., Gülçimen, F., Akbulut, A., 2005, Hava kaynaklı ısı pompası sisteminin performans katsayısı, enerji ve ekserji analizi, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 87, 33-42

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Dinçer İ., 2000, Thermodynamics, exergy and environmental impact, *Energy Sources*, 22, 723-732.
- Dinçer İ., 2002, The role of exergy in energy policy making, *Energy Policy* 30, 137-149.
- Dinçer, İ. and Rosen, M. A. 2005, Thermodynamic aspects of renewable and sustainable development, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 9, 2, 159-189.
- Ehyaiei, M. A., Anjiridezfuli, A., Rosen, M. A., 2013, Exergetic analysis of an aircraft turbojet engine with an afterburner, *Thermal Science*, 17, 4, 1181-1194
- Esen, D. O., Hosoz, M., 2007, Energy and exergy analysis of an automobile air conditioning system using refrigerant R134a, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23, 188-203
- Forster, C. J., 2009, Development of an air-cycle environmental control system for automotive applications, M.Sc. thesis, California Polytechnic State University
- Grönstedt, T., Irannezhad, M., Lei, X., Thulin, O., Lundbladh, A., 2014, First and second law analysis of future aircraft engines, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 136, 1-10
- Güngör, A., Karaçaylı, İ., Şimşek, E., Canlı, Y., 2017, Geri dönüş havalı iklimlendirme sistemlerinde enerji ve ekserji analizi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32, 3, 19-29
- Hassan, H. Z., 2013, Evaluation of the local exergy destruction in the intake and fan of a turbofan engine, *Energy*, 63, 245-251
- Hunt, E. H., Reid, D. H., Space, D. R., Tilton, F. E., 1995, Commercial airliner environmental control system, The Boeing Company, Aerospace Medical Association Annual Meeting, Anaheim, California
- Kabul, A., Kızıllan, Ö., Yakut, A. K., 2010, Gövde borulu ısı değiştiricili R404a kullanılan bir soğutma sisteminin enerji ve ekserji analizi, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 30, 2, 85-93
- Karakoç H., Işıklı B., 2007 Indoor air quality in commercial aircrafts Paper presented at the Fifth Triennial International Fire & Cabin Safety Research Conference, New Jersey, USA, 01/11/2007
- Leo, T. J., Perez – Grande, I., 2005, A thermoeconomic analysis of a commercial aircraft environmental control system, *Applied Thermal Engineering*, 25, 309-325

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Linaires, D. P., 2016, Modelling and simulation of an aircraft environmental control system, M.Sc. thesis, Université de Montréal
- Long, C., Xingjuan, Z., Chunxin, Y., 2014, A new concept environmental control system with energy recovery considerations for commercial aircraft, 44th International Conference on Environmental Systems, 99
- Ma, Z., Zhang, X., Wang, C., Yang, H., Yang, C., 2015, Study on ground-test simulation method of the ram air for commercial airliners environmental control system, Procedia Engineering, 121, 325-332
- Mahindru, D.V. and Mahendru, P. 2011, Environmental control system for military & civil aircraft, Global Journal of Researches in engineering: D Aerospace Engineering, 11, 5, 1-6
- Martinez, I 2012 Aircraft environmental control-lecture notes. <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/> (Accessed 21 Aug 2014)
- Mborah, C., Gbadam, E., K., 2010, On the energy and exergy analysis of a 500 KW steam power plant at Benso Oil Palm Plantation (BOPP), Research Journal of Environmental and Earth Sciences, 2, 4, 239-244
- Ordonez J., Bejan A., 2003, Minimum power requirement for environmental control of aircraft, Energy, 28, 1183-1202
- Paulus, D., M., 2003, The exergy of lift and aircraft exergy flow diagrams, International Journal of Thermodynamics, 6, 4, 149-156
- Perez – Grande, I., Leo, T. J., 2002, Optimization of a commercial aircraft environmental control system, Applied Thermal Engineering, 22, 1885-1904
- Porto Neves, J. B., Andrade, C. R., Zapparoli, E. L., 2009, Numerical analysis of typical aircraft air-conditioning air cycle machine, 20th International Congress of Mechanical Engineering
- Prasad, M., 2003, Refrigeration and air conditioning, New Age International Limited Publishers, p.78-80
- Rosen, M.A., 1999, Second-law analysis: approaches and implications International Journal of Energy Research, 33, 415-429
- Sanjay, Singh, O., Agarwal, M., Bhel, R., 2014, Energy and exergy analysis of Brayton-Brayton hybrid cycle for power plant applications, Engineering Letters, 22, 4

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Santos, A. P. P., Andrade, C. R., Zapparoli, E. L., 2014, A thermodynamic study of air cycle machine for aeronautical applications, *International Journal of Thermodynamics*, 17, 3, 117-126
- Sogut, M. Z., Karakoç, H., Kılış, B., 2011, Soğutucu akışkanların ekserji verimine bağlı çevresel performanslarının incelenmesi, 6th International Advanced Technologies Symposium
- Söğüt Z., Bulgurcu H., Oktay Z., 2008, Thermodynamics analyses of the humid air past from air handling unit in the operations of winter air conditioning, 4. Aegean Energy Symposium
- Turan O., 2012, Exergetic effects of some design parameters on the small turbojet engine for unmanned air vehicle applications, *Energy*, 46, 51-61
- Turgut E. T., Karakoc, T. H., Hepbaslı, A., 2007, Exergetic analysis of an aircraft turbofan engine, *International Journal of Energy Research*, 31, 14, 1383-1397
- Tuzemen, S., Altuntas, O., Sogut, M. Z., Karakoc, T. H., 2015, Investigation of thermodynamic performance based on the humidity effect in the aircraft environmental control systems, *International Journal of Sustainable Aviation*, 1, 3, 203-217
- Vargas, J. V. C., Bejan, A., 2001, Integrative thermodynamic optimization of the environmental control system of an aircraft, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 3907-3917
- Vargas, J. V. C., Bejan, A., 2001, Thermodynamic optimization of finned crossflow heat exchangers for aircraft environmental control systems, *International Journal of Heat Fluid Flow*, 22, 657-665
- Wu, X. Y., Zmeureanu, R., 2011, Exergy analysis of residential heating systems: performance of whole system vs performance of major equipment, 12th Conference of International Building Performance Simulation Association
- Yin, H., Shen, X., Huang, Y., Feng, Z., Long, Z., vd., 2016, Modelling dynamic responses of aircraft environmental control systems by coupling with cabin thermal environment simulations, *Building Simulation*, 9, 4, 459-468
- Zhao, H., Hou, Y., Yongfeng, Z., Chen, L., Chen, S., 2009, Experimental study on the performance of an aircraft environmental control system, *Applied Thermal Engineering*, 29, 3284-3288