

**PİSTON-PROP UÇAK MOTORLARINDA
EKSERJÖEKONOMİK ÇEVRESEL
OPTİMİZASYON**


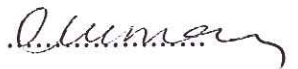
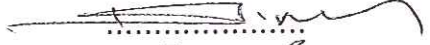
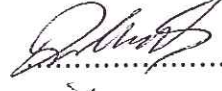
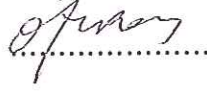
Önder ALTUNTAŞ
Doktora tezi

Sivil Havacılık Anabilim Dalı
Haziran-2011

Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Komisyonu Başkanlığı Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje No: 1001F01

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Önder ALTUNTAŞ'ın "Piston-prop Uçak Motorlarında Ekserjoekonomik Çevresel Optimizasyon" başlıklı Sivil Havacılık Anabilim Dalındaki, Doktora tezi ^{12.05.2011} tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ	
Üye	: Prof. Dr. Olcay KINCAI	
Üye	: Prof. Dr. Adnan MİDİLLİ	
Üye	: Doç. Dr. Zuhale OKTAY	
Üye	: Yard. Doç. Dr. Önder TURAN	

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

Enstitü Müdürü

ÖZET
Doktora Tezi

**PİSTON-PROP UÇAK MOTORLARINDA EKSERJOEKONOMİK ÇEVRESEL
OPTİMİZASYON**

Önder ALTUNTAŞ

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Sivil Havacılık Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ
İkinci Danışman: Prof. Dr. Arif HEPBAŞLI
2011, 99 sayfa

Isıl sistemlerin optimum çalışma koşullarının belirlenmesi, enerjinin verimli kullanılması açısından büyük bir önem taşımaktadır. Bunun yanı sıra, ekonomik ve çevresel etkilerinin değerlendirilmesi de önemli bir rol oynamaktadır. Bu tezde, 4-zamanlı, hava soğutmalı, 4-silindirli ve doğal emişli bir piston-prop uçak motoruna, iniş kalkış fazı (LTO) ve 1 saatlik düz uçuş için ekserjoekonomik ve ekserjoçevresel analiz yöntemleri uygulanmıştır. Ayrıca belirlenen kriterdeki optimum düz uçuş şartları için ekserjoekonomik çevresel optimizasyon gerçekleştirilmiştir. LTO safhasının kalkış fazında; en yüksek efektif güç ekserji akımı, giren ekserji akımı, izafi maliyet farkı ve ekserjoekonomik faktör, sırasıyla, 111.90 kW, 476.51 kW, % 116.06 ve % 98.81 olarak hesaplanmıştır. Buna karşın aynı fazda en düşük ekserjoçevresel faktör değeri % 16.06 olarak bulunmuştur. 1 saatlik düz uçuşta en yüksek giren ekserji akımının (410.60 kW) elde edildiği 1000 m irtifa, % 75 güç ayarı ve 18 hava-yakıt oranında (HY) ise en yüksek ekserji yıkımı (167.10 kW) ve yakıtın en düşük birim ekserji maliyeti (116.80 \$/GJ) elde edilmiştir. 1000 m irtifa, % 75 güç ayarı ve 13 HY oranında en yüksek ekserji verimi (% 19.98) ve çıkan ekserji akımı (170.05 kW) ve en düşük izafi maliyet farkı (% 62.29), ürünün özgül çevresel etkisi (8.26 mPts/MJ) ve izafi çevresel fark (% 61.54) elde edilmiştir. Yapılan ekserjoekonomik çevresel optimizasyon sonucunda ise yakıtın en yüksek ekserji verimi % 15.17 ile % 19.80, en düşük birim ekserji maliyeti 117.53 \$/GJ ile 130.05 \$/GJ arasında ve ürünün en düşük özgül çevresel etkisi 8.66 mPts/MJ ile 11.86 mPts/MJ arasında değiştiği görülmüştür. Tüm bu hesaplamalar ışığında, LTO safhasında yaklaşma ve taksi fazlarında bir iyileştirme yapılması gerektiği ve optimum düz uçuşun düşük irtifa, yüksek güç ayarı ve düşük HY oranında gerçekleştiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Piston-prop uçak motoru, Ekserjoekonomik analiz, Ekserjoçevresel analiz, Optimizasyon

ABSTRACT
Ph.D Dissertation

EXERGOECONOMIC ENVIRONMENTAL OPTIMIZATION OF PISTON-PROP
AIRCRAFT ENGINES

Önder ALTUNTAŞ

Anadolu University
Graduate School of Sciences
Civil Aviation Program

Supervisor: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ
Co-Supervisor: Prof. Dr. Arif HEPBAŞLI
2011, 99 pages

It is a great importance to determine the optimum working conditions of thermal systems in terms of efficient energy utilization. Beside this, economic and environmental assessments also play an important role. In this thesis, exergoeconomic and exergoenvironmental analysis methods are applied to a four-cylinder, spark ignition, naturally aspirated and air-cooled piston-prop aircraft engine for both flight operations, landing takeoff (LTO) and an hour cruise. Further, an exergoeconomic environmental optimization is undertaken to determine the optimum cruise conditions. In takeoff phase, the maximum exergy work rate, exergy input rate, relative cost difference and exergoeconomic factor are found to be 111.90 kW, 476.51 kW, 116.06%, and 98.81%, respectively while the minimum exergoenvironmental factor is calculated to be 16.06% in the same phase. The results of an hour cruise, the maximum exergy input rates (410.60 kW), the maximum exergy destruction rate (167.10 kW) and the minimum unit cost of the fuel (116.80 \$/GJ) are obtained in 1000 m altitude, 75% rated power setting and 18 air-to-fuel ratio (AF). The maximum exergy efficiency (19.98%) and exhaust exergy rate (170.05 kW) and the minimum relative cost difference (62.29%), specific environmental impacts of products (8.26 mPts/MJ) and relative environmental difference (61.54) are found in 1000 m altitude, 75% rated power setting and 13 AF ratios. As a result of the optimization, while the maximum exergy efficiency varies from 15.17% to 19.80%, the minimum unit cost of the fuel ranges from 117.53 \$/GJ to 130.05 \$/GJ, and specific environmental impacts of the product is in the range of 8.66 mPts/MJ to 11.86 mPts/MJ. In the light of the results, an improvements needs to be done in approach and taxi phases, and optimum cruise was realized at low altitude, high-power setting, and low AF ratios.

Keywords: Piston-prop aircraft engine, Exergoeconomic analysis, Exergoenvironmental analysis, Optimization

TEŞEKKÜR

*Yaklaşık 4 yıl önce Anadolu Üniversitesi Odunpazarı konuk evinde bana Doktora konusunu söylediklerinde sadece bir zarfın üzerine kısa bir not olarak yazmıştım.
O not içeriklendi, gelişti ve şimdi tez oldu.*

Öncelikli olarak o günden bu yana hep yanımda olan, beni her konuda en iyiye ve doğruya yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ'a,

Farklı bir vizyon ve bakış açısıyla benim önümü açan ve bana yön veren ikinci danışmanım, değerli hocam Prof. Dr. Arif HEPBAŞLI'ya

Tezin ve özellikle benim gelişmem için katkılarını eksik etmeyen değerli hocalarım Prof. Dr. Olcay KINCAI, Prof. Dr. Adnan MİDİLLİ, Doç. Dr. Zuhul OKTAY, Yard. Doç. Dr. Önder TURAN ve Dr. Ziya SÖĞÜT'e,

Bana akademisyenlikleri ile örnek olan Anadolu Üniversitesi öğretim üyeleri Yard. Doç. Dr. İlkay ORHAN ve Yard. Doç. Dr. Enis Turhan TURGUT'a,

Değerli çalışma arkadaşlarım Dr. Yılmaz YÖRÜ, Öğr. Gör. Nevzet KAYA ve Elif YILDIRIM'a,

Doktora süresince dersini aldığım ve dışarıdan derslerini takip edebildiğim, isimlerinin buraya sığdıramayacağım tüm hocalarıma,

Doğduğumdan bu yana yanımda olan annem, babam ve ablama,

Ve en son olarak hızla akan bu hayat akarında, elimi hiçbir zaman bırakmayan ve 5 yıldır hastalıkta ve sağlıkta yanımda olan sevgili eşim Dr. Hülya ALTUNTAŞ'a,

teşekkürü bir borç bilirim.

Onların destekleri ile hayatımın geri kalanında iyi bir öğrenci, iyi bir akademisyen, iyi bir arkadaş, iyi bir evlat, iyi bir eş ve özellikle iyi bir insan olmaya devam edeceğim.

Eskişehir, Haziran 2011

Önder ALTUNTAŞ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR	x
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Piston-Prop Uçaklar Hakkında Genel Bilgi.....	4
1.3. Piston-Prop Motorlarının Tarihsel Gelişimi	6
1.4. Literatür Taraması.....	9
1.4.1. Ekserjinin hava aracı uygulamaları	9
1.4.2. Ekserjinin buji ateşlemeli motor uygulamaları.....	11
1.5. Tezin Amacı ve Önemi	13
2. TERMODİNAMİK ANALİZ	15
2.1. Enerji Analizi	17
2.2. Ekserji Analizi	19
2.3. Ekserjoekonomik Analiz.....	22
2.4. Ekserjoçevresel Analiz.....	25
2.5. Ekserjoekonomik Çevresel Optimizasyon.....	26
2.5.1. Genetik algoritma	27

2.5.2. Genetik algoritmalarda parametre seçimi.....	29
3. BULGULAR ve TARTIŞMA	38
3.1. LTO Safhası Bulguları.....	38
3.1.1. Enerji analizi bulguları	38
3.1.2. Ekserji analizi bulguları.....	38
3.1.3. Ekserjoekonomik analiz bulguları	39
3.1.4. Ekserjoçevresel analiz bulguları	42
3.2. Düz Uçuş Safhası Bulguları.....	43
3.2.1. Düz uçuş safhası enerji analizi bulguları.....	44
3.2.2. Düz uçuş safhası ekserji analizi bulguları.....	46
3.2.3. Düz uçuş safhası ekserjoekonomik analiz bulguları.....	54
3.2.4. Düz uçuş safhası ekserjoçevresel analiz bulguları.....	59
3.3. Ekserjoekonomik Çevresel Optimizasyon.....	63
4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	74
Ek-1	78
Ek-2	81
Ek-3	85
KAYNAKLAR	90
TEZDEN ÇIKAN YAYINLAR	98

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
1.1. 1990–2008 yılları arasında hava aracı kaynaklı kişi başı CO ₂ eşdeğeri üretim miktarı	2
1.2. Doğrudan pervaneye bağlantılı bir motor-pervane yapısı.....	4
1.3. Yanma sonucu oluşan enerjinin motor içindeki dağılımı.....	6
2.1. Uçakların uçuş operasyon safhaları.....	15
2.2. Piston-prop uçak motorunun kontrol hacmi (KH)	17
2.3. Genetik algoritmanın akış şeması	27
2.4. Optimizasyon akış şeması	30
2.5. Oluşturulan genetik optimizasyon modeli.....	31
2.6. Başlangıç popülasyonu.....	33
2.7. Uygulanabilir dizayn aralığı.....	34
2.8. ARMOGA akış şeması.....	35
2.9. Optimizasyon yönetimi ve parametreleri	36
3.1. Ekserji yıkımı maliyet akımı (c_F ve c_P hesaplamaları ile).....	40
3.2. LTO safhası izafi maliyet farkları	41
3.3. LTO safhası ekserjoekonomik faktör değerleri.....	41
3.4. LTO safhasında ekserji yıkımı nedeniyle oluşan çevresel etki değerleri.....	42
3.5. LTO safhasında izafi çevresel fark.....	43
3.6. LTO safhasında ekserjoçevresel faktör	43
3.7. Yakıt tüketiminin güç ayarı ve irtifa ile değişimi	45
3.8. Enerji veriminin güç ayarı ve irtifa ile değişimi.....	45
3.9. % 65 ve % 75 güç ayarları için efektif güç ekserji akımının irtifa ile değişimi	47
3.10. % 65 güç ayarında giren ekserji akımının HY oranı ve irtifa ile değişimi.....	47
3.11. % 75 güç ayarında giren ekserji akımının HY oranı ve irtifa ile değişimi.....	48

3.12.	% 65 güç ayarında egzoz ekserji akımının HY oranı ve irtifa ile değişimi.....	49
3.13.	% 75 güç ayarında egzoz ekserji akımının HY oranı ve irtifa ile değişimi.....	49
3.14.	% 65 güç ayarında ekserji kaybı akımının HY oranı ve irtifa ile değişimi.....	50
3.15.	% 75 güç ayarında ekserji kaybı akımının HY oranı ve irtifa ile değişimi.....	50
3.16.	% 65 güç ayarında ekserji yıkımı akımının HY oranı ve irtifa ile değişimi.....	51
3.17.	% 75 güç ayarında ekserji yıkımı akımının HY oranı ve irtifa ile değişimi.....	51
3.18.	% 65 güç ayarında ekserji veriminin HY oranı ve irtifa ile değişimi.....	52
3.19.	% 75 güç ayarında ekserji veriminin HY oranı ve irtifa ile değişimi.....	52
3.20.	Ekserji akışının Grassmann diyagramı.....	54
3.21.	% 65 ve % 75 güç ayarlarında yakıtın ortalama birim ekserji maliyetinin HY oranı ve irtifa ile değişimi.....	55
3.22.	% 65 güç ayarında ekserji yıkımı maliyet akımının HY oranı ve irtifa ile değişimi.....	56
3.23.	% 75 güç ayarında ekserji yıkımı maliyet akımının HY oranı ve irtifa ile değişimi.....	56
3.24.	% 65 güç ayarında izafi maliyet farkının HY oranı ve irtifa ile değişimi.....	57
3.25.	% 75 güç ayarında izafi maliyet farkının HY oranı ve irtifa ile değişimi.....	57
3.26.	% 65 güç ayarında ekserjoekonomik faktörün HY oranı ve irtifa ile değişimi.....	58
3.27.	% 75 güç ayarında ekserjoekonomik faktörün HY oranı ve irtifa ile değişimi.....	58

3.28.	% 65 güç ayarında özgül çevresel etkinin HY oranı ve irtifa ile değişimi.....	60
3.29.	% 75 güç ayarında özgül çevresel etkinin HY oranı ve irtifa ile değişimi.....	60
3.30.	% 65 güç ayarında izafi çevresel farkın HY oranı ve irtifa ile değişimi.....	61
3.31.	% 75 güç ayarında izafi çevresel farkın HY oranı ve irtifa ile değişimi.....	61
3.32.	% 65 güç ayarında ekserjoçevresel faktörün HY oranı ve irtifa ile değişimi.....	62
3.33.	% 75 güç ayarında ekserjoçevresel faktörün HY oranı ve irtifa ile değişimi.....	62
3.34.	Yakıtın birim ekserji maliyeti-ekserji verimi dağılımı.....	64
3.35.	Ürünün özgül çevresel etkisi-ekserji verimi dağılımı	65
3.36.	Hedef ekserji verimi dağılımı.....	66
3.37.	Hedef yakıtın birim ekserji maliyeti dağılımı	66
3.38.	Hedef ürünün özgül çevresel etkisi dağılımı.....	67
3.39.	Girdi ve hedef parametrelerinin paralel koordinat grafiği.....	68
3.40.	En iyi nesillerin paralel koordinat grafiği	69
3.41.	1000 m – 1500 m irtifalar arası paralel koordinat grafiği	70
3.42.	1500 m – 2000 m irtifalar arası paralel koordinat grafiği	71
3.43.	2000 m – 2500 m irtifalar arası paralel koordinat grafiği	72
3.44.	2500 m – 3000 m irtifalar arası paralel koordinat grafiği	73

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
2.1. Piston-prop uçak motoru ve kullanılan yakıtın özellikleri	16
2.2. LTO safhasında emisyon değerleri.....	16
2.3. Çevrenin tanımı	21
2.4. Ekonomik analiz ile ilgili denklemler	23
2.5. Optimizasyonda girdi verilerinin sınır değerleri	36
3.1. LTO safhası enerji analizi bulguları.....	38
3.2. LTO safhası ekserji analizi bulguları	39
3.3. Düz uçuş safhası enerji analizi bulguları.....	46
3.4. Düz uçuş safhası ekserji analizi bulguları	53
3.5. Düz uçuş safhası ekserjoekonomik analiz bulguları	59
3.6. Düz uçuş safhası ekserjoçevresel analiz bulguları	63
3.7. En iyi jenerasyonların hedef sonuç değerleri	69

SİMGELER ve KISALTMALAR

Kısaltmalar

ARMOGA	: Uyarlanabilir aralıklı çok amaçlı genetik algoritma (Adaptive range multi-objective algorithm)
ÇAGA	: Çok amaçlı genetik algoritma
DOE	: Deney tasarımı (Design of experiments)
GA	: Genetik algoritma
HP	: Motor beygir gücü (Horse power)
HY	: Hava yakıt oranı
LTO	: İniş kalkış (Landing and takeoff)
RPM	: Dakikadaki devir sayısı (Revolutions Per Munite)
SPECO	: Özgül ekserji maliyeti metodu (Specific-cost exergy costing)
YDD	: Yaşam döngüsü değerlendirmesi (Life cycle assessment)

Simgeler

α	: Yakıttaki sülfür sabiti
A	: Ortalama
b	: Ortalama özgül çevresel etki (mPts/MJ)
\dot{B}	: Çevresel etki akımı (mPts/s)
c	: Birim ekserji maliyeti (\$/GJ), yakıttaki karbon sabiti
\dot{C}	: Maliyet akımı (\$/s)
ε	: Özgül ekserji (kJ/kg)
\dot{E}	: Enerji akımı veya birim zamandaki enerjki miktarı (kW)

\dot{E}_x	: Ekserji akımı veya birim zamandaki ekserji miktarı (kW)
f	: Ekserjoekonomik faktör (%)
f_b	: Ekserjoçevresel faktör (%)
F	: Gelecek
g	: Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
\bar{g}	: Gibbs değeri (kJ/kmol)
h	: İrtifa (m), entalpi (kJ/kg); Yakıttaki hidrojen sabiti
\bar{h}	: Molar entalpi (kJ/kmol)
H	: Toplam entalpi (kJ)
i	: Bileşik faiz
m	: Kütle (kg); Yıl içindeki sayısı
\dot{m}	: Kütlesel debi (kg/s)
n	: Periyot
o	: Yakıttaki oksijen sabiti
P	: Basınç (kPa); Günümüz
\dot{Q}	: Isı akımı veya birim zamandaki ısı miktarı (kW)
ρ	: Yoğunluk (kg/m^3)
r	: İzafi maliyet fark (%)
r_b	: İzafi çevresel fark (%)
\bar{R}	: İdeal gaz sabiti (kJ/kmol.K)
S	: Entropi (kJ/K)
T	: Sıcaklık (K or °C)
V	: Hız (m/s)
\dot{W}	: Güç (kW)
\bar{x}	: Mol katsayısı

\dot{Y}	: Çevresel etki (mPts/s)
z	: Yerçekim merkezine olan yükseklik (m)
\dot{Z}	: Seviyelendirilmiş toplam anapara ve OM maliyet akımı (\$/s)
η	: Enerji verimi (%)
ϕ	: Kimyasal ekserji faktörü
ψ	: Ekserji verimi (%)

Alt indisler

0	: Referans ya da ölü hal
KH	: Kontrol hacim
ζ	: Çıkış
DS	: Deniz seviyesi
ef	: Etkin
egz	: Egzoz
g	: Giriş
kay	: Kayıp
kim	: Kimyasal
sh	: Soğutma havası sıcaklığı (K)
tm	: Termomekanik
TOT	: Toplam
u	: Alt
y	: Yakıt
$yık$: Yıkım
P	: Ürün

Üst indisler

<i>CI</i>	: İlk yatırım
<i>CO</i>	: İmalat
<i>DI</i>	: Atık
<i>OM</i>	: Bakım – işletme

1. GENEL BİLGİLER

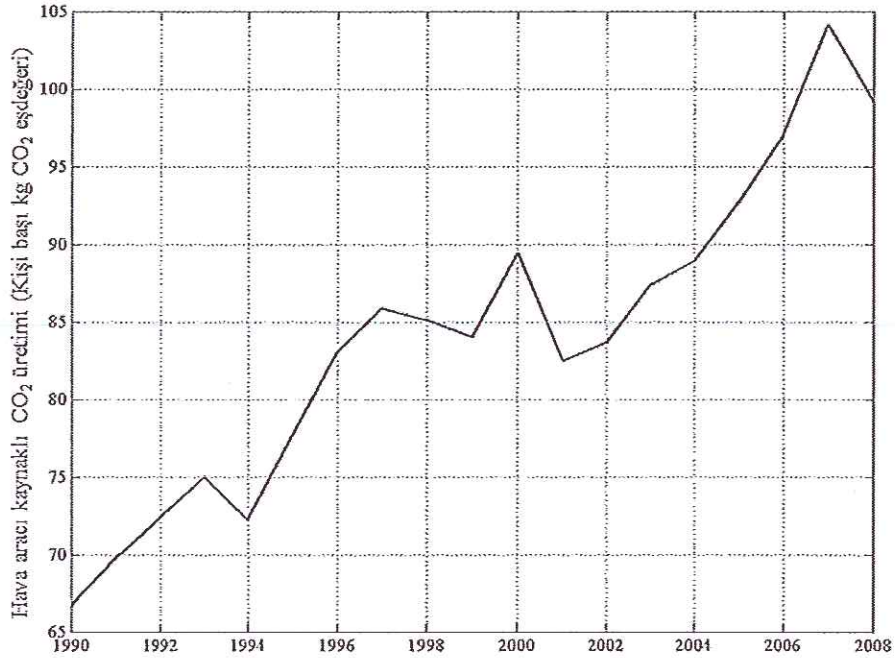
1.1. Giriş

Son yıllarda enerji kaynaklarının tükenme noktasına gelmesi, enerji yönetimi anlayışını hayatımıza sokmuştur. Enerji yönetimi, ya mevcut sistemlerin iyileştirilmesi ya da alternatif enerji kaynaklarının etkin bir şekilde kullanılmasıyla gerçekleştirilebilir. Fosil yakıt kaynaklı çevre ve insan sağlığı etkilerinin azaltılması nedeniyle alternatif enerji kaynaklarının değerlendirilmesi şüphesiz önemli olmasına rağmen, öncelikli olarak mevcut sistemlerin verimli çalıştırılmasını sağlamak için gerekli çalışmaların yapılması gerekmektedir. Bu noktada, termodinamik analizler (enerji, ekserji, ekserjoekonomik ve ekserjoçevresel) önemli bir araçtır. İyileştirmeler enerji, ekonomi ve çevre açısından değerlendirilerek sistemlerin verimi artırılabilir.

Çevresel etki incelemesinde, nitrojen oksitler (NO_x), yanmamış hidrokarbonlar (HC)'lar ve diğer kirleticilerin yanında karbondioksit (CO_2) önemli bir ölçüt olarak karşımıza çıkmaktadır. CO_2 , atmosferimizde bulunan, küresel ısınma ve iklim değişikliğine neden olan önemli bir kirleticidir. Atmosferde bulunan CO_2 miktarındaki değişim ile sıcaklık değişiminin paralellik sergilediği görülmüştür. Bu nedenle, küresel ısınmanın azaltılması isteniyor ise, atmosferdeki CO_2 gazının azaltılması için çalışmaların yapılması gerekmektedir. CO_2 'e ek olarak, küresel ısınma üzerinde doğrudan etkisi olan tüm sera gazı emisyonlarının toplamına bakılması, çevresel etkinin değerlendirilmesi açısından daha da etkin olacaktır. Örneğin, Türk İstatistik Kurumu'nun "Devletler Arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change)" metodolojisi kullanılarak hazırladığı emisyon hesaplamaları incelendiğinde, 2008 yılı verilerinde ülkemizde enerji, endüstriyel prosesler, tarım ve atıklar nedeniyle üretilen CO_2 miktarı yaklaşık olarak kişi başına 4 ton, tüm emisyonları içerdiği CO_2 eşdeğeri ise 4.97 ton olduğu görülmektedir [1-5].

Hava araçlarının insan kaynaklı CO_2 üretimindeki payının % 2 olduğu düşünülürse 1990-2008 yılları arasında hava aracı kaynaklı kişi başı CO_2 eşdeğeri üretiminin değişimi Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Hava aracı kaynaklı kişi başı CO_2

eşdeğer üretiminin günümüzde 100 kg mertebelerinde olması ve havacılık alanında yapılacak faaliyetlerin artış göstermesi, alınması gereken önlemlerin denli önemli olduğunun bir göstergesidir [6, 7].



Şekil 1.1. 1990–2008 yılları arasında hava aracı kaynaklı kişi başına CO₂ eşdeğeri üretim miktarı (Ref.[7]'den derlendi)

Hava araçları uçuşlarını genellikle troposfer ve stratosfer arasında gerçekleştirir. Yeryüzünde oluşan çeşitli sera gazları atmosferin bu katmanlarında toplanır ve küresel ısınmaya neden olur. Hava aracı motorlarının egzoz emisyonlarının doğrudan bu bölge üzerinde gerçekleşmesi nedeniyle küresel ısınma ve çevresel kirliliğe istenilmeyen bir katkı vermektedir [8]. Bu nedenle, havacılık alanında enerjinin etkin kullanımı ile ilgili yapılacak çalışmalar çevresel etki ve ekonomi açısından da önemli olacaktır.

Havacılıkla ilgili araştırmalar, hava araçlarından–havaalanına kadar tüm alanlarda yapılabilir. Bu tezde yalnızca, piston-prop uçakların ekserjoekonomik çevresel etkileri incelenmiştir. Piston-prop, hava aracı güç sistemlerinden biridir. Güç sistemleri uçuş şartları, gövde yapısı ve istenilen performanslara göre tercih edilmelidir. Hava aracı güç sistemleri genellikle tasarım gerekliliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmada önemli bir parametre, uçuş hızı

rejimleridir. Bu rejimler, subsonik (0.75 Mach¹ altı), transonik (Mach sayısı 0.75 ile 1.20 arası), süpersonik (Mach sayısı 1.20 ile 5.00 arası) ve hipersonik (5.00 Mach ve üzeri) şeklinde sıralanabilir [9]. Piston-prop güç sistemi yalnız subsonik uçuş hızları için uygundur ve bu hızlarda genellikle piston-prop güç sistemleri tercih edilir. Bu çalışmada piston-prop uçakların tercih edilmesinin nedeni ise bu uçakların havacılıkta hem araştırma hem de eğitim amaçlı kullanımının yaygın olmasıdır.

Uçuş faaliyetlerinin bir bölümü olan uçuş operasyonları, iniş-kalkış (LTO – Landing and Take off) ve düz uçuş olmak üzere iki temel safhadan oluşur. LTO safhası, kalkış, tırmanma, yaklaşma ve taksi olmak üzere dört fazda incelenirken, düz uçuş ise farklı irtifalarda değerlendirilebilir [10]. Çevre şartları, LTO safhasında standart atmosfer şartlarına denk olarak kabul edilebilirken, düz uçuş şartları, uçuşun gerçekleştiği irtifaya göre değişim gösterir. Dolayısıyla, düz uçuşun gerçekleşeceği irtifada çevre şartlarının bilinmesi, yapılacak olan incelemeler için önemli olacaktır.

Piston-prop güç sistemi, termodinamik bakımdan sürekli akışlı olarak kabul edilerek basit enerji dengesi oluşturulabilir. Fakat enerji analizi, sistemin sadece enerji açısından sınırlarını göstermediği için tek başına doğru bir karar verme mekanizması değildir. Bir sistemin verim veya performanslarından tespit edilen eksiklerin ne kadarının iyileştirilebileceğini görebilmek için ekserji analizinin yapılması gerekmektedir.

Karar mekanizmaların isabetli olabilmesi için enerji ve ekserji analizlerinin yanında ekonomik değerlendirmelerin de yapılması gerekmektedir. Ekserjoekonomik analiz yapılmadan önce, bakım ve ilk yatırım maliyeti gibi ekonomik analiz açısından önemli parametrelerin bilinmesi ve irdelenmesi önemlidir.

Ekserjoekonomik analize ek olarak çevresel etkilerin oluşturduğu incelemelerin de bir sonraki adımda gerçekleştirilmesinin günümüz çevre hassasiyetine önemli katkısı olacaktır. Isıl sistemlerin çevresel performanslarının incelenerek etkilerinin en aza indirilmesi, önemli bir çalışma konusudur [11].

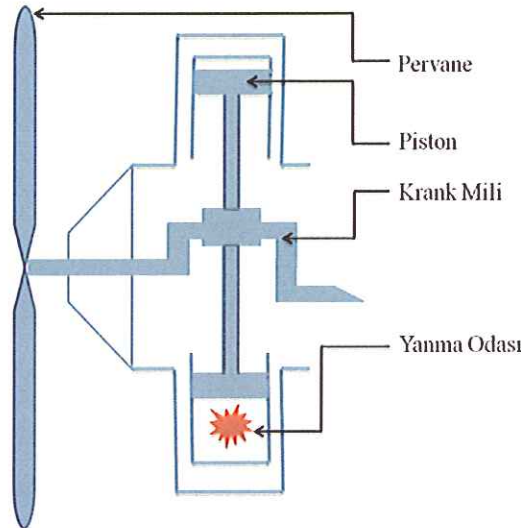
¹ Mach sayısı, uçağın bulunduğu irtifadaki ses hızının uçuş hızına oranıdır.

Özetle, bir ısıl sistem olan piston-prop uçak motorlarında ekserjoekonomik ve ekserjoçevresel analizlerin yapılması, hem ekonomik ve çevresel etkilerinin de içinde bulunduğu güç sistemi sınırlarının belirlenmesi hem de yapılacak iyileştirmelerin boyutları hakkında bilgi vermesi bakımından önemli olacaktır. En çok kullanılan piston-prop motor tipi buji ateşlemeli olduğu için, bu tezde sadece bu tip motorlar incelenmiştir.

1.2. Piston-Prop Uçaklar Hakkında Genel Bilgi

Dünya üzerinde bulunan toplam uçak sayısının dörtte üçünü piston-prop uçaklar oluşturmaktadır. Bunun öncelikli sebebi, özel pilot lisansının kullanabileceği tek uçak tipi olmasıdır. Bu uçakların kullanım alanlarına bakıldığında, özel, eğitim, ambulans, ilaçlama vb. tipleri görülmektedir. Ülkemizde, hava taksi amaçlı 103, genel havacılık amaçlı kullanılan 182 olmak üzere toplam 285 piston-prop uçak bulunmaktadır [12].

Piston-prop, içten yanmalı bir motor ile pervanenin birleşik olduğu anlamına gelmektedir. Motor mili, ya bir dişli yardımıyla ya da doğrudan pervaneye bağlantılı olabilir. Şekil 1.2’de doğrudan pervaneye bağlantılı bir motor-pervane yapısı görülmektedir.



Şekil 1.2. Doğrudan pervaneye bağlantılı bir motor-pervane yapısı (Ref [9] dan derlendi.)

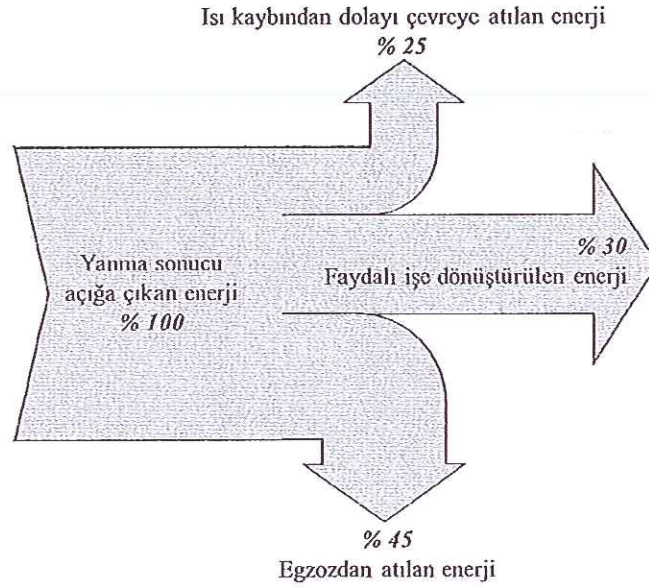
Hava aracı güç grubunun ilk ve temel yapısı, piston-propolar tarafından sağlanmıştır. İçten yanmalı motorlar, uçakların her zaman ihtiyaç duyduğu en yüksek güç oranı ve güç/ağırlık oranı ile en az hacme sahip olma özellikleriyle ilk alternatif güç kaynağı olmuştur. Günümüzde ise piston-prop motorlarının en önemli iki avantajı, ucuz olmaları ve çok düşük yakıt tüketimine sahip olmaları gösterilirken, ağır olması ve çalışması sırasında titreşim ve gürültünün oluşması dezavantajları arasında gösterilmektedir [9, 13].

En genel hali ile içten yanmalı motorlar, silindirlerin blok üzerine yerleştirmesine, silindir sayısına, ateşleme sırasına, soğutma sistemine, yağlama sistemine ve hava sistemine göre sınıflandırılırlar [14, 15]. Piston-prop motorlarda yaygın olarak kullanılan tipleri ise, karşı sıralı, buji ateşlemeli ve hava soğutmalı olanlardır. Diğer tipteki motorların kullanımı fazla yaygın değildir.

Motora alınan hava atmosfer basıncında alındığı zaman, doğal emişli olarak adlandırılır. Doğal emiş sistemi kullanıldığında, hava yoğunluğu ve emme zamanında sisteme alınan havanın basıncındaki düşme nedeni ile irtifa sınırlaması ortaya çıkmaktadır. Bu noktada irtifaya göre oluşan giriş havası özelliklerinin değişmesi, enerji analizinde önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır [16]. Değişik irtifalarda ve uzun menzillerde daha verimli bir uçuş sağlanabilmesi için uçak motorunda karbüratör sistem tasarımı, çevre şartlarının değişimine elverişli olmalıdır. Çevre şartlarındaki bir değişim, silindir içine giren basıncın değişmesine, dolayısıyla hava yakıt oranının (HY, yakıt ile havanın yanma odası içindeki oranı) değişimine neden olur. Birçok turbo şarj sistemi, bu durumu minimize edebilir [17]. Bu sorunun ortadan kaldırılması için geliştirilen ve ilk olarak piston-prop uçaklarda kullanılan turbo şarjlı sistemler, esas olarak yüksek irtifa performanslarının iyileştirilmesi için kullanılmıştır [13].

Silindir içerisinde oluşan yanma ile bir ısı açığa çıkar. Gerçekleştirilen yanma sonucunda oluşan enerjinin motor içindeki dağılımı Şekil 1.3'te gösterilmektedir. Pistonlu motorların verimlerinin yüksek olmadığı bilinmektedir. Pistonlu motorlar yakıtın yanma enerjisinin sadece % 30'a yakın bir bölümünü yararlı işe dönüştürebilirler. Yanma ısısının kullanılmayan % 70'lik bölümü incelenerek, iyileştirmelerin yapılması mümkündür. Şekil 1.3'te, enerjinin yaklaşık olarak % 25'inin ısı kaybından (motor cidarları ve yağlama yağı gibi)

dolayı çevreye atıldığı görülmektedir. Bu tip motorlarda silindir dış yüzeyleri, kanatlı olarak dökümlü yapısındadır. Motor cidarlarında kanatların olması, soğutma havasının daha fazla yüzeyi süpürmesine, dolayısıyla daha fazla ısı emmesine neden olur. Genelde irtifa değişimleri ve pervanenin sağlayacağı yüksek miktardaki hava akışı nedeniyle, hava ile soğutma tercih edilmektedir. Pervanenin de etkisini arttırdığı hava akışı, motor bloğu çevresinden ve silindirlerin dış yüzeyindeki kanatların üzerinden geçerek soğutma işlemini gerçekleştirir.



Şekil 1.3. Yanma sonucu oluşan enerjinin motor içindeki dağılımı [14, 18]

1.3. Piston-Prop Motorlarının Tarihsel Gelişimi

İçten yanmalı motorların tarihsel gelişimi kronolojik olarak aşağıda listelenmiştir [17, 19, 20];

- 1673-1680 -- *Huygens ve Papin*

Barut ile çalışan bir motor yapmışlardır. Düşey konumlu ve ağır dökümlü bir piston kullanılarak yapılan bu motorun verimi oldukça düşüktür.

- 1769 -- *James Watt*

Buhar makinasını icat etmiştir.

- *1824 – Sadi Carnot*

Motor performanslarının artırılmasıyla ilgili çeşitli fikirler geliştirmiştir. Bunlar:

- ✓ Hava hacminin 15/1 oranında sıkıştırılması,
- ✓ Yakıtın sıkıştırılmış hava içinde yakılması,
- ✓ Motorun soğutulması,
- ✓ Egzoz gazlarındaki ısı enerjisinden ısıtma işlerinde yararlanılabilmesi şeklinde sıralanabilir.

- *1860 – Jean J. Lenoir*

Lenoir petrolün bulunduğu yıl içerisinde, ilk gaz motorunun temelini atmıştır. Yaptığı çalışmalarla, yanmadan önce sıkıştırma olmayan bir sistem tasarlamıştır. Geliştirdiği motorun verimi % 5 civarında kalmıştır.

- *1867 – Nicolaus Otto ve Eugen Langen*

Atmosferik şartlarda çalışan % 11 verimli bir motor geliştirmişlerdir.

- *1876 – Nicolaus Otto*

Gelişmiş içten yanmalı motor teknolojisine ilk adım olarak 4 zamanlı buji ateşlemeli motoru geliştirmiştir. Geliştirdiği motorun ısıl verim % 14'lere kadar çıkmıştır. Otto'nun geliştirdiği yeni motor, Otto ve Langen motorunun 1/3 ağırlığında ve 1/16 deplasman boyundadır.

- *1878 – Dugald Clerk*

2 zamanlı motoru geliştirmiştir.

- *1883 – Gottlieb Daimler*

Yanma odasına yerleştirdiği bakır çubuğu, dışarıdan karpit lambası ile ısıtarak, motorun ateşlenmesini sağlamıştır.

- *1885 – Fernand Forest ve Daimler*

Hava gazı yerine benzini zerrecekler haline getirecek karbüratörün bulunmasının önünü açmışlardır. 1886 yılında ise Benz, bu sistemi motorlu bir taşıtta kullanmıştır.

- *1887 – Zühringen*

Bosch firması adına, alçak voltajlı manyetoyu icat etmiştir. 1897 yılında ise bu teknoloji ilk olarak benzinli motorlarda kullanılmaya başlanılmıştır.

- *1892 – Rudolf Diesel*
Sıkıştırma ateşlemeli motoru geliştirmiştir. Geliştirdiği motorun ısı verimi % 26'lara kadar çıkmıştır.
- *1893 – J. Frank Duryea*
Benzinle çalışan ilk motoru geliştirmiştir.
- *1957 – Felix Wankel*
Dönel pistonlu motorları geliştirmiştir. Bu motorun çalışmasıyla ilgili ilk yıllarda yaşanan problemler çözülerek, 1963 yılında NSU firması tarafından 4-zamanlı Wankel motoru üretilmiştir.

Uçaklarda pistonlu motorların kullanımının 20. yüzyılın başlarında olduğu görülmektedir. İlk uçuşun gerçekleştiği bu tarihte, içten yanmalı motorlar kullanılmaya başlayalı 50 yıl, benzinli buji ateşlemeli motor uygulamaları başlayalı 20 yıl olmuştur. 1903 yılında Wright kardeşler tarafından bir hava aracı ile ilk uçuşun temelleri atılmıştır [15, 17, 21].

Güç gruplarının yeni oluşumları içerisinde olduğu bu dönemlerde, hava araçlarının işin içine girmesi, araştırma-geliştirme açısından önemli rol oynamıştır. Bu tarihlerde 1. Dünya Savaşı'nın da başlaması, geliştirmeler ve iyileştirmelerin hızlanmasına neden olmuştur. 1. Dünya Savaşı boyunca yeni motor tipleri geliştirilmiş ve hava araçlarında deneme uçuşları yapılmıştır. 1. Dünya Savaşı'nın ardından 2. Dünya Savaşı başlamış ve askeri amaçlı araştırma-geliştirme çalışmalarına devam edilmiştir. Savaşlardan sonra, birçok askeri hava aracı, sivil kullanıma başlanmış ve ilk yolcu uçuşları yapılmıştır [14, 15].

Savaş sonrası iyileşen yaşam şartları ve küreselleşme beraberinde, ticari havacılık faaliyetlerinin gelişmesine yardımcı olmuştur.

1980'lerde özel ve ticari uçuşların artmaya başlamasıyla, bu amaç için içten yanmalı motorların kullanıldığı uçaklar imal edilmiş ve yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamıştır. 1990'ların ortalarında, gelişmekte olan bu teknolojinin yanında, ülkeler kendi sınırları için koydukları kuralları yaygınlaştırarak evrensel kurallar ve düzenlemeler oluşturmaya başlamıştır [14].

Piston-prop uçaklarının ilk yıllarında daha fazla beygir gücü istenirken, günümüzde enerjinin daha verimli kullanıldığı çevre dostu motorlar tercih edilmekte ve bu yönde çalışmalara önem verilmektedir.

1.4. Literatür Taraması

Tezin bu bölümünde literatür araştırması sunulmuştur. Yapılan araştırmalar sonucunda içten yanmalı motorlardan buji ateşlemeli motorlar ve hava araçları üzerine yapılan ekserji analizi çalışmaları değerlendirilmiştir. Ayrıca, açık literatürde henüz çalışılmamış olan konulara dikkat çekilmiştir.

1.4.1. Ekserjinin hava aracı uygulamaları

Ekserji analizi, uçaklarda enerji etkileşimli sistemlerin geliştirilmesindeki teorik limitlerin belirlenmesine yardımcı olur. İzole ve bütünleşik uçak sistemi analizi gibi yerlerde kullanılan ekserji temelli yaklaşımlar, havacılık sektöründe uzun yıllar kullanılmıştır. Ekserji temelli metotları bazı araştırmacılar uçak bütünleşik sistemlerinin parçalarının ve yer esaslı güç sisteminin tasarımlarında kullanırken, bazıları ise çevresel kontrol sistemlerinin tasarımında kullanmıştır [22–28]. Bunların yanından Periannan ve ark. [28] gibi ekserji analizini itki, çevre ve gövde-aerodinamik olarak üç alt gruba ayırıp uçak sistemlerinin tasarım ve süreçlerine uygulayan araştırmacılar da olmuştur.

Tüm bu incelemeler, uçak sistem tasarımı üzerine olsa da güç grubu açısından önemli bazı parametreler de belirlenmiştir. Uçak sistemlerinin geliştirilmesinde ekserji analizleri teorik bir sınırdır. Örneğin, Bejan ve Siems [22] kayıp ve yıkımların minimuma indirilmesiyle sistem performansı ve veriminin, istenilen teorik tavana yaklaşabileceğini göstermiştir.

Etelen ve Rosen [29], bir turbojet motorunun deniz seviyesi ile 15,000 m irtifa arasında ekserji verimlerinin değişimlerini incelemişlerdir. Bu incelemede, ekserji veriminin deniz seviyesinde % 16.9 iken, 15,000 m'de % 15.3'e düştüğünü, sonrasında ise bu irtifada sabit kaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca yapılan bu çalışma, egzoz emisyonlarının ekserji kayıplarında büyük bir yeri olduğunu göstermiştir.

Tona ve ark. [30] bir turbofan motorunun ekserji temelli incelemesini gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, düz uçuş safhasında maksimum ekserji verimi %

26.5 olduğu şartlarda en yüksek ekserji yıkımının da olduğunu bulmuştur. Ekserji veriminin ise iniş süresinde % 6 oranında azaldığı gösterilmiştir.

Rosen ve Etelen'in [31] kayıpların azaltılması üzerine yaptıkları araştırmalarında, özgün uçuş çevrim süresince bir turbojet motorunun ekserji verimini değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada, ekserji temelli verim değerlendirmesinin motor performansını belirlemede daha avantajlı olduğunu göstermişlerdir.

Roth ve ark. [32] yüksek entalpili bir gazın sahip olduğu iş potansiyelini, istenilen sıcaklık, basınç ve yakıt-hava karışımı aralığında belirleyerek, ekserji değerleri rahatlıkla görülebileceği grafikler hazırlamışlardır.

Leo ve Perez-Grande [33] yaptıkları incelemede, hava araçlarının özel durumunun diğer ısı üreten sistemlerle bir tutulmaması gerektiğini ve bu nedenle işletme maliyetinin diğer sistemlerden daha yüksek olduğunu bilinmesi gerektiğini göstermişlerdir.

Pellegrini ve ark. [23] hava aracı tasarımında ekserji metodu ile ilişkili birçok makaleyi incelemiş, bunun doğrultusunda tasarım aşamasında optimizasyon uygulamaları ve farklı yaklaşımlar ortaya atmışlardır.

Turgut ve ark., [34–36] turbofan motoruna ekserji analizi uygulamış, buldukları veriler doğrultusunda SPECO (Özgül Ekserji Maliyet Metodu – The Specific-Cost Exergy Costing) yöntemini kullanarak ekserjoekonomik analiz gerçekleştirmişlerdir.

Roth ve Mavris [37] turbofan motor yapısının direkt kullanılabilirlik etkilerini aşağıdaki şekilde listelemiştir,

- ✓ Çevrim basınç oranı, egzoz çıkış sıcaklığı kayıplarına,
- ✓ Türbin giriş sıcaklığı, dengeli olmayan yanma kayıplarına,
- ✓ Fan basınç oranı, artık egzoz gazı kinetik enerjisi nedeniyle oluşan kayıplara

Korones ve ark. [38] yaptıkları çalışmalarda, hava araçlarında kullanılan kerosen ve alternatif olarak kullanılması düşünülen hidrojenin çevresel etkileri, bir yaşam döngüsü değerlendirmesi ile incelemiştir. Bu inceleme sonucunda yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen hidrojenin taşınması sırasında birçok

çevresel etkiye neden olurken enerji ihtiyacının karşılanmasında kullanılmaya başlandığında ise daha az çevresel etkilere neden olduğu gösterilmiştir.

1.4.2. Ekserjinin buji ateşlemeli motor uygulamaları

Zhecheng ve ark. [39] yaptıkları incelemede, buji ateşlemeli içten yanmalı motorlarda, buji pozisyonunda, ısı izolasyonda ve sıkıştırma oranında yapılabilecek bir iyileştirme, egzozdan atılan kullanılabilir enerjide azalmaya, dolayısıyla motor veriminde artışa neden olacağını göstermişlerdir.

Rakoupoulos [40] ise sıkıştırma oranı, yakıt-hava oranı ve ateşleme avansı, ikinci yasa ile incelenerek daha geniş ve kesin sınırlar arasında gösterilebileceğini ortaya koymuştur.

Sezer ve Bilgin [41,42] yaptıkları çalışmalarda, HY oranı artışının tersinmezlikleri arttırdığını, hem birinci hem de ikinci yasa verimlerinde bir azalmaya neden olduğunu bulmuşlardır. Bunun yanında, belirli bir motor hızı ve en iyi buji zamanlamasında, tersinmezlik en aza iner dolayısıyla birinci ve ikinci yasa verimlerinin maksimuma ulaşabileceğini göstermişlerdir.

Kopaç ve Köktürk [43], inceledikleri buji ateşlemeli içten yanmalı bir motorun en iyi hızının, enerji analizine göre 2040 d/dak (RPM, Dakikadaki Devir Sayısı), ekserji analizine göre ise 2580 d/dak seviyelerinde olduğunu göstermiştir.

Ameri ve ark. [44] inceledikleri motorun en yüksek enerji veriminin 2500 d/dak, en yüksek ekseji verimini ise 3000 d/dak'da bulmuşlardır.

Abu-Nada ve ark. [45] belirtilen kabullerin yanında yüksek motor hızlarında hava yerine gaz karışımının kullanılmasının, motor performansını daha da yükselttiğini bulmuşlardır.

Ekserji analizi incelemelerinin yanı sıra, bir sistemin termodinamik analizinin gerçekleştirilmesinde entropi üretiminin azaltılması metodunun uygulanabilirliği de göz ardı edilmez [46].

Bir yakıt sisteme enerji girdisi olarak girdiğinde, bu yakıtın cinsi ve özelliği oldukça önemlidir. Bu nedenle birçok araştırmacı yakıt üzerine çalışma gerçekleştirmiştir.

Sayın ve ark. [47] yaptıkları çalışmada en iyi enerji ve ekserji performans değerlerinin, geleneksel benzinin 91 oktanda olduğunu göstermişlerdir.

Zhang ve Sobiesiak [48] buji ateşlemeli motorlarda kullanılan geleneksel yakıtların haricinde farklı yakıtların etkileri üzerinde de bazı çalışmalar yapmıştır. Sıkıştırılmış doğalgaz yakıt olarak kullanıldığında, sistemdeki en büyük tersinmezliğin, dolayısıyla en büyük ekserji yıkımının, yanma ve ısı transferi esnasında olduğu bilinmektedir. Yıkımdaki bu azalma kullanılabilir iş ve ikinci yasa veriminde bir artışa neden olur.

Rakopoulos ve ark. [49] yaptıkları incelemede doğalgaz yerine sentetik doğalgaz kullanılmasıyla da ikinci yasa veriminin arttığını, tersinmezliklerin azaldığını göstermiştir. Bu yaklaşımın sonuçlarından tamamen farklı olarak Özcan ve Söylemez [50], Sıvılaştırılmış Petrol Gazı'na (LPG) su eklenmesi ile yanma tersinmezliğinin arttığını göstermişlerdir.

Caton [51] buji ateşlemeli bir motorda, metan, propan, heksan, izooktan, metanol, etanol, karbon monoksit ve hidrojen gibi farklı yakıt tiplerinin performansa etkilerini ekserji tekniği kullanılarak incelemiştir. Yaptığı çalışmanın sonucunda, yakıtlar arasında en yüksek ekserji yıkımına yakıt ekserjisinin % 21'i ile izooktan olduğunu ve diğer yakıtların izooktandan oldukça düşük değerlere sahip olduğunu göstermiştir.

Sezer ve ark. [52] yaptıkları çalışmada, metanol ve etanol gibi oksijene doymuş yakıtların, pistonlu motorlarda ekserji verimi açısından uygun olduğunu, entropi üretiminin ve ısı kaybının az olduğunu göstermişlerdir. İzo-oktan yakıtı göre, metanol ve etanol yakıtın yanmasıyla oluşan tersinmezlik değerleri % 7.44 ve % 4.29 daha azdır. Isı ile olan ekserji transferi metanol için % 9.47, etanol için % 6.45 oranında azalmaktadır. İş ile olan ekserji transferi metanol ve etanol için, sırasıyla % 7.35 ile % 3.24 arasında azalmaktadır.

Pourkhesalian ve ark. [53] hidrojen ile çalışan buji ateşlemeli bir motorun hacimsel veriminin benzin ile çalışan aynı motordan % 28 daha az olduğunu göstermişlerdir. Aynı çalışmada hidrojenin özgül yakıt tüketimi benzinli motora göre % 63 daha az olduğu bulunurken, daha az güç üretimi gerçekleştirdiği gösterilmiştir.

Nieminen ve Dincer [54] yaptıkları incelemede hidrojen yakıtlı motorlar benzinli motorlara göre daha düşük tersinmezlik ve daha az özgül yakıt tüketimi olması nedeniyle daha yüksek ekserji verimine sahip olduğunu göstermiştir.

Ismail ve Mehta [55] hidrojen yakıtlı bir buji ateşlemeli motor üzerine yaptıkları inceleme sonucunda, tüm HY oranlarında en yüksek ekserji veriminin 3000 d/dak olduğunu bulmuşlardır. Aynı çalışmada, ekserji veriminin fakir karışımdan stokiometrik yanmaya doğru bir artış gösterdiği vurgulanmıştır.

1.5. Tezin Amacı ve Önemi

Yapılan araştırmalarda buji ateşlemeli motorlardaki kayıpların, çalışma sınırlarının ve verimlerinin etkin bir şekilde belirlenebilmesi için ekserji analizine ihtiyaç olduğu görülmüştür. Bunun haricinde motorda kullanılacak farklı yakıtların ise sistem performansı üzerinde doğrudan etkisi olduğu anlaşılmıştır. Diğer ısı sistemlerinden farklı olan hava araçlarında ekserji analizi üzerine, özellikle turbofan ve turbojet motorlarında, birçok çalışmanın yapıldığı belirlenmiştir. Bu çalışmalardaki genel yargı ise ekserji temelli verim incelemesinin hava aracı motor performansını daha etkin gösterdiği ve optimizasyon için elverişli bir araç olabileceği üzerinedir. Bu kapsamda, çoğu araştırmacı turbofan ve turbojet motorlarına ekserji veya ekserjoekonomik analiz veya optimizasyon uygulamıştır.

Yapılan literatür taraması ve incelemeler sonucunda piston-prop uçak motorlarının performans, verim ve kayıplarının belirlenmesinde ekserji analizinin yapılmadığı görülmüştür.

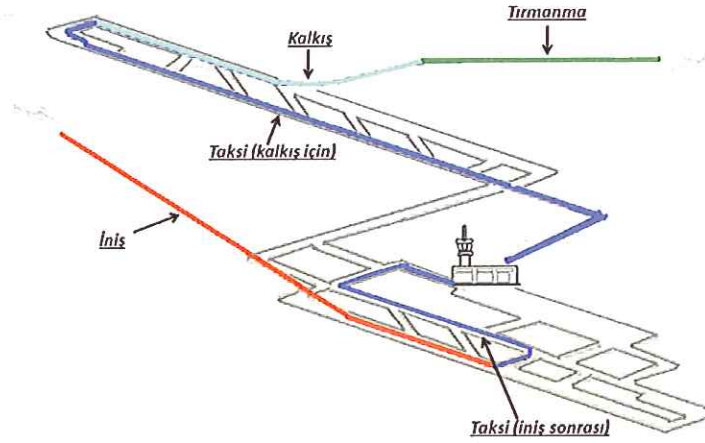
Bu tezde,

- LTO ile düz uçuş için ekserji, ekserjoekonomik ve ekserjoçevresel analiz uygulanmıştır,
- Belirli bir irtifa aralığında düz uçuş için optimizasyon gerçekleştirilmiştir,
- En yüksek ekserji veriminde, en düşük yakıt ortalama birim ekserji maliyeti ve ürünlerin özgül çevresel etkisi bulunmuştur.

Bu tezin amacı, iki farklı uçuş safhasında piston-prop uçakların performanlarını incelemek olmuştur. Bu kapsamda LTO safhasında yapılabilecek bir iyileştirmenin nereden başlanması gerektiği gösterilirken, düz uçuş safhasında da bir seçim kriteri olan uçuş irtifası, motor güç ayarı ve HY oranının optimum şartlarının belirlenmesi sağlanmış olacaktır. Böylece, hava aracı üreticilerinin de kullanması gereken yeni seçim parametreleri ortaya atılarak ileride yapılabilecek daha kapsamlı çalışmalara öncü olunacaktır.

2. TERMODİNAMİK ANALİZ

Uçuş faaliyeti, yer ve uçuş operasyonları olmak üzere iki bölümden oluşur. Yer operasyonları, yakıt ve yolcu ikmali, bagaj taşıma ve bakım faaliyetleri şeklinde listelenebilir. Uçuş operasyonu ise iniş-kalkış safhası (LTO – Landing and Take off) ve düz uçuş olmak üzere iki kısımdan oluşur. Uçakların enerji ve ekserji analizinin yapılabilmesi için uçuş operasyonlarının bilinmesi gerekmektedir. Uçuş operasyonunun tüm safhaları Şekil 2.1’de gösterilmektedir [10].



Şekil 2.1. Uçakların uçuş operasyon safhaları [Ref [10]’dan derlendi]

Tezin bu kısmında, yaygın olarak kullanılan benzinli, 5.24 L motor hacimli, 4 silindirli, doğal emişli ve 150 HP maksimum güce sahip bir motoru olan piston-prop uçağının ref. [56]’dan alınan verilerin kullanılacağı LTO safhası; parametrik verilerin kullanılacağı 1 saatlik düz uçuş sırasındaki enerji, ekserji, ekserjoekonomik ve ekserjoçevresel analizi iki ayrı bölüm halinde incelenecektir. 1 saatlik düz uçuş için belirlenen hedef değerleri doğrultusunda optimizasyon yapılacaktır.

Bu tip motorun tercih edilmesinin sebebi, en yaygın olarak kullanılan bir motor olmasıdır. İlgili motorun ve kullanılan yakıtın özellikleri Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Piston-prop uçak motoru ve kullanılan yakıtın özellikleri

Özellikler	Değerler
Motor†	Sıkıştırma oranı 7.5:1
	Maksimum güç 119 kW (2700 RPM değerinde)
Yakıt	Genel formülü C ₈ H ₁₈ (izooktan)
	Alt ısı değeri 44,430 kJ/kg*

† Motor parametreleri motor kullanım kitaplarından alınmıştır.

* Bu değer ref. [57]'den alınmıştır.

Yapılacak olan LTO safhası analizi için gerekli olan egzoz emisyon değerleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. LTO safhasında emisyon değerleri [56]

Çalışma fazı	Süre (dak.)	Yakıt tüketimi (kg)	CO (g)
Kalkış	0.3	0.18	146.88
Tırmanma	2.5	1.20	1004.40
Yaklaşma	3	0.86	601.34
Taksi	12	0.93	645.01

LTO safhasında toplam sürenin dağılımına bakıldığında taksi fazı LTO safhasının % 67.42'sini oluştururken, en düşük kısmı % 1.69 ile kalkış fazı olduğu görülmektedir.

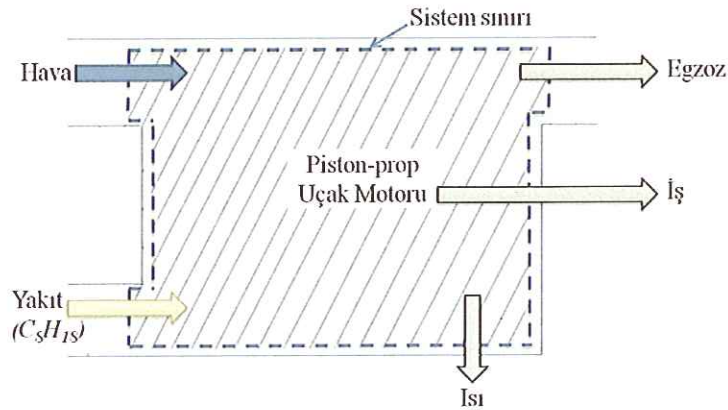
Eneji analizi için kullanılan bu kabullerin yanında ekserjoekonomi ve ekserjoçevresel analiz içinde bazı kabuller kullanılmıştır. Bu kabuller aşağıda listelenmiştir.

- ✓ Piston-prop uçaklarının servis ömrü 15 yıl olarak kabul edilmiştir (Bu süre gövde FASBAT bakımı ile eşdeğerdir).
- ✓ Faiz oranı % 10 alınmıştır.
- ✓ Yıllık ortalama 550 uçuş saati kabul edilmiştir.
- ✓ Kullanılan yakıtın (AVGAS) fiyatı 3.07 \$/L (Türkiye kullanım bedeli) alınmıştır [58].

- ✓ Dört silindirli, buji ateşlemeli, doğal emişli ve hava soğutmalı bir piston-prop uçak motorunun ortalama fiyatı 39,000 \$ kabul edilmiştir [59].
- ✓ Yakıt fiyatı 15 yıllık periyotta, yılda % 6 artacaktır.
- ✓ 6 adet 50 saatlik, 5 adet 100 saatlik ve bir adet yıllık olmak üzere toplamda bir yıl içinde 12 bakım yapılmaktadır.
- ✓ Ekserjoekonomik analizdeki kabullerin haricinde ekserjoçevresel analiz için de bazı kabuller yapılması gerekmektedir. Çevresel etki değerleri SimaPro 7.2 yazılımı yardımıyla hesaplanmıştır. Kullanılan motorun imalatı esnasında oluşan çevresel etki 0.275 mPts/s, işletme ve bakım esnasında oluşan çevresel etki ise 0.0108 mPts/s olarak hesaplanmıştır. 15 yılın ardından motor ve uçak gövdesinin FASBAT (Fabrika seviyesi bakım) bakımına girdiği kabul edildiği ve bu bakımda tüm parçaların iyileştirilerek yeniden kullanıldığı kabul edileceği için atık çevresel etkisi hesaplanmamıştır. LTO'nun tüm fazlarında motor sebebi ile oluşan çevresel etki akımı aynı kabul edilmiştir.

2.1. Enerji Analizi

Piston-prop uçak motorunu içine alan bir kontrol hacmi için basit bir enerji akış şeması Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Piston-prop uçak motorunun kontrol hacmi (KH).

Sürekli akış sürecinde bir termodinamik sisteme giren kütle zamanla değişmez. Bu nedenle, kontrol hacmindeki kütle değişmeyeceği için sisteme giren kütlelerin zaman içinde değişimi, sistem dışına çıkan kütlelerin değişimine eşittir ($m_{KH} = \text{sabit}$).

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \quad (2.1)$$

Kütle dengesinde olduğu gibi kontrol hacminde toplam enerji değişimi de değişmez ($\dot{E}_{KH} = \text{sabit}$). Sürekli akışlı açık sistemler için enerji dengesi

$$\dot{E}_g = \dot{E}_ç \quad (2.2)$$

$$\dot{Q}_g + \dot{W}_g + \sum_g \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) = \dot{Q}_ç + \dot{W}_ç + \sum_ç \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (2.3)$$

şeklinde yazılır.

Oluşturulan kontrol hacmi için enerji dengesi ise (2.4) yardımıyla hesaplanır.

$$\dot{E}_y = \dot{Q}_{kay} + \dot{W} \quad (2.4)$$

Buradaki \dot{E}_y sisteme giren enerjiyi gösterirken, \dot{Q}_{kay} kontrol hacminde oluşan ısı kaybını gösterir. İçten yanmalı motorlarda, yanma odasına alınan yakıt, alt ısıl değeri ile birlikte bir enerji girişine neden olur.

$$\dot{E}_y = \dot{m}_y H_u \quad (2.5)$$

Denklem (2.4)'deki \dot{W} ise içten yanmalı motorlarda motor gücüdür. Bu tip sistemlerde bu değer bulunmasının dinamometre ile ölçümünün haricinde en uygun yolu, termodinamik veriler sonucunda oluşturulan $P-v$ diyagramının altında kalan alanın hesaplanmasıdır. Bu noktada net işin bulunabilmesi için tüm hal değişimlerinin termodinamik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir [57, 19].

Hava araçlarında belirtilen irtifa ve motor parametrelerinde motor gücü, kullanıcı el kitabından bulunur [60]. Motor gücü emme manifolduna alınan havanın yoğunluğunun değişmesi nedeniyle irtifayla birlikte direkt olarak değişir. Eğer motor turbo şarjlı değil ise motor gücü hava yoğunluğuna bağlı olarak irtifa

ile azalır. Bu azalma 6000 m irtifaya kadar devam eder. Standart deniz seviyesinde ölçülmüş olan motor gücünün 6000 m irtifaya kadar değişimi (2.6) ile hesaplanır [9].

$$HP = HP_{DS} \left(\frac{\rho}{\rho_0} - \frac{1-\rho/\rho_0}{7.55} \right) \quad (2.6)$$

Burada hesaplanan motor gücü değeri (*HP*) beygir gücü cinsindedir. Bu değer analiz sırasında kW dönüştürülerek işlem gerçekleştirilir.

Motor gücü, enerji ve ekserji analizlerinde kritik bir parametredir. Bu nedenle, düz uçuş safhası incelenirken, uçuş irtifasındaki motor gücünün belirlenmesi önemlidir. Bunun yanında maksimum güç, kontrol panelinden de pilot tarafından kontrol edilmektedir. Bu kontrol, motor gücündeki değişimin dolayısıyla yakıt tüketiminin pilot kontrolünde olmasını sağlar. Düz uçuşta motorun % 65 ile % 75 güç ayarı arasında çalıştırılması tercih edilir. % 65 güç ayarına ekonomik düz uçuşu denilirken, % 75 güç ayarı yüksek performans düz uçuşu olarak adlandırılır [60].

Kontrol hacminin ısı verimi ise net gücün giren enerji akışına oranı ile bulunur.

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{E}_y} \quad (2.7)$$

2.2. Ekserji Analizi

Bir sistemin performansı hakkında kesin bir şey söyleyebilmek için enerji analizinin yanında ekserji analizinin de yapılması gerekmektedir. Ekserji, en genel haliyle iş yapabilme potansiyeli olarak tanımlanabilir. Yani bir sistemden en fazla iş elde edileceği durumdur. Sürekli akışlı sürekli açık sistemler için ekserji dengesi

$$\dot{E}x_g = \dot{E}x_\zeta + \dot{E}x_{i\zeta} + \dot{E}x_{kay} + \dot{E}x_{ytk} \quad (2.8)$$

$$\sum \dot{m}_g \varepsilon_g = \sum \dot{m}_\zeta \varepsilon_\zeta + \dot{W} + \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_{sh}} \right) \dot{Q} + \dot{E}x_{ytk} \quad (2.9)$$

ifadesiyle verilmektedir [57]. Burada “ $\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_{sh}}\right) \dot{Q}$ ”, soğutma havası sıcaklığı ile referans sıcaklık arasındaki ısı ile olan ekserji kaybını göstermektedir. Soğutma havası sıcaklığı yaklaşık olarak 330 K değerindedir. Denklem (2.9)’da kullanılan ısı akımı (2.10) yardımıyla elde edilmektedir [61];

$$\dot{Q} = \dot{m}_y H_u - (\dot{W} + \dot{m}_\phi \Delta h_\phi) \quad (2.10)$$

Tersinmezlikler daima entropi üretir ve entropi üreten herhangi bir durum ekserjiyi yok eder. Ekserji yok oluşu, ekserji yıkımı olarak tanımlanabilir ve (2.11)’de gösterilmektedir [57].

$$\dot{E}x_{yık} = T_0 S_{üretim} \quad (2.11)$$

Giren ekserji akımı (yakıt ekserji akımı, $\dot{E}x_y$) sadece kimyasal ekserji içerir ve (2.12) yardımıyla hesaplanır.

$$\dot{E}x_g = \dot{E}x_y = \dot{m}_y \varepsilon_y \quad (2.12)$$

Yakıtın kimyasal ekserji değeri, (i) oda sıcaklığı verileri kabulü veya (ii) farklı çevre şartları dikkate alınarak hesaplanabilir. Yakıtın kimyasal ekserji değerine ait hesaplamalar literatürde ayrıntılı olarak sunulmuştur [19, 57, 62–64]. Belirtilen bu iki yöntemle yapılan hesaplamalar ise Ek-1’de verilmiştir.

Atmosfer çeşitli gazların fiziksel karışımından meydana gelmektedir. Deniz seviyesinde atmosferde bulunan gazların mol kesirleri Çizelge 2.3’de gösterilmektedir [64]. En az 60,000 m’lik bir mesafeye kadar bu özelliklerin sabit kalmaktadır [65]. Mükemmel gazlar için standart molar kimyasal ekserji değerleri (2.13) ile hesaplanmaktadır.

$$\bar{\varepsilon}_{kim, k} = -\bar{R}T_0 \ln x_k^e \quad (2.13)$$

Burada kullanılan x_k^e , çevre atmosferde bulunan k . gazın mol kesridir.

Çizelge 2.3. Çevrenin tanımı [64]

<i>Referans Bileşen</i>	<i>Mol Kesri (%)</i>
N ₂	75.6700
O ₂	20.3500
CO ₂	0.03450
H ₂ O	3.03000
CO	0.00070
SO ₂	0.00020
H ₂	0.00005
Diğer	0.91455

Ref. [57] ve [64]'de gösterilen Model 1 ve Model 2'de farklı çevre şartları için 298 K ve 1 atm basınç altında standart kimyasal ekserji değerleri hesaplanmıştır. Yapılacak çalışmada, irtifa ile referans çevrenin sıcaklığı değişeceği için standart kimyasal ekserji değerleri de değişmektedir. Bu durumda Model 2 ışığında sıcaklık değişimi ile standart kimyasal ekserji değerleri hesaplanmalıdır.

Denklem (2.13)'de hesaplanan kimyasal ekserji hesaba katılarak giren ekserji akımı (2.12) yardımıyla bulunmaktadır.

Egzoz ekserjisi (ekserji çıkışı) özgül termomekanik ve özgül kimyasal ekserjilerinin toplamından oluşmaktadır. Yanma sonucu oluşan her bir ürün için özgül termomekanik ve özgül kimyasal ekserji değerleri ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Özgül termomekanik ekserji (2.14) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_{tm} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (2.14)$$

Toplam egzoz ekserji akımı $\dot{E}x_{egz}$, her bir yanma ürününün özgül ekserjilerinin, gerçek kütleli debileri ile çarpılması sonucu elde edilmektedir.

$$\dot{E}x_{egz} = \sum \dot{m}_i (\varepsilon_{tm} + \varepsilon_{kim})_i \quad (2.15)$$

buradaki i değeri her bir egzoz gazını ayrı ayrı simgelemektedir.

Değişik koşullar altında ekserji verimini değişik şekillerde tanımlamak mümkündür. Ekserji verimi en genel hali ile üniversal ve fonksiyonel olmak üzere iki farklı şekilde hesaplanmaktadır [66].

Ekserji verimi literatürde farklı şekilde [57, 62, 66, 68] sunulmaktadır. Bu çalışmada ekserji verimi aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\Psi = \frac{\dot{W}}{\dot{E}x_g} \quad (2.16)$$

2.3. Ekserjoekonomik Analiz

Uçak bakım ve çalışma değerinin belirlenmesinde en önemli faktörlerden birisi, maliyet hesabının yapılmasıdır. Ekserjoekonomik analiz yapılmadan önce, ekonomik analiz açısından önemli parametrelerin bilinmesi ve irdelenmesi önemlidir.

Maliyet, sabit ve değişken olmak üzere iki kısımda incelenir. Sabit maliyetler, sistemin ilk yatırım ve kurulumu için yapılan harcamalar ile vergiler, sigortalar, amortisman bedeli gibi diğer maliyetler şeklinde yazılır. Değişken maliyetler ise yakıt, çalışanların ücretleri, kaynaklar, hammadde, enerji ve eskalasyon şeklinde listelenebilir [36].

Bir sistemin ekonomik analizinde ilk olarak sistemin çalışma ömrü boyunca bir defa olmak üzere yapılan toplam ilk yatırım maliyetleri belirlenmelidir. Sürekli yapılan harcamalar ile bir defa yapılan harcamaları aynı tür altında toplayabilmek için bir takım düzenlemeler gerekmektedir [36]. Çizelge 2.4'de bu maksatla kullanılan bazı terimler ve hesaplamalar gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. Ekonomik analiz ile ilgili denklemler [36, 69, 70]

<i>Sembol</i>	<i>Terim ve Açıklama</i>	<i>Denklem</i>	<i>No</i>
i_{ef}	Efektif faiz oranı	$i_{ef} = (1 + i)^m - 1$	(2.17)
P	(P/F,i,n), Sabit bir ödeme ile paranın bugünkü değeri	$P = F[1/(1 + i_{ef})^n]$	(2.18)
	(P/A,i,n), Yıllık ödemelerin eşit zaman aralıklarında yapılması halinde paranın bugünkü değeri	$P = A\{[(1 + i_{ef})^n - 1]/i_{ef}(1 + i_{ef})^n\}$	(2.19)
F	(F/P,i,n), Bileşik faiz frekanslı paranın gelecekteki değeri	$F = P(1 + i_{ef})^n$	(2.20)
	(F/A,i,n), Yıllık ödemelerin eşit zaman aralıklarında yapılması halinde paranın gelecekteki değeri	$F = A\{[(1 + i_{ef})^n - 1]/i_{ef}\}$	(2.21)
CRF	İlk yatırım iyileştirme faktörü	$CRF = i_{ef}(1 + i_{ef})^n / [(1 + i_{ef})^n - 1]$	(2.22)
CELF	Sabit eskalasyon seviyelendirme	$CELF = \frac{k(1 - k^n)}{1 - k} CRF$	(2.23)

Çizelge 2.4.'deki efektif faiz oranı, i_{ef} , bileşik faizin i yıl içinde bir defa yapıldığı yıllık faiz oranını göstermektedir. Buradaki, m yıldaki bileşik periyodların sayısını göstermektedir. P paranın şimdiki değerini gösterirken, F gelecekteki değerini ve A ise eşit zaman aralığında meydana gelen eşit eşit para hareketidir. CRF, belli bir dönem sonundaki yıllık ödeme toplamının efektif faiz oranıyla yıllık ödeme başlangıcında yatırılmış olması durumundaki parasal değeridir. CELF ise İlk yılın başındaki harcama miktarı ile eşit bir yıllık ödeme arasındaki ilişkiyi ifader.

Ekserjoekonomik inceleme için pek çok yaklaşım tarzı vardır. Bu tezde bunlardan biri olan SPECO esas alınarak incelemeler yapılmıştır. Ekserjoekonomik analizin temel adımları aşağıda listelenmiştir [69, 70]:

- ✓ İlk olarak sistemin tüm elemanları için ekserji girdileri ve çıktıları hesaplanır.
- ✓ Her bir yanma ürünü için yakıt ve ekserji akımları hesaplanır.
- ✓ Ekserji değerlerine maliyet atamaları yapılır.

Belirlenen çerçevede ekserji yıkımı maliyet akımları, ürünün ekserjisi sabit olduğunda,

$$\dot{C}_{yık} = c_y \dot{E}x_{yık} \quad (2.24)$$

yakıtın ekserjisi sabit olduğunda,

$$\dot{C}_{yık} = c_p \dot{E}x_{yık} \quad (2.25)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır. Burada, c_p üretimin birim maliyetini ve c_y yakıtın birim maliyetini gösterirken, $\dot{C}_{yık}$ ekserji yıkımının maliyet akımını gösterir. Yakıt ortalama birim maliyetlerinin ürün ortalama birim maliyetinden daha düşük olması sebebiyle denklemlerden birincisi alt limiti, ikincisi ise üst limiti göstermektedir [63].

Maliyet akımı, giren ve çıkan birim maliyetler belirlenerek maliyet dengesinin kurulmasıdır [71].

$$\sum c_g \dot{E}x_g + \dot{Z} = \sum c_\zeta \dot{E}x_\zeta \quad (2.26)$$

Burada \dot{Z} , toplam seviyelendirilmiş ilk yatırım \dot{Z}^{CI} ve bakım-işletme maliyetini \dot{Z}^{OM} toplamını gösterir [71].

$$\dot{Z} = \dot{Z}^{CI} + \dot{Z}^{OM} \quad (2.27)$$

Belirli bir elemana ait yakıt ve ürün arasındaki birim ekserji başına ortalama maliyet artışını ifade eden izafi maliyet farkı [71]

$$r = \frac{c_p - c_y}{c_y} \quad (2.28)$$

yardımıyla hesaplanmaktadır. Her bir elemanın performansını belirlemek için kategorilerin maliyetler üzerindeki etkileri, dolayısıyla ekserjoekonomik faktörlerin (f) bulunması gerekir. Ekserjoekonomik faktör [71]

$$f = \frac{\dot{Z}}{\dot{Z} + c_y (\dot{E}_{yık})} \quad (2.29)$$

yardımıyla hesaplanmaktadır.

2.4. Ekserjoçevresel Analiz

Ekserjoekonomik analiz sonrasında sırasıyla, (i) Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD); (ii) ekserji akımlarına çevresel etkilerin atanması, (iii) ekserjoçevresel değişkenlerin hesaplanması ve (iv) ekserjoçevresel değerlendirme gerçekleştirilir. Tüm bu işlemler ekserjoçevresel analiz olarak tanımlanabilir. YDD sonrasında yapılan üç adım, değerlendirme şeklinde genel bir başlık altında toplanabilir [72].

YDD, bir işlemin tüm çevresel boyutlarını beşikten (*hammaddenin doğadan el edildiği nokta*) mezara (*atık olarak doğaya geri döndüğü nokta*) kadar olan safhasını değerlendirir. YDD, bir sistemin tamamı ya da ünite bazında gerçekleştirilebilir. YDD sonrasında bazı çevresel etki değerlendirmeleri indikatörler kullanılarak elde edilir. İndikatörlerin elle hesaplanması mümkün olmasına karşın yardımcı programlar kullanılarak daha net ve doğru sonuçlar elde edilmesi mümkündür. Örneğin, eko-indikatör 99, insan sağlığı, ekosistem kalitesi ve doğal kaynaklar olmak üzere üç hasar kategorisine dayanır. Bu üç kategoriden her birinin değerlendirme sonucu envanter analizi sonucu ortaya çıkan nitelendirme, normalleştirme ve ağırlıklandırma ile sağlanır. Son olarak, üç kategori bir araya getirilir ve sonuçlar eko-indikatör noktaları (eco-indicator points, b_i) şeklinde gösterilir. Ne kadar yüksek hasar var ise o kadar yüksek eko-indikatör değerler elde edilir [73–75].

Eco-indicator 99, yaşam etki değerlendirmesinde kullanılan örnek bir modeldir. Buna benzer birçok yaklaşım ve senaryo ile çevresel analiz gerçekleştirilerek çeşitli indikatörler elde edilebilir. Eco-indicator 99 kullanımı, özellikle yaşam etki değerlendirmesi için hazırlandığından etkin sonuçlar verir [73].

Bu çalışmada hazır bir program olan SimaPro-7 kullanılarak çevresel etkiyle ilgili indikatörler elde edildiği için hesaplama yöntemleri ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Çevresel etki (\dot{Y}), imalat (\dot{Y}^{CO}), işletme ve bakım (\dot{Y}^{OM}) ve atık (\dot{Y}^{DI}) parametrelerinin tamamından oluşmaktadır [76].

$$\dot{Y} = \dot{Y}^{CO} + \dot{Y}^{OM} + \dot{Y}^{DI} \quad (2.30)$$

İncelenen olan sistemde, ürün ve yakıtın ortalama özgül çevresel etkileri sırasıyla (2.31) ve (2.32) yardımıyla hesaplanmaktadır [73, 76].

$$\dot{B}_p = b_p \dot{E}x_p \quad (2.31)$$

$$\dot{B}_y = b_y \dot{E}x_y \quad (2.32)$$

Bu uygulama, ekserjoekonomik maliyet akımlarının bulunmasında yapılanlarla benzerdir. İlk olarak, (2.32) yardımıyla hesaplanan yakıtın etkilediği ortalama özgül çevresel etki (*özgül çevresel maliyet*) kullanılarak çevresel etki akımı (\dot{B}_{y1k}) ekserji yıkımı cinsinden bulunur [73, 76].

$$\dot{B}_{y1k} = b_y \dot{E}x_{y1k} \quad (2.33)$$

Toplam \dot{B}_{TOT} çevresel etki akımı (2.34) ile hesaplanmaktadır [73].

$$\dot{B}_{TOT} = \dot{B}_{y1k} + \dot{Y} \quad (2.34)$$

İzafi çevresel fark [73]

$$r_b = \frac{b_p - b_y}{b_y} \quad (2.35)$$

yardımlarıyla hesaplanmaktadır. Buradaki b_p ürünün etkilediği ortalama özgül çevresel etkiyi göstermektedir. Ekserjoçevresel faktör (2.36) ile hesaplanmaktadır [78, 80].

$$f_b = \frac{\dot{Y}}{\dot{Y} + \dot{B}_{y1k}} \quad (2.36)$$

2.5. Ekserjoekonomik Çevresel Optimizasyon

Isıl sistemlerin problemlerinin optimizasyon yaklaşımı ile çözümlenmesinde, öncelikle temel hedeflerin belirlenmesi gerekmektedir. Isıl

sistemlerde, (i) fiziksel boyutlandırmalara ilişkin optimizasyon yaklaşımı ve (ii) hedefe ulaşmak için ürün akışları, akış özellikleri (termodinamik, akışkanlar dinamiği, kütle transferi) dikkate alınan optimizasyon yaklaşımı olmak üzere iki yaklaşımın öne çıktığı görülmüştür [74].

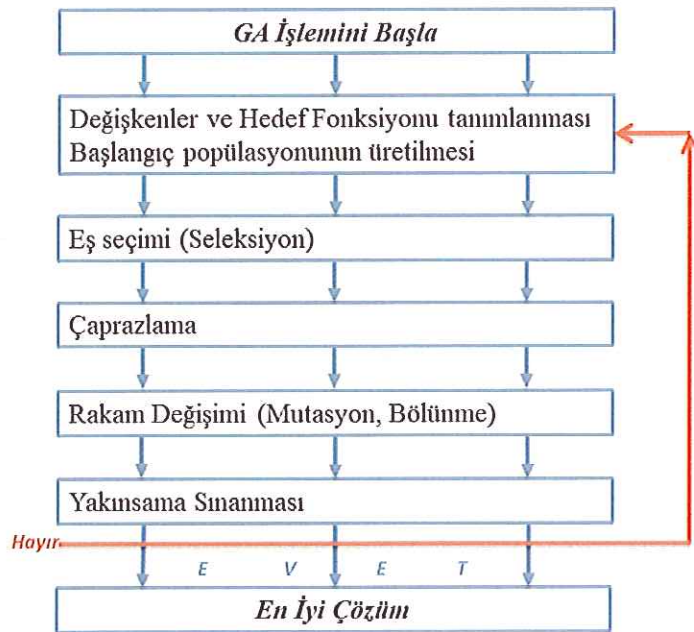
Bir sistemde belirlenen hedeflere yönelik optimizasyon çalışmasından önce aşağıdaki aşamaların sonuçlandırılması gerekmektedir [74].

- ✓ Problemlerle ilgili kontrol edilebilir unsurları tanımlayan ve çözüm sonunda değerleri elde edilecek olan karar değişkenlerinin saptanması,
- ✓ Sistemin durumunu belirleyen, kontrol edilemeyen ya da çevresel faktörler olarak bilinen parametrelerin belirlenmesi,
- ✓ Ulaşılmak istenilen amaç (karar) fonksiyonu veya fonksiyonlarının oluşturulması,
- ✓ Kısıtların (sınırlar) oluşturulması.

Belirtilen incelemelerin yapılabilmesi için bazı tekniklerin kullanılması gerekmektedir. Tezde Genetik Algoritma (GA) yöntemi kullanılarak optimizasyon işlemi gerçekleştirilmeye çalışılacaktır.

2.5.1. Genetik algoritma

Genetik algoritmanın akış şeması Şekil 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2.3. Genetik algoritmanın akış şeması [67, 77]

GA'lar temelde keşfetme, vurgulama ve çözüme ait iyi alt dizilerin yeniden birleştirilmesi ile çalışır. En iyi çözüme ulaşabilmek için en iyi alt dizilerin belirlenmesi gerekmektedir [78].

GA işleme adımları aşağıdaki gibi sıralanabilir [67, 77]:

- a- Sorunun çözümü olabilecek çözümler genetik sayılarla kodlanır,
- b- Başlangıç çözüm topluluğu değiştirilerek yeni bir popülasyon ortaya çıkartılır,
- c- Sorun hedefini belirleyen bir fonksiyon ile bundan elde edilebilecek çözüm kalitesini gösteren bir uygunluk değeri hesaplanır,
- d- Çoğalma işlemi gerçekleştirilir,
- e- Çözümlerin yapısını geliştirecek bir genetik işlemler dizisi (seçim, çaprazlama, mutasyon) yapılır,
- f- GA'da kullanılan değişken değerler hesaplanır.

GA, genel yapısı nedeniyle, herhangi bir optimizasyon problemine uygulanabilir. Bu özelliğine rağmen, davranış biçimleri karmaşıktır. GA'ların nasıl çalıştıkları ve hangi tip problemler için daha uygun oldukları konularında günümüzde eksiklikler vardır [79, 80].

Alt diziler, genetik algoritmaların davranışlarını açıklamak için kullanılan teorik yapılardır. Alt dizi derecesi ve alt dizi uzunluğunun GA temel teoreminde son derece önemli bir yeri vardır. Düşük alt dizi derecesi ve kısa alt dizi uzunluğu olan dizilere *yapı bloğu* denir. Holland'ın [80], uygun yapı bloklarının bulunması için geliştirdiği yapı blokları hipotezi önemlidir [67, 80].

GA'lar ilk olarak, popülasyon ortalamasının üstünde uyum gücü gösteren, kısa uzunluğa ve düşük dereceye sahip alt diziler zamanın ilerlemesiyle üstsel olarak çoğalırlar ve sonucunda ilk yapıdan daha üstün özellikler taşıyan bireyler ortaya çıkmaktadır. Bu çözüm kalitesinin kuşaktan kuşağa artması iki nedene bağlanmaktadır. Birincisi, başarısız olan bireylerin üreme şansları azaltıldığı için kötüye gidişin zorlaşması; diğeri ise genetik algoritmaların yapısı kötüye gidişi engellemekle kalmaması, (genetik algoritmaların temel teoremi uyarınca) zaman içinde hızlı bir iyiye gidiş de sağlayabilmesidir [67, 81–83].

GA'lar, yapıları gereği kötü bireyleri yani uygun olmayan çözümleri, bir takım operatörleri sayesinde elemektedir. Bu işlemler bir döngü içerisinde

durdurma kriteri sağlanana kadar devam etmektedir. GA'daki geleneksel anlayış, mutasyon ve tek noktadan çaprazlama operatörü ile yeni alt dizilerin oluşturulmasıdır [67, 78].

2.5.2. Genetik algoritmalarda parametre seçimi

GA'nın çalışma performansı, parametrelerin bulunmasıyla etkin hale getirilir. Kontrol parametrelerini bulmak için birçok sistem geliştirilmiş ve çalışma yapılmış olmasına rağmen, tüm problemler için genel olarak kullanılacak *popülasyon büyüklüğü, çaprazlama, mutasyon, kuşak aralığı, seçim stratejisi* ve *fonksiyon ölçeklemesi* gibi kontrol parametreleri geliştirilememiştir [81].

GA kullanıcısı tarafından verilen en önemli kararlardan birisi olan *Popülasyon Büyüklüğü* çok küçük olduğunda, genetik algoritma yerel bir en iyi bulabilir. Popülasyonun çok büyük olması ise çözüme ulaşma zamanını arttırmaktadır. Bu nedenle etkin bir popülasyon büyüklüğünün (20–30 arası gibi) belirlenmesi, sonuçların elde edilmesi için önemli olacaktır [81, 83].

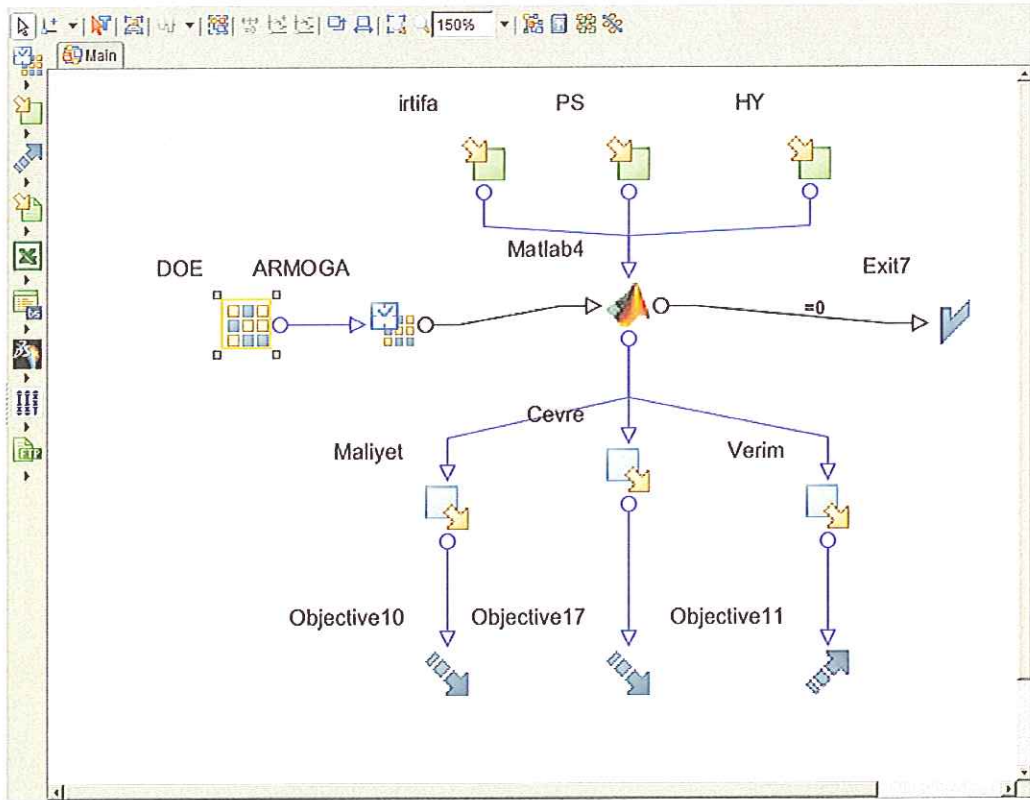
En uygun kromozomlara ulaşabilmek için mevcut iyi kromozomların özelliklerini *Çaprazlama* işleminde çaprazlayarak birleştirilir. Öncelikli olarak dizilerin çaprazlamaya tutulma olasılığı belirlenmelidir (Literatürde % 50 ile % 95 aralığında). Çaprazlamanın artması, yapı bloklarının artışına neden olurken, bazı iyi kromozomların da bozulma olasılığını arttırmaktadır [80, 85].

Mutasyonun amacı, sistemin belli döngü değerine geldikten sonraki popülasyonundaki genetik çeşitliliği korumaktır. Dizilerin işlem süresi geçtikçe birbirlerine benzemeleri çözüm uzayının daralmasına neden olur. Ne kadar çaprazlama yapılsa da dizi çeşitliliği sağlanamaz. Böyle bir durumda mutasyon olasılığı (Literatürde bu oran % 0.5 ile % 15 aralığında) iyi belirlenmelidir. Mutasyon olasılığının yüksek olması çözüm uzayını çok genişleterek sistemin yanlış yerlerde aranmasına neden olur [81, 85].

Her kuşaktaki yeni kromozom oranına *kuşak aralığı* denir. Kuşak aralığı, genetik operatörler için kaç tane kromozomun seçildiğini gösterir. Yüksek bir değer birçok kromozomun yer değiştirdiği anlamına gelmektedir. Eski kuşağı

fonksiyonlar tanımlanmıştır. Bu çalışmada, 1 saatlik düz uçuşun ekserjoekonomik çevresel analizler, arama uzayındaki mümkün çözümler olarak değerlendirilmiştir.

Genetik çözümlmeye geçmeden önce optimizasyon sabitleri ile değişkenleri belirlenmiştir. Uygulanan optimizasyon akış şemasında görüleceği gibi ekserji verimi, maliyetler ve çevresel etkiler ekserjoekonomik çevresel verileri etkileyecektir. Dolayısıyla, ekserji verimini etkileyen termodinamik parametreler, ekserjoekonomik verileri yani ürün maliyetini, bunun yanında ekserjoçevresel verileri, yani ürün çevresel etkisini doğrudan etkileyecektir. Basınç ve referans çevre şartları irtifa değişimi ile değişebildiği için kontrol edilebilir değişkenler olarak ele alınmıştır. Şekil 2.5’de optimizasyon için oluşturulan akış şeması gösterilmektedir.



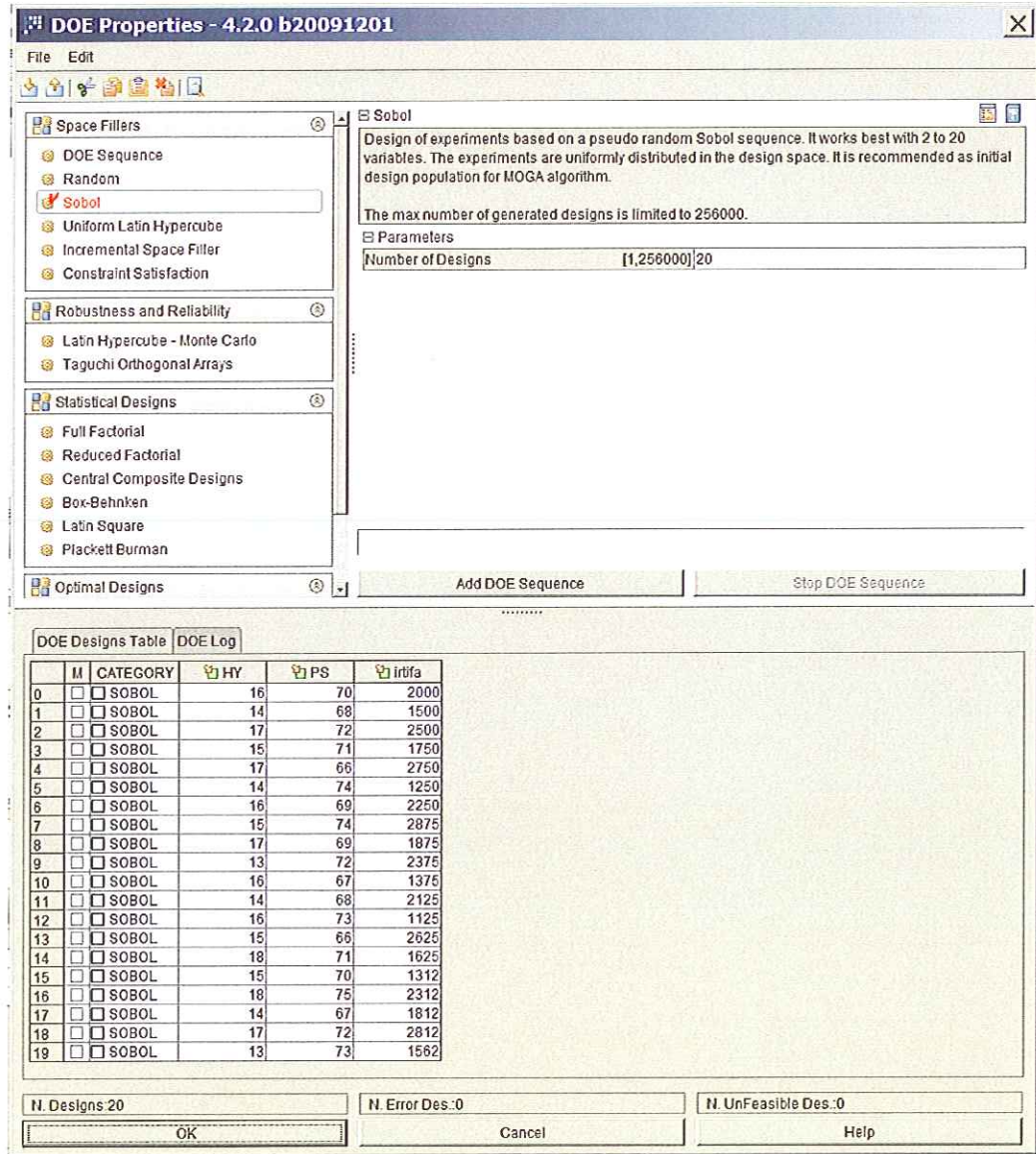
Şekil 2.5. Oluşturulan genetik optimizasyon modeli

İlk olarak programda analizin bir akış modeli oluşturulmuştur. Bu modelde, giriş değişkenleri olacak karar değişkenleri, hedef değişkenleri olan ekserji verimi, yakıtın birim ekserji maliyeti ve ürünün özgül çevresel etkisi

parametreleri, hedef değişkenlerin amaçları ve başlangıç popülasyonu ifade eden DOE (Design of Experiments Properties, Deneş Tasarımı) parametreleri tanımlanmıştır. DOE, sınırlı sayıda test sürecinden kazanılan bilgilerden uygun olacak maksimum bilginin çıkartılması için kullanılan bir metodolojidir. Bu yöntem, deneyleri analiz etmek ve tasarlamak için güçlü bir araçtır [67].

DOE metodolojilerinin rassal girdi ihtiyacının olduğu farklı uygulamalarda kullanıldığı görülmüştür. Ayrıca, DOE metodolojileri, optimizasyon algoritmalarında dizaynların başlangıç popülasyonunu oluşturmakta kullanılmaktadır.

Modellemede kullanılan DOE parametrelerinde, uzay dosyası olarak Sobol dizimi tercih edilmiştir. Sobol dizimi, çok amaçlı genetik algoritmalar için önerilen başlangıç tasarım jenerasyonudur. Sobol, tasarım uzayında düzenli örneğin tekrarını amaçlayan ve gelişigüzel dizinin davranışını taklit eden belirleyici bir algoritmadır. Ancak, bu durumda gelişigüzel örneğin grup etkileri de azalır. Bu tip dizinler, yarı random (random gibi) olarak isimlendirilir. Yapılan çalışmalar, bu tip dizinde dizayn uzayının tek davranışla kaplandığını ve her birinin azami korunduğunu göstermektedir. Sobol dizimi, 2–20 değişken sayısı ile en iyi çalışan dizi yapısıdır. Bu çalışmada, dizimde başlangıç popülasyonu için tasarım sayısı 20 olarak belirlenmiştir. Bu verilere göre oluşturulan başlangıç popülasyonu Şekil 2.6’da verilmiştir.

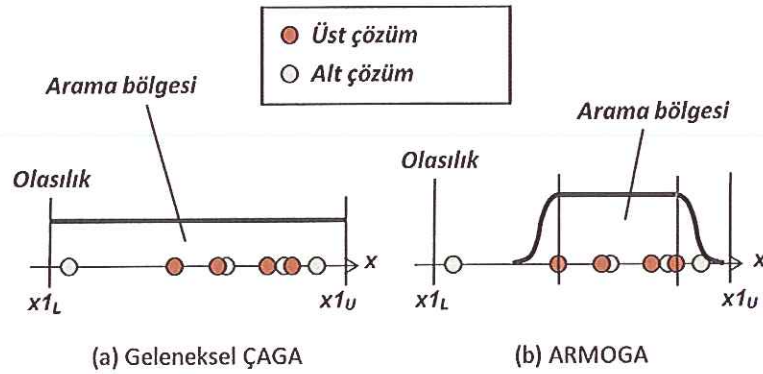


Şekil 2.6. Başlangıç popülasyonu

Optimizasyon problemlerinde, değerlendirme araçlarının çok zaman alması nedeniyle, değerlendirme sayısının sınırlanması yaygın olarak kullanılır. Optimizasyonda uyarlama aralığının belirlenmesiyle tasarım problemlerinin etkili çözümünün yapılabilirliği, bu amaçla (ARMOGA- Adaptive Range Multi-Objective Algorithm) uyarlanabilir aralıklı çok amaçlı genetik algoritma geliştirilmiştir. Bu özellikleri nedeniyle bu çalışmada ARMOGA genetik algoritma yöntemi seçilmiştir. ARMOGA fazla zaman isteyen verimli değerlendirme araştırmaları için tasarlanmıştır. ARMOGA uyarlanabilir aralığı,

seçiciliği, arşivlemeyi, uygun bölüşmeyi ve kısıtlı yürütme tekniğini içeren gerçek kodlamalara dayanır [67, 86].

ARMOGA'nın temel özellikleri, verimli araştırma için uyarlanabilir aralığı tanımlaması; uyarlanan aralık için tasarım tabloları oluşturması, olası ve olası olmayan sınırların araştırılmasını sağlamasıdır. Çok Amaçlı Genetik Algoritma (ÇAGA) ile ARMOGA arasındaki fark Şekil 2.7'de verilmiştir.

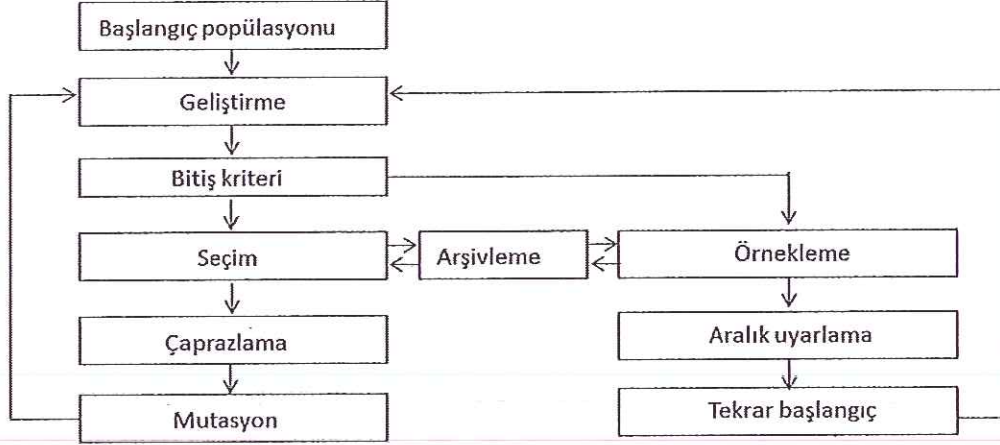


Şekil 2.7. Uygulanabilir dizayn aralığı [86]

Geleneksel optimizasyonda karar fonksiyonuna bağlı oluşturulan arama bölgesi, olası ve olası olmayan sınırları değerlendirilmeden uç sınırları belirler ve araştırmacıyı bu olasılıkları tek tek deneme arayışına sokar. ARMOGA'nın çözüm uzayı ise, olası ve olası olmayan parametrelerde uygun çözümleri sınırlar ve bu sınırlar içerisinde en iyi çözümlerin yığılmasını verir. Uyarlanabilir dizi, her jenerasyona uygulanır. Yeni karar uzayı, en iyi seçilen istatistiğe bağlı olarak tanımlanır [86].

Başlangıç popülasyonu, yeni karar uzayında gelişigüzel üretilir. Bu popülasyonun uygunluğu değerlendirildikten sonra, nesil sayısına bağlı olarak iyi kromozonlar seçilir ve çaprazlama işlemine tutulur. Mutasyonla oluşturulan yeni nesil, tekrar değerlendirilmeye tabi tutulur. ARMOGA'da yaratılan tüm jenerasyonlar, genetik operatörlerle yeni tasarım uzayına taşınır. Bu dizayn uzayında tüm jenerasyonların, örnekleme ile uyarlama aralıkları kontrol edilir. Örnekleme uygun olmayanlar, tekrar mutasyon işlemleri için geri gönderilir. Dizayn uzayına alınan uygun jenerasyonlar arasında en iyiler tercih edilir. Bu en iyiler, bir sonraki neslin oluşumunda başlangıç kabul edilir, genetik çözümleme

üretilen nesil sayısı kadar devam eder. Şekil 2.8’de ARMOGA’nın akış şeması verilmiştir [86].

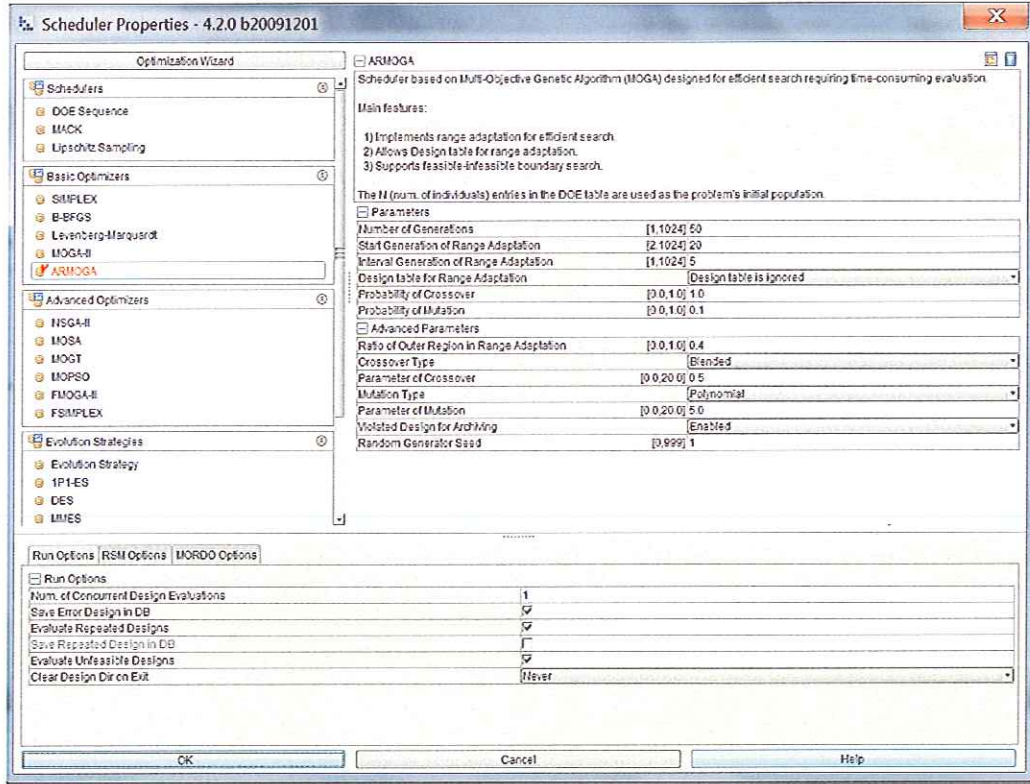


Şekil 2.8. ARMOGA akış şeması [86]

ARMOGA programıyla piston-prop düz uçuş optimizasyonu için başlangıç değer parametreleri aşağıdaki gibi seçilmiştir:

Başlangıç popülasyonu	: Sobol Dizisi
Popülasyon sayısı	: 252
Jenerasyon sayısı	: 232
Uyarlama aralığının başlangıç jenerasyonu	:20
Uyarlama aralığının jenerasyon arası	: 5
Geçiş olasılığı	: 1
Mutasyon olasılığı	: 0.1
Geçiş tipi	: BLX
Geçiş parametresi	: 0.5
Mutasyon tipi	: Çoklu yazılı mutasyon
Mutasyon parametresi	: 5

Seçilen genetik optimizasyon yöntemi ve parametrelerinin tümü Şekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.9. Optimizasyon yönetimi ve parametreleri

Optimizasyonda girdi verileri olarak seçilen maliyet ve çevre etkisini etkileyecek her girdi ürün için limit değerleri belirlenmiştir. Bu değerler Çizelge 2.5’de verilmiştir.

Çizelge 2.5. Optimizasyonda girdi verilerinin sınır değerleri

	<i>İrtifa (m)</i>	<i>HY (%)</i>	<i>Güç Ayarı (%)</i>
<i>En düşük</i>	1000	13	65
<i>En yüksek</i>	3000	18	75

Optimizasyonda üç amaç belirlenmiştir. Bunlar: ekserji veriminin enbüyüklenmesi, yakıtın birim ekserji maliyeti ve ürünün çevresel etkisinin enküçüklenmesidir. Bu amaçların gerçekleşmesi için girdi değişkenlerine bağlı karar fonksiyonlar tanımlanmıştır.

$$\text{Min}(c_Y) f(x_1) = \sum_{\text{min.}}^{\text{maks.}} (h(x_1); HY(x_1); PS(x_1)) \quad (2.37)$$

$$\text{Min}(b_p) f(x_2) = \sum_{\text{min.}}^{\text{maks.}} (h(x_2); HY(x_2); PS(x_2)) \quad (2.38)$$

$$\text{Maks}(\psi) f(x_3) = \sum_{\text{min.}}^{\text{maks.}} (h(x_3); HY(x_3); PS(x_3)) \quad (2.39)$$

GA'larda çözüm uzayında popülasyon üretimi, üretilen popülasyonda en iyi çözüme ulaşıncaya kadar devam eder. Eğer çözüm kümesinde sınırlama oluşturulmaz ise algoritma, ulaşacağı mükemmelliğe kadar işlemi devam ettirecektir. Gerçek durumda bu, sonsuzluğu ifade eder. Bu durum, hem olumlu hem de olumsuz değerlendirilebilir. Bu tür ısı sistemlerinde sonuçların tek parametreye indirilmesi uygulanabilirlik problemi yaratır. Ancak sınırlamaların oluşturulması, en iyi seçeneğinin birden fazla oluşturulması anlamına gelir. Bu da en iyiler arasındaki seçimi, daha rahat uygulama olanağı tanır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. LTO Safhası Bulguları

3.1.1. Enerji analizi bulguları

LTO safhasının büyük bir çoğunluğu deniz seviyesi şartlarında gerçekleşir. Bu nedenle LTO safhasında analiz yapılırken çevre şartları $P_0=101.32$ kPa ve $T_0=298$ K olarak ele alınmıştır. Enerji analizi ile elde edilen bulgular Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. LTO safhası enerji analizi bulguları

<i>Çalışma fazı</i>	<i>Motor gücü (%)</i>	\dot{m}_y (kg/s)	\dot{W} (kW)	\dot{E}_y (kW)	\dot{Q}_{kay} (kW)	η (%)
Kalkış	100	0.01	111.90	444.30	332.40	25.19
Tırmanma	85	0.008	95.12	355.44	260.32	26.76
Yaklaşma	45	0.0048	50.36	213.26	162.91	23.61
Taksi	12	0.0013	13.43	57.76	44.33	23.25

En düşük enerji ihtiyacına yani en düşük motor gücünde, taksi fazında ihtiyaç vardır. Bu nedenle taksi fazı; sisteme giren enerji miktarının, dolayısıyla kayıp enerji miktarının en düşük olduğu fazdır. En düşük enerji verimi taksi fazında görülürken, en yüksek enerji veriminin ise tırmanma fazında olduğu görülmektedir.

3.1.2. Ekserji analizi bulguları

Ekserji analizi ile elde edilen sonuçlar Çizelge 3.2'de verilmiştir. Tırmanma fazı % 24.95 ile en fazla ekserji verimine sahiptir. Bu fazda ekserji yıkımı 171.84 kW'tır. Ekserji verimi açısından sırasıyla kalkış fazı % 23.48 ve yaklaşma fazı % 22.02 değerleri ile ikinci ve üçüncü sırada olduğu görülmüştür. Taksi fazı % 21.68'lik değeri ile en düşük ekserji veriminin görüldüğü fazdır. En

yüksek ekserji verimi ile en düşük ekserji verimi arasında 3.27'lik bir fark olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.2. LTO safhası ekserji analiz sonuçları

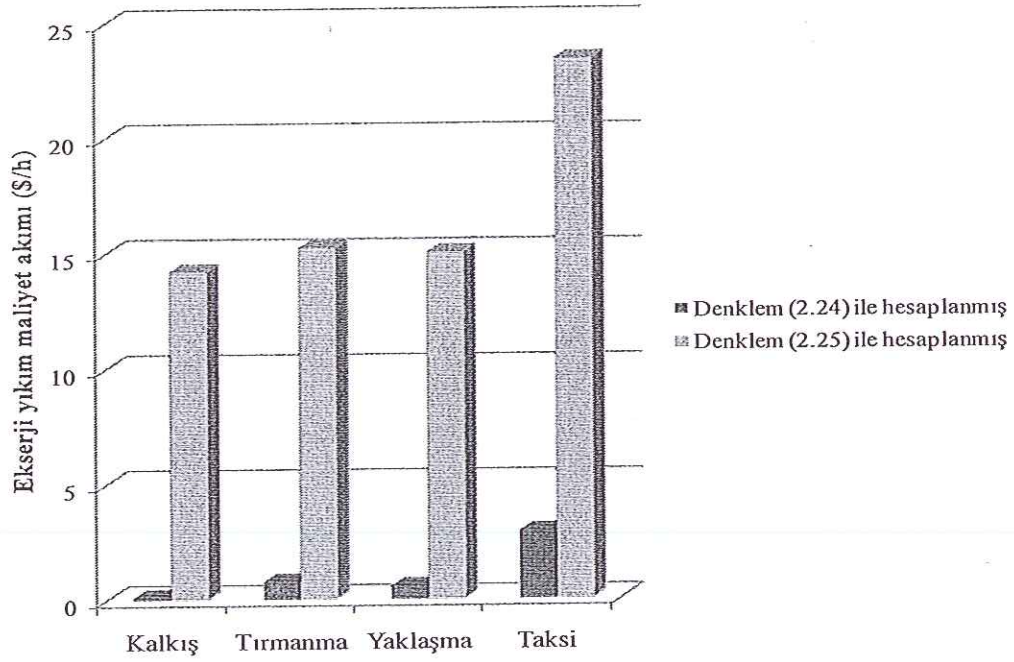
<i>Çalışma fazı</i>	$\dot{E}x_{i\dot{s}}$ (kW)	$\dot{E}x_{yık}$ (kW)	$\dot{E}x_{egz}$ (kW)	$\dot{E}x_{kay}$ (kW)	$\dot{E}x_g$ (kW)	ψ (%)
Kalkış	111.90	248.55	68.02	48.09	476.51	23.48
Tırmanma	95.12	196.65	54.79	34.65	381.21	24.95
Yaklaşma	50.36	118.58	37.84	21.95	228.73	22.02
Taksi	13.43	33.77	8.89	5.86	61.95	21.68

Toplam sürenin % 1.69'unu oluşturan kalkış fazı toplam içindeki ortalama % 42'lik payı ile en yüksek ekserji akım değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Buna karşın toplam sürenin % 67.42'ini oluşturan taksi fazı toplam içindeki ortalama % 5'lik payı ile en düşük ekserji akım değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

3.1.3. Ekserjoekonomik analiz bulguları

Tüm uçağın bakım maliyeti 3,409 \$/yıl'dır. Tüm uçak bakım maliyeti içinde, motor maliyetinin sadece % 8 olduğu kabul edilirse [36, 87], seviyelendirilmiş motor bakım maliyeti 404.93 \$/yıl olarak elde edilir. Seviyelendirilmiş yıllık yakıt maliyeti 63,507.84 \$ olarak elde edilir.

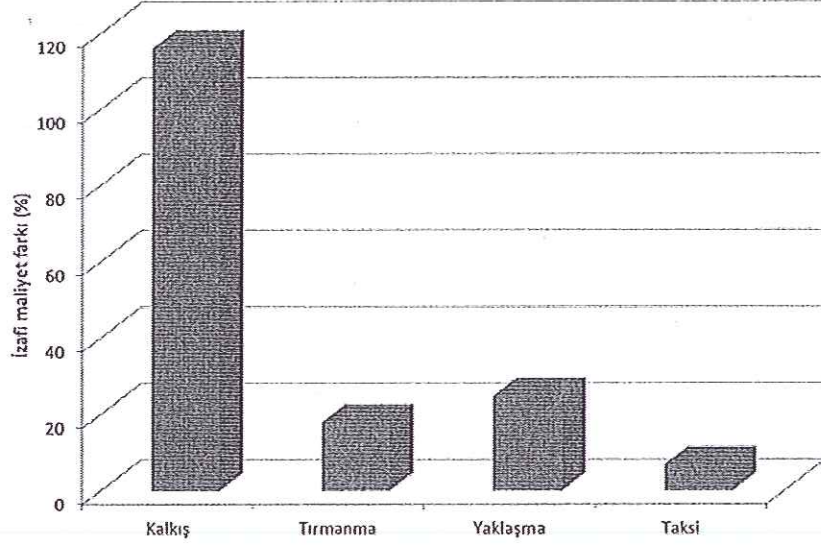
LTO safhasının tüm fazlar için ekserji yıkımı maliyet akımları; hem sabit yakıt ekserji akımı için hem de sabit ürün ekserji akımı için ayrı ayrı Şekil 3.1'de verilmiştir. Buradaki en önemli nokta, her bir fazın diğer fazlara göre sahip olduğu maliyet oranının her iki şekilde de aynı olması, fakat maliyet akımlarının ortalama ürün maliyetlerinin sabit yakıt kabul edildiğini daha yüksek olmasıdır. Ekserji yıkımı maliyet akımı hesaplama metodu, sabit yakıt ekserjisi ve sabit ürün ekserjisi, minimum ve maksimum limitleri göstermektedir [63].



Şekil 3.1. Ekserjî yıkımı maliyet akımı (c_F ve c_P hesaplamaları ile)

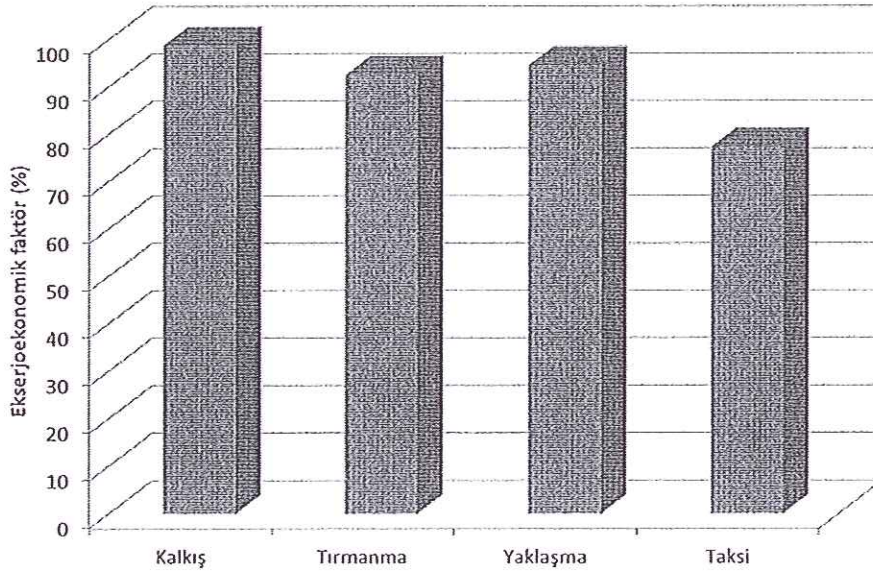
Şekil 3.1’de görüldüğü üzere, ürün ekserjisinin sabit olarak kabul edilen yaklaşımda taksi fazının ekserjî yıkımı maliyet akımı, diğer üç fazdaki değerlerin toplamına eşit olmaktadır. Bunun sebebi, taksi fazının süresinin uzun olması nedeni ile tüketilen yakıt miktarının fazla olması olarak gösterilebilir.

İzafi maliyet farkı değerleri Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Bu şekilde, kalkış fazının % 116.06 ile en yüksek izafi maliyet farkının görüldüğü faz olduğu görülmektedir. Kalkış fazını, % 24.89 ve % 18.00 izafi maliyet farkı değerleri ile sırasıyla yaklaşma ve tırmanma fazları izlemektedir. Taksi fazı ise % 6.94’lik izafi maliyet farkı değeri ile en düşüktür.



Şekil 3.2. LTO safhası izafi maliyet farkları

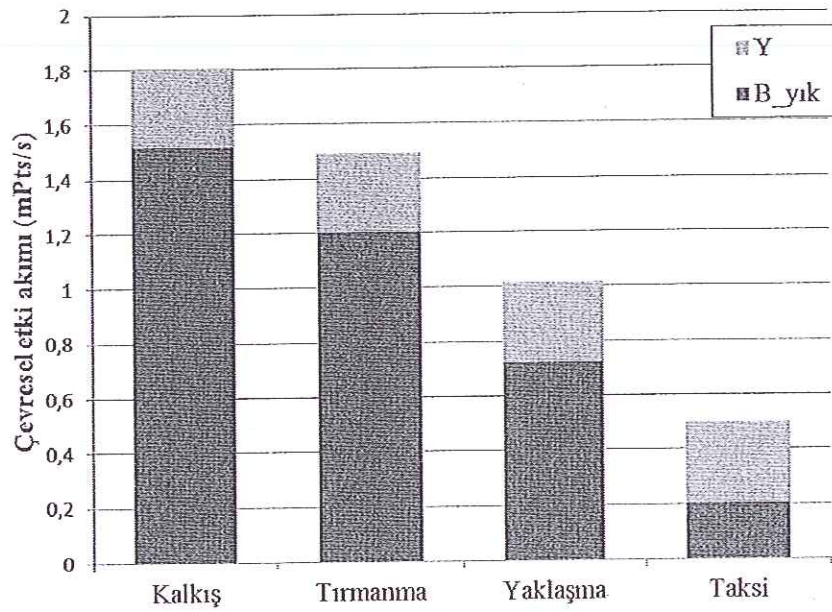
Tüm fazlar için ekserjoekonomik faktör değerleri Şekil 3.3'de verilmiştir. Kalkış fazı tüm fazlar arasında % 98.81 ile en yüksek değerde iken, taksi fazı % 77.34 ile en düşük olanıdır. Yaklaşma ve tırmanma fazı ise % 94.54 ve % 92.62 değerleri ile sırasıyla ikinci ve üçüncü sırada yer almaktadır.



Şekil 3.3. LTO safhası ekserjoekonomik faktör değerleri

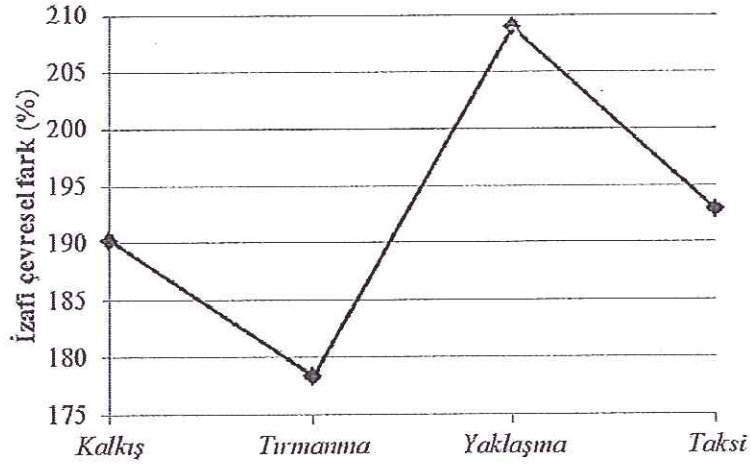
3.1.4. Ekserjoçevresel analiz bulguları

Ekserji yıkımı sebebiyle oluşan çevresel etki akımları ile motor sebebi ile oluşan çevresel etki akımlarının toplamı toplam çevresel etki akımını verecektir. Şekil 3.4’de LTO fazlarının toplam çevresel etki akımları gösterilmiştir. Ekserji yıkımının en fazla olduğu kalkış fazında en fazla çevresel etki akımı hesaplanmıştır. Buna karşın en az ekserji yıkımının olduğu taksi fazında da en az çevresel etki akımı olduğu görülmüştür.



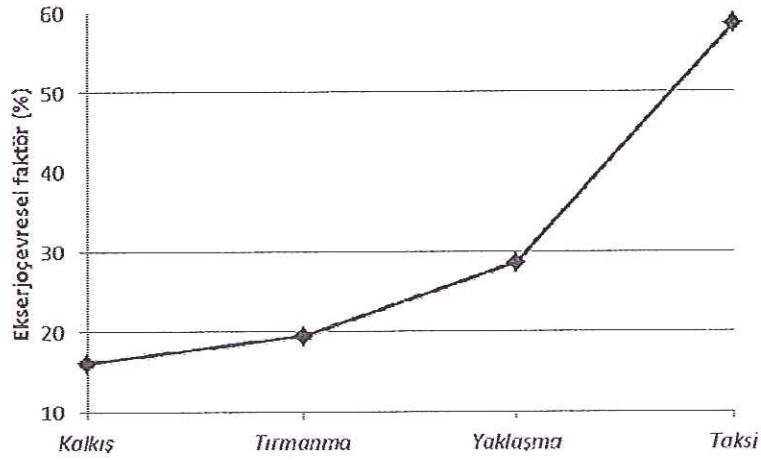
Şekil 3.4. LTO safhasında ekserji yıkımı nedeniyle oluşan çevresel etki değerleri

Yapılan hesaplamalar sonucunda LTO fazlarında elde edilen izafi çevresel fark ve ekserjoçevresel faktör değerleri Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’da gösterilmiştir. İzafi çevresel farklara bakıldığında, bu değerlerin tüm fazlarda eşit sayılacak derecede yüksek olduğu görülmektedir. İzafi çevresel fark ne kadar yüksek olursa, iyileştirme için harcanacak çaba daha az olacaktır. Bu nedenle LTO safhası için yapılacak iyileştirmede, yaklaşma, taksi, kalkış ve tırmanma sırasının izlenmesi uygun olacaktır.



Şekil 3.5. LTO safhasında izafi çevresel fark

Ekserjoçevresel faktör değerlerine bakıldığında, çevresel etki altındaki fazların kararlılığı görülmektedir. En yüksek ekserjoçevresel faktör taksi fazında iken, en düşük ekserjoçevresel faktörün kalkış fazında olduğu görülmüştür.



Şekil 3.6. LTO safhasında ekserjoçevresel faktör

3.2. Düz Uçuş Safhası Bulguları

Doğal emişli piston-prop uçakları için optimum uçuş şartı 2100 m ile 2400 m arasında değişmektedir. Bu irtifalarda motor, silindir içine istediği miktarda havayı alabilir. Ancak aşırı sıcak günlerde optimum uçuş irtifası 1200 m ile 1500 m arasında değişirken, aşırı soğuk günlerde 3000 m civarında olabilmektedir. Bu nedenle standart çevre şartlarındaki en iyi sonuçların elde edildiği noktaların

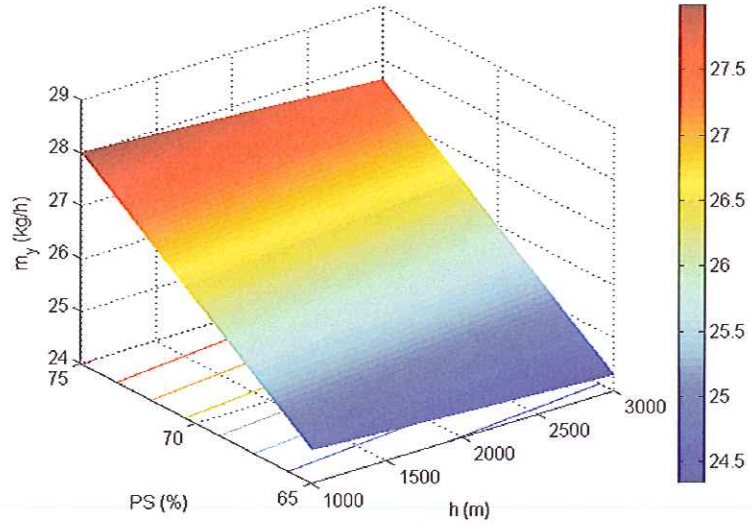
görülebilmesi için yapılacak olan inceleme 1000 m ile 3000 m irtifalar arasında olmalıdır.

Diğer bir kritik motor parametresi ise HY oranıdır. İzooktan için stokiometrik HY oranı yaklaşık olarak 15 civarındadır. Yanma her zaman stokiometrik olarak gerçekleşmemektedir. Fakir karışimli yanma veya zengin karışimli yanma oluşabilir. Maksimum güç zengin yakıt karışımında 13 HY oranında sağlanırken, en ekonomik uçuş (seyrüseferde) 18 HY oranında sağlanabilir. Bu nedenle yapılacak olan analizde HY oranı 13 ile 18 arasında incelenmiştir [21].

İrtifa ve HY oranı değişiminin, Uçuş El Kitaplarında belirtilen ekonomik ve performans güç ayarlarında (% 65 ile % 75) ayrı ayrı incelenmesi gerekir. Uçuş süresinin önemli olmadığı ekonomik uçuş istendiği şartlarda % 65 güç ayarı seçilirken, uçuş süresinin azaltılması istenildiği ekonomikliğin düşünülmediği şartlarda % 75 güç ayarı tercih edilmektedir. Düz uçuş safhasında değişen çevre şartları nedeniyle referans çevre değerleri Model 2 referans alınarak hesaplanmış ve irtifa değişimi gösterilmiştir.

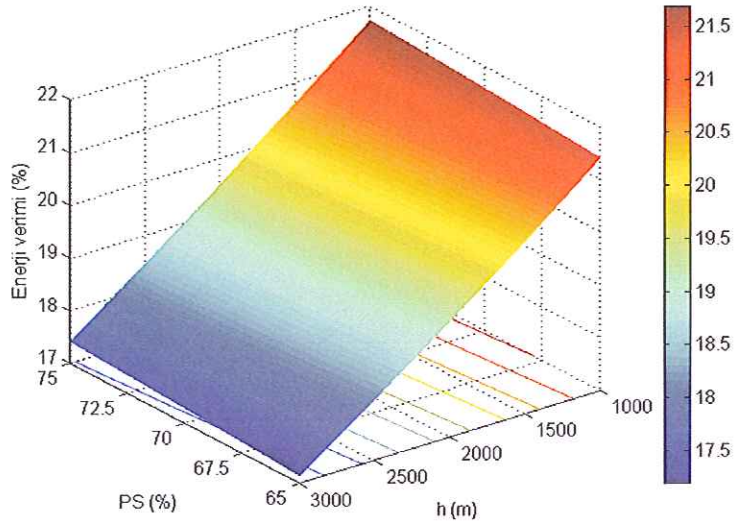
3.2.1. Düz uçuş safhası enerji analizi bulguları

Yakıt tüketiminin irtifa ve güç ayarı ile değişimi Şekil 3.7'de verilmiştir. En fazla yakıt tüketimi 28.02 kg/h ile 1000 m irtifa ve % 75 güç ayarında olurken, en düşük yakıt tüketimi 24.31 kg/h ile 3000 m irtifa ve % 65 güç ayarında görülmüştür. Tüm irtifalarda güç ayarı artışıyla yakıt tüketiminin de arttığı görülmüştür. İrtifa arttıkça yakıtın yoğunluğunun artması, aynı hacimde alınmış olan yakıtın kütleli olarak daha az yakılmasına neden olmakta, bu sebeple irtifa artışıyla kg-yakıt tüketiminin azalmasını neden olmaktadır.



Şekil 3.7. Yakıt tüketiminin güç ayarı ve irtifa ile değişimi

Enerji veriminin irtifa ve güç ayarı ile değişimi Şekil 3.8’de verilmiştir. Enerji verimi güç ayarı artışı ile artarken, irtifa artışı ile azalmaktadır. Maksimum enerji verimi % 21.73 ile 1000 m irtifa ve % 75 güç ayarında görülmüştür. Bunun yanında minimum enerji verimi % 17.16 ile 3000 m irtifa ve % 65 güç ayarında görülmüştür. İrtifa artışı ile enerji veriminin azalmasının sebebi, kg-yakıt tüketiminin azalmasıyla sisteme giren enerji değerindeki azalma gösterilebilir.



Şekil 3.8. Enerji veriminin güç ayarı ve irtifa ile değişimi

Yakıt tüketimi ve enerji veriminin irtifa ve güç ayarı ile değişimi Çizelge 3.3’de verilmiştir. Belirlenen sınırlar içinde ve aynı güç ayarında en yüksek yakıt tüketiminin olduğu 1000 m irtifasında en yüksek enerji verimi hesaplanmıştır. İrtifa artışıyla hem yakıt tüketimi hem de enerji verimi azalmaktadır.

Çizelge 3.3. Düz uçuş safhası enerji analiz bulguları

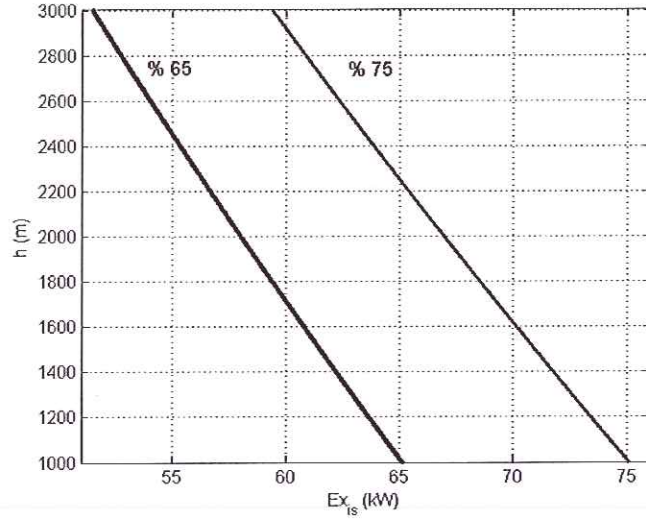
	<i>En yüksek</i>		<i>En düşük</i>	
<i>Yakıt tüketimi (kg/h)</i>	28.02	1000 m % 75 güç ayarı	24.31	3000 m % 65 güç ayarı
<i>Enerji verimi (%)</i>	21.73	1000 m % 75 güç ayarı	17.16	3000 m % 65 güç ayarı

Yapılan hesaplamalarda giren enerjinin % 21.73’ü yararlı işe dönüştürülürken, % 78.27’sinin kayıp (egzozdan atılan enerji, yağlama ile atılan enerji ve motor cidarlarından atılan enerji gibi) olduğu görülmüştür. Bulunan bu değerler literatürde verilmiş olan Ref. [14, 18] değerler ile de tutarlılık göstermektedir.

3.2.2. Düz uçuş safhası ekserji analizi bulguları

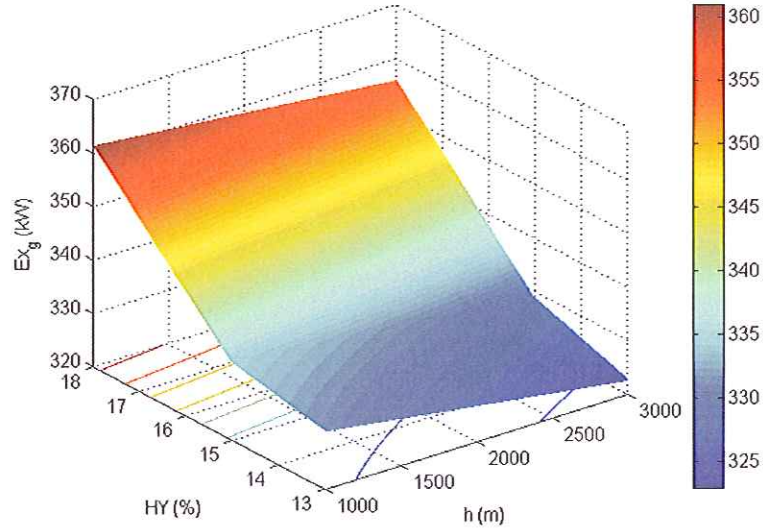
Ekserji analizi hesabında çevre şartlarının irtifa ile değiştiği kabul edilmiş ve bu kapsamda incelemeler yapılmıştır. İncelemeler hem % 65 güç ayarı hem de % 75 güç ayarı için ayrı ayrı yapılarak, ekserji analizi sonucundaki en düşük ve en yüksek değerler elde edilmiştir.

Ekserji, maksimum iş yapabilme potansiyeli olarak tanımlandığı için enerji analizi ile elde edilen iş, doğrudan ekserjiye eşit olacaktır. Efektif güç ekserji akımı, motor gücünün sabit kabul edilmesi nedeniyle HY değişimi ile değişmeyecek, sadece irtifa ile değişiklik gösterecektir. Efektif güç ekserji akımının irtifa ile değişimi Şekil 3.9’da hem % 65 güç ayarı için hem de % 75 güç ayarı için verilmiştir. En yüksek efektif güç ekserji akımı % 75 güç ayarı ve 1000 m irtifada 75.13 kW olduğu görülürken, en düşük efektif güç ekserji akımı ise % 65 güç ayarı ve 3000 m irtifada 51.48 kW olduğu görülmüştür.

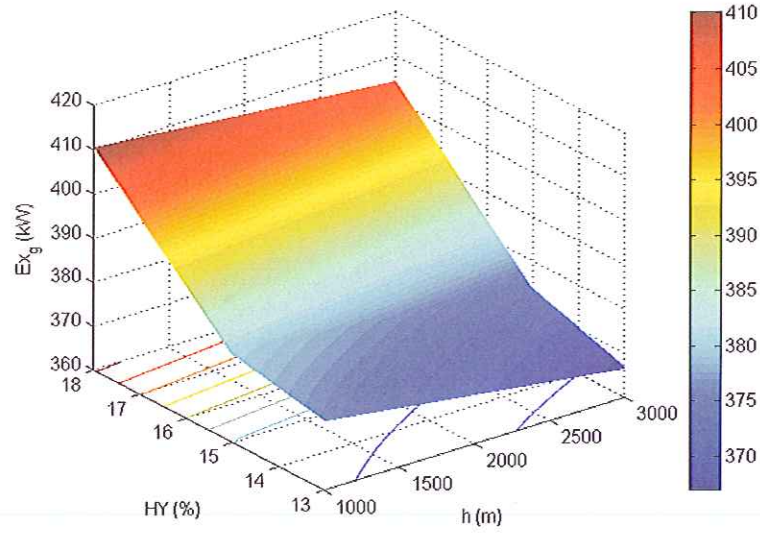


Şekil 3.9. % 65 ve % 75 güç ayarları için efektif güç ekserji akımının irtifa ile değişimi

Giren ekserji akımının, irtifa ve HY oranı ile değişimi % 65 güç ayarı için Şekil 3.10'da, % 75 güç ayarı için Şekil 3.11'de verilmiştir. En yüksek giren ekserji akımı, % 75 güç ayarı, 1000 m irtifa ve 18 HY oranında, 410.60 kW olduğu görülmüştür. Bunun yanında en düşük giren ekserji akımı ise % 65 güç ayarı, 3000 m ve 13 HY oranında, 322.60 kW olduğu görülmüştür.



Şekil 3.10. % 65 güç ayarında giren ekserji akımının HY oranı ve irtifa ile değişimi



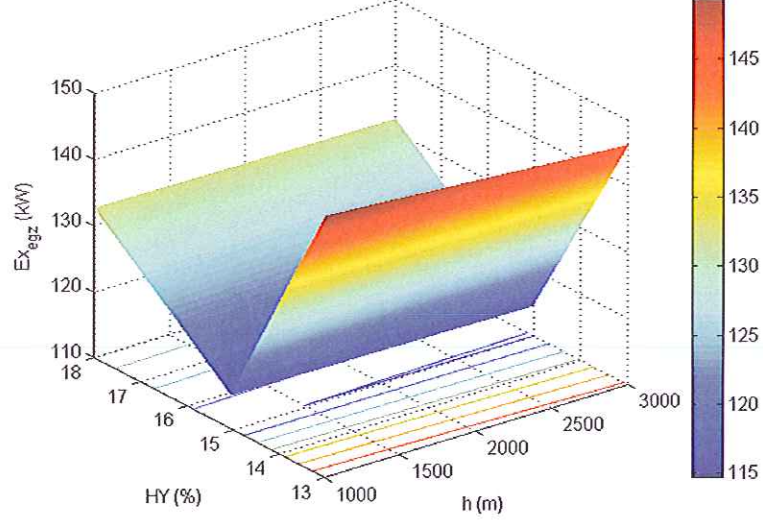
Şekil 3.11. % 75 güç ayarında giren ekserji akımının HY oranı ve irtifa ile değişimi

Giren ekserji akımı, yapılan hesaplamalarda irtifa artışıyla azalırken, HY oranının artmasıyla artmıştır. Aynı miktardaki yakıtın daha az hava ile yakılması (zengin karışım) daha az giren ekserji akımı oluşmasına neden olurken, stokiometrik yanmaya kadar az miktarda da olsa bir artış görülmüştür. Sonrasında ise oksijen fazla yanmaya (fakir karışım) yaklaştıkça giren ekserji akımında gözle görülür bir artış olmuştur.

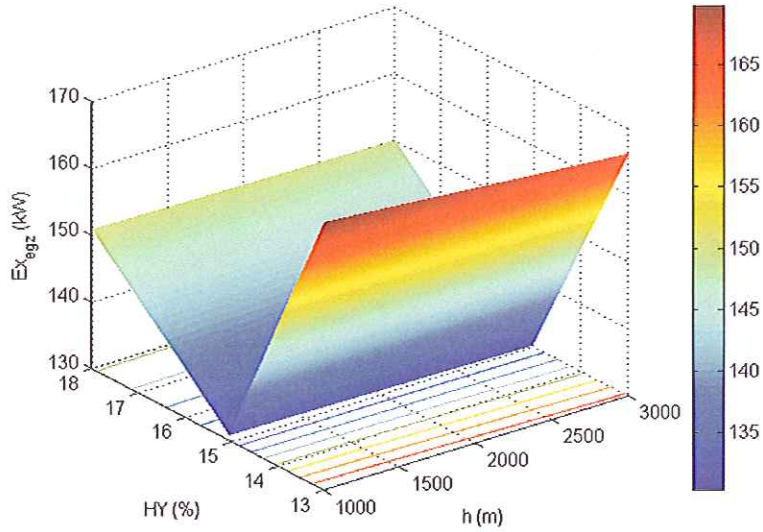
İrtifa artışıyla giren ekserji akımının azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni olarak, irtifa artışıyla azalan özgül yakıt ekserjisi gösterilebilir. Giren ekserji akımı, Ek-1’de anlatılan 1. Yöntem ile bulunan yakıtın özgül ekserjisinin kullanılmasıyla hesaplanmış olsaydı, sadece yakıtın bir fonksiyonu olmaktadır. Yapılan hesaplamalarda 1 saatlik düz uçuşta yakıt tüketimi sabit olarak kabul edildiği için, irtifa ile tüketilen yakıt miktarı sadece kendi yoğunluğuna bağlı olarak değişecek, bu da giren ekserji akımında büyük bir değişime neden olmayacaktır. Fakat Ek-1’de anlatılan 2. yöntemin uygulanmasıyla referans çevrenin şartları da göz önüne alınmış, böylece belirtilen irtifadaki giren ekserji akımı daha doğru bir şekilde hesaplanmıştır.

Egzoz ekserji akımının irtifa ve HY oranı ile değişimi, % 65 güç ayarı için Şekil 3.12’de, % 75 güç ayarı için Şekil 3.13’de verilmiştir. En yüksek egzoz ekserji akımının, % 75 güç ayarı, 1000 m irtifa ve 13 HY oranında, 170.05 kW olduğu görülmüştür. Bunun yanında en düşük egzoz ekserji akımının ise % 65 güç

ayar, 3000 m ve 15.054 HY oranında, 114.45 kW olduğu görülmüştür. Bu değerler 1050 K egzoz çıkış sıcaklığı kabulü ışığında gerçekleştirilmiştir.



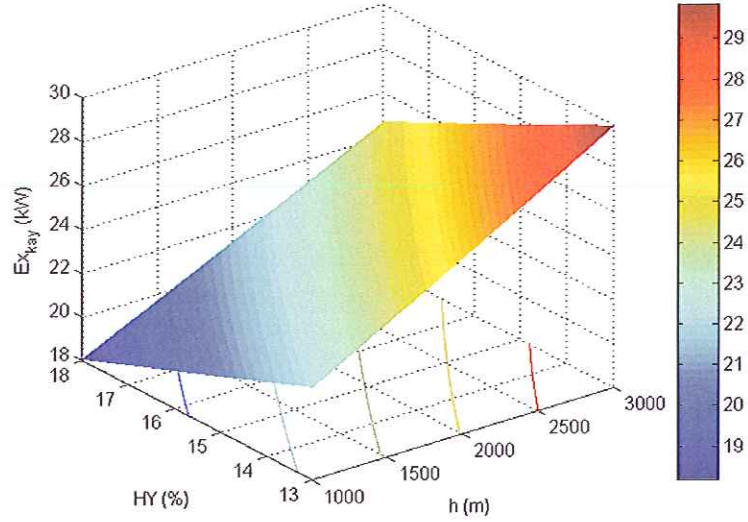
Şekil 3.12. % 65 güç ayarında egzoz ekserji akımının HY oranı ve irtifa ile değişimi



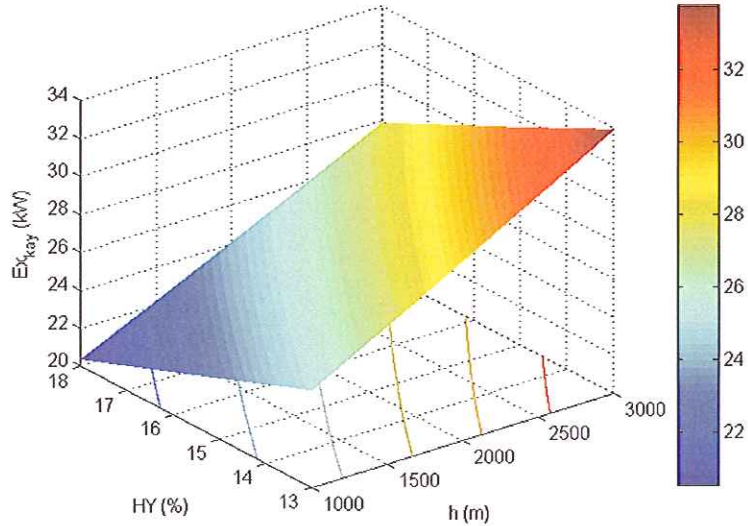
Şekil 3.13. % 75 güç ayarında egzoz ekserji akımının HY oranı ve irtifa ile değişimi

İrtifa artışıyla az da olsa azalma gösteren egzoz ekserji akımı, stokiometrik yanma seviyesinde en düşük değerine ulaşmıştır. Stokiometrik yanma şartından uzaklaştıkça (zengin veya fakir karışıma doğru ilerledikçe) egzoz ekserji akımının arttığı görülmüştür.

Ekserji kaybı akımının irtifa ve HY oranı ile değişimi % 65 güç ayarı için Şekil 3.14'de, % 75 güç ayarı için Şekil 3.15'de verilmiştir. En yüksek ekserji kaybı akımının, % 75 güç ayarı, 3000 m irtifa ve 13 HY oranında, 33.86 kW olduğu görülmüştür. Bunun yanında en düşük ekserji kaybı akımının ise % 65 güç ayarı, 1000 m ve 18 HY oranında, 18.09 kW olduğu görülmüştür.



Şekil 3.14. % 65 güç ayarında ekserji kaybı akımının HY oranı ve irtifa ile değişimi

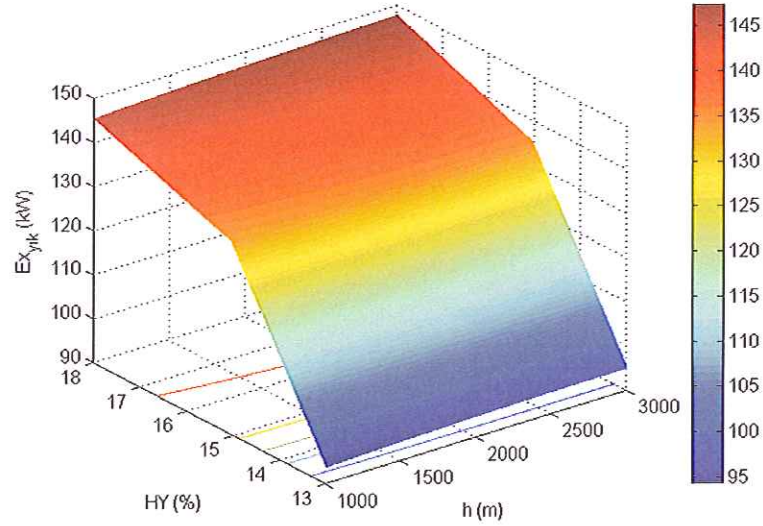


Şekil 3.15. % 75 güç ayarında ekserji kaybı akımının HY oranı ve irtifa ile değişimi

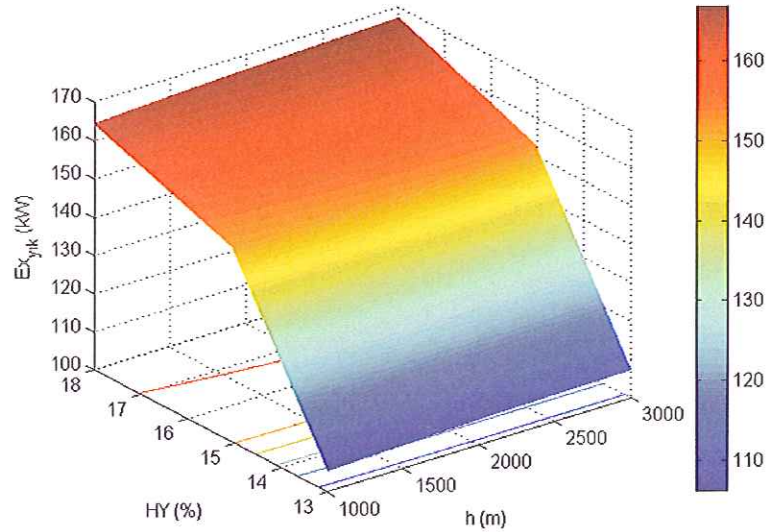
Ekserji kaybı akımı, soğutma havasının 330 K sıcaklığında sabit olduğu kabul edilerek hesaplanmıştır. Motor çevresinde gerçekleşen ısı kayıplarının ve

soğutma hava sıcaklığının iyi belirlenebilmesi için uygun bir ölçüm noktasının seçilmesi gerekir. Sabit soğutma hava sıcaklığı altında yapılan parametrik analiz sonucunda, irtifa artışı ile artan ekserji kaybı akımının HY oranında artış ile azaldığı görülmüştür.

Ekserji yıkımı akımının irtifa ve HY oranı ile değişimi % 65 güç ayarı için Şekil 3.16'da, % 75 güç ayarı için Şekil 3.17'de verilmiştir. En yüksek ekserji yıkımı akımının, % 75 güç ayarı, 3000 m irtifa ve 18 HY oranında, 167.10 kW olduğu görülmüştür. Bunun yanında en düşük ekserji yıkımı akımının ise % 65 güç ayarı, 1000 m ve 13 HY oranında, 93.83 kW olduğu görülmüştür.



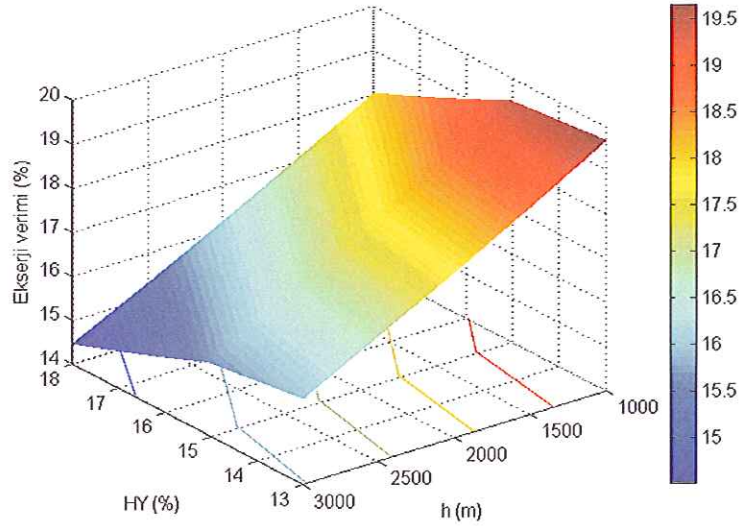
Şekil 3.16. % 65 güç ayarında ekserji yıkımı akımının HY oranı ve irtifa ile değişimi



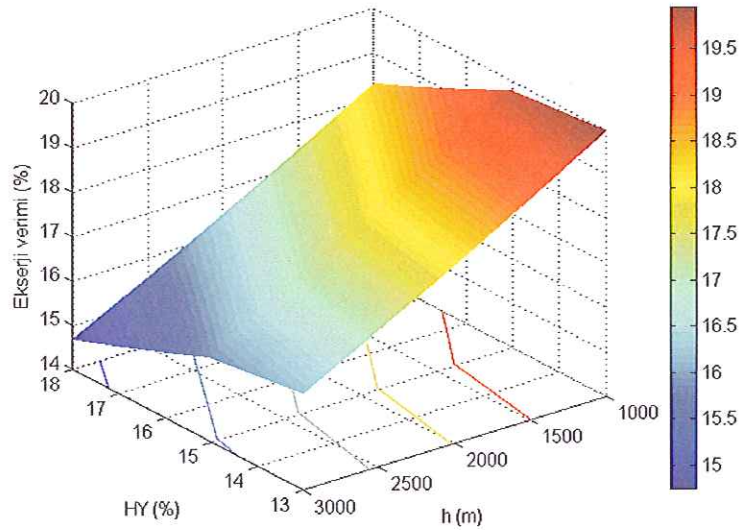
Şekil 3.17. % 75 güç ayarında ekserji yıkımı akımının HY oranı ve irtifa ile değişimi

Hem irtifa artışıyla, hem de HY oranı artışıyla ekserji yıkımı artmaktadır. Ekserji yıkımı akımının en yüksek olduğu noktada, en yüksek giren ekserji akımının olduğu görülmüştür. Bununla birlikte en düşük ekserji verimi de bu noktada elde edilmiştir.

Ekserji veriminin irtifa ve HY oranı ile değişimi % 65 güç ayarı için Şekil 3.18'de, % 75 güç ayarı için Şekil 3.19'da verilmiştir. En yüksek ekserji veriminin, % 75 güç ayarı, 1000 m irtifa ve 13 HY oranında, % 19.98 olduğu görülmüştür. Bunun yanında en düşük ekserji veriminin ise % 65 güç ayarı, 3000 m ve 18 HY oranında, % 14.47 olduğu görülmüştür.



Şekil 3.18. % 65 güç ayarında ekserji veriminin HY oranı ve irtifa ile değişimi



Şekil 3.19. % 75 güç ayarında ekserji veriminin HY oranı ve irtifa ile değişimi

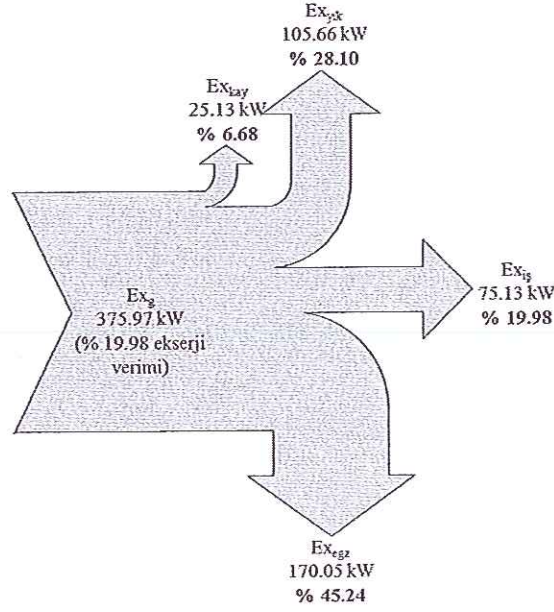
Ekserji verimi hem irtifa artışıyla hem de HY oranı artışıyla azalmaktadır. Ref. [40]'da belirtilen “HY oranındaki artış ekserji veriminde azalmaya neden olur” sonucunun, piston-prop uçak motorlarında da elde edildiği görülmüştür. Ekserji analizi sonucunda elde edilmiş en düşük ve en yüksek değerler ve elde edildikleri noktalar Çizelge 3.4’de verilmiştir. Çizelgeden anlaşılacağı üzere, en yüksek ekserji veriminin görüldüğü 1000 m irtifa ve 13 HY oranında en yüksek egzoz ekserji akımı ve efektif güç ekserji akımı görülürken, en düşük ekserji yıkım akımı ve giren ekserji akımı görülmektedir. Etelen ve Rosen [29]’in bahsettiği turbojet motorlu uçaklardaki irtifa artışıyla ekserji veriminin azalmasının, yapılan incelemeler sonucunda piston-prop uçaklar için de geçerli olduğu görülmüştür.

Çizelge 3.4. Düz uçuş safhası ekserji analiz bulguları

	% 65 Güç Ayarı		% 75 Güç Ayarı	
	En yüksek	En düşük	En yüksek	En düşük
$\dot{E}_{x_{yık}} (kW)$	147.70 3000 m 18 HY	93.83 1000 m 13 HY	167.10 3000 m 18 HY	105.70 1000 m 13 HY
$\dot{E}_{x_{egz}} (kW)$	149.65 1000 m 13 HY	114.45 3000 m 15.054 HY	170.05 1000 m 13 HY	130.05 3000 m 15.054 HY
$\dot{E}_{x_{kay}} (kW)$	29.94 3000 m 13 HY	18.09 1000 m 18 HY	33.86 3000 m 13 HY	20.39 1000 m 18 HY
$\dot{E}_{x_g} (kW)$	361.30 1000 m 18 HY	322.61 3000 m 13 HY	410.60 1000 m 18 HY	366.60 3000 m 13 HY
ψ (%)	19.68 1000 m 13 HY	14.47 3000 m 18 HY	19.98 1000 m 13 HY	14.69 3000 m 18 HY

Ekserji analizi sonucunda elde edilen değerler Şekil 3.20’deki Grassmann diyagramında verilmiştir. Bu grafik, en yüksek ekserji veriminin (% 19.98) sağlandığı noktadaki ekserji verileri alınarak hazırlanmıştır. Enerji analizi sonucunda elde edilen % 21.70’lik yararlı işin, ekserji analizi sonucunda % 19.98 olduğu görülmektedir. Finler ve yağlama yağı gibi bölgelerden atılan ısı sebebiyle

oluşan ekserji kaybı, giren ekserjinin % 6.68'ini oluşturmuştur. Egzozdan atılan ekserji % 45.24'lük kısmı oluştururken, ekserji yıkımı % 28.10'luk kısmı oluşturmaktadır.

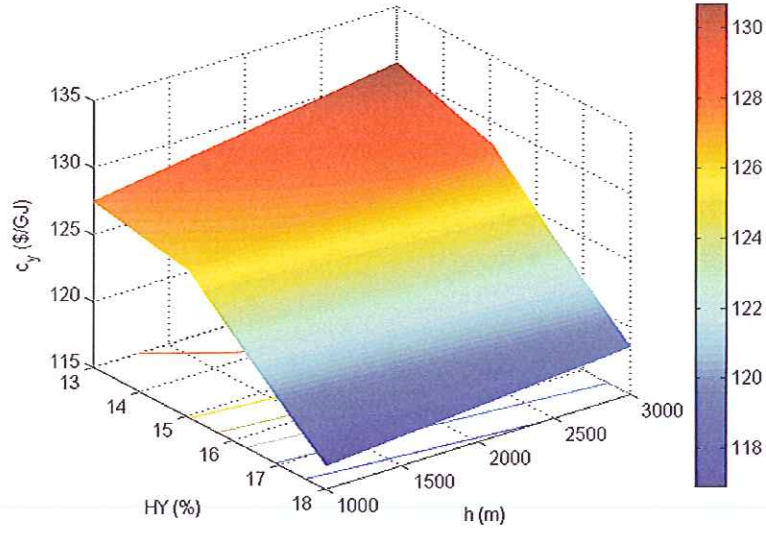


Şekil 3.20. Ekserji akışının Grassmann diyagramı

3.2.3. Düz uçuş safhası ekserjoekonomik analiz bulguları

Ekserjoekonomik analiz, Bölüm 3.1.3'deki kabuller kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

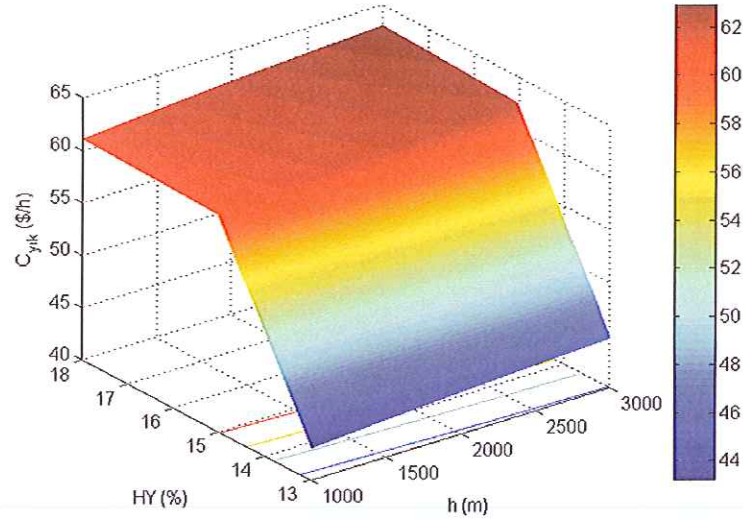
Sistemde kullanılan yakıtın birim ekserji maliyetinin irtifa ve HY oranı ile değişimi % 65 güç ayarı ve % 75 güç ayarları için Şekil 3.21'de verilmiştir. En yüksek yakıtın birim ekserji maliyetinin, 3000 m irtifa ve 13 HY oranında, 130.80 \$/GJ olduğu görülmüştür. Bunun yanında en düşük yakıtın birim ekserji maliyetinin ise 1000 m ve 18 HY oranında, 116.80 \$/GJ olduğu görülmüştür.



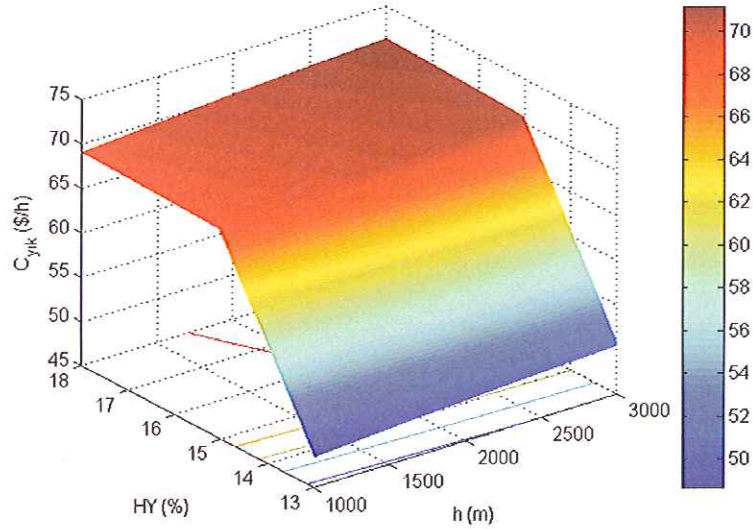
Şekil 3.21. % 65 ve % 75 güç ayarlarında yakıtın ortalama birim ekserji maliyetinin HY oranı ve irtifa ile değişimi

Yakıtın ortalama birim ekserji maliyeti, irtifa artışıyla artarken, HY oranı artışıyla azalma göstermektedir. Elde edilen sonuçlarda birim ekserji maliyetinin irtifa ile azalmasının sebebi olarak, saatlik yakıt tüketimindeki azalma gösterilebilir.

Ekserji yıkım maliyetinin gerçek değerinin, sabit yakıt veya sabit ürün yaklaşımı ile hesaplanan değerler arasında olduğu bilinmektedir. Yapılan bu çalışmada sabit yakıt yaklaşımı kullanılarak inceleme yapılmıştır. Sabit yakıt ekserji akımı için elde edilen ekserji yıkımı maliyet akımının irtifa ve HY oranı ile değişimi % 65 güç ayarı için Şekil 3.22’de, % 75 güç ayarı için Şekil 3.23’de verilmiştir. En yüksek ekserji yıkım maliyetinin, % 75 güç ayarı, 3000 m irtifa ve 18 HY oranında, 71.35 \$/h olduğu görülmüştür. Bunun yanında en düşük ekserji yıkım maliyetinin ise % 65 güç ayarı, 1000 m ve 13 HY oranında, 43.07 \$/h olduğu görülmüştür.



Şekil 3.22. % 65 güç ayarında ekserji yıkımı maliyet akımının HY oranı ve irtifa ile değişimi

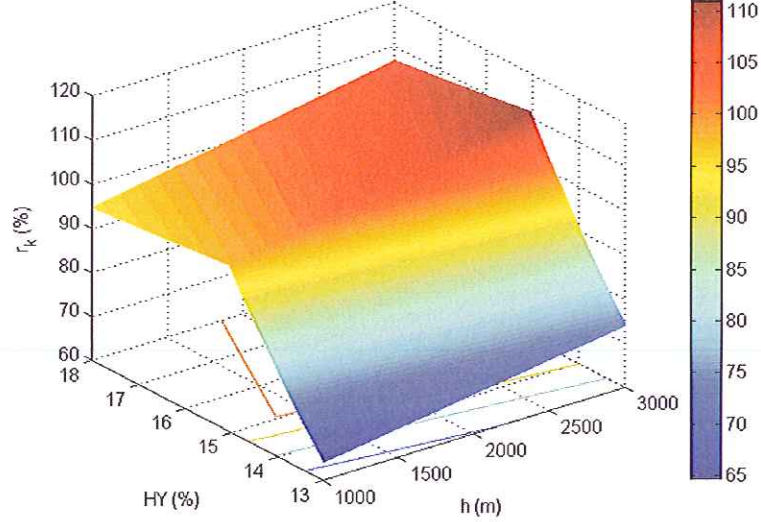


Şekil 3.23. % 75 güç ayarında ekserji yıkımı maliyet akımının HY oranı ve irtifa ile değişimi

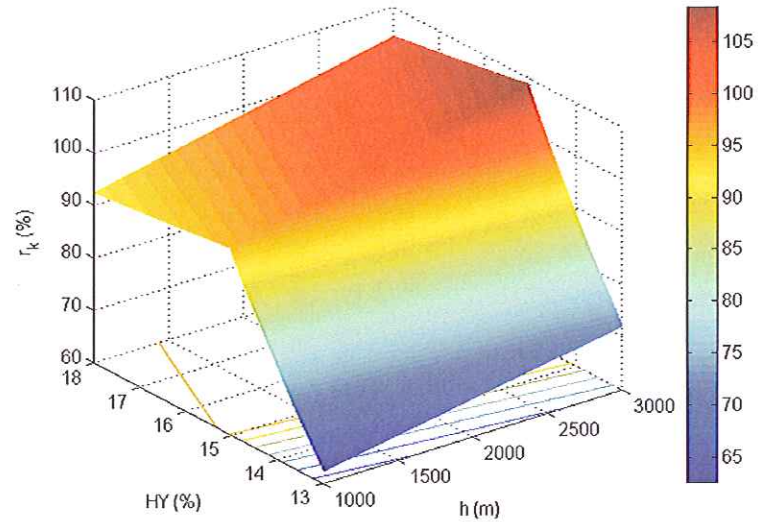
Yakıtın ortalama birim ekserji maliyeti ile hesaplanan ekserji yıkım maliyeti, irtifa ve HY oranı karşısında ekserji yıkım akımı maliyeti ile aynı özelliği göstermiştir. Dolayısıyla en düşük ekserji yıkımı akımında, en düşük ekserji yıkım maliyeti elde edilmiştir.

İzafi maliyet farkının irtifa ve HY oranı ile değişimi % 65 güç ayarı için Şekil 3.24'de, % 75 güç ayarı için Şekil 3.25'de verilmiştir. En yüksek izafi maliyet farkının, % 65 güç ayarı, 3000 m irtifada ve 15.054 HY oranında, %

111.30 olduğu görülmüştür. Bunun yanında en düşük izafi maliyet farkının ise % 75 güç ayarı, 1000 m irtifada ve 13 HY oranında, % 62.29 olduğu görülmüştür.

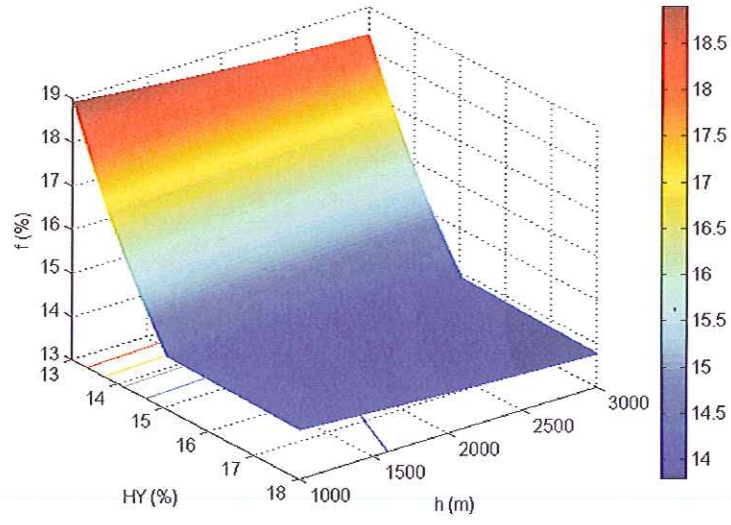


Şekil 3.24. % 65 güç ayarında izafi maliyet farkının HY oranı ve irtifa ile değişimi

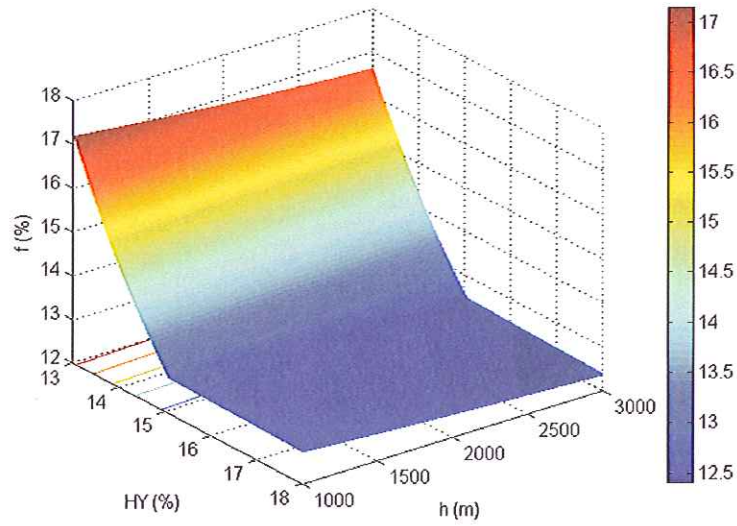


Şekil 3.25. % 75 güç ayarında izafi maliyet farkının HY oranı ve irtifa ile değişimi

Ekserjoekonomik faktörün irtifa ve HY oranı ile değişimi % 65 güç ayarı için Şekil 3.26'da, % 75 güç ayarı için Şekil 3.27'de verilmiştir. En yüksek ekserjoekonomik faktörün, % 65 güç ayarı, 1000 m irtifa ve 13 HY oranında, % 18.94 olduğu görülmüştür. Bunun yanında en düşük ekserjoekonomik faktörün ise % 75 güç ayarı, 3000 m irtifa ve 18 HY oranında, % 12.36 olduğu görülmüştür.



Şekil 3.26. % 65 güç ayarında ekserjoekonomik faktörün HY oranı ve irtifa ile değişimi



Şekil 3.27. % 75 güç ayarında ekserjoekonomik faktörün HY oranı ve irtifa ile değişimi

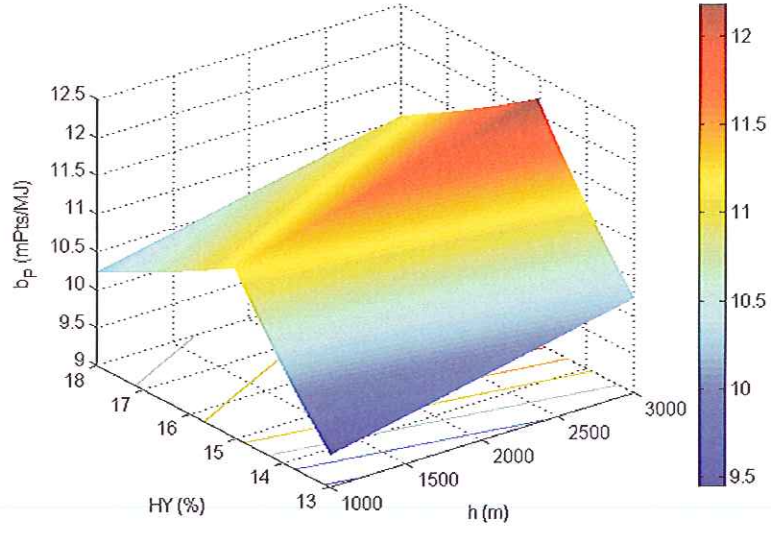
Ekserjoekonomik analiz sonucunda elde edilmiş en düşük ve en yüksek değerler ve elde edildikleri noktalar Çizelge 3.5’de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Düz uçuş safhası ekserjoekonomik analiz bulguları

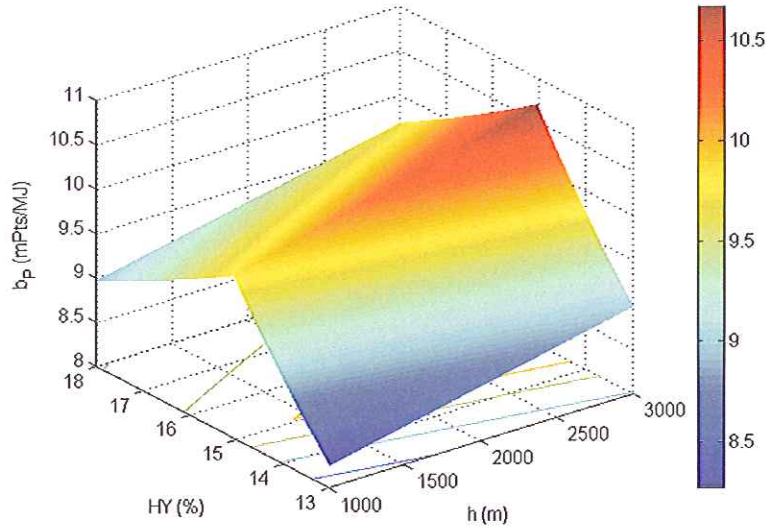
	% 65 Güç Ayarı		% 75 Güç Ayarı	
	<i>Maksimum</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maksimum</i>	<i>Minimum</i>
C_y (\$/GJ)	130.80	116.80	130.80	116.80
	3000 m	1000 m	3000 m	1000 m
	13 HY	18 HY	13 HY	18 HY
$\dot{C}_{yık}$ (\$/h)	63.07	43.07	71.35	48.50
	3000 m	1000 m	3000 m	1000 m
	18 HY	13 HY	18 HY	13 HY
r_k (%)	111.30	64.26	108.70	62.29
	3000 m	1000 m	3000 m	1000 m
	15.054 HY	13 HY	15.054 HY	13 HY
f (%)	18.94	13.76	17.18	12.36
	1000 m	3000 m	1000 m	3000 m
	13 HY	18 HY	13 HY	18 HY

3.2.4. Düz uçuş safhası ekserjoçevresel analiz bulguları

Ekserjoçevresel analiz, Bölüm 3.1.4'teki kabuller kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çevresel etki incelemesinde egzoz gazlarının çevresel etkilerinin incelenmesi esas olacaktır. Ürünlerin özgül çevresel etkisi irtifa ve HY oranı ile değişimi % 65 güç ayarı için Şekil 3.28'da, % 75 güç ayarı için Şekil 3.29'da verilmiştir. Ürünün özgül çevresel maliyetinin en yüksek değerinin, % 65 güç ayarı, 3000 m irtifa ve 15.054 HY oranında, 12.20 mPts/MJ olduğu görülmüştür. Bunun yanında ürünün özgül çevresel maliyetinin en düşük değerinin, % 75 güç ayarı, 1000 m irtifa ve 13 HY oranında, 8.26 mPts/MJ olduğu görülmüştür.



Şekil 3.28. % 65 güç ayarında özgül çevresel etkinin HY oranı ve irtifa ile değişimi

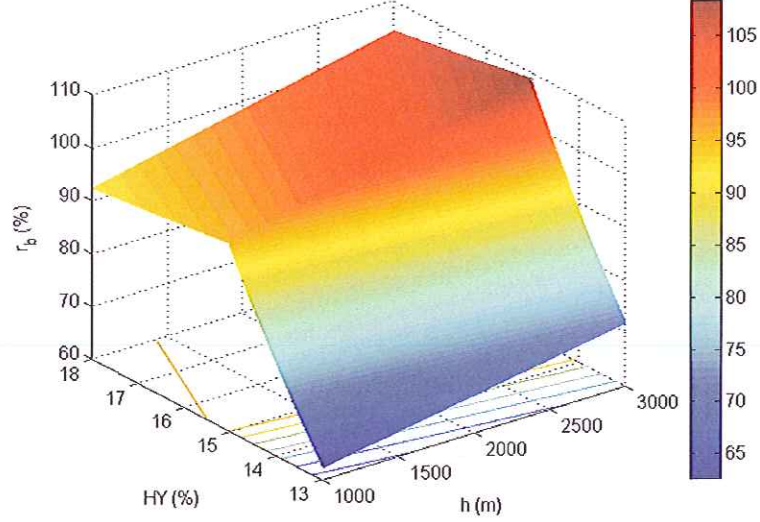


Şekil 3.29. % 75 güç ayarında özgül çevresel etkinin HY oranı ve irtifa ile değişimi

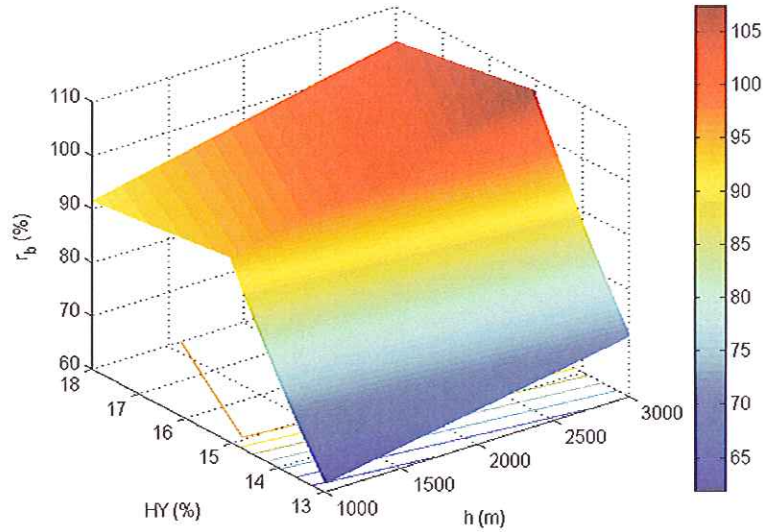
Özgül çevresel etki değeri, stokiometrik yanmanın olduğu bölgelerde en yüksek değerine sahipken, hem fakir hem de zengin yanma yönünde ilerlerken azalma göstermektedir. Bunun yanında irtifa artışıyla beraber artış da göstermektedir.

İzafi çevresel farkının irtifa ve HY oranı ile değişimi % 65 güç ayarı için Şekil 3.30'da, % 75 güç ayarı için Şekil 3.31'de verilmiştir. En yüksek izafi çevresel farkın, % 65 güç ayarı, 3000 m irtifa ve 15.054 HY oranında, % 108.70

olduğu görülmüştür. Bunun yanında en düşük izafi çevresel farkın ise % 75 güç ayarı, 1000 m ve 13 HY oranında, % 61.54 olduğu görülmüştür.



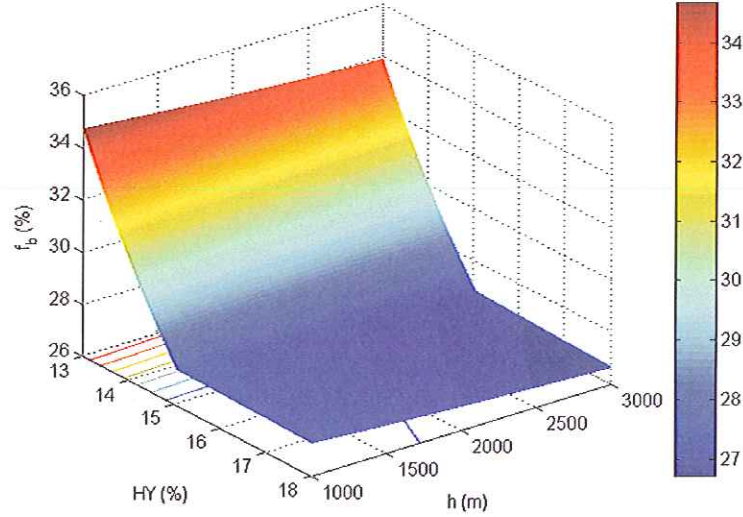
Şekil 3.30. % 65 güç ayarında izafi çevresel farkın HY oranı ve irtifa ile değişimi



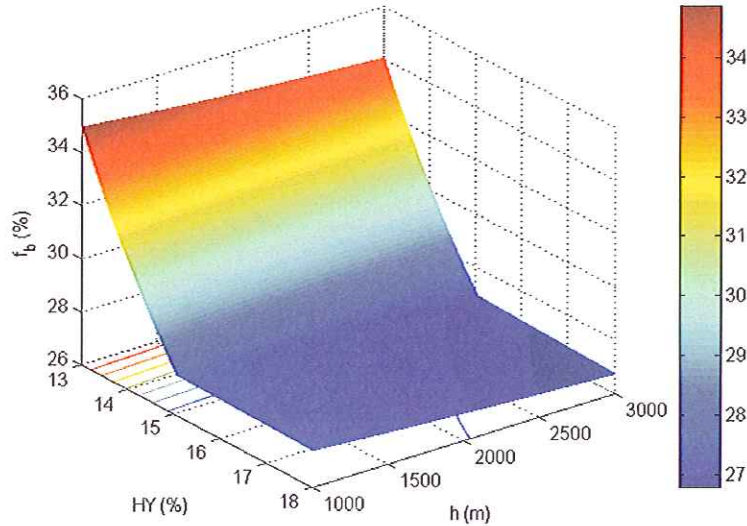
Şekil 3.31. % 75 güç ayarında izafi çevresel farkın HY oranı ve irtifa ile değişimi

İzafi çevresel fark irtifa artışıyla artarken; HY oranında, hem zengin hem de fakir karışımlardan stokiometrik karışıma doğru yaklaştıkça bir artış olduğu görülmektedir. Çevresel etkinin azaltılması için irtifanın azaltılması, önemli bir kriter olarak karşımıza çıkmaktadır.

Ekserjoçevresel faktörün irtifa ve HY oranı ile değişimi % 65 güç ayarı için Şekil 3.32’de, % 75 güç ayarı için Şekil 3.33’de verilmiştir. En yüksek ekserjoçevresel faktörün, % 75 güç ayarı, 1000 m irtifa ve 13 HY oranında, % 34.93 olduğu görülmüştür. Bunun yanında en düşük ekserjoçevresel faktörün ise % 65 güç ayarı, 3000 m ve 18 HY oranında, % 26.65 olduğu görülmüştür.



Şekil 3.32. % 65 güç ayarında ekserjoçevresel faktörün HY oranı ve irtifa ile değişimi



Şekil 3.33. % 75 güç ayarında ekserjoçevresel faktörün HY oranı ve irtifa ile değişimi

Ekserjoçevresel analiz sonucunda elde edilmiş en düşük ve en yüksek değerler ve elde edildikleri noktalar Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Düz uçuş safhası ekserjoçevresel analiz bulguları

	% 65 Güç Ayarı		% 75 Güç Ayarı	
	<i>Maksimum</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maksimum</i>	<i>Minimum</i>
b_p (mPts/MJ)	12.20 3000 m 15.054 HY	9.43 1000 m 13 HY	10.69 3000 m 15.054 HY	8.26 1000 m 13 HY
$\dot{B}_{yık}$ (mPts/s)	0.798 3000 m 18 HY	0.545 1000 m 13 HY	0.795 3000 m 18 HY	0.540 1000 m 13 HY
\dot{B}_{TOT} (mPts/s)	1.088 3000 m 18 HY	0.835 1000 m 13 HY	1.085 3000 m 18 HY	0.830 1000 m 13 HY
r_b (%)	108.70 3000 m 15.054 HY	62.29 1000 m 13 HY	107.80 3000 m 15.054	61.54 1000 m 13 HY
f_b (%)	34.73 1000 m 13 HY	26.65 3000 m 18 HY	34.93 1000 m 13 HY	26.73 3000 m 18 HY

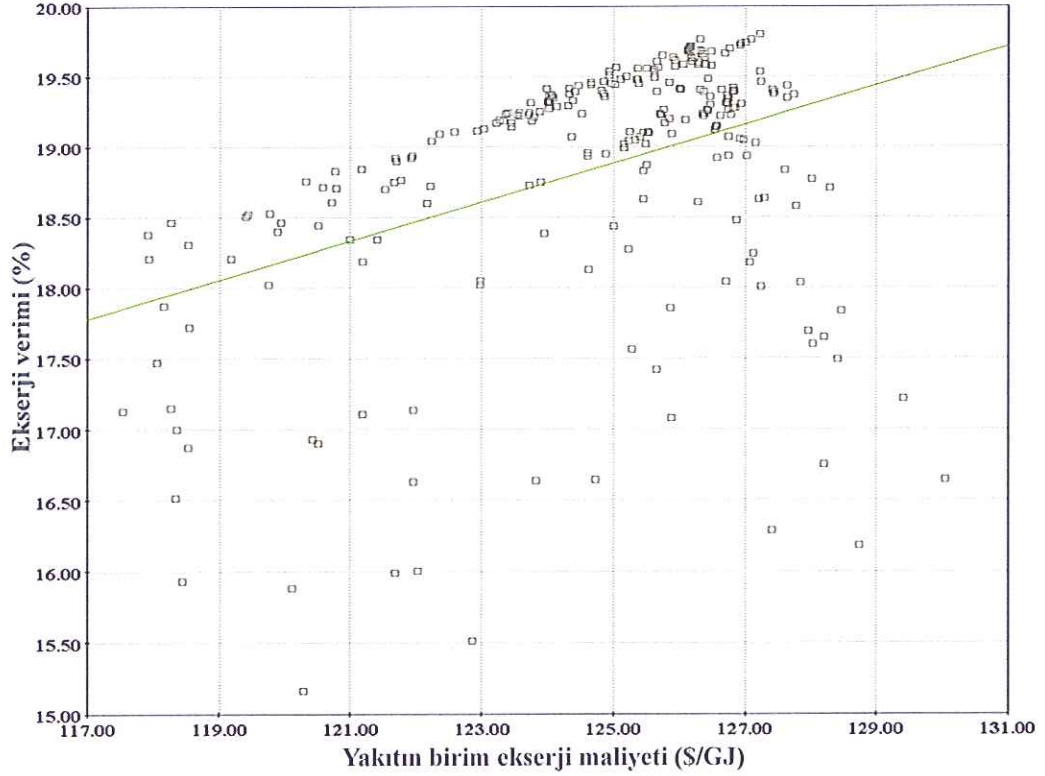
3.3. Ekserjoekonomik Çevresel Optimizasyon

Bu bölümde uygulanacak ekserjoekonomik çevresel optimizasyonun temel hedefi, piston-prop uçaklarının düz uçuş maliyetlerinin ve çevresel etkisinin azaltılması, bununla birlikte sistemin ekserji veriminin yükseltilmesi şeklinde belirlenmiştir. Yapılacak incelemedeki temel amaç, belirli bir uçuş irtifa aralığı, motor güç ayarı ve HY oranında elde edilecek olan maksimum ekserji veriminde minimum maliyetin ve minimum çevresel etkinin sağlanması olarak belirlenmiştir. Bu nedenle, öncelikle hedef sonuçları etkileyen karar değişkenleri saptanmıştır. Bunun için Ek-2’de verilen MATLAB ile hazırlanmış termodinamik hesaplamaları kullanılmıştır. Ek-2’de ekserjoekonomik çevresel analizin MATLAB çalışma sayfasında sisteme giren ve çıkan tüm ürünlere ait hesaplamalar, formüllerle kodlanmıştır.

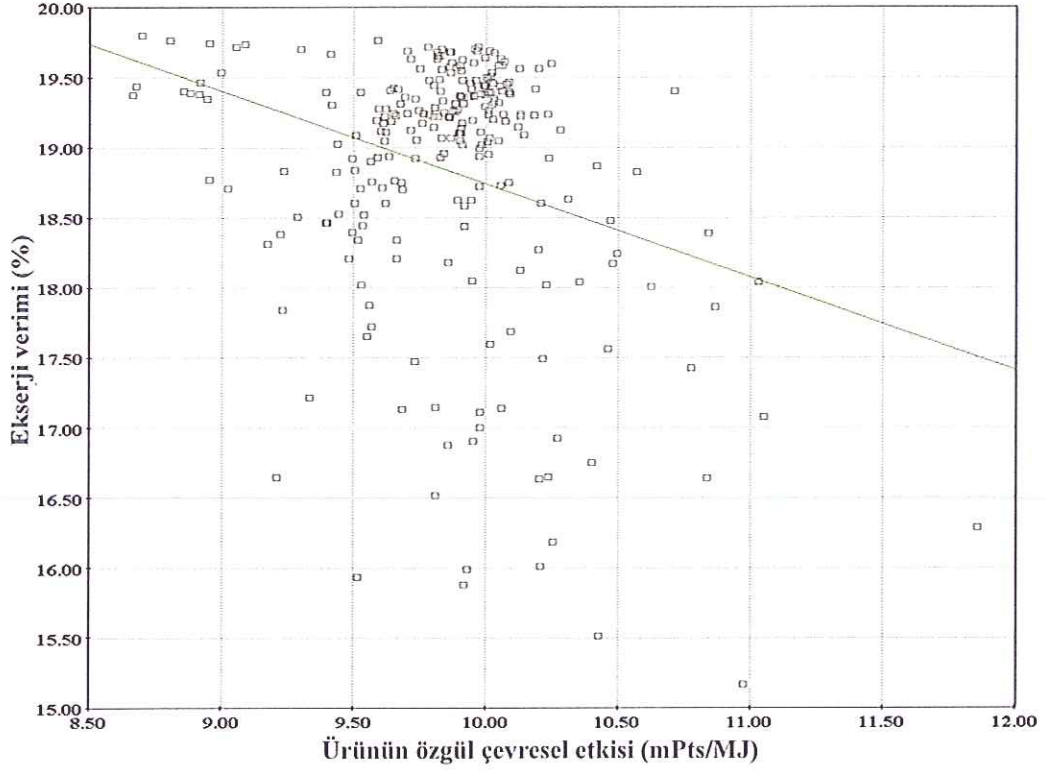
ARMOGA programında piston-prop uçağının düz uçuş optimizasyonu için çözüm uzayı, 252 jenerasyon ile sınırlandırılmıştır. Programda çözüm uzayında elde edilen her jenerasyon, dizayn tablosunda yeni nesil olarak yer almıştır.

Programda elde edilen 252 jenerasyonun hepsi, sıfır hata oranı ile uygun bulunmuştur. Tüm çözümler yapıldıktan sonra verim, maliyet ve çevresel etki hedefleri için en iyi çözümler aranmıştır. Optimizasyonun çözüm uzayı Ek-3’de verilmiştir.

ARMOGA programında ilk başta rassal olarak oluşturulan çözüm uzayında en iyi jenerasyonlar belirlenebilir. Bu belirlenmiş tasarım tablosunda üretilen tüm jenerasyonların hedef verim ile maliyet ve çevresel etkisinin, regresyon çizgisinin etrafında başlangıç popülasyonu ile başlayıp en iyilerin de toplandığı noktaya doğru dağınık bir yapı gözlenmektedir. Şekil 3.34 ve Şekil 3.35’de eniyi değerleri, regresyon çizgisi etrafında toplanmaya yönelik dağılımı olduğu görülmektedir.



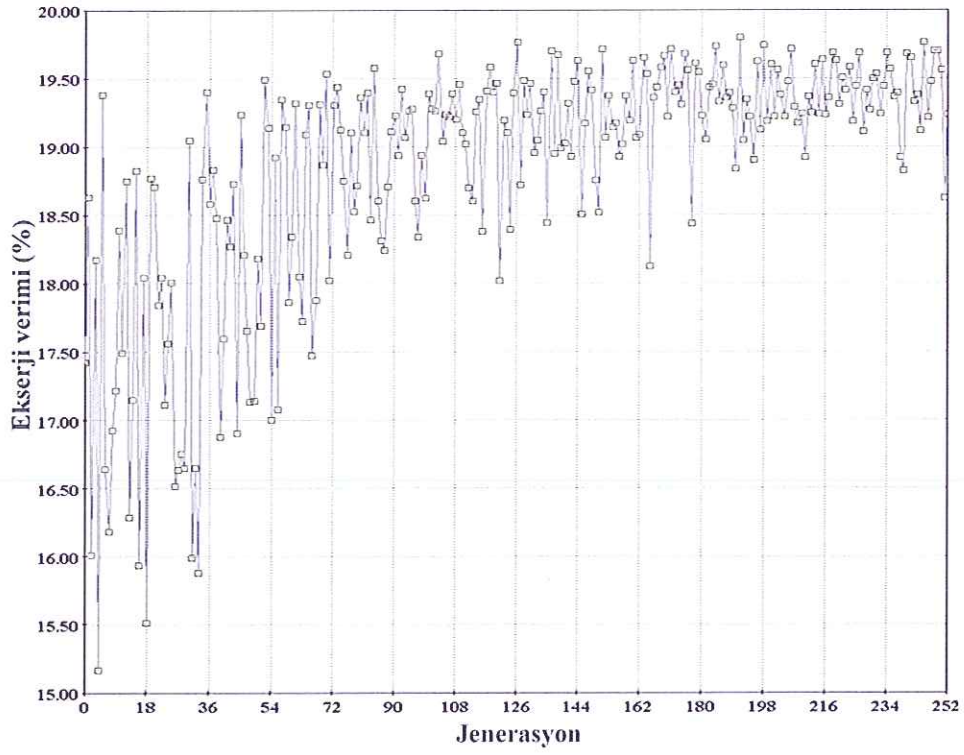
Şekil 3.34. Yakıtın birim ekserji maliyeti-ekserji verimi dağılımı



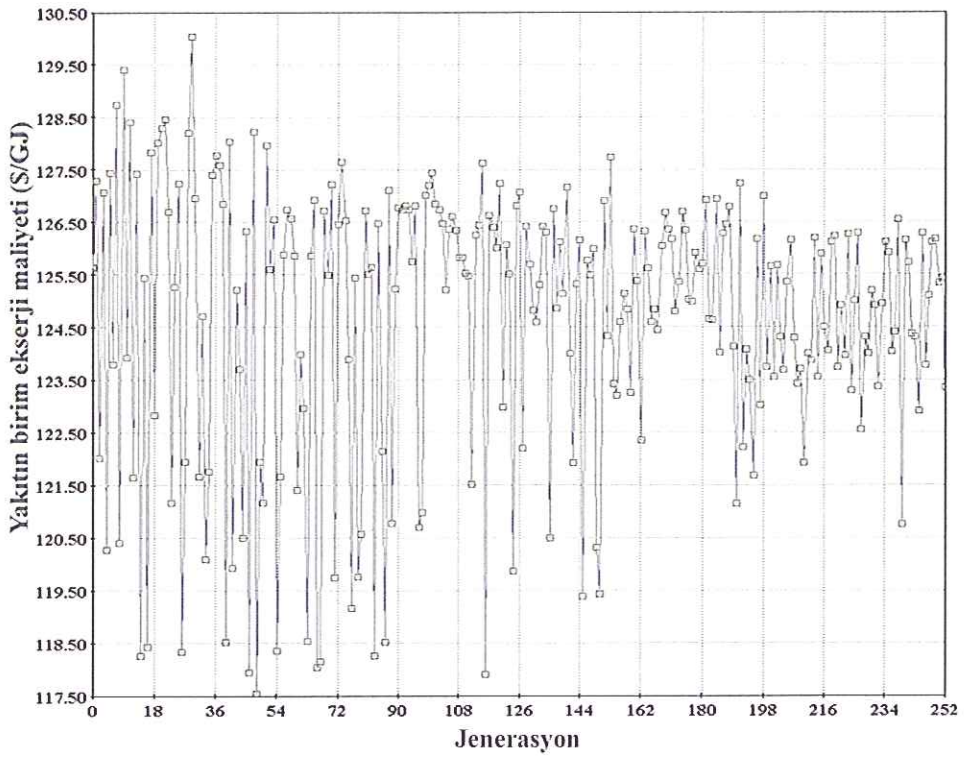
Şekil 3.35. Ürünün özgül çevresel etkisi-ekserji verimi dağılımı

Düz uçuş için yapılan parametrik çalışmalar ayrı ayrı tüm kriterlerin en yüksek ve en düşük sonuçlarını göstermiştir. Bu noktada belirtilen kısıtlar dahilinde yapılan optimizasyon ile en yüksek ekserji verimi, en düşük ortalama yakıtın ekserji maliyeti ve en düşük ürünün özgül çevresel etkisinin bulunduğu irtifa, HY oranı ve güç ayarı hesaplanmıştır. Hedeflenmiş en düşük yakıtın birim ekserji maliyeti 117.53 \$/GJ ile 130.05 \$/GJ arasında yoğunlaşırken, buna karşın en yüksek ekserji verimi % 15.17 ile % 19.80 arasında değişmektedir. Belirlenmiş olan en yüksek ekserji verim aralığında en düşük ürünün çevresel etkisi 8.66 mPts/GJ ile 11.86 mPts/GJ arasında değiştiği görülmektedir.

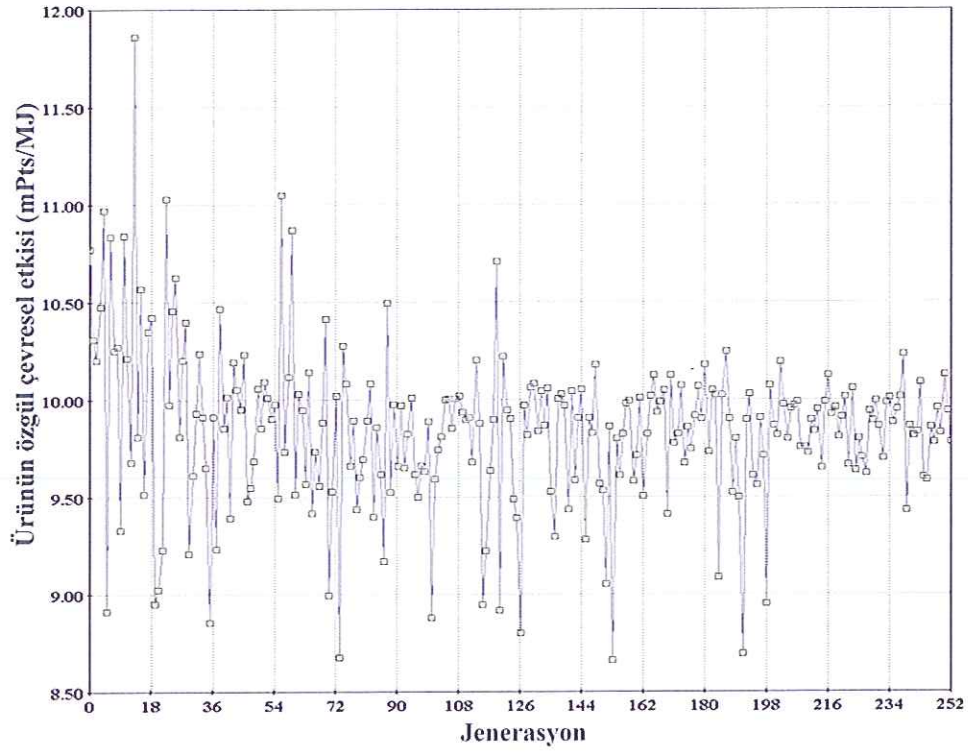
Algoritma yapısı gereği verim, çevresel etki ve maliyet akışlarında başlangıç jenerasyonundan en iyiye doğru sürekli bir arayış içindedir. Bu arayış sonucunda en iyi bir değer elde edilir. Bu uygulama ile yapılan 252 jenerasyon sonrası hedef maliyet, çevresel etki ve verim grafiğinin sonuçları Şekil 3.36–3.38’de verilmiştir.



Şekil 3.36. Hedef ekserji verimi dağılımı

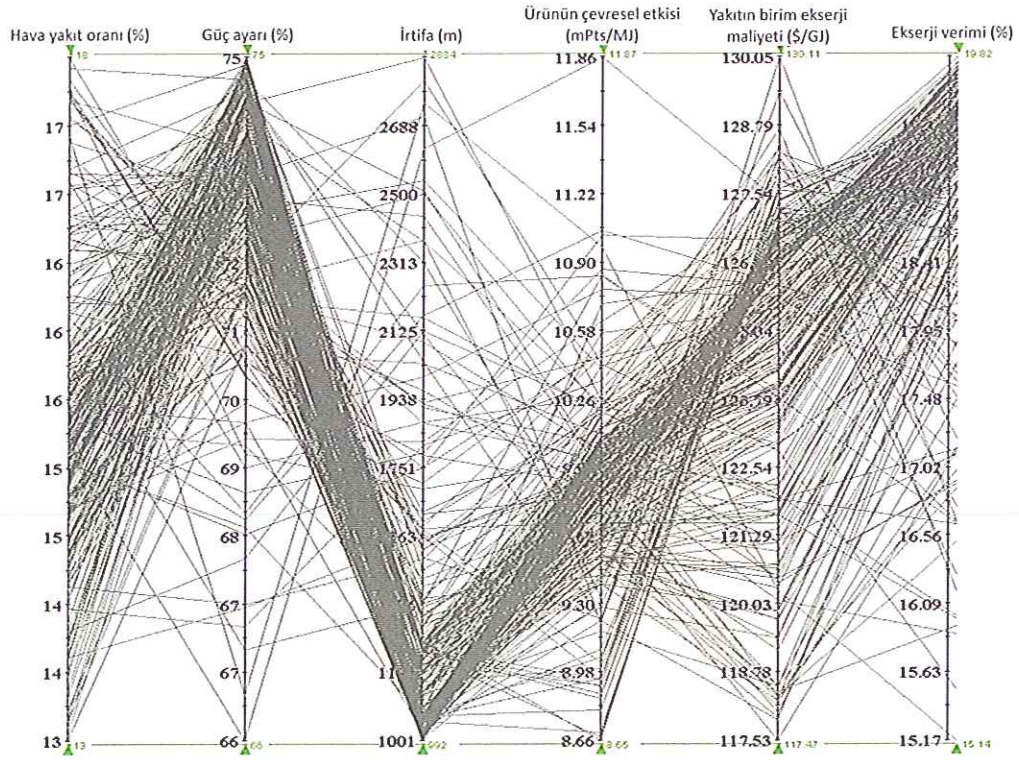


Şekil 3.37. Hedef yakıtın birim ekserji maliyeti dağılımı



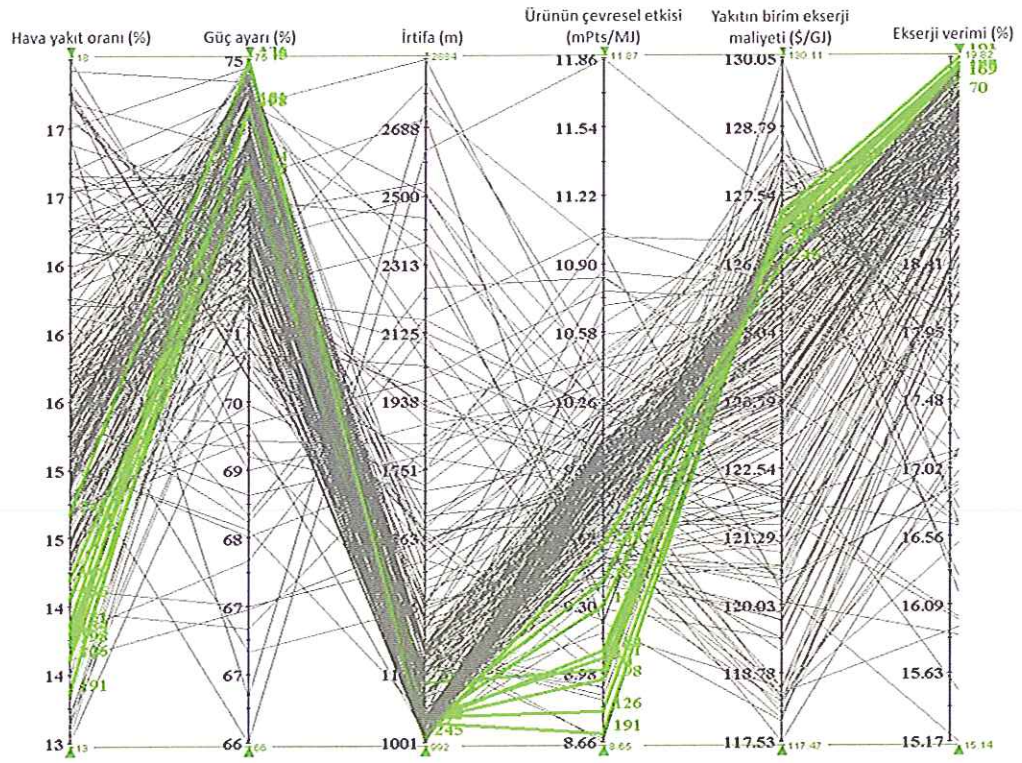
Şekil 3.38. Hedef ürünün özgül çevresel etkisi dağılımı

ModeFrontier programı, geleneksel optimizasyonlarda elde edilen sonuçlara karşın, daha geniş bir tercih ortamı ve değişen kısıtlar altında hedeflerin belirlenmesini yardımcı olur. Bu programdan elde edilen girdiler ve hedefler arasındaki paralel koordinat grafiği Şekilde 3.39'da gösterilmektedir. Grafikte 252 jenerasyon ile her girdi sonucu için akış eğrileri verilmektedir.



Şekil 3.39. Girdi ve hedef parametrelerinin paralel koordinat grafiği

Tüm jenerasyonun paralel koordinatları, sadece en iyilerin kalacağı şekilde sadeleştirilmiş ve en iyilerin paralel koordinat grafiği Şekil 3.40'da verilmiştir. Her nesil için girdi parametreleri ve hedef parametreleri arasında akış eğrileri görülebilir. Grafikte her neslin kodu tanımlanmıştır. Girdiler ile hedeflerin isimlerinin yer aldığı çizgilerin her iki uç noktalarında, hareketli oklar ile tercihlere en uygun nesil seçilebilir. Böylece optimizasyon sonucu hem girdi hem de çıktı parametreleri kontrol edilebilir.



Şekil 3.40. En iyi nesillerin paralel koordinat grafiği

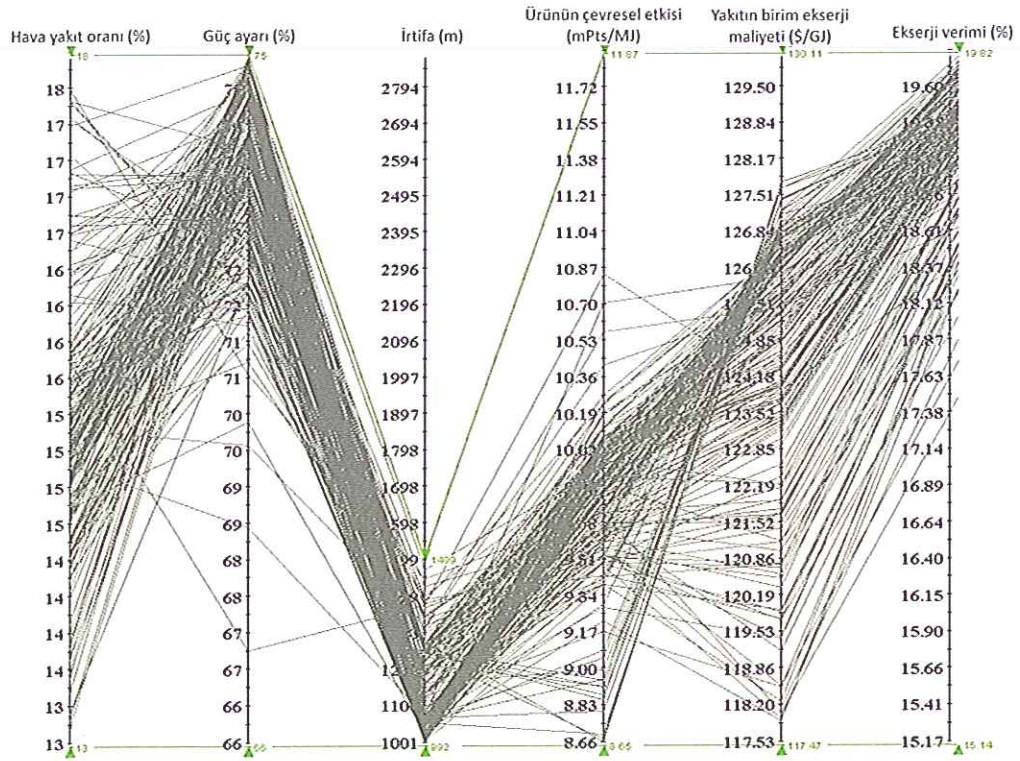
Optimizasyon sonucunda ulaşılan en iyi nesilli hedef maliyet, çevresel etki ve verim değerleri Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7. En iyi jenerasyonların hedef sonuç değerleri

ID	HY oranı (%)	Güç ayarı (%)	İrtifa (m)	Ürünün özgül çevresel etkisi (mPts/MJ)	Yakıtın birim ekserji maliyeti (\$/GJ)	Ekserji verimi (%)
70	13.75	73.53	1161.96	8.99	127.22	19.54
126	13.76	75.00	1068.13	8.80	127.08	19.76
136	14.18	73.39	1053.48	9.30	126.76	19.70
151	14.00	74.37	1068.20	9.05	126.91	19.72
169	14.31	73.39	1065.19	9.41	126.68	19.66
184	13.93	73.57	1053.74	9.09	126.93	19.73
191	13.52	74.35	1053.94	8.70	127.23	19.80
198	13.86	74.32	1063.07	8.95	127.00	19.74

Uçuş için önemli parametre olan uçuş irtifasının değişiminin hedef sonuçlar üzerindeki etkisi incelenecektir. Bu nedenle 1000 m’den başlayarak 500 m’lik artış ile kısıt değişimi yapılarak, hedefler doğrultusundaki en iyi uçuş irtifası

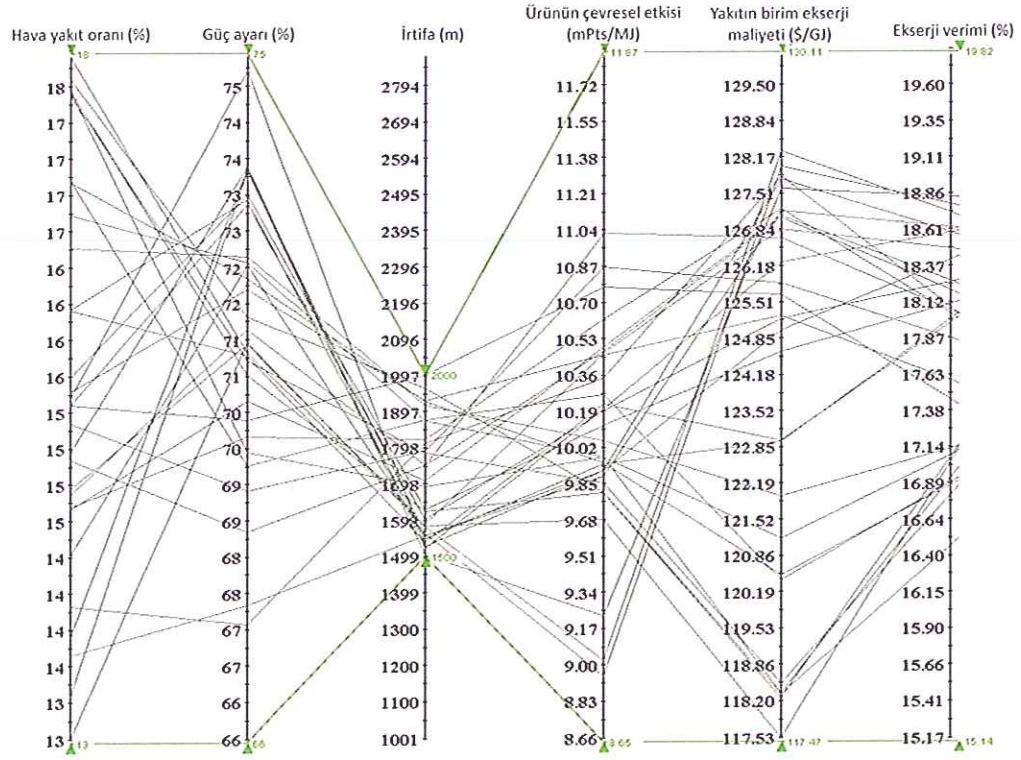
belirlenecektir. Öncelikli olarak 1000 m ile 1500 m irtifalar arası incelenmiştir. Şekil 3.41’de de görüleceği gibi elde edilen 252 sonucun 204 tanesi (% 80.95’i), bu irtifalar arasında elde edilmiştir. Bu irtifa aralığında en yüksek ekserji verimi ve en düşük maliyet ile çevresel etkinin elde edildiği görülmüştür. Bu irtifa aralığında hedeflere bakıldığında, ekserji veriminin % 17.48 ile % 19.80, yakıt ortalama birim ekserji maliyetinin 117.91 \$/GJ ile 127.74 \$/GJ ve ürünün özgül çevresel etkisinin 8.66 mPts/MJ ile 10.84 mPts/MJ arasında değiştiği görülmektedir. Bu irtifalar arasında hedeflenen en iyi sonuçların elde edilmesi için güç ayarı ve HY oranlarının tüm girdi sınır aralığında olduğu görülmüştür.



Şekil 3.41. 1000 m – 1500 m irtifalar arası paralel koordinat grafiği

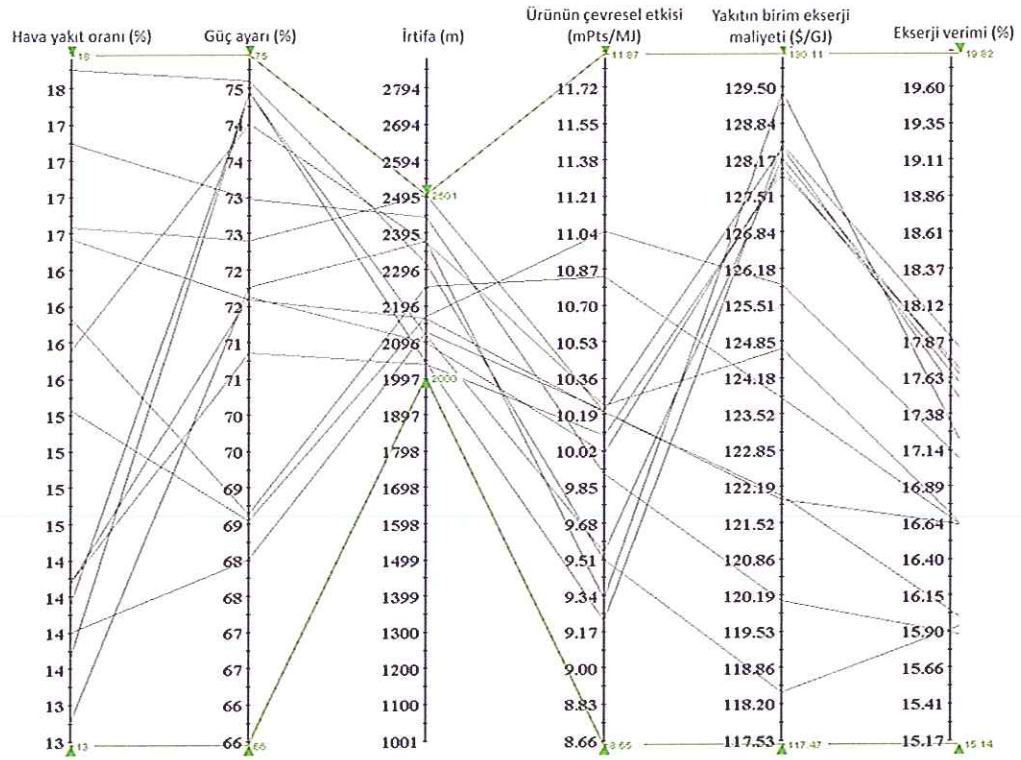
1500 m ile 2000 m irtifalar arasında en iyi sonuçların paralel koordinat grafiğindeki değişimi, Şekil 3.42’de verilmiştir. Bu irtifa aralığında 29 tane sonuç (% 11.51) olduğu görülmektedir. Ekserji veriminde azalma olurken, maliyet ve çevresel etkide en iyi sonuçlardan biraz daha artış olduğu görülmüştür. Bu irtifa aralığında hedeflere bakıldığında, ekserji veriminin % 16.52 ile % 18.84, yakıtın

ortalama birim ekserji maliyetinin 117.53 \$/GJ ile 128.29 \$/GJ ve ürünlerin özgül çevresel etkisinin 8.95 mPts/MJ ile 11.03 mPts/MJ arasında değiştiği görülmektedir. Bu irtifalar arasında da hedeflenen en iyi sonuçların elde edilmesi için güç ayarı ve HY oranlarının tüm girdi sınır aralığında olduğu görülmüştür.



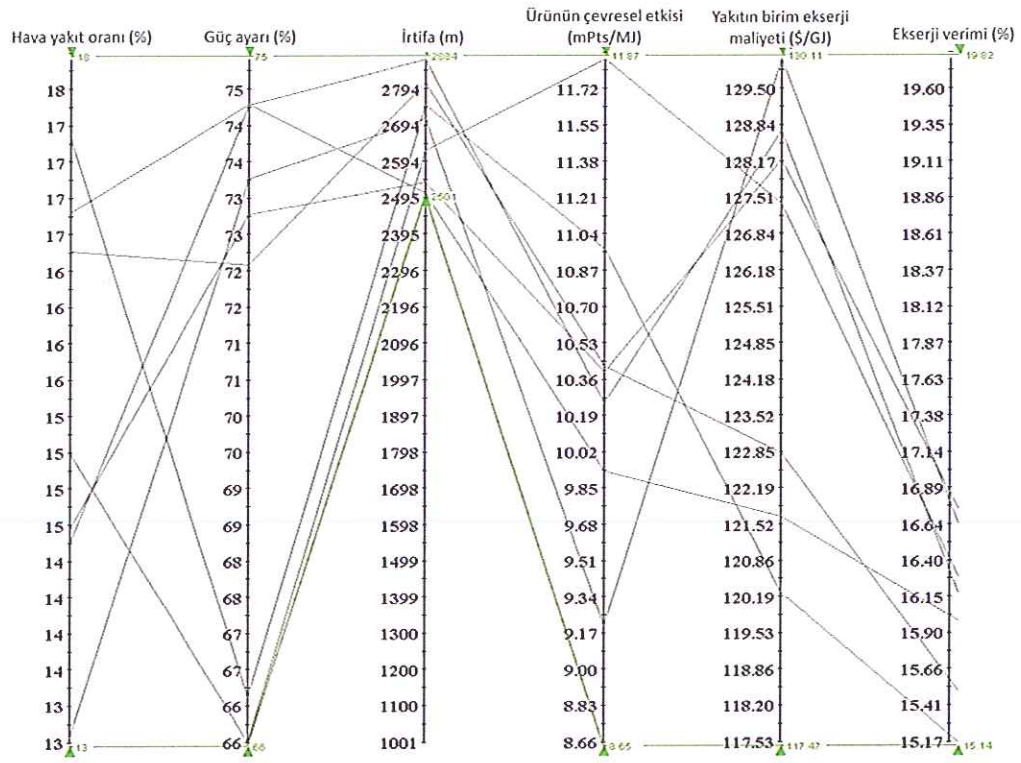
Şekil 3.42. 1500 m – 2000 m irtifalar arası paralel koordinat grafiği

2000 m ile 2500 m irtifalar arasında en iyi sonuçların paralel koordinat grafiğindeki değişimi, Şekil 3.43'de verilmiştir. Bu irtifa aralığında 13 sonuç (% 5.16) olduğu görülmektedir. İrtifa artışı ile ekserji veriminde azalma olurken, maliyet ve çevresel etkide en iyi sonuçlardan biraz daha artış olduğu görülmüştür. Bu irtifa aralığında hedeflere bakıldığında, ekserji veriminin % 15.88 ile % 17.84, yakıtın ortalama birim ekserji maliyetinin 118.43 \$/GJ ile 129.40 \$/GJ ve ürünlerin özgül çevresel etkisinin 9.23 mPts/MJ ile 11.05 mPts/MJ arasında değiştiği görülmektedir. Bu irtifalar arasında da hedeflenen en iyi sonuçların elde edilmesi için güç ayarı ve HY oranlarının tüm girdi sınır aralığında olduğu görülmüştür.



Şekil 3.43. 2000 m – 2500 m irtifalar arası paralel koordinat grafiği

2500 m ile 3000 m irtifalar arasında en iyi sonuçların paralel koordinat grafiğindeki değişimi, Şekil 3.44’de verilmiştir. Bu irtifa aralığında 7 sonuç (% 2.78) olduğu görülmektedir. İrtifa artışı ile ekserji veriminde azalma olurken, maliyet ve çevresel etkide çok az artış olduğu görülmüştür. Bu irtifa aralığında hedeflere bakıldığında, ekserji veriminin % 15.17 ile % 16.75, yakıtın ortalama birim ekserji maliyetinin 120.28 \$/GJ ile 130.05 \$/GJ ve ürünlerin özgül çevresel etkisinin 9.21 mPts/MJ ile 11.86 mPts/MJ arasında değiştiği görülmektedir. Bu irtifalar arasında da hedeflenen en iyi sonuçların elde edilmesi için daha çok düşük güç ayarı ve yüksek HY oranının gerekli olduğu görülmüştür.



Şekil 3.44. 2500 m – 3000 m irtifalar arası paralel koordinat grafiği

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Dünya üzerinde bulunan toplam uçak sayısının dörtte üçünü piston-prop uçakları oluşturmaktadır. Günümüzde yaygın olan bir sektörde bu kadar fazla hava aracı kuşkusuz rekabeti de beraberinde getirecektir. Ekonomik ve çevresel etkilerinin belirlenmesi ve bunların gösterilmesi işletme için oldukça önemlidir. Yapılan incelemelerde, bir ısıl sistemin ekonomik ve çevresel etkilerini optimum belirleyecek olan aracın ekserji olduğu görülmüştür. Bu nedenle tezde, 4-zamanlı, hava soğutmalı, 4-silindirli ve doğal emişli bir piston-prop uçak motoruna, hem iniş-kalkış fazı (LTO) için hem de 1 saatlik düz uçuş için ekserjoekonomik ve ekserjoçevresel analiz uygulanmıştır. Ayrıca belirlenen kriterdeki optimum düz uçuş şartları için ekserjoekonomik çevresel optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Analiz kısmında LTO safhası ve düz uçuş safhası ayrı ayrı incelenmiştir. Düz uçuş safhasında hem analiz hem de optimizasyon için temel kısıtlarımız 1000 m – 3000 m irtifa aralığı, 13 HY oranı – 18 HY oranı aralığı ve % 65 – % 75 güç ayarı aralığı olmuştur. Analiz kısmı, elde edilen denklemlerin MATLAB programı yardımıyla çözülmesiyle gerçekleştirilirken, optimizasyon kısmı için ise ModeFrontier programı yardımıyla seçim uzayını kısıltacak olan ARMOGA yöntemini kullanılarak hedef sonuç ilişkisi kurulmuştur.

Çalışma sonuçları aşağıda listelenmiştir:

- ✓ LTO safhası için yapılan hesaplamalar sonucunda kalkış fazının ekserji akımları yönünden en yüksek değerlere sahip olduğu görülmüştür. 476.51 kW'lık bir giren ekserji akımının ardından, 111.90 kW'ı efektif güç ekserjisi'ne dönüştürülürken 248.55 kW'ının yıkıma uğradığı görülmüştür. Bununda yanında en yüksek enerji ve ekserji verimleri, tırmanma fazında, sırasıyla % 26.76 ve % 24.95 olarak hesaplanmıştır.
- ✓ LTO safhasında yakıtın ortalama birim ekserji maliyetinin en yüksek ve en düşük değerleri, 24.26 \$/GJ ve 0.14 \$/GJ olmak üzere, sırasıyla taksii ve kalkış fazlarında bulunmuştur. Yakıtın ortalama birim ekserji maliyetinin en düşük olduğu kalkış fazında en yüksek izafi maliyet

farkı (% 116.06) ve ekserjoekonomik faktör (% 98.81) değerleri elde edilmiştir.

- ✓ LTO safhasında en yüksek ürünün özgül çevresel etkisi ve izafi çevresel fark, yaklaşma fazında sırasıyla 18.83 mPts/MJ ve % 208.94 şeklinde hesaplanmıştır. Bunu sırasıyla taksi, kalkış ve tırmanma fazları takip etmektedir. En yüksek ekserjoçevresel faktör ise taksi fazında % 58.48 olarak hesaplanmıştır.
- ✓ Düz uçuş safhası için yapılan enerji analizi sonucunda en yüksek enerji verimi, 1000 m irtifa ve % 75 güç ayarında % 21.73 olarak hesaplanmıştır. Egzozdan, yağlama ile ve motor cidarlarından atılan enerji ise sisteme verilen enerjinin % 78.27 gibi büyük bir kısmını oluşturduğu görülmüştür. Bu şartlarda tüketilen yakıt miktarı ise 28.02 kg/h ile en yüksek değerine sahiptir.
- ✓ Düz uçuş safhası için yapılan ekserji analizi sonucunda en yüksek ekserji verimi 1000 m irtifa, 13 HY oranı ve % 75 güç ayarında, % 19.98 olarak hesaplanmıştır. Aynı şartlar altında, en yüksek egzoz ekserji akımının (170.05 kW) elde edildiği görülmüştür.
- ✓ En yüksek giren ekserji akımı (410.60 kW), 1000 m irtifa, 18 HY oranı ve % 75 güç ayarında sağlınırken, en yüksek ekserji yıkım akımı (167.10 kW); 3000 m irtifa, 18 HY oranı ve % 75 güç ayarında gerçekleşmiştir.
- ✓ En yüksek ekserji verimi değerinin elde edildiği (% 19.98) nokta incelendiğinde, sisteme giren ekserji akımının (375.97 kW) % 6.68'i ekserji kaybı akımı (25.13 kW), % 19.98'i efektif güç ekserji akımı (75.13 kW), % 28.10'u ekserji yıkımı akımı (105.66 kW) ve % 45.24'lük büyük bir kısmının ise egzoz ekserji akımı (170.05 kW) olarak sistemden çıktığı görülmüştür.
- ✓ Düz uçuş safhasında, en yüksek ortalama yakıtın birim ekserji maliyeti 1000 m irtifa ve 13 HY oranında 130.80 \$/GJ olarak hesaplanmıştır.
- ✓ En yüksek ürünün özgül çevresel etkisi 3000 m irtifa, 15.054 HY oranı ve % 65 güç ayarında 12.20 mPts/MJ olarak hesaplanmıştır.

- ✓ Hem en yüksek izafi maliyet fark hem de izafi çevresel fark, 3000 m irtifa, 15.054 HY oranı ve % 65 güç ayarında sırasıyla % 111.30 ve % 108.70 olarak hesaplanmıştır.
- ✓ En yüksek ekserjoekonomik faktör 1000 m irtifa, 13 HY oranı ve % 65 güç ayarında % 18.94, en yüksek ekserjoçevresel faktör ise 1000 m irtifa, 13 HY oranı ve % 75 güç ayarında % 34.93 olarak hesaplanmıştır.
- ✓ Düz uçuş için yapılan optimizasyon sonucunda en iyi değerler incelendiğinde, en yüksek ekserji verimi % 19.54 ile % 19.80 arasında elde edilirken; en düşük ürünlerin özgül çevresel etkisi 8.70 mPts/MJ ile 9.59 mPts/MJ aralığında, yakıtın ortalama birim ekserji maliyeti ise 126.30 \$/GJ ile 127.23 \$/GJ aralığında olduğu görülmüştür. Tüm bu değerler % 13.52 ile % 14.77 HY oranı aralığında, % 73.39 ile % 75 güç ayarında ve 1012 m ile 1161 m irtifa aralığında elde edilmiştir.
- ✓ İrtifa kısıtı değiştirilerek yapılan incelemelerde, irtifa değerinin artışı ile ekserji veriminde azalma görülürken, yakıtın ortalama birim ekserji maliyetinde artış görülmektedir. Bunun yanında ürünlerin özgül çevresel etkisinde önemli bir değişim olduğu görülmemiştir. Bu da bize, piston-prop uçaklarının düşük irtifalarda uçuşmasının en iyi olacağını göstermektedir.
- ✓ Yapılan inceleme sonucunda LTO safhasında yapılacak olan iyileştirmelere ilk olarak yaklaşma ve taksi fazlarında başlanması gerekmektedir. Bu noktada LTO safhasında toplam sürenin büyük bir kısmını oluşturan taksi fazının süresinin uçuşa elverişliliğe uygun olacak şekilde kısaltılması, ya da prosedürlere uygun olacak şekilde en azından taksi fazının belli bir bölümünde alternatif bir enerji kaynağı kullanımının sağlanması önemli olacaktır.
- ✓ Düz uçuş içinse optimum şartları sağlamak amacıyla düşük uçuş irtifalarının, düşük hava yakıt oranlarının ve yüksek güç ayarlarının seçilmesi gerekli olduğu görülmüştür.

Bu tezin, hem ekserji, ekserjoekonomi ve ekserjoçevresel analizin, hem de ekserjoçevresel optimizasyonun etkin kullanılması ve geliştirilmesi için yararlı bir kaynak olacağı düşünülmektedir.

- Tez sonrasında yapılması önerilen çalışmalar ise şu şekilde sıralanabilir;
- ✓ Oluşturulacak bir bilgisayar ara yüzü ile tüm piston-prop tipleri için bir bilgisayar programı yapılması. Böylece, seçilecek olan uçağın ve ya uçakların belirlenmiş kısıtlar altındaki sonuçları görülmüş olabilir.
 - ✓ Yapılan incelemelerde turboprop ve turbofan motorlarına ekserjoekonomik analiz uygulanmadığı görülmüştür. Bu tip ve diğer tüm hava aracı güç gruplarına ekserjoçevresel analiz uygulanabilir. Böyle bir çalışma sonucunda, havayolu işletmelerinin uçak seçim kriterleri arasına yeni bir araç daha eklenebilir.
 - ✓ Tüm hava aracı güç gruplarına ekserjoekonomik çevresel optimizasyon gerçekleştirilerek optimum uçuş ve motor şartları belirlenebilir.

Ek-1 Yakıtın Özgül Ekserjisinin Hesaplanması

Yakıtın kimyasal ekserjisinin bulunmasında kullanılacak olan yakıtın özgül ekserjisi ε_y iki farklı yöntem ile hesaplanmaktadır.

1. Yöntem

Denklem (Ek-1.1)'deki ε_y yakıtın özgül ekserjisini gösterir. Yakıtın özgül ekserjisi

$$\varepsilon_y = H_u \varphi \quad (\text{Ek-1.1})$$

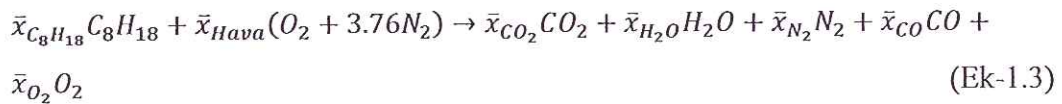
ifadesiyle verilir. Burada, φ kimyasal ekserji faktörünü göstermektedir. Kimyasal ekserji faktörü sıvı yakıtlar için (Ek-1.2) yardımı ile hesaplanmaktadır [59].

$$\varphi = 1.0401 + 0.1728 \frac{h}{c} + 0.0432 \frac{o}{c} + 0.2169 \frac{\alpha}{c} \left(1 - 2.0628 \frac{h}{c}\right) \quad (\text{Ek-1.1})$$

Buradaki $\frac{h}{c}$, $\frac{o}{c}$ ve $\frac{\alpha}{c}$ sırasıyla sıvı yakıt içindeki hidrojen, oksijen ve sülfür bileşenlerinin karbona oranlarını göstermektedir [59].

2. Yöntem

Saf hidrokarbonlar ($C_c H_h$) hava ile yakıldığında çevreye karbon monoksit, karbon dioksit, fazla oksijen, su buharı ve azot atılır. Bu emisyon parametrelerinin miktarı HY oranı ile değişir. Piston-prop uçaklarda kullanılan yakıtlar hem kimyasal hem de fiziksel özellikleri açısından benzerlik gösterdiği için hesaplama kolaylığı sağlaması açısından izooktan ($C_8 H_{18}$) olarak kabul edilecektir. İzooktanın yanma denklemi (Ek-1.3)'te verilmiştir [60, 61].



Denklem (Ek-1.3)'deki \bar{x}_{CO} mol kütlesi fazla yakıt ile yanma gerçekleştiği zaman tepkime dışına çıkarken, \bar{x}_{O_2} mol kütlesi fazla oksijen ile yanma olduğu zaman tepkime dışına çıkar.

Belirli bir T_0, P_0 değerinde, C_8H_{18} için kimyasal ekserji aşağıdaki şekilde hesaplanır [60].

$$\varepsilon_y = \left(\left[\bar{g}_y + 12.5\bar{g}_{O_2} - \left(\bar{x}_{CO_2}\bar{g}_{CO_2} + \bar{x}_{H_2O}\bar{g}_{H_2O} + \bar{x}_{CO}\bar{g}_{CO} + \bar{x}_{O_2}\bar{g}_{O_2} \right) \right] (T_0, P_0) + \left\{ \left(\bar{x}_{CO_2}\bar{e}_{CO_2} + \bar{x}_{H_2O}\bar{e}_{H_2O} + \bar{x}_{CO}\bar{e}_{CO} + \bar{x}_{O_2}\bar{e}_{O_2} \right) - 12.5\bar{e}_{O_2} \right\} \right) / m_y \quad (\text{Ek-1.4})$$

Buradaki gazların entalpi ve entropi değerlerinin 101.325 kPa basınç altında sıcaklıkla değişimi (Ek-1.5) ve (Ek-1.6)'dan hesaplanır. Bu denklemlerdeki sabitler Çizelge Ek-1.1'de verilmiştir. (Bu işlem $298.15 < T \leq T_{max}, P_0=101.325$ kPa, için yapılır. $y=10^{-3}T$ olarak kullanılır) [60].

$$\bar{h}^0 = 10^3 \left[H^+ + ay + \frac{b}{2}y^2 - cy^{-1} + \frac{d}{3}y^3 \right] \quad (\text{Ek-1.5})$$

$$\bar{s}^0 = S^+ + a \ln T + by - \frac{c}{2}y^{-2} + \frac{d}{2}y^2 \quad (\text{Ek-1.6})$$

Çizelge Ek-1.1 Denklem (Ek-1.5) ve (Ek-1.6)'de kullanılan sabitler [60].

Formüller	H^+	S^+	a	b	c	d
$N_2(g)$	-9.982	16.203	30.418	2.544	-0.238	0
$O_2(g)$	-9.589	36.116	29.154	6.477	-0.184	-1.017
$CO(g)$	-120.809	18.937	30.962	2.439	-0.28	0
$CO_2(g)$	-413.886	-87.078	51.128	4.368	-1.469	0
$H_2O(g)$	-253.871	-11.75	34.376	7.841	-0.423	0

Entalpi, sıcaklığın fonksiyonu iken entropi değeri sıcaklığın yanı sıra basınç ile de değişim göstermektedir. Bu nedenle farklı basınç değerlerindeki entropi, aşağıdaki (Ek-1.7) yardımıyla hesaplanmaktadır [67].

$$\bar{s}(T, p) = \bar{s}^0(T) - \bar{R} \ln \frac{p}{P_0} \quad (\text{Ek-1.7})$$

Denklem (Ek-1.4) kullanılacak olan \bar{g} değerlerini hesaplayabilmek için gerekli olan Gibbs fonksiyonu (Ek-1.8)'de verilmektedir.

$$\bar{g} = \bar{h}^0 + T\bar{s}(T, P) \quad (\text{Ek-1.8})$$

Mükemmel gazların standart şartlar altındaki özelliklerinin yanı sıra, yakıtın sıcaklık ve basınç değişiminin de göz önüne alınması gerekmektedir [19].

$$\bar{c}_{p,y} = -2.3143 + 759.9t - 409.104t^2 + 85.36t^3 - \frac{0.1295}{t^2} \quad (\text{Ek-1.9})$$

$$\bar{h}_y = \left(-2.3t + 380t^2 - 136t^3 + 21t^4 - \frac{0.13}{t} - 170 \right) \times 1000 \quad (\text{Ek-1.10})$$

Buradaki t değeri $T_0/1000$ 'e eşittir [19]. İzooktan'ın 298.15 K ve 101.35 kPa değerlerindeki entropi değeri 360.79 kJ(kmol.K)'dir. Farklı sıcaklıklar için entropi değeri (2.23) ile hesaplanmaktadır [56].

$$\bar{s}_y = \bar{s}_0 + \bar{c}_{p,y} \ln(T_0/298.15) - (\bar{R} \ln(P_0/101.325)) \quad (\text{Ek-1.11})$$

$$\bar{g}_y = \bar{h}_y + T\bar{s}_y(T, P) \quad (\text{Ek-1.12})$$


```

H2O_ratio_atm=0.0216;
CO_ratio_atm=5.9927e-049;
CO2_ratio_atm=0.00033;
O2_ratio_atm=0.2014;
Ex_N2=- (8.31447*T_h_0*log(N2_ratio_atm));
Ex_H2O=- (8.31447*T_h_0*log(H2O_ratio_atm));
Ex_CO=- (8.31447*T_h_0*log(CO_ratio_atm));
Ex_CO2=- (8.31447*T_h_0*log(CO2_ratio_atm));
Ex_O2=- (8.31447*T_h_0*log(O2_ratio_atm));
y=(0.001)*1050;
af1=-0.55313;
af2=181.62;
af3=-97.787;
af4=20.402;
af5=-0.03095;
af6=-60.751;
af8=20.232;
w=(0.001)*T_h_0;
cp_c8h18=(af1+af2*w+af3*(w^2)+af4*(w^3)+af5/(w^2))*4.184;
hf_c8h18=(af1*w+(af2*(w^2))/2+(af3*(w^3))/3+(af4*(w^4))/4-af5/w+af6+af8)*4184;
s_c8h18=360.79+(cp_c8h18*log(T_h_0/298.15))-(8.3144*log(P_h/101.325));
g_c8h18=hf_c8h18-(T_h_0*s_c8h18);
h_N2=((0.0016*(T_h_0*T_h_0)))+(29.388*T_h_0)-540.98)/28;
h_O2=((0.0017*(T_h_0*T_h_0)))+(31.012*T_h_0)-1086.3)/32;
h_CO2=((0.0034*(T_h_0*T_h_0)))+(46.065*T_h_0)-5959.8)/44;
h_H2O=((0.0044*(T_h_0*T_h_0)))+(32.457*T_h_0)-585.41)/18;
h_CO=((0.0015*(T_h_0*T_h_0)))+(29.863*T_h_0)-727.62)/28;
s_Cengel_N2=(84.515*(T_h_0^0.1437))/28;
s_Cengel_O2=(91.264*(T_h_0^0.142))/32;
s_Cengel_CO2=(70.013*(T_h_0^0.1952))/44;
s_Cengel_H2O=(67.622*(T_h_0^0.1794))/18;
s_Cengel_CO=(88.409*(T_h_0^0.112))/28;
g_Cengel_N2=-T_h_0*191.610;
g_Cengel_O2=-T_h_0*205.146;
g_Cengel_CO2=-393521-T_h_0*213.794;
g_Cengel_H2O=-241856-T_h_0*188.824;
g_Cengel_CO=-110528-T_h_0*197.648;
h_0_N2=1000*(N2_Hplus+(N2_a*y)+((N2_b/2)*(y*y))-(N2_c/y)+((N2_d/3)*(y*y*y)));
s_0_N2=N2_Splus+(N2_a*log(T_h_0))+(N2_b*y)-((N2_c/2)/(y*y))+((N2_d/2)*(y*y));
%Bejan'ın kitabında belirtilen sıcaklığın haricinde belirtilen basınç
s_N2=s_0_N2-((8.31447)*log(P_h/101.325));
g_0_N2=h_0_N2-(T_h_0*s_N2);
h_0_O2=1000*(O2_Hplus+(O2_a*y)+((O2_b/2)*(y*y))-(O2_c/y)+((O2_d/3)*(y*y*y)));
s_0_O2=O2_Splus+(O2_a*log(T_h_0))+(O2_b*y)-((O2_c/2)/(y*y))+((O2_d/2)*(y*y));
s_O2=s_0_O2-((8.31447)*log(P_h/101.325));
g_0_O2=h_0_O2-(T_h_0*s_O2);
h_0_CO2=1000*(CO2_Hplus+(CO2_a*y)+((CO2_b/2)*(y*y))-
(CO2_c/y)+((CO2_d/3)*(y*y*y)));
s_0_CO2=CO2_Splus+(CO2_a*log(T_h_0))+(CO2_b*y)-
((CO2_c/2)/(y*y))+((CO2_d/2)*(y*y));
s_CO2=s_0_CO2-(8.31447*log(P_h/101.325));
g_0_CO2=h_0_CO2-(T_h_0*s_CO2);
h_0_H2O=1000*(H2O_Hplus+(H2O_a*y)+((H2O_b/2)*(y*y))-
(H2O_c/y)+((H2O_d/3)*(y*y*y)));
s_0_H2O=H2O_Splus+(H2O_a*log(T_h_0))+(H2O_b*y)-
((H2O_c/2)/(y*y))+((H2O_d/2)*(y*y));
s_H2O=s_0_H2O-(8.31447*log(P_h/101.325));
g_0_H2O=h_0_H2O-(T_h_0*s_H2O);

```

```

h_0_CO=1000.*(CO_Hplus+(CO_a.*y)+((CO_b/2).*(y.*y))-(CO_c./y)+((CO_d/3).*(y.*y.*y)));
s_0_CO=CO_Splus+(CO_a.*log(T_h))+CO_b.*y-((CO_c/2)./(y.*y))+((CO_d/2).*(y.*y));
s_CO=s_0_CO-(8.31447.*log(P_h./101.325));
g_0_CO=h_0_CO-(T_h.*s_CO);
if x2<15.054
    a=m_f_kg./114;
    b=((m_f_kg).*15.052)./137.28;
    f=9.*a;
    c=(25.*a)-(2.*b);
    e=(2.*b)-(17.*a);
    g=0;
    h=3.76.*b;
else
    a=m_f_kg./114;
    b=((m_f_kg).*x2)./137.28;
    c=0;
    e=8.*a;
    f=9.*a;
    h=3.76.*b;
    g=b-e-(f./2);
end;
m_CO=c.*28;
m_CO2=e.*44;
m_O2=g.*32;
m_H2O=f.*18;
m_N2=h.*28;
m_total=m_CO+m_H2O+m_N2+m_CO2+m_O2;
m_debi_total=(((m_f.*x2)+m_f).*0.98);
m_debi_CO2=(m_CO2./m_total).*m_debi_total;
m_debi_CO=(m_CO./m_total).*m_debi_total;
m_debi_H2O=(m_H2O./m_total).*m_debi_total;
m_debi_O2=(m_O2./m_total).*m_debi_total;
m_debi_N2=(m_N2./m_total).*m_debi_total;
m_multiply_deltah_total=(m_debi_CO2.*(1034-h_CO2))+(m_debi_O2.*(1031-
h_O2))+(m_debi_CO.*(1143-h_CO))+(m_debi_H2O.*(2109-h_H2O))+(m_debi_N2.*(1134-
h_N2));
Ex_ch_N2=(8.31447.*T_h_0.*log(1/(0.7478))./28);
Ex_ch_H2O=(8.31447.*T_h_0.*log(1/(0.0216))./18);
Ex_ch_CO=(8.31447.*T_h_0.*log(1/(5.9927e-049))./28);
Ex_ch_CO2=(8.31447.*T_h_0.*log(1/(0.00033))./44);
Ex_ch_O2=(8.31447.*T_h_0.*log(1/(0.2014))./32);
Ex_exh=(m_debi_N2.*(Ex_tm_N2+Ex_ch_N2))+(m_debi_O2.*(Ex_tm_O2+Ex_ch_O2))+(m_de
bi_CO2.*(Ex_tm_CO2+Ex_ch_CO2))+(m_debi_CO.*(Ex_tm_CO+Ex_ch_CO))+(m_debi_H2O.*
(Ex_tm_H2O+Ex_ch_H2O));
Q=(m_f.*44430)-(W+m_multiply_deltah_total);
Ex_loss=(1-(T_h_0./330)).*Q;
ExCh_mol=((a.*g_c8h18)+(b.*g_Cengel_O2)+((b.*3.76).*g_Cengel_N2)-(f.*g_Cengel_H2O)-
(e.*g_Cengel_CO2)-(c.*g_Cengel_CO)-(g.*g_Cengel_O2)-
(h.*g_Cengel_N2))+((e.*Ex_CO2)+(c.*Ex_CO)+(f.*Ex_H2O)+(g.*Ex_O2)+(h.*Ex_N2)-
((b.*Ex_O2)-((b.*3.76).*Ex_N2)));
ExCh=ExCh_mol./m_f_kg;
Ex_in=m_f.*ExCh;
Ex_Dest=Ex_in-W-Ex_loss-Ex_exh;
%%EXERGOEKONOMİK ANALİZ%
i=0.1;
n=15;
CRF=(i*((i+1)^n))/(((1+i)^n)-1); %1/yr
C_fuel=(m_f_kg.*407.6).*(3.07./m_f_d); %$/yr %% Annual Fuel Consumption

```

```

k=(1+0.06)/(1+0.1);
C_f_yr=C_fuel.*(k*(1-(k^n)).*CRF)/(1-k); % $/yr
C_f_h=C_f_yr./407.6; % $/h
Z_engine_yr=404.93;
Z_engine_h=0.74;
Z_CI=(39000.*CRF)/550;
Z_tot=Z_CI+Z_engine_h;
C_p=((Z_tot+C_f_h)/3600)/(Ex_exh+W))*1000000; % $/GJ
C_f=((C_f_h./3600)/Ex_in)*1000000; % $/GJ
C_D_f=((C_f/1000000)*Ex_Dest)*3600; % $/h %% Fuel based
C_D_p=((C_p/1000000)*Ex_Dest)*3600; % $/h %% Product based
r=((C_p-C_f)/C_f)*100;
f_ex=(Z_tot/(Z_tot+((3600/1000000)*C_f*(Ex_Dest))))*100;
%%Exergoenvironmental Analysis%%
b_F=((6.93/3600)*1000./Ex_in)*1000;
b_P=(7.23./(Ex_exh+W)).*1000;
B_dest=b_F.*(Ex_Dest./1000);
B_TOT=B_dest+Y;
r_b=((b_P-b_F)/b_F).*100;
f_b=(Y./(Y+B_dest)).*100;

```

Ek-3 Optimizasyonun çözüm uzayı

ID	HY oranı (%)	Güç ayarı (%)	İrtifa (m)	Ürünün özgül çevresel etki (mPts/MJ)	Yakıtın birim ekserji maliyet (\$/GJ)	Ekserji verimi (%)
0	15.5	70	2000	10.77321	125.6489	17.42672
1	14.25	67.5	1500	10.30855	127.2869	18.63592
2	16.75	72.5	2500	10.2044	122.0236	16.00903
3	14.875	71.25	1750	10.47442	127.0683	18.1793
4	17.375	66.25	2750	10.97098	120.2802	15.16503
5	13.625	73.75	1250	8.913262	127.4345	19.37953
6	16.125	68.75	2250	10.83677	123.8126	16.64112
7	14.5625	74.375	2875	10.25192	128.7333	16.18407
8	17.0625	69.375	1875	10.26943	120.4197	16.93128
9	13.3125	71.875	2375	9.33107	129.4034	17.21712
10	15.8125	66.875	1375	10.84109	123.937	18.38865
11	13.9375	68.125	2125	10.21513	128.4055	17.49795
12	16.4375	73.125	1125	9.678671	121.6561	18.74914
13	15.1875	65.625	2625	11.85886	127.4154	16.29147
14	17.6875	70.625	1625	9.80838	118.2655	17.15079
15	15.34375	69.6875	1312.5	10.56785	125.4382	18.82903
16	17.84375	74.6875	2312.5	9.513931	118.425	15.93637
17	14.09375	67.1875	1812.5	10.34943	127.8329	18.04201
18	16.59375	72.1875	2812.5	10.42427	122.8441	15.51403
19	13.46875	73.4375	1562.5	8.95317	128.0182	18.77544
20	13.1764	71.07361	1581.142	9.022744	128.2924	18.71181
21	13.7611	74.55139	2043.858	9.227467	128.4608	17.84109
22	15.11585	68.45634	1751.504	11.02799	126.6971	18.0459
23	16.82165	72.16866	1873.496	9.975781	121.1764	17.11171
24	15.58993	71.80959	1927.74	10.45771	125.2658	17.56835
25	14.78507	69.77514	1822.26	10.62517	127.2311	18.0104
26	17.76862	71.42506	1963.122	9.808968	118.3315	16.518
27	16.66888	71.69994	2161.878	10.20162	121.9485	16.6363
28	14.66377	72.88024	2537.184	10.39705	128.2045	16.75417
29	13.21123	73.36976	2712.816	9.208952	130.0454	16.65066
30	14.45315	73.73453	1366.964	9.611646	126.956	19.0503
31	16.85935	74.39047	2508.036	9.930539	121.6801	15.9905
32	15.89406	74.10626	2371.96	10.23574	124.711	16.6509
33	17.33655	73.08124	2440.54	9.914554	120.1053	15.88282
34	16.40515	73.4465	1130.044	9.65096	121.7641	18.76346
35	13.65735	74.45731	1244.956	8.855982	127.4028	19.40455
36	13.75423	67.45827	1557.107	9.91342	127.7722	18.58313
37	13.87932	73.47923	1505.393	9.233692	127.5963	18.83811
38	14.9123	71.04987	1590.122	10.46704	126.8536	18.48214
39	17.6502	70.82513	1784.878	9.854814	118.5255	16.87791
40	14.27973	71.73107	2096.3	10.01586	128.0366	17.60323
41	16.99507	74.17211	1144.16	9.39358	119.9271	18.46923
42	15.50054	72.96688	1601.495	10.19512	125.2188	18.27042
43	15.8443	72.11544	1268.461	10.0517	123.7211	18.73217
44	17.04968	71.95417	1927.203	9.951758	120.5101	16.90597
45	15.05367	72.60549	1224.638	10.23228	126.3337	19.23688

Ek-3 (Devam) Optimizasyonun çözüm uzayı

ID	HY oranı (%)	Güç ayarı (%)	İrtifa (m)	Ürünün özgül çevresel etki (mPts/MJ)	Yakıtın birim ekserji maliyet (\$/GJ)	Ekserji verimi (%)
46	17.63363	71.7524	1091.086	9.480587	117.937	18.21028
47	14.12637	74.5321	2116.992	9.546966	128.2116	17.65344
48	17.91991	70.93068	1584.048	9.684112	117.5322	17.13304
49	16.58923	72.25307	1914.448	10.05618	121.9579	17.14196
50	16.65779	71.88187	1342.616	9.853515	121.1734	18.18569
51	14.28403	70.97236	2037.777	10.09433	127.9562	17.694
52	15.21449	73.39142	1067.716	10.00775	125.6112	19.49189
53	14.88036	74.19089	1302.24	9.901915	126.5504	19.14235
54	17.67961	69.56108	1693.086	9.976162	118.3519	17.0012
55	16.41305	74.51042	1061.958	9.493212	121.6711	18.92175
56	15.4852	68.65618	2167.419	11.0498	125.8802	17.08258
57	14.46795	72.31422	1199.545	9.730604	126.7367	19.34537
58	14.81224	71.90689	1271.654	10.11892	126.5667	19.15029
59	15.37193	69.03061	1790.846	10.86654	125.8597	17.86097
60	16.57598	74.74473	1318.035	9.516228	121.408	18.34515
61	15.68137	71.88112	1012.385	10.02722	123.9907	19.31969
62	16.1625	73.03239	1549.507	9.947006	122.9691	18.05175
63	17.51948	72.19715	1377.733	9.566791	118.5443	17.72784
64	15.20188	73.04488	1264.112	10.14084	125.8674	19.09175
65	14.29976	73.90389	1249.305	9.416211	126.9246	19.3076
66	17.70606	70.65544	1445.587	9.730695	118.045	17.47697
67	17.61507	71.72196	1270.499	9.557133	118.1573	17.87546
68	14.48381	71.23923	1200.35	9.881433	126.726	19.31186
69	15.32789	70.82723	1311.695	10.41448	125.491	18.87113
70	13.74666	73.52928	1161.964	8.994363	127.2179	19.53526
71	17.11164	73.36589	1335.045	9.528314	119.7496	18.02544
72	14.86182	72.79467	1204.717	10.02031	126.4528	19.30385
73	13.33068	73.97686	1239.784	8.67482	127.6423	19.43978
74	14.86412	71.07677	1269.932	10.27673	126.5257	19.12465
75	15.79241	72.01968	1270.183	10.08178	123.8939	18.75207
76	17.25128	71.48032	1180.151	9.660131	119.1743	18.20922
77	15.32206	74.62086	1248.771	9.894883	125.4428	19.10195
78	17.0354	73.53703	1096.321	9.439206	119.7568	18.52711
79	16.75771	72.72579	1056.723	9.604363	120.58	18.71696
80	14.48885	72.75036	1194.988	9.692178	126.7157	19.36418
81	15.30116	74.71176	1253.328	9.892316	125.5185	19.10589
82	15.21702	72.93449	1107.733	10.08272	125.646	19.39679
83	17.49976	72.48367	1000.972	9.396024	118.2551	18.46568
84	14.59939	71.75864	1070.5	9.861008	126.4842	19.57575
85	16.31869	74.31337	1244.125	9.616952	122.1548	18.60337
86	17.4481	74.90759	1124.889	9.171707	118.5253	18.31145
87	14.77158	70.26185	1708.464	10.49359	127.1091	18.24612
88	16.7043	73.61966	1086.225	9.522778	120.7758	18.70825
89	15.37547	73.72698	1219.269	9.977017	125.2307	19.11051
90	14.54546	73.67324	1270.422	9.657991	126.7661	19.23105
91	14.78805	73.29944	1398.782	9.971545	126.733	18.93628

Ek-3 (Devam) Optimizasyonun çözüm uzayı

ID	HY oranı (%)	Güç ayarı (%)	İrtifa (m)	Ürünün özgül çevresel etki (mPts/MJ)	Yakıtın birim ekserji maliyet (\$/GJ)	Ekserji verimi (%)
92	14.31421	71.79422	1161.415	9.649668	126.8016	19.42475
93	14.70105	73.6359	1341.175	9.827253	126.7328	19.07037
94	15.20928	73.80025	1186.426	10.00821	125.7578	19.26467
95	14.45836	73.3257	1248.254	9.617283	126.8043	19.2762
96	16.74126	73.86289	1132.284	9.50038	120.705	18.60621
97	16.69131	73.08766	1268.156	9.662544	120.9946	18.34528
98	14.4715	73.91781	1425.285	9.628755	127.0142	18.93692
99	14.4496	72.13094	1558.829	9.887634	127.1984	18.62871
100	13.61803	74.00493	1248.009	8.87886	127.4369	19.39107
101	14.41222	73.22466	1249.55	9.591268	126.8405	19.27614
102	14.55534	72.9824	1245.127	9.741264	126.7278	19.26219
103	14.53291	71.5266	1020.36	9.811485	126.4699	19.67812
104	15.38844	73.60539	1248.679	10.00062	125.2186	19.0416
105	15.04062	74.34117	1248.345	10.00687	126.3695	19.23671
106	14.73509	73.38738	1260.186	9.854464	126.6113	19.22236
107	14.93776	73.32975	1164.424	10.00413	126.3515	19.39143
108	15.19824	73.84017	1221.567	10.02178	125.8335	19.20047
109	15.1634	74.23681	1109.614	9.935498	125.8302	19.45608
110	15.2995	74.66268	1254.605	9.899474	125.5255	19.10292
111	15.32372	74.66994	1289.683	9.905434	125.4814	19.02019
112	16.48315	73.03101	1135.885	9.680696	121.5219	18.7029
113	15.16884	73.48542	1521.814	10.20602	126.2619	18.60607
114	14.95315	74.71593	1246.39	9.879038	126.4324	19.26032
115	13.37783	71.91784	1255.192	8.944928	127.6299	19.34771
116	17.62481	73.73666	1029.703	9.222702	117.9071	18.38395
117	14.58474	73.82688	1182.173	9.636508	126.6296	19.40831
118	14.71445	72.25484	1066.623	9.897659	126.3985	19.58506
119	15.09943	68.54985	1071.593	10.70759	126.0066	19.4049
120	13.82566	74.90057	1211.759	8.917938	127.2294	19.46307
121	16.15547	70.88445	1538.283	10.22503	122.9806	18.02085
122	15.13801	74.70708	1251.442	9.945345	126.0715	19.19407
123	15.30252	74.62553	1250.657	9.901441	125.511	19.10835
124	17.01623	73.37005	1163.832	9.490648	119.8805	18.40058
125	14.37442	74.47088	1207.558	9.393461	126.8159	19.39788
126	13.75765	74.99821	1068.131	8.802821	127.0775	19.76168
127	16.27349	71.30642	1155.242	9.972492	122.2104	18.72122
128	14.78886	73.61559	1131.036	9.819386	126.4209	19.48342
129	15.22675	73.35101	1188.915	10.06079	125.7011	19.23859
130	15.42788	72.07598	1008.855	10.08254	124.8294	19.46358
131	15.57555	74.426	1252.301	9.838797	124.5949	18.96021
132	15.3608	73.3322	1248.865	10.04459	125.312	19.0482
133	14.98079	74.98912	1246.204	9.870362	126.4116	19.2646
134	14.99077	73.245	1153.556	10.05924	126.301	19.4053
135	16.8222	73.60698	1190.713	9.529738	120.5088	18.44669
136	14.1755	73.39138	1053.483	9.298355	126.7617	19.7021
137	15.49735	73.32575	1262.486	10.00641	124.8673	18.95099

Ek-3 (Devam) Optimizasyonun çözüm uzayı

ID	HY oranı (%)	Güç ayarı (%)	İrtifa (m)	Ürünün özgül çevresel etki (mPts/MJ)	Yakıtın birim ekserji maliyet (\$/GJ)	Ekserji verimi (%)
138	15.02477	73.27628	1019.077	10.02877	126.128	19.6768
139	15.41519	73.84213	1267.909	9.970037	125.1491	18.99559
140	14.23295	73.76214	1389.782	9.434981	127.1573	19.03146
141	15.67455	71.78108	1013.927	10.04311	124.0149	19.31729
142	16.33166	73.9342	1068.017	9.589223	121.9364	18.93519
143	15.29587	73.96764	1061.658	9.905933	125.3295	19.47698
144	15.00013	72.96081	1039.009	10.05501	126.1671	19.62997
145	17.14967	74.55227	1089.682	9.283969	119.3996	18.51139
146	15.22314	74.75825	1239.809	9.906236	125.7687	19.17466
147	15.24279	74.67279	1046.103	9.828855	125.492	19.55525
148	15.11669	72.46175	1117.157	10.18169	125.9975	19.4173
149	16.82831	72.73922	1016.698	9.56609	120.3212	18.76179
150	17.13128	72.40007	1060.382	9.535257	119.4281	18.52193
151	13.99622	74.36519	1068.199	9.051409	126.9081	19.71839
152	15.62556	73.82734	1175.205	9.865207	124.3468	19.07353
153	13.27192	73.84167	1274.876	8.66184	127.7407	19.37354
154	15.86818	73.39233	1071.372	9.799852	123.4382	19.14679
155	15.93331	74.72348	1058.063	9.611226	123.2117	19.17528
156	15.57983	74.55711	1265.517	9.826717	124.5946	18.93499
157	15.41091	73.71102	1254.693	9.982427	125.1494	19.02082
158	15.43977	72.90331	1058.723	9.992941	124.8428	19.37913
159	15.91572	74.99849	1056.718	9.583096	123.2677	19.19397
160	14.74668	73.93778	1063.048	9.713826	126.3716	19.63503
161	15.33806	73.64545	1246.418	10.01109	125.3862	19.07306
162	16.19032	74.88375	1035.529	9.505116	122.3566	19.09486
163	14.76776	73.11601	1041.61	9.825424	126.3318	19.6541
164	15.20623	73.25095	1046.65	10.01936	125.6163	19.53534
165	15.68963	73.10073	1628.028	10.12552	124.6115	18.12957
166	15.44213	73.37161	1073.136	9.938653	124.8503	19.3614
167	15.53511	72.47715	1000.906	9.992343	124.4632	19.43506
168	15.08103	73.39137	1056.008	10.04653	126.0523	19.58624
169	14.30896	73.39144	1065.191	9.410735	126.6826	19.66376
170	15.03768	73.3669	1241.896	10.1255	126.3645	19.22436
171	14.96788	74.89849	1023.385	9.775822	126.1721	19.71771
172	15.45086	74.21238	1061.172	9.825579	124.8083	19.40352
173	15.28478	72.65857	1059.209	10.07523	125.3643	19.45229
174	14.56902	73.56162	1225.121	9.673175	126.6933	19.31642
175	14.73018	72.5201	1023.674	9.859669	126.337	19.67822
176	15.37062	74.89912	1012.776	9.746533	125.0255	19.56196
177	15.54348	74.81348	1528.725	9.915724	124.9963	18.43826
178	15.11225	73.06276	1030.625	10.06748	125.9181	19.6126
179	15.2084	74.18116	1050.109	9.90259	125.6128	19.5522
180	15.22128	72.41439	1180.981	10.18067	125.7111	19.23208
181	14.4757	72.83316	1348.851	9.734311	126.916	19.05983
182	15.48103	72.19245	1007.674	10.04955	124.6506	19.44155
183	15.48196	72.36068	1002.087	10.02505	124.6415	19.45707

Ek-3 (Devam) Optimizasyonun çözüm uzayı

ID	HY oranı (%)	Güç ayarı (%)	İrtifa (m)	Ürünün özgül çevresel etki (mPts/MJ)	Yakıtın birim ekserji maliyet (\$/GJ)	Ekserji verimi (%)
184	13.9317	73.56893	1053.739	9.087519	126.9341	19.73318
185	15.67168	71.89842	1008.599	10.02649	124.0187	19.3328
186	14.79004	69.99669	1022.797	10.24554	126.2945	19.60071
187	14.81947	73.34596	1186.144	9.903828	126.4625	19.36107
188	14.37237	73.31392	1192.767	9.523958	126.7987	19.39709
189	15.6545	73.88456	1062.542	9.802219	124.1322	19.28678
190	16.57346	74.04166	1056.258	9.499227	121.1576	18.84204
191	13.51777	74.34821	1053.944	8.696484	127.2277	19.79948
192	16.22156	71.55254	1007.022	9.896127	122.2275	19.0474
193	15.6525	71.91611	1006.269	10.02938	124.0797	19.34788
194	15.84029	74.95773	1059.039	9.612037	123.5167	19.22666
195	16.4071	73.97497	1066.978	9.561148	121.695	18.90097
196	15.02608	74.38328	1058.608	9.907132	126.1707	19.62557
197	15.98826	73.73156	1055.463	9.713937	123.0301	19.12684
198	13.86131	74.3232	1063.066	8.952206	126.9968	19.74251
199	15.76505	71.4569	1051.589	10.07226	123.756	19.18608
200	15.19133	74.42824	1031.882	9.869619	125.6508	19.60502
201	15.8217	73.269	1042.658	9.818046	123.5607	19.22481
202	15.18145	71.87717	1021.126	10.19526	125.6727	19.56234
203	15.5833	72.54331	1015.768	9.974602	124.3188	19.3818
204	15.78341	73.55223	1055.315	9.799936	123.6995	19.22646
205	15.28588	73.5707	1056.156	9.956801	125.3573	19.48277
206	14.96415	73.25454	1003.755	9.969031	126.1527	19.71412
207	15.59885	72.49751	1054.34	9.991756	124.308	19.29459
208	15.86446	73.72721	1064.181	9.75649	123.4429	19.17199
209	15.77831	73.88892	1053.824	9.759188	123.7147	19.24099
210	16.33272	72.75913	1058.584	9.729597	121.9236	18.92244
211	15.6721	72.87085	1005.478	9.900089	124.0141	19.36573
212	15.73006	73.36686	1054.826	9.839696	123.8746	19.24978
213	15.00548	73.90908	1063.724	9.949821	126.1908	19.60467
214	15.82303	74.66237	1051.588	9.649903	123.5656	19.24285
215	15.11746	73.6124	1024.207	9.992715	125.8934	19.63798
216	15.5496	71.68842	1082.76	10.12518	124.5017	19.24026
217	15.65719	72.68715	1007.65	9.929117	124.0656	19.364
218	15.04286	73.94212	1021.085	9.961806	126.1177	19.68884
219	14.9511	74.60687	1060.909	9.812298	126.2257	19.63495
220	15.75536	72.57287	1006.471	9.911947	123.7408	19.31275
221	15.3987	72.65866	1001.095	10.01317	124.9188	19.5108
222	15.68184	74.72548	1003.467	9.666379	123.9798	19.41422
223	14.87934	72.13495	1056.047	10.05774	126.2705	19.58527
224	15.90268	74.58341	1058.892	9.637849	123.3125	19.18556
225	15.38847	74.58669	1061.319	9.799317	125.0175	19.44558
226	14.8166	74.46518	1041.473	9.701716	126.2976	19.68558
227	16.12389	74.09154	1034.322	9.61979	122.5693	19.1102
228	15.57799	72.79397	1004.384	9.939436	124.3244	19.41449
229	15.68717	73.05004	1051.349	9.891731	124.0124	19.27026

Ek-3 (Devam) Optimizasyonun çözüm uzayı

ID	HY oranı (%)	Güç ayarı (%)	İrtifa (m)	Ürünün özgül çevresel etki (mPts/MJ)	Yakıtın birim ekserji maliyet (\$/GJ)	Ekserji verimi (%)
230	15.3273	73.06283	1029.455	9.996586	125.1889	19.50161
231	15.39914	73.84257	1003.333	9.863845	124.9197	19.53826
232	15.87112	74.0525	1030.77	9.700768	123.3865	19.24431
233	15.39705	72.9812	1037.124	9.987652	124.9629	19.4473
234	15.02091	73.37308	1013.941	10.01061	126.125	19.69039
235	15.12262	74.62261	1068.874	9.883372	125.9246	19.57088
236	15.66109	72.47605	1000.877	9.952025	124.0456	19.36988
237	15.55538	72.28857	1012.413	10.01501	124.408	19.39601
238	14.99403	72.70454	1386.142	10.23326	126.5579	18.9217
239	16.69499	74.25364	1035.599	9.430081	120.7555	18.82884
240	14.99372	74.41357	1032.414	9.862689	126.1642	19.68355
241	15.16549	74.91317	1022.853	9.814282	125.7287	19.64998
242	15.57904	73.79368	1057.92	9.835483	124.3775	19.33259
243	15.57891	71.64915	1005.761	10.08791	124.3229	19.37941
244	16.02327	74.59585	1062.792	9.600952	122.9239	19.11699
245	14.76765	74.965	1012.181	9.586497	126.2976	19.76407
246	15.7579	73.17266	1062.37	9.858398	123.7907	19.21515
247	15.36062	74.78089	1053.776	9.781203	125.103	19.48056
248	15.01984	73.79318	1013.043	9.955936	126.1247	19.70379
249	14.96895	74.47839	1024.283	9.828765	126.1723	19.70462
250	15.27124	72.12216	1001.79	10.12483	125.348	19.56134
251	15.39174	74.82522	1470.272	9.939607	125.4458	18.62967
252	15.87769	73.37011	1024.813	9.780552	123.3589	19.23485

KAYNAKLAR

- [1] Hansen, J., Sato, M., Kharecha, Beerling, D., Berner, R., Masson-Delmotte, V., Raymo, M., Royer, D.L. ve Zachos, J.C., *Target atmospheric CO2: where should humanity aim?* <http://arxiv.org/abs/0804.1126> and <http://arxiv.org/abs/0804.1135> (Siteye Giriş: Şubat 2011)
- [2] Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguier, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K. ve Johnson C.A., *IPCC 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [3] Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. ve Miller, H.L., *IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge United Kingdom and New York, NY, USA.
- [4] Lynas, M., *6 Derece: Isınan Dünyadaki Geleceğimiz*, NTV yayınları, İstanbul, 2008.
- [5] Lynas, M., *Karbon Ayak İziniz*, Açık Radyo Kitapları 2, Metsims Yayımevi, İstanbul, 2009.
- [6] Bernstein et al., *Climate change 2007: IPCC Plenary XXVII Synthesis Report*, Spain, 2007.
- [7] Anonim, *Türkiye Enerji İstatistikleri Raporu 2008*, http://www.tuik.gov.tr/VeriBilgi.do?tb_id=10&ust_id=3 (Siteye Giriş: Şubat 2011)
- [8] Cleveland, C.J., *Encyclopedia of energy*, Elsevier Academic Press, ABD, 2004.
- [9] Raymer, P.D., *Aircraft Design: A Conceptual Approach*, AIAA Education Series, USA, 1989.
- [10] Anonim, *Airport air quality guidance manual*, Report No. Doc 9889, ICAO Secretariat, 2007.

- [11] Güler, G., *Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ve Çevre Mühendisliği Açısından Uygulama Alanları*, Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Eskisehir, Türkiye, 2004.
- [12] Anonim, *Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü*, www.shgm.gov.tr, (Siteye Giriş: Şubat 2011)
- [13] Hiereth, H. ve Prenninger, P., *Charging of the International Combustion Engine*, Springer, ABD, 2007.
- [14] Crane, D., *Powerplant*, Aviation Maintenance Technician Series, Canada, 2005.
- [15] Kroes, M.J. ve Wild, T.W., *Aircraft Powerplants*, Aviation Technology Series, New York, 1995.
- [16] Anonim, *Aviation Fuel Technology Review Report*, 2006.
- [17] Pulkrabek, W.W., *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*, Pearson Education International, ABD, 2004.
- [18] Anonim, *AOPA, Air Safety Foundation*, www.aopa.org, (Siteye Giriş: Şubat 2008).
- [19] Heywood, J.B. *International Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill Book Company, ABD, 1988.
- [20] Yardım, M.H., *Motor Teknolojisi*, Nobel Yayın Dağ., Ankara, 2008.
- [21] Gunston, B., *The Development of The Piston Aero Engines*, Haynes Publishing, 1999.
- [22] Bejan, A. ve Siems, D.L., "The Need for Exergy Analysis and Thermodynamic Optimization in Aircraft Development," *International Journal of Exergy*, 1(1), 14-24, 2001.
- [23] Pellegrini, L.F., Gandolfi, R. ve Silva, G.A.L., "Exergy Analysis as A Tool for Decision Making in Aircraft Systems Design," *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Conference Proceedings, 2007.
- [24] Moorhouse, D.J., "Proposed System-Level Multidisciplinary Analysis Technique Based on Exergy Methods," *Journal of Aircraft*, 40(1), 11-15, 2003.

- [25] Muñoz, J.R., ve von Spakovsky, M.R., "Decomposition in Energy System Synthesis/Design Optimization for Stationary and Aerospace Applications," *Journal of Aircraft*, 40(1), 35-42, 2003.
- [26] Figliola, R.S. ve Tipton, R., "An Exergy-Based Methodology for Decision-Based of Integrated Aircraft Thermal Systems," *World Aviation Congress & Exposition*, No:2000-01-5527, SAE, 2000.
- [27] Figliola, R.S., Tipton, R. ve Li, H., "Exergy Approach to Decision-Based Design of Integrated Aircraft Thermal Systems," *Journal of Aircraft*, 40(1), 49-55, 2003.
- [28] Periannan, V., von Spakovsky, R. ve Moorhouse, D.J., "A Study of Various Energy- and Exergy-Based Optimization Metrics for the Design of High Performance Aircraft Systems," *The Aeronautical Journal*, 112(1134), 449-458, 2008.
- [29] Etele, J. ve Rosen, M.A., "Sensitivity of exergy efficiencies of aerospace engines to reference environment selection," *Exergy Int. J.*, 1(2), 91-99, 2001.
- [30] Tona, C., Raviolo, P.A., Pellegrini, L.F. ve Junior, S.O., "Exergy and thermoeconomic analysis of a turbofan engine during a typical commercial aircraft," *Energy*, 35, 952-959, 2010.
- [31] Rosen, M.A. ve Etele, J., "Aerospace systems and exergy analysis: applications and methodology development needs," *Int. J. Exergy*, 1(4), 411-425, 2004.
- [32] Roth, B., McDonald, R. ve Mavris, D., "A method for thermodynamic work potential analysis of aircraft engines," *AIAA Publication*, No:2002-3768, 2002.
- [33] Leo, T.J. ve Perez-Grande, I., "A thermoeconomic analysis of a commercial aircraft environmental control system," *Applied Thermal Eng.*, 25, 309-325, 2005.
- [34] Turgut, E.T., Karakoç, T.H. ve Hepbaşlı, A., "Exergetic analysis of an aircraft turbofan engine," *International Journal of Energy Research*, 31(14), 1383-1397, 2007.

- [35] Turgut, E.T., Karakoç, T.H., Hepbaşlı, A. ve Rosen, M.A., "Exergy analysis of a turbofan aircraft engine," *International Journal of Exergy*, 6(2), 181-199, 2009.
- [36] Turgut, E.T., Karakoç, T.H. ve Hepbaşlı, A., "Exergoeconomic analysis of an aircraft turbofan engine," *Journal of Exergy*, 6(3), 277-294, 2009.
- [37] Roth, B. ve Mavris, D., "A work availability perspective of turbofan engine performance," *AIAA Publication*, No:2001-0391, 2001.
- [38] Koroneos, C., Dompros, A., Roumbas, G. ve Moussiopoulos, N., "Advantages of the use of hydrogen fuel as compared to kerosene," *Resources, Conservation and Recycling*, 44, 99-113, 2005.
- [39] Zhecheng, L., Brun, M. ve Badin, F., "A Parametric Study of SI Engine Efficiency and of Energy and Availability Losses Using a Cycle Simulation," *SAE Papers*, No:910005, 1991.
- [40] Rakoupoulos, C.D., "Evaluation of a spark ignition engine cycle using first and second law analysis techniques," *Energy Convers. Mgmt.*, 34(12), 1299-1314, 1993.
- [41] Sezer, İ. ve Bilgin, A., "Exergy analysis of SI engines," *Int. J. Exergy*, 5(2), 204-217, 2008.
- [42] Sezer, İ. ve Bilgin, A., "Mathematical analysis of spark ignition engine operation via the combination of the first and second laws of thermodynamics," *Proc. R. Soc. A*, 1-22, 2008.
- [43] Kopaç, M. ve Köktürk, L., "Determination of optimum speed of an internal combustion engine by exergy analysis," *Int. J. Exergy*, 2(1), 40-54, 2005.
- [44] Ameri, M., Kiaahmadi, F., Khanaki, M. ve Nazoktabar, M. "Energy and exergy analyses of a spark-ignition engine," *Int. J. Exergy*, 7(5), 547-563, 2010.
- [45] Abu-Nada, E., Al-Hinti, I., Akash, B. ve Al-Sarkhi, A., "Thermodynamic analysis of spark-ignition engine using a gas mixture model for the working fluid," *Int. J. Energy Res.*, 31, 1031-1046, 2006.
- [46] Ribeiro, B., Martins, J. ve Nunes, A., "Generation of Entropy in Spark Ignition Engines," *Int. J. of Thermodynamics*, 10(2), 53-60, 2007.

- [47] Sayın, C., Horoz, M., Çanakçı, M. ve Kılıçaslan, I., "Energy and exergy analysis of a gasoline engine," *Int. J. Energy Res.*, **31**, 259-273, 2007.
- [48] Zhang, S. ve Sobiesiak, A., "The first and second analyses of a port-injected, spark ignition engine fuelled with compressed natural gas," *Journal of KONES Internal Combustion Engines*, **1(2)**, 298-302, 2002.
- [49] Rakopoulos C.D., Michos, C.N. ve Giakoumis, E.G., "Availability analysis of a syngas fueled spark ignition engine using a multi-zone combustion model," *Energy*, **33**, 1378-1398, 2008.
- [50] Özcan, H. ve Söylemez, M.S., "Effect of water additon on the exergy balances of an LPG fuelled spark ignition engine," *Int. J. Exergy*, **2(2)**, 194-206, 2005.
- [51] Caton, J.A., "Implications of fuel selection for an SI engine: Result from the first and second law of thermodynamics," *Fuel*, **89**, 3157-3166, 2010.
- [52] Sezer, İ., Altın, İ. ve Bilgin, A., "Exergetic analysis of using oxygenated fuels in spark-ignition (SI) engines," *Energy & Fuels*, **23(4)**, 1801-1807, 2009.
- [53] Pourkhesalian, A.M., Shamekhi, A.H. ve Salimi, F. "Alternative fuel and gasoline in an SI engine: A comperative study of performance and emissions characteristics," *Fuel*, **89**, 1056-1063, 2010.
- [54] Nieminen, J. ve Dince, I., "Comparative exergy analysis of gasoline and hydrogen fueled ICEs," *International Journal of Hydrogen Energy*, **35**, 5124-5132, 2010.
- [55] Ismail, S. ve Mehta, P.S., "Second law analysis of hydrogen-air combustion in a spark ignition engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, **36**, 931-946, 2011.
- [56] Anonim, *FACO (Federal Office of Civil Aviation)*, <http://www.bazl.admin.ch/fachleute/lufttechnik/entwicklung/00653/00764/index.html?lang=en/> (Siteye giriş: 30 Mart 2010).
- [57] Çengel, Y., Boles, M.A., *Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik*, Güven Bilimsel, İzmir, 2008.
- [58] Anonim, *Petrol Ofisi Yakıt Fiyatları*, Burak Sakar (*Havacılık Satış Danışmanı*) ile yapılan görüşme, Airline Sales Manager, (Aralık, 2009).

- [59] Anonim, *Lycoming. After Engine Exchange Price List – 2010*, Official website, <http://www.lycoming.textron.com/utility/global-resources/2010-Aftermarket-Engine-Price-List.pdf/> (Siteye giriş: 30 Mart 2010).
- [60] Anonim, *Lycoming Flyer: Key Reprints*, <http://www.lycoming.textron.com/support/tips-advice/key-reprints/> (Siteye Giriş: Haziran 2010).
- [61] Çalışkan, H., Tat, M.E. ve Hepbaşlı, A., “A review on exergetic analysis and assessment of various types of engines,” *Int. J. Exergy*, **7(3)**, 287-310, 2010.
- [62] Kotas, T.J., *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, Krieger Publishing Company, Malabar, FL, 1995.
- [63] Bejan A., Tsatsaronis G. ve Moran M., *Thermal Design and Optimization*, John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [64] Moran, M.J. ve Shapiro, H.N., *Fundamental of Engineering Thermodynamics, 3rd ed.*, John Wiley & Sons, New York, 2000.
- [65] Anonim, *050 Meteorology, Oxford aviation training*, Jeppesen, 2001 ISBN: 0-88487-286-6.
- [66] Hepbaşlı, A. *Schneider Electric Enerji Verimliliği Serisi 1: Enerji Verimliliği ve Yönetim Sistemi: Yaklaşımlar ve Uygulamalar*, Esen Ofset, İstanbul, 2010.
- [67] Söğüt, Z., “Çimento Sektöründe Döner Fırın Prosesinin Eksergoekonomik Optimizasyonu,” Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2009.
- [68] Dincer I. ve Rosen M.A., *Exergy: Energy Environmental and Sustainable Development*, Elsevier, ABD, 2007.
- [69] Lazzaretto, A., ve Tsatsaronis, G., “SPECOC: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems,” *Energy*, **31(8-9)**, 1257-1289, 2006.
- [70] Tsatsaronis, G. ve Moran, M.J., “Exergy-aided cost minimization,” *Energy Convers. Mgmt.*, **38(15-17)**, 1535-1542, 1997.
- [71] Tsatsaronis, G., “Recent developments in exergy analysis and exergoeconomics,” *Int. J. Exergy*, **5(5/6)**, 489-499, 2008.

- [72] Tsatsaronis, G., ve Morosuk, T., "A general exergy-based method for combining a cost analysis with an environmental impact analysis. Part I—Theoretical Development; Part II—Application to a cogeneration system," *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE*, Boston, Massachusetts, USA, No: IMECE2008-67218-9, 2008.
- [73] Meyer, L., Tsatsaronis, G., Buchgeister, J. ve Schebek, L., "Exergoenvironmental analysis for evaluation of the environmental impact of energy conversion systems," *Energy*, **34**, 75-89, 2009.
- [74] Goedkoop, M., ve Spriensman, R., *The Eco-indicator 99: a damage oriented method for life assessment, methodology report, second editing*, PreConsultatants, Amersfoort, The Netherlands, 2000.
- [75] Meyer, L., Castillo, R., Buchgeister, J. Ve Tsatsaronis, G., "Application of exergoeconomic and exergoenvironmental analysis to an SOFC system with an allothermal biomass gasifier," *Int. J. of Thermodynamics*, **12**(4), 177-186, 2009.
- [76] Tsatsaronis, G. ve Morosuk, T., " Understanding and improving energy conversion processes with the aid of exergy-based methods," *1st International Exergy, Life Cycle Assessment and Sustainability Workshop & Symposium (ELCAS)*, Greece, 2009.
- [77] Şen, Zekai, *Genetik Algoritmalar ve En İyileme Yöntemleri*, Su Vakfı Yayınları, 2004.
- [78] Melanie, M., *An Introduction to Genetic Algorithms*, MIT Press London, England, 1999.
- [79] Goldberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
- [80] Holland, J.H., *Adaptation in Natural and Artificial System*, Second Edition, MIT Press, USA, 1992.
- [81] Ünlüsoy Y. S., Eralp O. C. ve Öner D.," Doğal Gaz Dağıtım Ağlarının Tasarım Optimizasyonu," Doğalgaz & Enerji Yönetimi Kongre Ve Sergisi, TMMOB Maltına Mühendisleri Odası Gaziantep Şubesi, Gaziantep, Eylül 2001.

- [82] Fığlalı A. ve Engin O., “Genetik Algoritmalarla Akış Tipi Çizelgelemede Üreme Yöntemi Optimizasyonu”, *İTÜ Dergisi*, 1-6, 2002.
- [83] Tuncel, H., *Askeri Nöbet Çizelgelerinin Genetik Algoritma Kullanılarak Eniyilenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Ünivesitesi, Fen Bilimleri Estitüsü, Eskişehir, 2005.
- [84] Birođul, S., *Genetik Algoritma Yaklaşımıyla Atölye Çizelgeleme*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2005.
- [85] Sinriech D. ve Samakh E., “A Genetic Approach to the Pickup/Delivery Station Location Problem in Segmented Flow Based Material Handling Systems,” *Journal of Manufacturing Systems*, **18(2)**, 81-99, 1999.
- [86] Sasaki D., *ARMOGA, An efficient Multi-Objective Genetic Algorithm*, 2005.
- [87] Willcox, K., *Cost Analysis, 16.885 Aircraft Systems Engineering, Lecture notes*, MIT Aerospace Computational Design Laboratory, 2004.

TEZDE ÇIKAN YAYINLAR

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitaplarında Basılan Bildiriler

- 1- Altuntas, O., Karakoc, T.H., and Hepbasli, A., "Energy Analysis of Piston-prop Aircrafts at Various Altitudes", The Fourth World Congress Aviation in the XXI-Century, National Aviation University (NAU), Kyiv, Ukraine, 22/09/2010.
- 2- Altuntas, O., Karakoc, T.H., and Hepbasli, A., "Exergoenvironmental Analysis of Piston-prop Aircrafts", 6th International Green Energy Conference (IGEC-VI) Abstracts Books, IGEC-VI-2011-221, ISBN: 978-605-89885-3-8, Eskisehir, Turkey, 7/6/2011.
- 3- Altuntas, O., Karakoc, T.H., and Hepbasli, A., "Exergoeconomic Environmental Optimization of Piston-prop Aircrafts", 6th International Green Energy Conference (IGEC-VI) Abstracts Books, IGEC-VI-2011-222, ISBN: 978-605-89885-3-8, Eskisehir, Turkey, 7/6/2011.

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler

- 1- Altuntas, O., Karakoc, T.H., and Hepbasli, A., "Exergetic, Exergoeconomic and Sustainability Assessments of Piston-Prop Aircraft Engines" Isı Bilim ve Tekniği Dergisi, J. of Thermal Science and Technology, TIBTD, 2011 (*Baskıda*)