

DÜZ UÇUŞ VE TIRMANMADA FARKLI MOTOR TİPLERİ İÇİN TAŞIMA EKSERJİSİ

Süleyman Kağan AYAZ*

Anadolu Üniversitesi
Havacılık ve Uzay Bilimleri
Fakültesi
skayaz@anadolu.edu.tr

Önder ALTUNTAŞ

Anadolu Üniversitesi
Havacılık ve Uzay Bilimleri
Fakültesi
oaltuntas@anadolu.edu.tr

Emin AÇIKKALP

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi
Makine ve İmalat Mühendisliği
eacikkalp@gmail.com

Geliş Tarihi: 13 Mart 2015, Kabul Tarihi: 20 Ocak 2016

ÖZET

Ekserji analizi, günümüzde hava trafiğinin artmasıyla birlikte hava araçlarından kaynaklanan küresel ısınma etkilerinin azaltılması ve enerjinin etkin kullanıma yönelik yapılan çalışmalarda büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada, teorik bir hava aracı için beş farklı motor tipinde 8,000ft (2,440m)'te düz uçuş ve deniz seviyesinde tırmanma durumları için taşıma ekserjisi tabloları oluşturulmuştur. Bu çalışma sonucunda, yakıt debisi ve gücü fazla olan motorların diğer bileşenlerinde de taşıma ekserjisi anlamında daha fazla ekserji yıkımı meydana geldiği görülmüştür. Ekserji yıkımları bileşenler arasında hem düz uçuşta hem de tırmanma durumunda en fazla motorda meydana gelmiştir. Bu bağlamda kanat ve pervane sırasıyla ikinci ve üçüncü bileşenlerdir. Daha fazla kanat açıklık oranı (aspect ratio) değerine sahip bir hava aracının tüm bileşenleri için daha az taşıma ekserjisi gerektiği görülmüştür. Düz uçuşta motor bileşeninde en fazla ekserji yıkımı yaklaşık olarak 32 kW ile gücü ikinci en yüksek olan motorda meydana gelmiştir. Tırmanma aşamasında ise en yüksek güce sahip motorda yaklaşık olarak 473 kW ekserji yıkımı meydana gelmiştir ve bu değer beş motor arasında en yüksek olanıdır.

Anahtar Kelimeler: Ekserji, İkinci Yasa Analizi, Taşıma Ekserjisi, Verimlilik.

THE EXERGY OF LIFT DURING CLIMB AND CRUISE FOR DIFFERENT ENGINE TYPES

ABSTRACT

Nowadays with the increasing air traffic, exergy analysis is of great importance in studies aimed efficient use of energy and decreasing environmental impacts caused by aircrafts. In this study, tables for exergy of lift for a hypothetical aircraft have been created with five different engine types. Tables created are for cruise at 8,000ft (2,440m) and climbing at sea level. As a result of this study, it is seen that the engines with higher power and fuel mass flow rate have bigger exergy destruction rates within their components in the meaning of the exergy of lift. The exergy destructions have occurred most greatly at the engines both at the climbing and the cruise. Wing and propeller are the second and third components in this regard, respectively. It is seen that for the components of an aircraft which has a lower aspect ratio there is lesser need for the exergy of lift. During the cruise, the biggest exergy destruction rate in the engine component is occurred approximately as 32 kW at the engine which has the second highest power. As to climb, 473 kW exergy destruction rate which is the biggest value within all engines is occurred at the engine having the biggest power.

Keywords: Exergy, Second Law Analysis, Exergy of Lift, Efficiency.

1. GİRİŞ

Ekserji analizi, son yıllarda enerji kaynaklarının azalmaya başladığı gerçeği göz önünde bulundurulduğunda, termodinamik kayıplardan sorumlu sistem ve bileşenlerin tanımlanmasına ve bu kayıpların ve sistemlerin toplam maliyetlerinin

(termoekonomi) azaltılmasını sağlaması dolayısıyla, günümüzde termal sistemlerin analizlerinde büyük önem taşımaktadır. Günümüzde ekserji analizi, termoekonomi ve entropi üretimi azaltılması gibi ikinci yasa analizlerini hava araçlarının enerji sistemlerine uygulanmasında artan bir ilgi mevcuttur.

* Sorumlu Yazar

Performans ve verimlilikle ilgili en hassas konulardan bir tanesi motorların çevreye olan etkileridir. Bu yüzden, motorların çevreye olan etkilerinin azaltılması konusu, küresel ısınmanın etkilerinin arttığı ve iklim değişiklerinin yaşanmaya başladığı günümüzde büyük önem kazanmıştır. 2007 yılında yaklaşık olarak 16,800 ticari uçak görev yapmaktayken günümüzde ise 19,600 ticari uçak görev yapmaktadır. 2024 yılında ise bu sayının 35,300 olması beklenmektedir [1]. Artan hava trafiği göz önünde bulundurulduğunda termodinamik-çevresel-ekonomik analizlerin hava araçlarına uygulanması enerji maliyetlerinin, küresel ısınmaya olan katkılarının ve işletme maliyetlerinin azaltılması yönünde önemli rol oynamaktadırlar. Ekserji tabloları ise ekserji analizinin önemini belirlenmesi için gereklidir. Bu tabloların oluşturulması için taşıma ekserjisinin tanımlanması gereklidir [2].

Paulus ve Gaggioli [2] taşıma ekserjisinin tanımını yapmış ve bu tanıma göre bir hava aracı için ekserji akış şemasını oluşturmuştur.

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 işlemleri geliştirme açısından büyük avantaj sağlar [3]. Ayrıca bu sayede her bir bileşenin termodinamik açıdan optimizasyonun yapılması, hava araçlarının işletme maliyetlerini azaltacak, faydalı yük/mesafe oranına olumlu katkıda bulunacaktır [4,5].

Ekserji tabloları, sistemlerin ve bileşenlerin ekserji yıkım oranlarının belirlenmesini ve dolayısıyla termodinamik açıdan tersinmezliklerin en fazla olduğu sistem veya bileşenlerin belirlenmesini sağlar. Dolayısıyla entropi üretim oranları (ya da ekserji yıkım oranları), termodinamik olarak kayıp analizlerini incelemek için Bejan [6]'ında belirttiği gibi ortak ve bir sağlam bir parametre sunmaktadır. Buna karşın, entropi üretimi ya da ekserji yıkım oranları, termodinamik kayıpları ölçmede ve tanımlamada gerekli ve sağlam temelli bir analiz olmakla birlikte, hava araçlarının dizayn, analiz ve optimizasyonunda yaygın olarak kullanılmamaktadır [7].

Ekserji analizini hava araçlarının dizayn, analiz ve optimizasyonunda kullanan araştırmacılardan Roth [8], termodinamiğin ikinci yasasının hava aracı tasarımında umut vaat eden bir yaklaşım olmasının sebebinin 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 [8]'nin 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 [8], daha fazla ekserji yıkımının meydana geldiği bileşenlerin daha tersinmez olduğunu belirtmiş, aynı zamanda ekserji yıkımının itki kuvvetiyle alakalı olduğunu söylemiştir. Roth [4], aerodinamik kayıpların da ekserji kayıplarıyla alakalı olduğunu ve bu iki kayıp arasında kıyaslama yapılabileceğini göstermiştir.

Markell [10], ekserji temelli bir metodolojiyi daha geleneksel bir yöntemle, hipersonik bir hava aracında sentez/dizayn 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 debisi oranları sunduğunu göstermiştir.

Riggins ve ark.[11], kayıplar ve enerji kullanımı değerlerini elde etmek için genel elverişlilik (ekserji) değerinin hava aracının hareket denklemleriyle birleştirilerek elde edilebileceğini belirtmiştir. Kayıp elverişlilik değerinin entropi üretimiyle alakalı olduğunu belirtmiş, hava aracı kütlesi başına düşen toplam elverişlilik kayıp oranıyla ilgili ifadeleri (hava aracı başına düşen toplam entropi üretim oranı) atmosferde ivmeli olarak tırmanma gerçekleştiren bir hava aracı için bulmuştur. Ayrıca hava aracının toplam kesit alanı başına düşen toplam elverişlilik oranının itki sistemleriyle ve sürüklenme kuvvetiyle alakalı olduğunu, elverişlilik analizinin tüm alt sistemler ve süreçler için tasarım ve optimizasyon süreçlerinde kullanışlı olduğunu vurgulamıştır. Bu bağlamda, ekserji analizi enerjinin ekonomik değeri olan tek parçası olduğu için, dikkatle yönetilmeye değer bileşendir [12].

Hava araçlarında ekserji yıkımlarının en büyük miktarlarından bir tanesi yanma işleminde %30 ile meydana gelmektedir [13-15]. İkinci en önemli ekserji yıkımı motorda meydana gelmektedir. Motorların tersinmez çalışma süreci göz önüne alındığında, motorlarda meydana gelen ekserji yıkımları toplam ekserji yıkımlarının %50'sine kadar ulaşabilmektedir [14]. Bu anlamda, bu çalışma hava aracının farklı motor tiplerinde meydana gelen ekserji yıkımları ve bunların tüm bileşenler içerisinde ne kadar paya sahip olduklarını, taşıma ekserjisi denklemleri kullanılarak irdelenme fırsatı sunmaktadır.

Bu çalışmada yukarıda bahsedilenler çerçevesinde, belirlenen teorik bir hava aracının deniz seviyesinde tırmanma aşamasında ve 8000ft (2440m)'te düz uçuşu sırasında, beş farklı motor tipinde taşıma ekserjisi

denklemleri kullanılarak ekserji tabloları oluşturulmuştur. Oluşturulan bu tablolar vasıtasıyla, belirlenen teorik hava aracı için beş farklı motor tipinde taşıma ekserjisi denklemleri yardımıyla motorların performans parametreleri göz önünde bulundurularak ekserji değerleri kıyaslanmıştır.

2. YÖNTEM

2.1. Sistem Tanımı

Bu çalışmada kullanılan hava aracı Cessna 172, 152 ve 182 serileri incelenerek genellenmiş teorik bir modeldir. Kabul edilen hava aracının özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Hava aracı özellikleri.

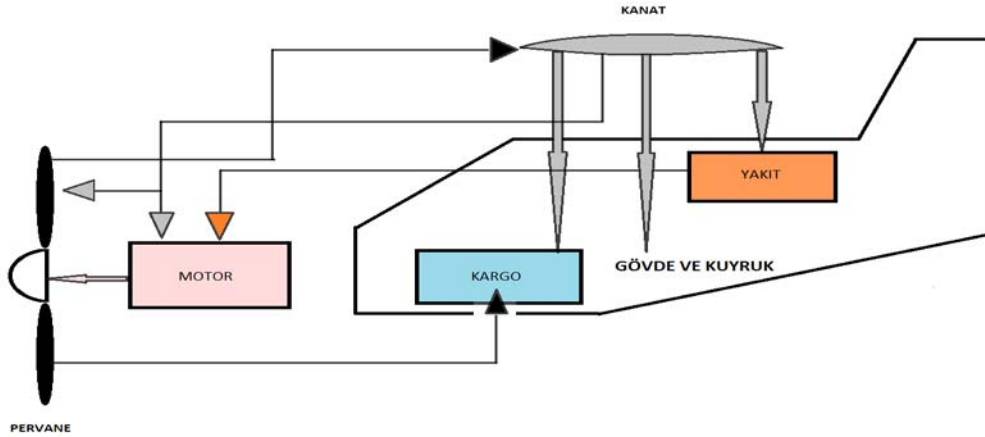
Boş Kütle	767 kg
Kalkış Kütle	1111 kg
Tırmanma Hızı	3.66 m/s
Yatay Hız(tırmanmada)	24.16 m/s
Düz Uçuş Hızı	62.77 m/s
Kanat Açıklık Oranı (a)	7.32
Kanat Yüzey Alanı	16.2 m ²

Hava aracının 7 bölüme ayrıldığı varsayılmıştır. Bu bölümler; yakıt, motor, pervane, kanat, gövde ve kuyruk takımı(yatay ve dikey dengeleyici) ve kargodur. Bu bölümlerin kütleleri Tablo 2’ de ve sistem şeması Şekil 1’de verilmiştir.

Motorlarda pervane olarak iki palli Hartzell bulunduğu kabul edilmiştir.

Tablo 2. Bileşenlerin kütleleri

Bileşen	Kütle(kg)
Pervane	18.14
Kanat	225
Gövde ve kuyruk takımı	400.06
Kargo	191.148



Şekil 1. Sistem şeması.

Ekserji tabloları maksimum tırmanma hızında IO-320-DIAD, O-540-J3C5D, O-360-A3A, IO-360-A1B6, O-320-E2A gibi farklı motor tipleri için oluşturulmuştur. Bu motorların düz uçuş ve tırmanma aşamasında yakıt akış miktarları ve ağırlıkları Tablo 3’de verilmiştir.

Motor parametreleri Lycoming Operating Handbook’tan alınmıştır.

Lycoming Operating

Tablo 3. Motorların yakıt akış oranları ve ağırlıkları [16-18].

Motor	Tırmanma safhasında yakıtın kütleli debisi(kg/s)(\dot{m}_{fuel})	Düz uçuşta yakıtın kütleli debisi(kg/s) (\dot{m}_{fuel})	Güç(kW)	Kütle (kg)	Yakıt Miktarı(kg) (m_{fuel})
IO-320-DIAD	0.0077	0.0076	119	123.8	153
O-540-J3C5D	0.018	0.0097	175.24	176	100.8
O-360-A3A	0.0102	0.0072	134	131.54	145
IO-360-A1B6	0.0106	0.00945	149	151.045	126
O-320-E2A	0.008	0.0076	112	129.273	147

2.2. Taşıma Ekserjisi Tanımı ve Genel Denklemler

Bir kuvvetin bir nesneye uygulanmasıyla ilişkili ekserji

$$\dot{E} = F(V - V_0) \quad (1)$$

denklemlerinde elde edilir. Burada V nesne hızı, F kuvvet ve V_0 ölü hal hızıdır. Ancak bu tanımın bir hava aracı için kullanılması durumunda, taşıma kuvvetinin elde edilmesi için gerekli ekserjinin "0" olduğunu ve düşey hız komponenti olan başka bir referansın bulunması gerektiğini Paulus ve Gaggioli [1] vurgulamıştır.

Düşey hız bileşeni olan başka ölü hal hızı tanımlanmasının, taşıma ekserjisinin düzgün bir şekilde hesaplanmasını sağlayacağı Paulus ve Gaggioli [1] tarafından belirtilmiştir. Bu sebeple Paulus ve Gaggioli [1]

$$\dot{E}^{LI} = F_{lift}(V_y - V_{y0}) \quad (2)$$

denklemlerinde V_y düşey hız bileşenini ve V_{y0} ölü hal hızının düşey bileşenini kullanarak taşıma ekserjisini tanımlamıştır. Denklem (2) 'de F_{lift} kanat üzerindeki toplam taşıma kuvvetinin düşey bileşeni olarak yorumlanabilir, dahası F_{lift} bir hava aracının herhangi bir bileşenine, kanatlardan o bileşene hava aracının yapısı vasıtasıyla aktarılan taşıma kuvveti olarak düşünüldüğünde uygulanabilir.

Paulus ve Gaggioli [1] minimum sürüklenme kuvveti $F_{drag,min}$ 'in belirli bir taşıma kuvvetinde(3) denklemlerinde hesaplandığını belirtmiştir.

$$F_{drag,min} = \frac{\rho S V_\infty^2 C_L^2}{2\pi a} \quad (3)$$

ρ : Yoğunluk
 S : Yüzey alanı
 V_∞ : Hız
 C_L : Taşıma katsayısı
 a : Kanat açıklık oranı(Aspect ratio)

Ayrıca Paulus ve Gaggioli [1] yatay düzlemde ölü hal hızını sıfır varsayarak ve uçuşun sürekli olduğunu varsayarak kanatlara minimum ekserji girişini

$$\dot{E}^{TH}_{min} = \frac{\rho S V_\infty^3 C_L^2}{2\pi a} \quad (4)$$

düz uçuşta bu kanatta ekserji dengesini

$$0 = \frac{dE}{dt} = \dot{E}^{TH} - \dot{E}^{LI} - \dot{E}_\delta \quad (5)$$

\dot{E}_δ : Ekserji yıkımı

olarak belirtmiştir. Minimum sürüklenme kuvvetine sahip uçuşun ideal olduğu varsayıldığında $\dot{E}_\delta = 0$ olacaktır, yani itme kuvvetiyle üretilen tüm ekserji taşıma kuvvetine harcanacaktır ($\dot{E}^{TH} = \dot{E}^{LI}$) [1].

(2) ve (4) denklemleri birbirlerine eşitlenirse, ivmesiz düz uçuşta, $V_y = 0$ ve g yerçekimi ivmesi ve hava aracının ağırlığı m_a ise, $F_{lift} = m_a g$ ve

$$-m_a g V_{y,0} = \frac{\rho S V_\infty^3 C_L^2}{2\pi a} \quad (6)$$

bulunur [1]. Buradan ölü hal hızı

$$V_{y,0} = \frac{-\rho S V_\infty^3 C_L^2}{2\pi a m_a g} \quad (7)$$

olmaktadır [1].

$$F_{lift}^2 = \left(\frac{\rho S V_\infty^2 C_L}{2}\right)^2 \text{ ve } F_{lift} = m_a g \text{ olduğundan,}$$

$$V_{y,0} = \frac{-2m_a g}{\pi a \rho S V_\infty} \quad (8)$$

Ve bu denklem denklem (2) de yerine koyulursa herhangi bir bileşen için taşıma ekserjisi,

$$\dot{E}_C^{LI} = m_c g \left(V_y + \frac{2m_a g}{\pi a \rho S V_\infty} \right) \quad (9)$$

m_c : Komponent kütlesi

Olarak Paulus ve Gaggioli [1] tarafından hesaplanmıştır.

2.3. Ekserji Dengesi

Ekserji dengeleri aşağıdaki denklemleri kullanarak oluşturulmuştur.

Yakıt:

$$\begin{aligned} \frac{dE_{fuel}}{dt} &= m_{fuel}g \frac{dY}{dt} - \dot{m}_{fuel}e_{fuel}^{CH} \\ &= \dot{E}_{fuel}^{LI} - \dot{m}_{fuel}e_{fuel}^{CH} - \dot{E}_{\delta,fuel} \end{aligned} \quad (10)$$

e_{fuel}^{CH} : Yakıtın özgül kimyasal ekserjisi

Motor:

$$\begin{aligned} \frac{dE_{engine}}{dt} &= m_{engine}g \frac{dY}{dt} \\ &= \dot{m}_{fuel}e_{fuel}^{CH} + \dot{E}_{engine}^{LI} - \dot{W}_{prop} - \dot{E}_{\delta,engine} \end{aligned} \quad (11)$$

Pervane:

$$\begin{aligned} \frac{dE_{prop}}{dt} &= m_{prop}g \frac{dY}{dt} \\ &= \dot{E}_{prop}^{LI} + \dot{W}_{prop} - \dot{E}_{prop}^{TH} - \dot{E}_{\delta,prop} \end{aligned} \quad (12)$$

Kanat:

$$\frac{dE_{wing}}{dt} = m_{wing}g \frac{dY}{dt} = \dot{E}_{wing}^{TH} - \dot{E}_{lift,net}^{LI} - \dot{E}_{\delta,wing} \quad (13)$$

Gövde ve Kuyruk Takımı:

$$\frac{dE_{fuse}}{dt} = m_{fuse}g \frac{dY}{dt} = \dot{E}_{fuse}^{LI} + \dot{E}_{fuse}^{TH} - \dot{E}_{\delta,fuse} \quad (14)$$

Kargo:

$$\frac{dE_{cargo}}{dt} = m_{cargo}g \frac{dY}{dt} = \dot{E}_{cargo}^{LI} - \dot{E}_{\delta,cargo} \quad (15)$$

2.4. Diğer Denklemler

$$\dot{E}_{engine}^{LI} = \frac{m_{engine}g}{m_{ag}} \dot{E}^{LI} \quad (16)$$

$$\dot{E}_{net}^{LI} = \dot{E}^{LI} - \frac{m_{wing}g}{m_{ag}} \dot{E}^{LI} \quad (17)$$

$$\dot{E}_{prop}^{TH} = \eta_{prop} \dot{W}_{prop} \quad (18)$$

$$F_{drag,fuse} = \frac{1}{2} \rho A_{equiv} V_{\infty}^2 \quad (19)$$

Denklem (19) yardımı ile E_{fuse}^{TH} hesaplanmıştır.

$A_{equiv} = 0.1911 \text{ m}^2$, pervane verimi η_{prop} tırmanma ve düz uçuş aşamalarında sırasıyla 0.68 ve 0.81 kabul edilmiştir [1]. Yakıtın özgül kimyasal ekserjisi 46,000 kJ/kg olarak kabul edilmiştir.

\dot{E}^{LI} : Taşıma ekserjisi

\dot{E}^{TH} : İtke ekserjisi

\dot{E}^{CH} : Kimyasal ekserji

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Düz uçuş ve tırmanma durumlarında ekserji tabloları tüm motorlar için ayrı ayrı oluşturulmuştur. Yakıt, hava aracının ekserji kaynağıdır. Aynı zamanda yakıtın kendi ağırlığından dolayı taşıma ekserjisi gerekmektedir. Yakıtın ekserjisi öncelikle motorlara iletilmekte ve motorlar bu değerleri mekanik güce çevirmektedir. Mekanik güç pervaneyi çevirmek için kullanılmakta ve böylece pervane tarafından itki ekserjisi oluşturulmaktadır. İtke ekserjisi taşıma kuvveti meydana getirmek ve gövdenin geri kalanına etkilenen sürüklenme kuvvetini yenmek için kanatlara iletilmektedir [1]. Kanatların taşıma ekserjisi kanatların kendisine ve diğer bileşenlere iletilmektedir.

Düz uçuşta giren ve çıkan ekserjilerin farkı, sürekli akış şartları mevcut olduğu için, ekserji yıkımını vermektedir. Tırmanma durumunda yüksekliğin zamanla değişmesinden dolayı tüm bileşenlerin ekserjilerinde değişim söz konusudur [1].

3.1. Düz Uçuşta Ekserji Değerleri

Düz uçuşta ekserji değerleri 8,000 ft (2440m)'te %75 motor performansı değerlerinde elde edilmiştir.

Yakıt

IO-320-DIAD motoru kullanımı sırasında daha fazla yakıt miktarı bulunması (153kg) Tablo 4'te görüldüğü gibiekserji yıkımının ve yakıt için gerekli taşıma ekserjisinin en fazla olmasını sağlamıştır. En fazla taşıma ekserjisi değeri IO-360-A1B6 motorunda 1.193 kW ile meydana gelmiştir.

Tablo 4. Düz uçuşta yakıtın ekserji değerleri.

Motor	\dot{E}^{LI} (kW)	\dot{E}^{CH} (kW)	\dot{E}_{δ} (kW)	dE/dt(kW)
IO-320-DIAD	1.451	-349.6	1.451	-349.6
O-540-J3C5D	0.957	-446.2	0.957	-446.2
O-360-A3A	1.38	-331.2	1.38	-331.2
IO-360-A1B6	1.193	-434.7	1.193	-434.7
O-320-E2A	1.4	-349.6	1.4	-349.6

Motor

Tablo 5. Düz uçuşta motorun ekserji değerleri.

Motor	$\dot{E}^{LI}(\text{kW})$	$\dot{W}(\text{kW})$	$\dot{E}^{CH}(\text{kW})$	$\dot{E}_\delta(\text{kW})$	$dE/dt(\text{kW})$
IO-320-DIAD	1.176	-89.25	349.6	261.525	0
O-540-J3C5D	1.671	-131.43	446.2	316.441	0
O-360-A3A	1.249	-100.5	331.2	231.949	0
IO-360-A1B6	1.434	-111.75	434.7	324.384	0
O-320-E2A	1.227	-84	349.6	266.827	0

En yüksek güce sahip olan O-540-J3C5D motorunun pervaneye harcadığı güç Tablo 5’te görüldüğü gibi en fazladır. Buna karşın, tüm motorlar için harcanan taşıma ekserjisinin hemen hemen aynı olmasından dolayı ve IO-360-A1B6 motorunun kimyasal ekserjisinin O-540-J3C5D motoruna kıyasla daha az olması, IO-360-A1B6 motorunda 324.384 kW ile en fazla ekserji yıkımı meydana gelmesini sağlamıştır.

Kanat

Tablo 6’da görüldüğü üzere düz uçuş sırasında kanat tarafından üretilen taşıma ekserjileri değerleri yaklaşık olarak tüm motorlar için aynıdır. En fazla itki ekserjisi O-540-J3C5D motoru tarafından oluşturulmuştur. Aynı şekilde en fazla ekserji yıkımı yine bu motorda 76.993 kW olarak meydana gelmiştir.

Tablo 6. Düz uçuşta kanatın ekserji değerleri.

Motor	$\dot{E}^{LI}(\text{kW})$	$\dot{E}^{TH}(\text{kW})$	$\dot{E}_\delta(\text{kW})$	$dE/dt(\text{kW})$
IO-320-DIAD	-8.413	49.538	42.829	0
O-540-J3C5D	-8.414	83.704	76.993	0
O-360-A3A	-8.415	58.65	51.940	0
IO-360-A1B6	-8.413	67.763	61.054	0
O-320-E2A	-8.413	45.285	38.576	0

Pervane

Tablo 7. Düz uçuşta pervanenin ekserji değerleri.

Motor	$\dot{E}^{LI}(\text{kW})$	$\dot{E}^{TH}(\text{kW})$	$\dot{W}(\text{kW})$	$\dot{E}_\delta(\text{kW})$	$dE/dt(\text{kW})$
IO-320-DIAD	0.172	-72.293	89.25	17.130	0
O-540-J3C5D	0.172	-106.458	131.43	25.144	0
O-360-A3A	0.172	-81.405	100.5	19.267	0
IO-360-A1B6	0.172	-90.518	111.75	21.405	0
O-320-E2A	0.172	-68.04	84	16.132	0

Pervane tarafından kanatlara ve gövde ve kuyruk takımına en fazla itki ekserjisi O-540-J3C5D motoru tarafından sağlanmıştır. Tablo 7’de görüldüğü gibi pervanenin motorlardan aldığı gücün 106.458 kW ile en fazla bu motorda olmasına rağmen, ekserji yıkımı 25.144 kW ile yine en fazla bu motorda meydana gelmiştir.

Gövde ve Kuyruk Takımı

Düz uçuş safhasında tüm motorlar için gövde ve kuyruk takımı için ekserji değerleri $\dot{E}^{TH}=22.755$ kW, taşıma ekserjisi değeri $\dot{E}^{LI} = 3.7988$ kW, ekserji yıkımı $\dot{E}_\delta = 26.553$ kW ve $dE/dt=0$ kW’tır.

Kargo

Kargo için ekserji değerleri düz uçuşta

$\dot{E}^{LI} = 1.815 \text{ kW}$ ve ekserji yıkımı değeri aynı şekilde $\dot{E}_\delta = 1.815 \text{ kW}$ 'tır.

- Beş farklı motor tipinden düz uçuşta en fazla ekserji yıkımı motor, kanat ve pervane bileşenlerinde O-540-J3C5D motorunda meydana gelmiştir. Bu motorda Tablo 5'e göre motor bileşeninde 316.441 kW, Tablo 6'ya göre kanat bileşeninde 76.993 kW ve Tablo 7'ye göre pervane bileşeninde 25.144 kW ekserji yıkımı meydana gelmektedir.
- Özellikle kanatlarda, kanatlara iletilen ekserjinin büyük kısmı yıkıma uğramıştır. Bunun sebebi, aynı gövdeye ve yatay hız, ağırlık gibi aynı karakteristiklere sahip hava aracı için yakıt debisi ve gücü fazla olan motorun seçilmesidir. Bu motorun yerine daha az güce ve yakıt debisine sahip O-320-E2A motorunun kullanılması hava aracının aynı

uçuş karakteristiklerinde daha az güç ve yakıt kullanarak işletilmesini sağlayacaktır.

3.2. Tırmanma Aşamasında Ekserji Değerleri Yakıt

Tablo 8'de görüldüğü gibi tırmanma aşamasında yakıtın kimyasal ekserji değerleri arasında belirgin fark olmasına rağmen ekserji yıkımları arasındaki fark yok denecek kadar azdır. Ancak hava aracının tırmanma işleminin yapabildiği için en fazla O-540-J3C5D motoru tarafından 644 kW olmak üzere yakıt harcanmaktadır.

Tablo 8. Tırmanmada yakıtın ekserji değerleri.

Motor	$\dot{E}^{LI}(\text{kW})$	$\dot{E}^{CH}(\text{kW})$	$\dot{E}_\delta(\text{kW})$	$dE/dt(\text{kW})$
IO-320-DIAD	8.452	-354.2	2.964	-348.712
O-540-J3C5D	5.574	-644	1.955	-640.381
O-360-A3A	8.035	-469.2	2.818	-463.983
IO-360-A1B6	6.946	-487.6	2.436	-483.09
O-320-E2A	8.150	-368	2.858	-362.708

Motor

Tablo 9. Tırmanmada motorların ekserji değerleri.

Motor	$\dot{E}^{LI}(\text{kW})$	$\dot{W}(\text{kW})$	$\dot{E}^{CH}(\text{kW})$	$\dot{E}_\delta(\text{kW})$	$dE/dt(\text{kW})$
IO-320-DIAD	6.846	-119	354.2	237.608	4.445
O-540-J3C5D	9.732	-175.24	644	472.173	6.319
O-360-A3A	7.274	-134	469.2	337.7508	4.723
IO-360-A1B6	8.352	-149	487.6	341.529	5.423
O-320-E2A	7.148	-112	368	258.5068	4.641

Tablo 9'dan anlaşılacağı gibi tırmanma aşamasında en fazla ekserji yıkımı O-540-J3C5D motorunda 472.173 kW olarak meydana gelmiştir. Düz uçuş safhasından farklı olarak O-540-J3C5D motoru %100 motor performansında çalışarak 175.24 kW ile pervaneye iletilen en büyük gücü sağlamasına rağmen kimyasal ekserjisinin çok büyük olmasından dolayı en büyük ekserji yıkımının meydana geldiği motordur.

Kanat

Tırmanma aşamasında tüm motorlarda kanatların ürettikleri taşıma ekserjileri Tablo 10'da görüldüğü gibi hava aracının özellikleri değişmemesi sebebiyle aynıdır. Ancak O-540-J3C5D motoru 117.512 kW ile en fazla itki ekserjisini kanatlara ilettiğinden, kanatlardan meydana gelen ekserji yıkımı bu motorda 70.357 kW ile en fazla olmuştur. Dikkat edilirse itki ekserjisi ve ekserji yıkımı arasında tüm motorlarda yaklaşık 47 kW lık bir fark söz konusudur.

Tablo 10. Tırmanmada kanatın ekserji değerleri

Motor	$\dot{E}^{LI}(\text{kW})$	$\dot{E}^{TH}(\text{kW})$	$\dot{E}_\delta(\text{kW})$	$dE/dt(\text{kW})$
IO-320-DIAD	-48.9926	79.269	32.120	8.0785
O-540-J3C5D	-49.0007	117.512	70.357	8.0785
O-360-A3A	-49.004	89.469	42.311	8.0785
IO-360-A1B6	-48.9926	99.669	52.520	8.0785
O-320-E2A	-48.9926	74.509	27.360	8.0785

Pervane

Tablo 11’de görüldüğü gibi O-540-J3C5D motoru 175.24 kW değerinde diğer motorlardan daha fazla olan gücü pervaneye aktarmaktadır. Bu motorun

pervanesinde meydana gelen ekserji yıkımı, itki ekserjisi ve pervane gücü arasındaki fark sebebiyle (175.24 kW – 119.163 kW) diğer motorlardan daha yüksektir(56.429kW).

Tablo 11. Tırmanmada pervanenin ekserji değerleri.

Motor	$\dot{E}^{LI}(\text{kW})$	$\dot{E}^{TH}(\text{kW})$	$\dot{W}(\text{kW})$	$\dot{E}_\delta(\text{kW})$	$dE/dt(\text{kW})$
IO-320-DIAD	1.003	-80.92	119	38.432	0.6513
O-540-J3C5D	1.003	-119.163	175.24	56.429	0.6513
O-360-A3A	1.003	-91.12	134	43.232	0.6513
IO-360-A1B6	1.003	-101.32	149	48.032	0.6513
O-320-E2A	1.003	-76.16	112	36.192	0.6513

Gövde ve Kuyruk Takımı

Tırmanma safhasında gövde ve kuyruk takımı için tüm motorların ekserji değerleri $\dot{E}^{TH} = 1.651 \text{ kW}$, $\dot{E}^{LI} = 22.122 \text{ kW}$, $\dot{E}_\delta = 9.408 \text{ kW}$ ve $dE/dt = 14.364 \text{ kW}$ ’tır.

gerekecek, hava aracı için işletme maliyeti azaltılmış olacaktır.

Kargo

Tırmanma safhasında gövde ve kuyruk takımı için tüm motorların ekserji değerleri $\dot{E}^{LI} = 10.57 \text{ kW}$, $\dot{E}_\delta = 3.706 \text{ kW}$ ve $dE/dt = 6.863 \text{ kW}$ ’tır.

5. KAYNAKLAR

4. SONUÇLAR

- Ekserji akış diyagramlarının incelenmesi sonucu, üretilen taşıma ekserjisinin, sistemi çevreyle denge hali dışında tutmak için harcadığı açıktır.
- Ekserji yıkımı bileşenler arasında en fazla motorda meydana gelmiştir. Tersinmezliklerin en fazla motorda olduğu açıktır. Ayrıca bu tablolar yakıttan bileşenlere aktarılan ekserji miktarını ve verimsizlikleri belirlemede önemli role sahiptir.
- Taşıma ekserjisi tanımı itibarıyla, aspect ratio’nun artması, bir hava aracı için taşıma ekserjisini azaltacaktır. Bu durumda tüm bileşenler için daha az taşıma ekserjisi

- [1] Karakoc, H., Turgut, E., Hepbasli, A.(2006), "Exergetic analysis of an aircraft turbofan engine" Proceedings, Summer Course on Exergy and its Applications, Anadolu University, Eskisehir, Turkey, 14-16.
- [2] Paulus, D.M. Jr., Gaggioli, R. A., (2003) " The Exergy of Lift and Aircraft Exergy Flow Diagrams" International Journal of Thermodynamics, 6, 149-156.
- [3] Bejan, A., (2002), "Fundamentals of Exergy Analysis, Entropy Generation Minimization, and the Generation of Flow Architecture" International Journal of Energy Research, 26, 545-565.
- [4] Roth, B., (2001), "Aerodynamic Drag Loss Chargeability and its Implications in the Vehicle Design Process" 1st AIAA Aircraft, Technology Integration and Operations Forum, 5236.
- [5] Bejan, A., Siems, D.L., (2001), "The Need for Exergy Analysis and Thermodynamic Optimization in Aircraft Development" Exergy, an International Journal, 1, 14-24.
- [6] Bejan, A., (1996) "" Entropy Generation and Exergy Destruction" Entropy Generation

Minimization: The Method of Thermodynamic Optimization of Finite-Size Systems and Finite Time Processes", CRCPress, 21-42.

[7] Moorhouse, D., (2003) "Introduction: Exergy, " Journal of Aircraft, Vol. 40, No. 1, 10.

[8] Roth, B., (2003) "The Role of Thermodynamic Work Potential in Aerospace Vehicles" In:Proceedings of the 16th International Symposium on Air Breathing Engines (ISABE), Cleveland.

[9] De Oliveira, S., Jr.,(2013) "Exergy: Production, Cost and Renewability, 1st ed. ", Springer-Verlag, 249.

[10] Markell, K.C., (2005), "Exergy Methods for the Generic Analysis and Optimization of Hypersonic Vehicle Concepts" *Master Dissertation*, Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.

[11] Riggins, D. W., Moorhouse, D. J., Camberos, J. A., (2010) " Characterization of Aerospace Vehicle Performance and Mission Analysis Using Thermodynamic Availability" *Journal of Aircraft*, 47, No. 3, 904-916.

[12] Moran, M. J., Sciubba, E., (1994), "Exergy Analysis: Principles and Practice"*Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 116, No. 2, 285-290.

[13] 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.

[14] Ordonez, J.C., Bejan, A., (2003), "Minimum Power Requirement for Environmental Control of Aircraft" *Energy*, 28, 1183-1202.

[15] Dunbar, W.R., Lior N., (1991),"Understanding Combustion Irreversibility "*ASME AES*;25, 81-90.

[16] Avco Lycoming, (1973), "O-320, IO320, AIO 320 and LIO 320 Series Aircraft Engines Operator's Manual"

[17] Textron Lycoming, (2000), "O-360, HO-360,IO-360, HIO-360 & TIO-360 Series Aircraft Engines Operator's Manual"

[18] Avco Lycoming, (1982), "O-540, IO-540& HIO-540 Series Aircraft Engines Operator's Manual"

ÖZGEÇMİŞLER

Arş.Gör. Süleyman Kağan AYAZ

2011 yılında Erciyes Üniversitesi Uçak Gövde Motor Bölümü'nden mezun olduktan sonra bir süre havacılık bakım sektöründe çalıştı. 2012 yılında Çukurova Üniversitesinde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2014 yılından itibaren Anadolu Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmakta ve aynı üniversitede Uçak Gövde Motor Bakım Bölümü'nde yüksek lisans çalışmalarına devam etmektedir. 1988 yılı Ankara doğumludur.

Doç.Dr. Önder ALTUNTAŞ

2004 yılında Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Y.O. Uçak Gövde-Motor Bakım Bölümünü bitirdikten sonra Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Sivil Havacılık ABD'da 2007 yılında Yüksek Lisansını, 2011 yılında Doktorasını tamamlamıştır. Uçak motorları ve havacılık üzerine enerji, ekserji ve çevresel analizler üzerine birçok ulusal ve uluslararası bilimsel çalışması bulunmaktadır. Halen Anadolu Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesinde Doç. Dr. olarak görev yapmakta, aynı zamanda Sivil Havacılık Araştırma ve Uygulama Merkezi Müdür Yardımcılığını yürütmektedir. 1982 yılı İstanbul doğumludur. Evli ve 1 kız çocuk babasıdır.

Doç.Dr. Emin AÇIKKALP

1982 yılı Eskişehir doğumludur. 2004 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun olmuştur. Aynı Üniversiteden 2008 yılında Yüksek Lisans diplomasını, 2013 yılında da doktor unvanını almıştır. 2010-2013 Yılları arasında Bileşik Şeyh Edebalı Üniversitesi Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi, 2015 yılından itibaren aynı bölümde Doç. Dr. olarak görev yapmaktadır. Enerji analizi, ekserji analizi, eksergoe ekonomik analiz, eksergo çevresel analiz, ileri ekserji temelli analizler, sonlu zaman termodinamiği, yenilenebilir enerji, istatistiksel termodinamik, kuantum termodinamiği ve entransi analizi konularında araştırmalar yapmaktadır.