



|

**BİR UÇAĞA AİT GAZ TÜRBİNLİ
MOTORUN GENİŞLETİLMİŞ
EKSERJİ ANALİZİ**

Doktora Tezi

Muhammet YILANLI

Eskisehir 2024

**BİR UÇAĞA AİT GAZ TÜRBİNLİ MOTORUN GENİŞLETİLMİŞ EKSERJİ
ANALİZİ**

Muhammet YILANLI

Doktora Tezi

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Önder ALTUNTAŞ

(İkinci Danışman: Prof. Dr. Emin AÇIKKALP)

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ocak 2024

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Muhammet YİLANLI'nın BİR UÇAĞA AİT GAZ TÜRBİNLİ MOTORUN GENİŞLETİLMİŞ EKSERJİ ANALİZİ başlıklı çalışması 12/01/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye

: Prof. Dr. Önder ALTUNTAŞ

Üye

: Prof. Dr. Hakan ÇALIŞKAN

Üye

: Doç. Dr. Işıl YAZAR

Üye

: Dr. Öğr. Üyesi Birsen YÖRÜK
AÇIKEL

Üye

: Dr. Öğr. Üyesi Elif KORUYUCU

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

12/01/2024

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yrttğm Doktora ğrencisi Muhammet YLANLI, BR UçAğA AT GAZ TRBNLI MOTORUN GENİşLETLMİş EKSERJ ANALZ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve ğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun grlmştir.

Tez Danişmanı

Prof. Dr. nder ALTUNTAş

ÖZET
BİR UÇAĞA AİT GAZ TÜRBİNLİ MOTORUN GENİŞLETİLMİŞ EKSERJİ
ANALİZİ

Muhammet YILANLI

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2024

Danışman: Prof. Dr. Önder ALTUNTAŞ

(İkinci Danışman: Prof. Dr. Emin AÇIKKALP)

Mevcut enerji kaynaklarının etkili ve verimli bir şekilde kullanabilmek için enerji kaynaklarının kullanıldığı teknolojik altyapıların sürdürülebilir bir fonksiyon kazanmasını zorunlu hale getirmektedir. Extended Exergy Accounted (EEA) metodu ile bugüne kadar mevcut literatürde gerçekleştirilen ekserjetik çalışmalarda yer alan enerji akışları ve materyal haricinde, ek olarak sistem sınırları içerisinde sermaye, iş gücü ve çevresel etkilerin ekserjetik akışlarının da eklenmesiyle sisteme ait daha derin ve geniş bir ekserji analiz yöntemi gerçekleştirilebilmektedir. Sistem için harcanan sermaye, kullanılan işgücü ve sistemden kaynaklanan çevresel etkinin karşılığı olarak harcanan ekserji akışları gibi dışsallıkların, enerji ve materyal içerikleri ile beraber toplam kaynak kullanımı içerisinde ele alınmasıyla EEA metodunu daha da gerçekçi temellere dayandırır. Bu sebeple eylem yapıcı bireylerin kaynak kullanım kalitesi ve verimlilik değerlendirmesi için gerçekleştirdikleri faaliyetlerde hem çevresel, hem de mali açıdan daha isabetli karar verme sürecinde önemli bir katkı sunar, Bu çalışmada, bir uçağa ait gaz türbinli uçak motorunun kaynak kullanım verimliliği açısından ekserji, ekserjo-ekonomik ve kümülatif ekserji tüketimi (Cumulative Exergy Consumption, CE_{XC}) analiz metotlarını içererek enerji, sermaye, işgücü, materyal ve çevresel etki parametrelerini değerlendirerek kapsamlı bir karşılaştırma Genişletilmiş Ekserji Analiz Metodu (EEA) ile gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Ekserji, Ekserjoekonomi, Kümülatif ekserji tüketimi, Genişletilmiş ekserji analiz metodu, Gaz türbinli uçak motoru.

ABSTRACT

EXTENDED EXERGY ACCOUNTING METHOD OF AN AIR VEHICLE'S GAS TURBINE ENGINE

Muhammet YİLANLI

Department of Department of Airframe and Powerplant Maintenance

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, January 2024

Supervisor: Prof. Dr. Önder ALTUNTAŞ

(Co-Supervisor: Prof. Dr. Emin AÇIKKALP)

The technical infrastructures in which energy resources are employed must perform sustainably in order to use the available energy resources effectively and efficiently. By including capital, labor, and environmental impact exergy flows within the system boundaries in addition to the flows of energy and material included in the exergetic studies carried out in the existing literature to date, the Extended Exergy Accounted (*EEA*) method makes it possible an in-depth and more expansive exergetic analysis of the system. The *EEA* approach is constructed on a more realistic basis since it incorporates the energy flows of capital, labor, and environmental impact within the overall resource use, together with the energy and material composition. This is why it makes a significant contribution to the process of making more informed decisions in terms of both environmental and financial considerations during the activities of decision-makers for resource usage quality and efficiency assessment. Exergy, exergo-economic, and cumulative exergy consumption (*CE_xC*) analysis methods were included in this study's evaluation of the energy, capital, labor, material, and environmental impact parameters in terms of resource use efficiency of a gas turbine aircraft engine belong to an air vehicle. |

Keywords: |Exergy, Exergo-economy, Cumulative exergy consumption, Extended exergy accounted method, Gas turbine engine,|

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca pozitif yaklaşımı, bilgisi, birikimi ve metaneti ile desteklerini esirgemeyen, daima en iyiye ve en verimliye yönlendiren değerli danışmanım Sayın Doç. Dr. Önder ALTUNTAŞ'a,

Tezin gelişmesi için değerli katkılarını sunan Sayın Prof. Dr. Emin AÇIKKALP'a,

Tez izleme süreçlerinde değerli yorumlarını eksik etmeyen sayın Prof. Dr. Hakan ÇALIŞKAN, Doç. Dr. Işıl YAZAR, Dr. Öğr. Üyesi Birsen YÖRÜK AÇIKEL ve Dr. Öğr. Üyesi Elif KORUYUCU'ya,

Yükseköğrenimim boyunca derslerini takip ettiğim öğretim üyelerine,

Değerli çalışma arkadaşlarım Sayın S. Kağan AYAZ, M. Emin ÇILGIN, Tarık GÜNEŞ, Hakan AYGÜN ve Barış KARABAYRAK'a

En içten teşekkürlerimi sunarım

Muhammet YİLANLI

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Muhammet YİLANLI

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ	XIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XVI
1. GİRİŞ	1
1.1. Gaz Türbinli Uçak Motorları.....	1
1.2. Literatür Araştırması	3
1.2.1. Ekserji ve ekserjo-ekonomi	3
1.2.2. Kümülatif ekserji tüketimi (CE_{xC}).....	9
1.2.3. Genişletilmiş ekserji analiz metodu (EEA)	20
1.2.4. Tezin önemi ve amacı	31
2. ANALİZ.....	33
2.1. Sistem ve Kabuller	33
2.1.1. Kütle ve materyal tayini.....	36
2.2. Enerji Analizi.....	42
2.3. Ekserji Analizi	42
2.3.1. Kelvin-planck ifadesi.....	43
2.3.2. Clausius ifadesi	43
2.3.3. Hesaplamalar	49
2.3.4. Sonuçların karşılaştırılması.....	51

2.3.4.1. Ekserji verimi.....	51
2.3.4.2. Ekserji yıkım oranı	52
2.3.4.3. Yakıt ekserjisi tüketim oranı.....	54
2.3.4.4. Ürün ekserjisi kaybı.....	54
2.3.4.5. Ekserjetik iyileştirme potansiyeli.....	56
2.3.4.6. Atık ekserji oranı.....	57
2.3.4.7. Ekserji yıkım faktörü	58
2.3.4.8. Çevresel etki faktörü	58
2.3.4.9. Ekserjetik sürdürülebilirlik endeksi.....	59
2.3.5. Ekserji analizi değerlendirme.....	60
2.4. Ekserjo-ekonomik Analiz	60
2.4.1. Ekonomik analize giriş.....	60
2.4.2. Ekserjo-ekonomi.....	63
2.4.3. Hesaplamalar	69
2.4.4. Sonuçların karşılaştırılması.....	71
2.4.4.1. Ekserji yıkım maliyeti	71
2.4.4.2. İzafi maliyet farkı.....	72
2.4.4.3. Özgül akış maliyeti.....	73
2.4.4.4. Ekserjo-ekonomik faktör	75
2.4.4.5. Özgül itki maliyeti	78
2.4.5. Ekserjo-ekonomik analizi değerlendirme.....	79
2.5. Genişletilmiş Ekserji Analiz Metodu (EEA).....	80
2.5.1. EEA yönteminin swot analizi	81
2.5.1.1. EEA metodunun güçlü yönleri	82
2.5.1.2. EEA metodunun kısıtlı yönleri.....	83
2.5.2. Kümülatif ekserji tüketimi akışı (CEXC).....	85
2.5.3. Kümülatif enerji arzı (CED)	87
2.5.4. Fiziksel ekserji akışları (EEphy)	91
2.5.5. İşgücünün ekserjetik eşdeğerliliği ve ekonometrik faktörler (EEL)	
.....	92
2.5.5.1. Hesaplamalar	93
2.5.5.2. Gaz Türbinli Motorunun İşgücü Girdisinin Eşdeğer (EEL),	94

2.5.6. Gaz türbinli motorunun yatırım maliyetlerinin ekserjetik eşdeğeri (<i>EEC</i>).....	96
2.5.7. Çevresel etki/iyileştirme maliyeti	98
2.5.8. Sonuçların karşılaştırılması.....	102
2.5.8.1. <i>Kümülatif ekserji tüketimi verimi</i>	105
2.5.8.2. <i>Özgül çevresel etki/iyileştirme maliyeti</i>	106
2.5.8.2. <i>Genişletilmiş ekserji verimi</i>	106
2.5.8.3. <i>Genişletilmiş ekserji tabanlı sürdürülebilir endeksi</i>	110
2.5.9. Genişletilmiş ekserji analizi değerlendirmesi	112
3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	114
KAYNAKÇA.....	120
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1.1. Yakıtın birim maliyeti 0.232 \$/Nm ³ ve 5.822 \$/GJ olmak üzere, farklı ekserji akışlarının parasal akışlarına karşılık gelen tam yük şartları, ısı ve mekanik ekserjilerinin dağılması durumundaki, birincil yatırım maliyetlerinin olması veya olmaması durumundaki birim maliyetleri (Kim S.M. et al.,1998)	3
Tablo 1.2. Üç firmaya ait ekserji envanter politika verileri (Jawad vd. 2015)	26
Tablo 2.1. Teorik GTM'nin referans aldığı TRS-18 motoruna ait teknik ve performans değerleri (http-2).	34
Tablo 2.2. GTM ve çevre şartlarına ait uçuş verileri	35
Tablo 2.3. GTM için uçuş verileri.....	35
Tablo 2.4. GTM bileşenlerine sıcaklık verileri	35
Tablo 2.5. GTM bileşenlerine ait basınç verileri	35
Tablo 2.6. GTM için elde edilen ekserji parametreleri	51
Tablo 2.7. GTM'ye ait Kabul edilen ekonomik parametreler (Aygün ve Turan, 2021)	67
Tablo 2.8. GTM için elde edilen seviyelendirilmiş ilk yatırım maliyeti (CA), seviyelendirilmiş toplam yatırım (CIC) ve bakım maliyetlerinin (O&M) toplamı olan Z_k ve Z_{GTM}	67
Tablo 2.9. GTM'nin çözümüne yönelik ekserji-ekonomik denklemlerin, ortalama birim maliyetlerin matris denklem sisteminin tablosal formu.	70
Tablo 2.10. Metallere ait birim kütleyle karşılık gelen kümülatif enerji arzı değerleri (MJeq/kg), (Nuss vd., 2014)	88
Tablo 2.11. Alaşımlarda mevcut olan her metal elementi için gerekli olan kümülatif enerji arzı değerleri.....	89
Tablo 2.12. Alaşımların yer aldığı bileşenlerin GTM içerisindeki toplam kümülatif enerji arzı değerleri.....	89
Tablo 2.13. GTM için kullanılan metallerin standart kimyasal ekserji değerleri	90
Tablo 2.14. GTM bileşenleri için kullanılan materyallerin standart kimyasal ekserji değerleri.....	90
Tablo 2.15. GTM motorun yıllık 250 saatlik uçuşu boyunca yakıt ve hava tüketiminin ekserjetik eşdeğeri.	91

Tablo 2.16. Ekonomik faktörler ve bileşenleri, (Seçkin., 2013).....	94
Tablo 2.17. GTM için ekserjetik işgücü eşdeğeri	95
Tablo 2.18. GTM için ekserjetik işgücü eşdeğeri	95
Tablo 2.19. TRS-18 motoruna ait elde edilen ekserjetik maliyet eşdeğer akışları	96
Tablo 2.20. GTM ve komponentleri maliyetlerinin seviyelendirilmiş eşdeğer ekserjetik değerleri.....	96
Tablo 2.21. GTM tarafından gerçekleştirilen yıllık yakıt tüketimi maliyetine karşılık gelen ekserjetik eşdeğeri	97
Tablo 2.22. GTM üretiminde kullanılan elektrik enerjisi kaynakları ve maliyet faktörleri.....	98
Tablo 2.23. GTM üretiminde kullanılan elektrik enerjisi maliyetinin ekserjetik eşdeğeri	98
Tablo 2.24. GTM üretiminde kullanılan materyallerin CO ₂ salınımındaki global etki değerleri	99
Tablo 2.25. GTM üretimi için kullanılan her materyalin birim kütlelerindeki CO ₂ tüketim miktarı.....	100
Tablo 2.26. GTM materyalleri üretimi sırasında kullanılan elektrik enerji kaynağının çevresel ekserjetik eşdeğeri.....	101
Tablo 2.27. Yıllık 250 saatlik uçuşu boyunca gaz türbinli motorun gerçekleştirdiği yakıt sarfiyatının uçuşun evrelerine göre çevresel ekserjetik eşdeğeri.....	102
Tablo 2.28. GTM'nin genişletilmiş ekserji metodu çerçevesinde kümülatif ekserji tüketimi, fiziksel ekserji, işgücü girdisi, maliyet ve çevresel ekserjetik eşdeğer akışları.....	103
Tablo 2.29. Farklı sistemler için elde edilen EEA _{eff} değerleri	106

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Brayton Çevrimi şeması ve T-s diyagramı (Cengel ve Boles, 2006).....	2
Şekil 1.2. Biyokütle gazlaştırma sistem bileşenlerinin ekserji verimi (Athari vd., 2016)	8
Şekil 2.1. TRS-18 motoru ve teknik çizelge görseli (http-1).....	33
Şekil 2.2. TRS-18 jet motoru sisteminin şematik gösterimi (Aygün ve Turan, 2021)	34
Şekil 2.3. Boeing 787 GEnx motoru kesiti ve Boeing 787 General Electric CF6 motorunun materyal dağılımı (Okura, 2015)	37
Şekil 2.4. CFM56-7B27 ve Trent 892 motorları bileşenlerinin kütle oranları Lolis (2014).....	38
Şekil 2.5. GTM bileşenlerinde kullanılan alaşımların kimyasal içeriklerinin birim kütledeki oranı (Sjöberg 2008, Viswanathan vd., 2003, Schilke vd., 1991, Mouritz 2012, Viswanathan vd., 2003, Muktinutalapati 2011, Čerňan vd., 2016, Okura 2015).....	40
Şekil 2.6. GTM bileşenlerindeki materyallerin kimyasal içerikleri ve kütle oranı	41
Şekil 2.7. GTM materyallerinin bileşenlere göre dağılım oranı	41
Şekil 2.8. Gerçek proseslerde ekserji yıkımı (Dewulf vd., 2008)	44
Şekil 2.9. Ekserjinin disiplinler arası ilişkisi (Bejan, 2002; I. Dincer, 2002).....	45
Şekil 2.10. Bir prosesin ekserji verimi, sürdürülebilirlik ve çevresel etkileri arasındaki ilişki niteliğinin grafiği (Rosen ve Dincer 2001.)	45
Şekil 2.11. GTM bileşenlerine ait kütle, enerji ve ekserji parametreleri.....	49
Şekil 2.12. GTM bileşenlerinin uçuş seyrine göre ekserji verimleri değişimi	52
Şekil 2.13. GTM'nin uçuş seyrine göre ekserji verimleri değişimi.....	52
Şekil 2.14. GTM bileşenlerinin uçuş evrelerine göre ekserji yıkımı akım değerleri.....	53
Şekil 2.15. GTM bileşenlerinin uçuş evrelerine göre ekserji yıkımı oranı değerleri	53
Şekil 2.16. GTM bileşenlerinin uçuş seyrine göre yakıt ekserjisi tüketim oranları dağılımı	54
Şekil 2.17. GTM bileşenlerinin uçuş evrelerine göre yakıt ürün ekserjisi kaybı oranlarının dağılımı.....	55

Şekil 2.18. Uçuş evrelerine göre ekserji yıkımı oranı, yakıt ekserjisi tüketim oranı ve ürün ekserjisi kaybı oranının değişimi	55
Şekil 2.19. GTM bileşenlerinin ekserjetik iyileştirme potansiyeli	56
Şekil 2.20. Uçuş boyunca gerçekleşen ekserjetik iyileştirme potansiyeli	57
Şekil 2.21. GTM'nin uçuş evreleri boyunca aktık ekserji oranı değişimi	57
Şekil 2.22. GTM'nin uçuş boyunca ekserji yıkım faktörü dağılımı	58
Şekil 2.23. GTM'nin uçuş boyunca çevresel etki faktörü dağılımı	59
Şekil 2.24. GTM'nin uçuş boyunca ekserjetik sürdürülebilirlik endeksi dağılımı	59
Şekil 2.25. GTM bileşenlerinin ekserji yıkım maliyetinin uçuş evreleri boyunca değişimleri	71
Şekil 2.26. GTM bileşenlerinin uçuş seyrine göre izafi maliyet farkı dağılımları	72
Şekil 2.27. GTM'nin kompresör bileşeninin uçuş seyrine göre özgül akış maliyet değişimi	74
Şekil 2.31. GTM'nin uçuş seyrine göre ekserjo-ekonomik faktör değişimi	78
Şekil 2.32. GTM'nin uçuş seyrine göre özgül itki maliyetlerinin değişimi	79
Şekil 2.34. Sistem (S) ve çevresel etkinin gerçekleşip ele alındığı sistem (St) (Seçkin, 2013)	99
Şekil 2.35. GTM'nin genişletilmiş ekserji metodu çerçevesinde kümülatif ekserji tüketimi, fiziksel ekserji, işgücü girdisi, maliyet ve çevresel ekserjetik eşdeğer akışlarının oranı	103
Şekil 2.36. GTM'nin genişletilmiş ekserji metodu çerçevesinde kümülatif ekserji tüketimi, fiziksel ekserji, işgücü girdisi, maliyet ve çevresel ekserjetik eşdeğer akışlarının ekserjetik akış türlerine göre dağılımı	104
Şekil 2.38. GTM'nin yıllık çalışma faaliyeti sırasındaki uçuş evrelerine göre genel genişletilmiş ekserji veriminin değişimi	107
Şekil 2.39. GTM'nin kira yolu ile maddi getiri elde etmesi durumunda muhtemel yıllık çalışma faaliyetlerine göre genel olarak genişletilmiş ekserji veriminin değişimi	108
Şekil 2.40. GTM'nin uçuşunun her aşaması için EEA_{eff} değerinin değişimi	109
Şekil 2.41. GTM'nin ticari faaliyet gerçekleştirmesi durumunda muhtemel yıllık çalışma faaliyetlerine ait genişletilmiş ekserji veriminin değişimi	110
Şekil 2.42. GTM'nin ekserji ve genişletilmiş ekserji tabanlı sürdürülebilirlik endeks değerlerinin uçuşa ait evrelere göre değişimi	111

Şekil 2.43. SI_EEA, SI_EEA_I ve SI_EEA_II değerlerinin SI_Ekserji değerine uzaklıkları ve değişimleri	112
--	-----



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

C_{exCO_2}	: CO ₂ emisyonlarının ekserjetik maliyeti (\$/ay)
$\bar{C}_p$	: Sabit basınçta özgül ısı (kJ/kmolK)
$\dot{Q}_f$	: Yakıtın ısı değeri (kJ/h)
$\bar{e}^{ch}$	: Kimyasal ekserji (kJ/kmol)
$\bar{h}$	: Entalpi (kJ/kmol)
$\dot{m}$	: Kütlesel debi (kg/s)
$\dot{Q}$	: Isı enerjisi (kW)
C_p	: Sabit basınçta özgül ısı (kJ/kgK)
$\dot{E}$	: Enerji (kW)
$\dot{E}_x$	: Ekserji (kW)
$\bar{R}$	: Gaz sabiti (kJ/kmolK)
$\dot{W}$	: İş (kW)
c_f	: Yakıt maliyeti (\$/kJ)
e_f	: Yakıtın birim ısı değeri için yakıtın üretimi süresince meydana gelen CO ₂ -eq miktarı (kgCO ₂ /kJ)
e_x	: Özgül ekserji (kJ/kg)
f_D	: Ekserji yıkım faktörü
$\dot{n}$	: Molar debi (kmol/s)
r_{eef}	: Çevresel etki faktörü
r_p	: Basınç oranı
r_{we}	: Atık ekserji oranı
$\bar{s}$	: Entropi (kJ/kmolK)
$t_{working}$	: Belli bir zaman aralığında çalışma süresi(h/zaman)
y_{CO_2}	: Yaşam döngüsü boyunca güç başına çevreye yayılan CO ₂ -eq miktarı (kgCO ₂ -eq/kWh)
θ_{esi}	: Ekserjetik sürdürülebilirlik endeksi
CED	: Kümülatif enerji arzının eşdeğeri
CO ₂ -eq	: CO ₂ eşdeğeri
EEA	: Genişletilmiş ekserji analizi metodu
EE _C	: Maliyet akışlarının ekserjetik eşdeğeri

EE_{ENV}	: Çevresel etki/iyileştirme maliyetinin ekserjetik eşdeğeri,
EE_L	: İşgücünün ekserjetik eşdeğeri
EE_{LIG}	: Üretim faaliyetindeki işgücünün ekserjetik eşdeğeri
EE_{LOF}	: Operasyonel faaliyet işgücünün ekserjetik eşdeğeri
EE_{phy}	: Fiziksel ekserjinin ekserjetik eşdeğeri
h	: Entalpi (kJ/kg)
P	: Basınç
T	: Sıcaklık (K)
Türb	: Türbin
YO	: Yanma odası
$CExC$	: Kümülatif ekserji tüketimi
IP	: Geliştirme potansiyeli (kW)
MW	: Mol kütlesi (kg/kmol)
N	: Sistemin bir yıllık çalışma saati (h/yıl)
OM	: Bakım onarım masrafı (\$)
P	: Güç (kW)
PEC	: Satın alınan ekipman maliyeti (\$)
PP	: Geri ödeme süresi (yıl)
R	: Gaz sabiti (kJ/kg.K)
SI	: Sürdürülebilirlik endeksi
X	: Ekserji yıkım oranı
ke	: Kinetik enerji
m	: Kütle (kg)
pe	: Potansiyel enerji
s	: Entropi (kJ/(kg.K))
x	: Kütle oranı
y	: Mol oranı
Ψ	: Akış ekserjisi (kW)
δ	: Yakıt ekserjisi tüketim oranı
ε	: Ekserji verimi
η	: İzantropik verim
ξ	: Ürün ekserjisi kaybı

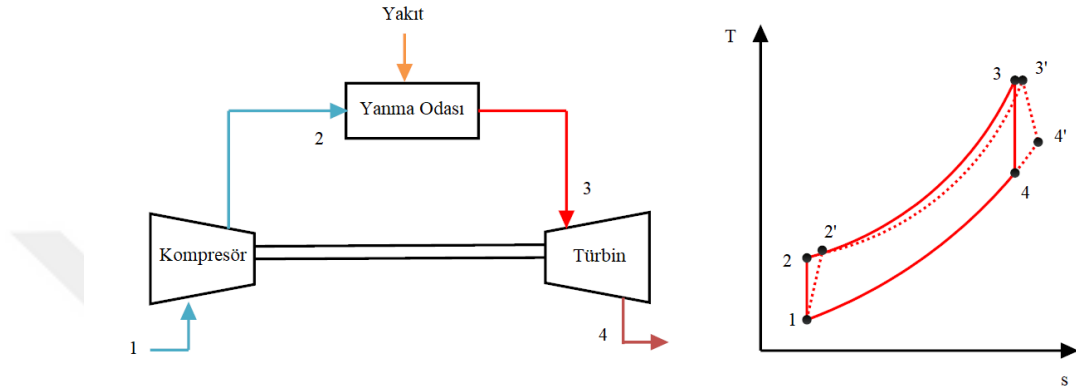
1. GİRİŞ

Enerjinin verimli ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılması açısından enerji tüketen teknolojik araçlar arasında gaz türbinli uçak motorlarının materyal gereksinimi, ekonomik yükü, çevresel etkileri ve enerji kullanım verimliliği açısından, günümüzde en kapsamlı ve derin araştırmaların gerçekleştirildiği önemli bir başlık olduğu aşikardır. Havacılık endüstrisinde kullanılan araçların üretiminden çalışma faaliyetleri süreçleri içerisinde çevreye saldıgı sera gazlarının küresel ısınmada etkin bir rolü olmasının yanında, kullanılan bu teknolojilerin önemli mertebede mali ve işgücü yükünü de beraberinde getirdiği açıktır. Çevresel problemlerin açık bir tehdit olarak kendisini göstermesi sebebiyle verimli ve sürdürülebilir enerji kullanımının, kaynak kullanımı ile çevre arasında eniyileme çalışmalarını zorunlu hale getirmiştir. Bu çalışmalarda elektrik üretimi için sanayi tesislerinden, hava ulaşımı ve taşımacılığı için uçaklara kadar kullanılan gaz türbinli motorların verimli bir şekilde tasarlanması ve kullanım şartlarının çevresel, kaynak kullanımı ve ekonomiklik açıdan daha da elverişli hale getirilmesi oldukça önem arz etmektedir.

1.1. Gaz Türbinli Uçak Motorları

Bir uçağa etki eden aerodinamik itki kuvvetini elde etmek için gaz türbinli motorlardan yararlanılır. Havacılıkta ve yer ünitelerinde kullanılan gaz türbinli motorlar Enerjinin verimli ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılması açısından enerji tüketen teknolojik araçlar arasında gaz türbinli uçak motorlarının materyal gereksinimi, ekonomik yükü, çevresel etkileri ve enerji kullanım verimliliği açısından, günümüzde en kapsamlı ve derin araştırmaların gerçekleştirildiği önemli bir başlık olduğu açıktır. Havacılık endüstrisinde kullanılan araçların üretiminden operasyonel faaliyetleri süreçleri içerisinde çevreye saldıgı sera gazlarının küresel ısınmada etkin bir rolü olmasının yanında, kullanılan bu teknolojilerin önemli mertebede mali ve işgücü yükünü de beraberinde getirdiği açıktır. Çevresel problemlerin açık bir tehdit olarak kendisini göstermesi sebebiyle verimli ve sürdürülebilir enerji kullanımının, kaynak kullanımı ile çevre arasında eniyi durum çalışmalarını zorunlu hale getirmiştir. Bu çalışmalarda elektrik üretimi için sanayi tesislerinden, hava ulaşımı ve taşımacılığı için uçaklara kadar kullanılan gaz türbinli motorların verimli bir şekilde tasarlanması ve kullanım şartlarının çevresel, kaynak kullanımı ve ekonomiklik açıdan daha da elverişli hale getirilmesi oldukça önem arz etmektedir.

Bir uçağa etki eden aerodinamik itki kuvvetini elde etmek için gaz türbinli motorlardan yararlanılır. Havacılıkta ve yer ünitelerinde kullanılan gaz türbinli motorlar 40-50 MW arasında güç üretmekte olup Brayton çevrimine göre çalışmaktadırlar. İdeal ve gerçek gaz türbinli şeması ve T-s diyagramı Şekil 1.1.'de gösterilmiştir. Gaz türbinli uçak motorları; turbojet, turboprop ve turbofan olarak sınıflandırılmaktadır.



Şekil 1.1. Brayton Çevrimi şeması ve T-s diyagramı (Cengel ve Boles, 2006)

Basit bir gaz türbinli motor tipi olan turbojet motorlar sırasıyla hava alığı, kompresör, yanma odası, türbin ve egzoz lülesi bileşenlerinden oluşmakta olup dış ortamdan alınan hava, alık vasıtasıyla kompresörde sıkıştırılıp yanma odasına doğru ilerler. Sıcaklığı sıkıştırma işlemi ile artmış olan yüksek basınçtaki hava üzerine yakıtın püskürtülmesi ile yanma sağlanır ve yüksek sıcaklıklara ulaşan yanma sonu gazların türbinden genişleyerek güç sağlanır. Türbini terk eden yanma gazları, egzoz lülesi yardımı ile dış ortama yüksek hızlarla transfer edilerek hava aracının hareketi için gereken itki temin edilir (Tek veya iki şaftlı olarak sınıflandırılan turboprop motorlar ise düşük yakıt tüketimleri sebebiyle belirli bir irtifa ve hız limitlerine uymak koşuluyla). 1000 milin altındaki kısa mesafe uçuşlarda etkin ve verimli bir biçimde kullanılmaktadırlar. Basit bir gaz türbinli uçak motoruna bir pervane eklenerek türetilmişlerdir. Pervane havanın motora alınması için gereken hava debisinin mümkün mertebede yüksek bir değerde iletilebilecek şekilde tasarlanan bir bileşendir. Turboprop motorlarda bulunan pervane bileşeni yerine fan kullanan turbojet motorları ise performans açısından en gelişmiş uçak motoru tipidir. Havanın kompresöre girmeden önce kısmen de olsa basıncının yükseltilmesi ve motora birim zamanda giren hava miktarının artırılabilmesi için ayırık akışlı ve tümleşik akışlı tipleri bulunan turbofan motorlar, günümüzde

kullanılan pek çok yolcu uçağının ana güç ünitesidir (Ryerson ve Hansen, 2010; Mattingly, 2006; Kerrebrock, 1992; Saravanamuttoo, 1987).

1.2. Literatür Araştırması

1.2.1. Ekserji ve ekserjo-ekonomi

Kim v. (1998), 1000 kW gücündeki bir kojenerasyon tesisi için gerçekleştirdiği ekserjo-ekonomik analizinde sistem elemanlarının ilk yatırım, amortisman ve bakım-işletme maliyetlerinin maliyetler üzerindeki etkisini yıllık olarak incelemiştir. Maliyeti 5×10^{-6} \$/kJ yakıt için ürünlerin birim ekserji maliyetleri ve buna ilişkin parasal akışlara ilişkin sonuçlar ile ilgili olarak, ilk yatırım ve bakım maliyetleri göz önüne alındığında, sistemin gaz türbin, atık ısı kazanı, ara soğutucu ve baca elemanlarının toplam para akışları 17.03 \$/h iken bu toplam değer %40'lık kısmı türbinde, %17'şerlik kısmı kompresör ve atık ısı kazanında ve geri kalanı da yanma odası, baca ve ara soğutma ünitelerinde harcanmıştır. Ayrıca sistemin farklı yük şartları altında çalıştırılmasının maliyetlerinin incelenmesi sonucunda buhar maliyetinin yük artışıyla doğru, elektrik maliyetinin ise ters orantılı bir şekilde değiştiğini tespit etmiştir. Ek olarak, sistem kayıplarının maliyete getirdiği ek yüklerin sistem çalışma yükünün azalmasıyla düştüğü (%100 yük için 12.781 \$/h, %75 için 11.237 \$/h ve %50 yük için 8.942 \$/h) ifade etmektedir. Sonuçlar ile ilgili detaylı bilgiler Tablo 1.1.'de görülmektedir.

Tablo 1.1. Yakıtın birim maliyeti 0.232 \$/Nm³ ve 5.822 \$/GJ olmak üzere, farklı ekserji akışlarının parasal akışlarına karşılık gelen tam yük şartları, ısı ve mekanik ekserjilerinin dağılması durumunda, birincil yatırım maliyetlerinin olması veya olmaması durumunda birim maliyetleri (Kim S.M. et al.,1998)

Ekserji maliyeti	Yatırım olmaksızın		A için yatırım		2A için yatırım
	Kazanlı	Kazansız	Kazanlı	Kazansız	
Enerji ekserji maliyeti (\$/kWh)/(\$/GJ)	0.04333/12.036	0.08873/24.647	0.04899/13.607	0.10000/27.777	0.05464/15.178
Neentropy maliyeti (\$/kWh)/(\$/GJ)	-0.00882/-2.450	-0.06314/-17.539	-0.01057/-2.937	-0.07141/-19.835	-0.01233/-3.424
Elektrik ekserji maliyeti (\$/kWh)/(\$/GJ)	0.04567/12.685	0.09553/26.537	0.05420/15.055	0.11022/30.617	0.06273/17.425
Buhar ekserji maliyeti (\$/kg)/(\$/GJ)	0.01408/18.230		0.01692/21.911		0.01977/25.592

Erlach vd., (2001) yapmış oldukları çalışmada bir kojenerasyon sisteminin termoekonomik analizinin hesaplanmasında mühendisler açısından maliyet

hesaplamalarında daha kullanışlı ve daha doğru sonuç veren yeni bir yaklaşım sunmaktadırlar.

Silveira and Tuna (2004), bir kojenerasyon sisteminin 4 farklı modeli için ekserjiye dayalı olarak geliştirilen “ekserji üretim maliyeti (EPC: exergy product cost)” yöntemi ile sistemin operasyonel, üretim maliyeti ve maliyet iyileştirme analizlerini gerçekleştirmişlerdir. 4 farklı kojenerasyon modeli için üretilen buharın birim ekserji üretim maliyetlerinin 0.0377 \$/kWh, 0.0378 \$/kWh, 0.0425 \$/kWh ve 0.0247 \$/kWh; üretilen elektriğin birim ekserji üretim maliyetleri ise 0.0606 \$/kWh, 0.0623 \$/kWh, 0.0332 \$/kWh ve 0.0331 \$/kWh olarak hesaplanmıştır.

Turgut (2007) hazırlamış olduğu doktora tezinde, 1 kademe fan, 3 ve 14 kademe düşük ve yüksek basınç kompresörü, halka tipi yanma odası, 2 kademe yüksek basınç türbini ve 4 kademe alçak basınç türbininden oluşan yüksek by-pass oranına sahip bir turbofan motorunun ekserjoekonomik analizini gerçekleştirmiş olup, uçak motorunun 10,670 m irtifadaki itki ve özgül yakıt tüketimini sırasıyla 48.04 kN ve 63 kg/hkN olarak, fan itkisi (36.03 kN) için % 40.19 ve egzoz itkisi (12.01 kN) için % 15.68 şeklinde ekserji verimlerini hesaplanmıştır. Yazar ekserji yıkımının en yüksek olduğu iki bileşenin 14.75 MW ile yanma odası ve 2.77 MW ile fan olduğunu, fan ve egzoz lülelerindeki özgül itki maliyeti değerlerini sırasıyla 139.01 \$/hkN ve 306.44 \$/hkN olarak bulmuştur.

Balli vd. (2008) uçak motorunun performans ve verimliliği hakkında ekserji analizi yönteminin kullanışlı ve yararlı bilgiler vermesinin yanında muhtemel proses iyileştirmelerinin lokasyonunu belirlemenin ve maliyete dayalı ekserjo-ekonomik analiz metodunun önemine değinen yazarlar, bir eğitim uçağında kullanılan J69-726A uçak motorunun enerji, ekserji ve ekserjo-ekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Uçak motorunun gerçek test ölçüm verilerine dayanarak yapılan bu çalışmada yazarlar, itki eldesi esnasında uçak motorunun ekserji verimi 2421.86 kW değeri ile %34.84 olup, uçak motorunun bileşenleri arasında en yüksek ekserji yıkımı oranı 3691 kW değeri ile yanma odasında gerçekleştiğini ve yanma sonu ürünlerin ekserji maliyeti ile birim ekserji maliyeti 618.643 US\$/h ve 70.956 US\$/h olarak elde edildiğini ifade etmektedirler.

Altuntas (2011) ısı sistemlerin ekonomik ve çevresel etkilerinin değerlendirilmesi, en iyi çalışma koşulları ve enerji verimliliği açısından önem taşıdığını ifade eden yazar, 4-zamanlı, hava soğutmalı, 4-silindirli ve doğal emişli bir piston-prop uçak motoruna, iniş kalkış fazı (LTO) ve 1 saatlik düz uçuş için ekserjo-ekonomik ve ekserjoçevresel analiz yöntemleri yanı sıra, belirlenen özelliklere sahip en uygun düz uçuş şartları için

ekserjoekonomik çevresel optimizasyonunu gerçekleştirdiği tez çalışmasında, LTO safhasının kalkış fazında; en yüksek efektif güç ekserji akımı, giren ekserji akımı, izafi maliyet farkı, ekserjo-ekonomik faktörü ve aynı fazdaki en düşük ekserjoçevresel faktör değeri, sırasıyla, 111.90 kW, 476.51 kW, %116.06, %98.81 ve % 16.06 olarak tespit etmiştir. 1 saatlik düz uçuşta en yüksek ekserji girdisi akımının (410.60 kW) ile 1000 m irtifada, %75 güç ayarı ve 18 hava-yakıt oranında (HY), 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) olup, 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) şeklinde elde edilmiştir. Yapılan ekserjo-ekonomik 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. Yazar sonuç olarak, LTO safhasında iken yaklaşma ve taksi fazlarında iyileştirme yapılması gerektiğini ve optimum düz uçuşun düşük irtifa, yüksek güç ayarı ve düşük HY oranında gerçekleştiğini belirtmektedir. Diğer bir ekip çalışmasın da ise Altuntaş vd. (2014) aynı sistemi kullanarak yükseklik, güç modu ve hava-yakıt oranı parametrelerini kullanarak ekserji ve ekserjo-ekonomik analizini %65 ve %75 güç modları arasında bütün ekserjetik değerlerin değişimler artış gösterirken, bu artışın ekserjo-ekonomik değerlere yansımadığını, en yüksek ekserji girdi oranı 405.60 kW, ekserji verimi %14.43 ve en yüksek ekserji yıkım oranının 168.48 kW ile 3000 m'lik irtifa ve 18 hava-yakıt oranında elde edildiğini ve yakıtı ait en yüksek ortalama ekserji maliyetin 130.77 \$/GJ ile 1000 m irtifada, 13 hava-yakıt oranı ve %65 güç modunda elde gerçekleştiğini, ekserji yıkımı ile ilişkili olarak en düşük maliyetin %40.29\$/h olduğunu ve maksimum ekserjo-ekonomik faktör değerini ise %19.98 olarak tespit etmişlerdir.

Sohel vd. (2011), hava soğutmalı organik Rankine çevrimine sahip (RC) ikili jeotermal elektrik santralinin ortam sıcaklığı üzerindeki etkisini modelleyerek tesis yoğunlaştırıcısı içerisinde bulunan basınç dengeleyicisinin değiştirilmesi ile türbin çıkış basıncı ve türbin basıncı oranının değiştiğini ifade etmektedirler. Ayrıca yoğunlaştırıcı çıkış sıcaklığının ortam sıcaklığına eşitlendirilerek pompa giriş ve çıkış koşullarının, buharlaştırıcı denge sıcaklığı ve basıncı etkilenecek şekilde değiştirilerek hem yoğunlaştırıcı hem de buharlaştırıcı için denge koşullarını tekrarlamayı amaçlamaktadırlar.

Morosuk ve Tsatsaronis (2012) enerji çevrimi gerçekleştiren hava soğutmalı soğutma sisteminin ekserjetik, ekserjo-ekonomik ve ekserjo-çevresel analizlerinin kullanımıyla, sisteme ait veriminin geliştirme potansiyelinin başarılı bir şekilde elde dilediğini göstermektedirler.

Balli ve Hepbaşlı (2014) sürdürülebilirlik ve çevresel hasar maliyet analizi yöntemlerini kullanarak T56 turbo-prop motorunun farklı güç yükleri altında performansını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirdikleri çalışmada elde etmiş oldukları sonuçlar şu şekildedir:

- Şaft gücünün ekserji maliyeti, şaft gücünün artırılması sebebiyle, güç yükü %75 modunda 76.34 \$/GJ değerinden kalkış modundaki 58.32 \$/GJ değerine kadar düşüş göstermektedir.
- Kinetik enerjinin birim ekserji maliyeti yakıt akışındaki artış ile beraber egzoz gazlarının birim ekserji maliyetlerinin artmasından dolayı %75 modunda 599.43 \$/GJ ve kalkış modunda 666.76 \$/GJ değerine sahip olmaktadır.
- En yüksek sürdürülebilirlik endeksi farklı senaryo ve modlar için gaz türbininde 1.26 ila 1.36 değerleri arasında gerçekleşmektedir.
- Artan yakıt akışı oranı çevresel kirliliği ve çevresel hasar maliyeti oranını da arttırmaktadır.
- Motorun çevresel hasar maliyet oranı %75, %100, askeri ve kalkış modları için sırasıyla 423.94 \$/GJ, 576.97 \$/GJ, 634.93 \$/GJ ve 666.85 \$/GJ olarak elde edilmiştir.
- Çevresel hasar bakım, çalıştırma, ana sermaye yatırımları ve yakıt maliyetlerinin tamamını ifade eden motorun toplam maliyet oranı %75, %100, askeri ve kalkış modları için sırasıyla 1702.59 \$/GJ, 2100.26 \$/GJ, 2220.42 \$/GJ ve 2284.50 \$/GJ değerindedir. Ayrıca yazarlar arasından Balli (2019) referanslı çalışmasında termodinamik, termoekonomik ve çevresel performans ölçütlerini dikkate alarak yüksek by-pass oranına sahip bir ticari uçağın motorunu da incelemiştir.

Oyedepo vd. (2015) Nijerya'da bulunan basit bir Brayton Çevrimli gaz türbinli motoruna sahip olan gaz türbinli güç tesisinin 6 yıllık zaman dilimine ait 11 farklı ortalama çalıştırma verilerini kullanarak, tesise ait performans ve ekserji maliyet analizini gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar ekserji yıkımının en fazla gerçekleştiği bileşenin yanma odası olduğunu, tesisin ekserji veriminin önemli ölçüde yanma sonu ürünlerinin türbin girişi sıcaklıklarına bağlı olup sınırın ise türbin malzemesinin sıcaklığa karşı dayanma

limitleri olduğunu, diğer bileşenler ile karşılaştırıldığında yanma odasına ait ekserji yıkım maliyetinin oldukça yüksek olduğunu, yanma sonu gaz ürünlerinin sıcaklığı arttırıldıkça hem ekserji yıkımının hem de türbine ait ekserji yıkım maliyetinin azaldığını, tesisler için ekserji iyileştirme potansiyelinin 54.04 MW ile 159.88 MW değerleri arasında olduğunu, tesisler için en yüksek iyileştirme potansiyeline sahip bileşenin 30.21 MW – 88.86 MW değerleri arasında olup yanma odası olduğunu ve ek olarak tesisten elde edilen elektriğin birim maliyetinin 1.99/kWh cent ile 5.65/kWh cent değeri arasında olduğu sonuçlarına varmışlardır.

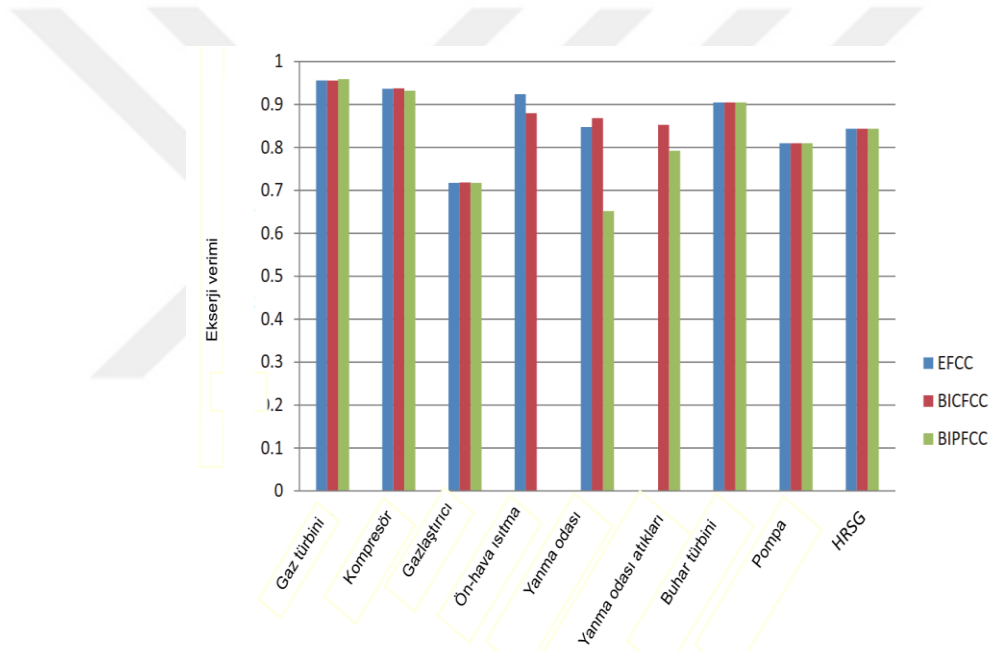
Naserian vd. (2016) bir rejeneratif brayton çevriminin gücünün en iyilemesi yoluyla sisteme ait en iyi performans kriterlerini, zamana bağlı termodinamik metot ile boyuta bağlı bileşenlerin ekserjo-ekonomik analizinin gerçekleştirildiğini ifaden eden yazarlar, en yüksek güç değerinin %71 kadarının çok amaçlı optimizasyon değerlendirmesinde kullanılabileceği, en yüksek güç durumundaki halden %67 oranında daha düşük toplam maliyet oranı ve en yüksek güç durumunda iken üretilen ekserji yıkım oranının sadece %24 olup optimum sistem performans değerini elde etmişlerdir.

Athari vd. (2016) harici ateşlemeli biyokütle kombine çevrimi (EFCC), biyokütle ile entegrel edilmiş ara ateşlemeli kombine çevrim (BIPFCC) ve biyokütle entegre edilmiş sonradan ateşlemeli kombine çevrim (BIPFCC) gibi 3 farklı biyokütle gazlaştırma temelli güç tesislerinin enerji, ekserji ve ekserjo-ekonomik analizini gerçekleştirmiş olup elde etmiş oldukları sonuçları şu şekilde ifade etmektedirler.

- BIPFCC tesisinin enerji verimliliği BICFCC tesisinden %3 daha büyük iken, EFCC tesisinden ise %6 daha yüksek bir değerdedir.
- Birim buhar kütlesi başına düşen hava kütlesinin en fazla olduğu sistem BIPFCC olup, bu sistemi sırasıyla BICFCC ve EFCC sistemleri izlemektedir. Not edilmelidir ki, basınç oranının arttırılması ile bu değer BIPFCC için azalır iken, BIFCC ve EFCC tesislerinin değerlerini de hafifçe arttırmaktadır.
- Her 3 çevrim için en düşük ekserjo-ekonomik faktör değeri bileşen maliyetine bağlı olarak en yüksek ekserji yıkım maliyetlerini yansıtan yanma odasında tespit edilirken, en yüksek ekserjo-ekonomik faktör değeri ise ekserji yıkım maliyetine bağlı olarak en yüksek bileşen maliyetini gösteren buhar türbini olmaktadır.
- Her 3 çevrim için kompresör basınç oranı değeri belirli bir değere kadar enerji ve ekserji verimlerini arttırır iken basınç oranının daha da fazla arttırılması ile verim değerleri düşmektedir.

- Türbin girişi yanma sonu gazların sıcaklıklarındaki artış toplam ürün maliyet değerini BIPFCC için arttırırken, EFCC ve BICFCC için ise hafifçe düşürmektedir.
- En yüksek toplam birim maliyet değeri BIPFCC ve sonrasında BICFCC sisteminde gerçekleşmiştir.

Maksimum enerji verimliliği şartları altında her 3 sistem yapısının bileşenlerine ait ekserji verimleri Şekil 1.2.'de görüldüğü üzere, verimi en yüksek bileşen her 3 sistem için de türbin olup, en yüksek verime sahip türbin ise BIPFCC tesisine aittir. BIPFCC tesisi en düşük ekserji verimine haiz iken, aynı zamanda en yüksek yanma odası ekserji verim değerine sahiptir.



Şekil 1.2. Biyokütle gazlaştırma sistem bileşenlerinin ekserji verimi (Athari vd., 2016)

- BIPFCC tesisinin ekserji kayıpları diğer tesislere nazaran daha da düşük ike, maliyetleri ise daha da yüksektir.
- Her 3 sistem için basınç oranı değeri arttıkça ekserjo-ekonomik faktör değeri de arttığından, basınç oranını arttırmak demek ekserji yıkım maliyetlerine orantılı olarak ana sermaye yatırımlarının da arttırılması anlamına gelmektedir.
- Türbin giriş sıcaklığını arttırmak BIPFCC tesisi için ekserjo-ekonomik faktörü yükseltirken, diğer sistemler için ise kayda değer bir değişim göstermemiştir.

Coban vd. (2017) hem uçaklarda kullanılan jet yakıtını hem de biyodizel yakıtını kullanarak temel bileşenleri hava kompresörü (AC), yanma odası (CC) ve yüksek basınç türbinine (HPT) sahip olan mini ölçekteki bir turbojet motorunun ekserjetik performansı, ekserjo-ekonomik analizi yanı sıra motorun performans ve maliyet akışlarını inceledikleri bu çalışmada, yazarlar biyodizel yakıtla yanma durumunda AC, CC ve HPT için ekserji verimlerini sırasıyla %74.53, %47.68. ve %99 olarak elde ederken, jet yakıtlı yanma durumunda ise ekserji verimlerini ise sırasıyla %75.22, %48.34 ve %98.44 olarak elde etmişlerdir. İtkinin maliyet oranını ise biyodizel ve jet yakıtlı yanma durumunda sırasıyla 79.08 US\$/hkN ve 91.89 US\$/hkN olarak elde etmişlerdir.

Boukelia vd. (2020), güneş enerjisini kullanan bir soğutma kulesinin kuru soğutma yoluyla ekserjetik ve ekserjo-ekonomik analizi yaparak sistemin teknik-ekonomik performansına etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmadaki simülasyonlar geleneksel ıslak soğutma gerçekleştirilen kulelere nazaran kuru soğutmanın kullanılmasıyla önemli ölçekte enerji ve ekserji verimini sağlaması yanı sıra, maliyet ve elektrik kullanımının artmasına rağmen kulenin ihtiyacı olan yıllık su tüketimi miktarını %94 oranında azalttığı görülmektedir.

Aygun vd. (2020) birçok uçaklarda kullanılan PW4000 yüksek by-pass turbofan motorunun enerji tüken bileşenlerine ait tasarım ve optimizasyon parametrelerini dikkate alarak, sistem verimliliğindeki potansiyel iyileştirmeleri tespit etmek amacıyla gerçekleştirdikleri ekserjo-ekonomik analizinde, fan ve egzoz için özgül itki maliyetini sırasıyla 5.7051 \$hkN VE 68.45 \$hkN olarak elde etmişlerdir. Ayrıca PW4000 motorunun ekserjo-ekonomik faktör değerini %7.958 olarak tespit ederken, izafi maliyet farkı değerinin yanma odası için en yüksek oranında %24.458 olduğunu da belirtmişlerdir. Ek olarak yazarlar ekonomik değişkenler ile ekserjo-ekonomik performans parametreleri arasındaki ilişkiyi dikkate alarak 0.6 ile 1.2 \$/kg arasındaki yakıt fiyatlarının değişimi durumunda egzoz ve fan için özgül itki maliyetinin sırasıyla 82.4701 \$hkN ve 5.4332 \$hkN değerleri arasında kalacağını göstermişlerdir.

1.2.2. Kümülatif ekserji tüketimi (CE_{XC})

Szargut (1987) bir ürünün doğal kaynaklar ile elde edilmeye başlandığı andan, fabrikasyon ürününe dönüşmesi süreci boyunca bütün üretim prosesleri zinciri ile bağlı olan bütün bağlantılardaki ekserji kayıplarını inceleyen bir yöntem sunmuştur. Bu ekserji kayıplarının dikkate alındığı proses zincirindeki termodinamik eksikliklerin belirli bir ara

prosesin termodinamik eksikliğinin etkisi olduğunu gösteren çalışma sonuçlarını içeren grafiksel bir şema, band diyagramı ve nümerik bir örnek üzerinde göstermektedir.

Szargut vd. (1987) retim proseslerindeki bütün aşamalar, doğal kaynaklardan son ürüne kadar, doğal kaynaklardan elde edilen yakıtları ve diğer enerji taşıyıcılarının tüketilmesi ile meydana gelmekte olduğunu ve bazen üretimin son aşaması enerji taşıyıcılarının küçük çaptaki tüketimini ifade edilebilir iken, yine de ara proseslerde ürünün elde edilebilmesi için gereken enerji tüketimi yüksek bir miktar da olabildiğini ifade etmektedirler. Yazarlar bu sebebe binaen yüzden hammaddeden son ürüne kadar gerçekleşen bütün üretim aşamalarını incelemek üzere CE_xC endüstriyel enerji ve maliyet analizi ortaya koymuşlardır. CE_xC üretim maliyetleri üzerinden yakıtların fiyat değişiminin etkisini ve planlı bir üretimini arttırma mekanizması içerisinde artan yakıt teminin analizinde önemli sonuçlar elde ettiklerini ifade eden yazarlar buna rağmen ekserjetik olmayan hammaddelerin tüketimini dikkate almaması ve üretim prosesine ait termodinamik mkemellik derecesi hakkında bilgi vermemesi sebebiyle eksik kalmakta olduğunun altını çizen yazarlar şu sonuçları elde etmişlerdir;

- CE_xC analizi CEC metodundan daha geniş uygulamaları içermekte olup CEC metodunun aksine enerjetik olmayan hammaddeleri de inceleyebilmektedir.
- CE_xC analizi sayesinde ele alınan materyalin bütün üretim proses zincirinin tamamına ait CDP değerlendirmesi gerçekleştirebilmektedir
- Birçok durumda karşılaşılan küçük CDP değerleri, incelenen üretim aşamalarındaki geliştirme potansiyelini gösterip yeni üretim metotlarının incelenmesi gerektiği anlamına gelir.
- CE_xC analizi onarımı mümkün olmayan doğal kaynaklar dikkate alındığında ekoloji açısından ilginç bilgiler verir ve onarılamayan doğal kaynakların CE_xC indisi doğal evre üzerinde en az etkilere sahip üretim metotlarının tercih edilmesinde kullanılmasının en önemli sebebidir.

Morris (1990) karmaşık kimyasal proseslerin ekserji analizine yönelik geliştirdiği yöntem ve teorisinde kaustik soda ve klorin üretim proseslerini örnek göstererek incelemiştir. Yöntemi hakkında ekserji analizinin CE_xC ve CDP değerinin belirlenmesinde klor-alkali prosesine ait CDP değerlerinin %8 ile %10 değerleri arasında olduğunu ifade etmektedir. Ayrıca kimyasal bir prosesin proses ağı içerisindeki enerji kullanımı sebebiyle ekserji kayıplarının yeri ve boyutu hakkında bilgi verdiğini ve bu

şekilde gerçekleşen kayıplar sayesinde kayıplardaki azalmanın doğal kaynak kullanımının azaltılması ile mümkün olabileceğini belirtmektedir.

Feng vd. (2004) CE_XC yöntemini verilen sistem için sadece prosesin enerji performansını ölçmekle kalmayıp aynı zamanda proses parametreleri ile sistem için gerekli ekipmanın boyutunda optimizasyon sağlanmasını tercih edildiğini belirterek, gerçekleştirmiş oldukları analizde hem madde tüketimi, elektrik tüketimi ve üretim prosesinde kullanılan ekipmanları dikkate alarak ham maddelerin CE_X 'sinin sistemde eniyilemeyi sağlamak için gerekli olan en önemli bileşen olduğunu ifade etmektedirler.

Zhu vd. (2005) CE_XC açısından endüstriyel proseslerin toplam çevresel etkilerini incelemiştir. Emisyonların iyileştirilmesi için CE_XC yöntemi ile eşdeğer kümülatif ekserji tüketimi (ECE_XC) yöntemini sunarak ECE_XC için genel bir amaç fonksiyonu ortaya koyup, bu amaç fonksiyonuna ait detaylı hesaplamalarını ECE_XC değerlerini ekonomik değerler ile kıyaslayıp elde ederek etanol üretiminin gerçekleştiği bir ısı pompası damıtma sisteminin parametrelerini eniyilemesi amacıyla göstermişlerdir.

Huijbregts vd. (2006) çevresel yaşam döngüsü etkileri ile 1218 adet fosil ürünün (cumulative energy demand) CED değerlerini enerji, üretim, aktarım ve atık işlemler kategorisine ayırarak, proses ve ürünleri için çevresel performansına bir gösterge olarak fosil CED ($FCED$) yöntemini sunmaktadırlar. $FCED$ yönteminin kuraklık, asitleşme, ötrofikasyon, troposferik ozon formasyonu, ozon tabakasının incilmesi ve insan sağlığı için toksiklik gibi etki kategorileri ile %95 oranında uyumlu sonuçlar ürettiğini belirtmektedirler.

Szargut (2007) kojenerasyon proseslerinde ana ürünün yanında bir veya daha fazla yan ürün eldesi söz konusu olduğundan birincil yenilenemeyen ekserji yüküne ait kümülatif tüketimin ana ürün için yan ürünlerden yararlanmanın ara proseslerdeki ekserji tüketimini engellediğini varsayması durumunda, kaçınılabılır harcamaların prensibine dayanarak belirlenebileceğini bildirmiştir. Yazar belirtmiş olduğu prensip için ham madde ve tamamlanmamış ürünlerin tüketiminin ana ürün üzerindeki yükü belirlemeye olanak sağladığını belirterek bu ayrımın yan ürünler yerine kojenerasyon sistemindeki toplam üretim sisteminin ekserji tüketimi ve kayıpları ile materyal yükü olacağından, alternatif materyaller ile mümkün olamayacağını ifade etmektedir. Ayrıca her üretim prosesinde sadece ilgili bileşenlerin işlevi açısından, tersinmezliklerden kaynaklı bölgesel ekserji kayıpları gerçekleştiği gibi aynı zamanda sistem ekserji kayıplarının tüketilen tamamlanmamış ürünlerin üretimine de sebep olduğunu ifade etmektedir.

Ukidve vd. (2007) 1997 yılında ABD ekonomisinde 488 sektörün CE_X akılarının ekonomik girdi-çıktılarını endüstriyel CE_XC (ICE_XC) analizi ve ekolojik CE_XC (ECE_XC) yöntemlerini kullanarak bir termodinamik girdi-çıkı (TIO) modelini geliştirmişlerdir. ICE_XC her ekonomik sektörün dolaylı veya dolaysız yoldan tükettiği bütün doğal kaynakların enerji miktarını tespit ederken, ECE_XC ise üretimi gerçekleştirilen her doğal kaynağın ekolojik sistemlerde harcanan ekserji miktarını belirlediğini ifade etmektedirler. TIO modeli ile aynı zamanda her sektöre ait emisyonları, emisyonların etkilerini ile işgücünü de kapsadığını ifade eden yazarlar TIO metodu sayesinde çevresel gelişmelere duyarlı ekonomik politikalara izin veren pro-ekolojik vergileri ve endüstriyel ekolojik maliyetleri hesaplamaya yardımcı olmasının yanında, sürdürülebilir uluslararası ticaret ile endüstriyel destek ağlarındaki doğal sermaye akılarında önemli ve güvenilir bir araç olabileceğini ifade etmektedirler.

Bösch vd. (2007) bir proses veya ürünün elde edilmesi için gereken bütün kaynakların toplamı ekserjisi LCA değerlendirmeleri için ek bir etki kategori göstergesi sağlamak ve kaynak kalitesi ile enerji verimliliği için birincil gösterge olarak kullanılan ekserji ile geniş çapta bir ekserji etki değeri kaynağını literatüre sunmuşlardır. 2630 ecoinvent ürün, proses ve altyapı birimlerinin ortalama değerler ile uyduğunu göstermektedirler. Sonuç olarak enerjinin kalitesi ve ekserjetik olmayan kaynakların bütünleştirilmesi sebebiyle CE_XD yöntemi genel olarak kullanılan CED yönteminden daha da kapsamlı bir gösterge olduğunu ve yaşam döngüsü analizi çalışmalarında yer alan araştırmacılar için CE_XD yönteminin ecoinvent veritabanı gibi envanterlerde ekserji karakterizasyon faktörlerinin entegre edilmesinin yararlı olacağını vurgulamaktadırlar.

Lei vd. (2007) glukozun süperkritik sıcaklığında su içerisinde buharlaşmasına olanak sağlayan bir deneysel hidrojen üretim tesisi için LCA'ya dayalı CE_X teorisi uygulaması ve üretim prosesinden salınan emisyonların çevresel etkilerine dikkat çeken ECE_XC analizi ile sistem optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir. Sistemin optimizasyonunda ele almış oldukları değerlendirme kriteri ürün ekserjisinin ECE_XC değerine oranı olan CDP değeridir. Yazarların bu çalışmada elde etmiş oldukları sonuçlar aşağıdaki gibidir.

- Hidrojenin elde edilen tek ürün olduğu CDP değeri ile amaç ürün hidrojen yan ürünlerinin ise karbonmonoksit, metan, etilen, etan ve propilen olan CDP' değeri basınca bağlı olarak büyük değişimler göstermiştir.

- CDP ve CDP' değeri sıcaklığı 500°C 'den 550°C 'ye değişimi durumunda yavaşça arttığı ve sıcaklığın 550°C 'den 607°C 'ye artırılması durumunda ise hızlı bir şekilde yükseliş göstermektedir.
- Çözelti yoğunluk değeri 0.2 mol/L olduğu durumda CDP değeri en yüksek değere ulaşmaktadır.
- Reaksiyon tüpünün iç yarıçapının 3 ile 9 mm aralıklarında iken yarıçap arttıkça, CDP değeri de artış göstermektedir.
- Belirli bir çözelti yoğunluğu için daha kısa akış süresinin daha yüksek bir CDP değerini gerçekleştirmektedir.

Ping (2008) ekserji analizi uygulamaları arasında en zorlu problemin petrol damıtma prosesi gibi yararlı ürünlerin elde edilmesi sırasında CE_XC metodunun nasıl tahsis edilmesi gerektiği olduğuna dikkat çeken yazar bu çalışmasında ekserji konseptine dayalı ürünün minimum ayrık gücü ($MSPP$) hesaplama yöntemini kullanmıştır.

Zhu (2008) gerçekleştirdiği bu çalışmada CE_XE için uygulamasına yönelik geliştirdiği geliştirilmiş bir minimum separation power of product ($MSPP$) yöntemini bir petrol ayrıştırıcı prosesinde kullanarak bir matematiksel model ortaya koymuştur. Yazar bu yöntemin sistem akışlarındaki verilerin mevcut olması yanında olmaması durumunda da kullanılabileceğini ifade etmektedir.

Hoang vd. (2010) tarımsal üretimde yeni ve verimli sürdürülebilir önlemlerin alınabilmesi için CE_X metodunu teknik verim ve CE_X tahsisat verimine ayırarak analiz yapmışlardır. Bunun için 1990 ve 2003 yılları arasında 29 OECD ülkelerine ait ürün ve besi hayvancılığı üretiminin sürdürülebilirliğini deneysel çalışma olarak sunmuş oldukları bu çalışmada elde ettikleri sonuçları şu şekilde ifade etmektedirler;

- OECD, CE_XC ürünlerinin %72.3'ünü koruma potansiyeline sahiptir.
- Sürdürülebilirlik verimi oranı OECD ülkeleri arasında çarpıcı bir farklılık göstermektedir.
- 2003 yılındaki verimlilik seviyesinin 1990 yılına nazaran daha da düşüktür.

Pu vd. (2010) iki farklı hava şartlandırma senaryosunu değerlendirmek için CE_X yaklaşımını kullanmışlardır. İlk senaryoda üç farklı hava şartlandırma sistemi bulunmaktadır. Bunlar doğrudan gaz ateşlemeli (A), hava soğutmalı ısı pompası soğutucusu, diğeri ise su soğutmalı su soğutucu hava şartlandırma sistemleridir. 2. senaryoda ise 4 farklı hava şartlandırma sistemi bulunmaktadır. Bunlar A, hava soğutmalı su soğutucusu, santrifüjlü su soğutucusu ve su soğutucusu hava şartlandırma

sistemleridir. Yazarlar aynı ortam şartları altında gerçekleştirdikleri CE_X verimini 1. senaryo için hava soğutmalı ısı pompası soğutucusunda 0.112, su soğutmalı soğutucuda 0.119 ve 2. senaryo için ise CE_X verimi doğrudan gaz ateşlemeli sistemin 0.148 değerine karşılık en yakın değere sahip olan sistemin 0.15 ile hava soğutmalı su soğutucusu olduğunu ifade etmektedirler.

Zhu (2011a) minimum ayırık teorisine göre bir ayırıştırma projesi için ürün akılarının minimum ayırık gücü (MSPS) ve CE_XC parametresine yeni bir yaklaşımın matematiksel modellemesini kurup, birden çok yararlı ürün çıktısının gerçekleştiği bir ayırıştırma projesi olan tipik bir damıtma sistemi üzerinde uygulamıştır. Yazar bu yaklaşımın sistemlerin fiziksel davranışları açısından olabildiğince gerçekçi değerleri yansıttığını ve bu sebeple MSPS yaklaşımının sadece CE_XC metodunda değil aynı zamanda ekonomik maliyetleri için de uygulanabilir olduğunu göstermiştir. Zhu (2011b) gerçekleştirdiği diğer bir çalışmada ise CE_XC metoduna dayalı olarak endüstriyel proseslerde sıkça kullanılan ters akışlı bir ısı değiştiricisi prosesinin optimal tasarımının soğuk akışların yıllık toplam CE_XC değerini minimize ederek gerçekleştirilmiştir.

Pu vd. (2012) hava şartlandırma sisteminin güç ikmal ünitesinde bulunan ısıl bir buz deposunun (ITS) CE_XC analizini ve maksimum güç düzenleme birimi tarafından üretilen elektriğin bütün proseslerde nasıl tüketildiğini incelemişlerdir. Yazarlar ortalama CE_X değişiminin hem ITS yükü hem de güç üretim biriminin çalışma yükü ile doğru orantılı olduğunu ve herhangi birinin artması durumunda azaldığını göstermişlerdir. Fakat bunun yanında ITS sisteminin kullanımı durumunda, maksimum üretim birimi tarafından sağlanan gücün tüketildiği bütün proseslerin CE_XC değerinin arttığını ifade etmektedirler.

Ziebig ve Gladysz (2013) bütünleşik bir oksijen-yakıt yanmalı güç tesisinin CE_XC analizini gerçekleştirmişlerdir. Elde etmiş oldukları tesise ait elektrik üretimi CE_XC endeks değeri zannedilenden daha da küçük bir değerde 3.74 MJex/MJ olduğunu ve bunun sebebi olarak da şu ana kadar gerçekleştirilen analizlerin sistemler için bir ara yaklaşım olması ve katı atık ürünlerinin dikkate alınması olarak izah etmektedirler. Yazarlar oksijen açısından ise CE_XC değerinin alıntı yapılan verilerin 20 yıldan daha da eski olan ASU teknolojilerine ait olmasından dolayı literatürde bulunan değerlerden 2.7 kat daha düşük bir değerde olduğunu ve katı atık ürünlerinin kullanılmadığı durumda ise elektrik üretimi ile ilgili CE_XC endeks değerinin 3.136 MJex/MJ gibi bir değer ile az bir farkla artmış olduğunu ifade etmektedirler.

Nogueira vd. (2014) mısır ve şeker kamışı bitkisinden etanol üretimini gerçekleştiren bir güç tesisi için *LCA* ile çevresel boyutunu, termodinamik çevresel performansını ise *CED* ve *CE_xC* metodunu kullanarak birinci enerji tüketim miktarını karşılaştırarak incelemişlerdir. Yazarlar ideal dönüşüm prosesleri şartları altında, seker kamışının daha iyi endeks değerlerine sahip olduğunu ve bu durumun ideal sistemlerin birincil enerji tüketim miktarını azaltmakla iklim değişikliğinden kaynaklanan çevresel etkileri incelemek üzere ele alınan birleşik analiz metotlarında da geçerli olduğunu ifade etmektedirler.

Sun vd.(2014) matriks metodu yöntemi ile Çin'deki en temel kömür doğalgaz, ham petrol, gaz yağı, dizel, LPG, rafineri, gaz, elektrik vb. enerji taşıyıcılarının *CE_xC* değerlerini belirlemek için gerçekleştirildiğini bu çalışmada Çin'de 1 MJ değerine karşılık gelen enerji taşıyıcılarının değerlerini 3.31, 1.57- 1.59, 1.23- 1.29 ve 1.12- 1.20 sırasıyla elektrik, petrol ürünleri, kömür ürünleri ve fosil yakıtlar için elde etmiş olup Sargut'un (2005) çalışması ile bir kıyas yaparak iki yöntem arasındaki farklılıkları belirlemişlerdir. Sonuç olarak Çin'in gelecek planları için enerji üretimi verimliliğini geliştirmesine ve yenilenebilir kaynakların kullanımına geliştirici teknikler ile önem vermesini önermektedirler.

Zhu (2016) ısı pompası damıtma sisteminin kaynak kullanımı ve emisyonları içerecek şekilde toplam çevresel etkilerini eniyilemek ve analiz etmek için kullandığı *CE_xC* metoduna göre ekserji ve proses değerlendirmelerinin ortak bir birimde çevresel etkiler ile kaynakların tamamen entegre edilebilmesinin mümkün olduğunu ve böylelikle sistemlerin ortalama performansının değerlendirilmesi için daha iyi bir çerçeve olduğunu göstermiştir.

Khattak vd. (2018) enerji ve su arasında güçlü bağ içeren komponentler arasındaki dinamik ilişkiyi ele alan Holistic Resource Accounting metodunu göz önüne alarak, suyun ekserji akıları açısından bir model ortaya atıp sürdürülebilir bir üretim yapısının nasıl gerçekleştirilebileceğini incelemişlerdir. Yazarlar bu metot ile ele aldıkları bir yemek endüstrisinde %4.1 oranında bir kaynak tüketimi azalmasının mümkün olduğunu göstermişlerdir.

Yıldızhan ve Taki (2018) *CE_xC* yaklaşımını kullanarak Güney Marmara ve Tokat'ın açık üretim alanları ile Antalya'daki sera alanlarındaki domates üretimini ele almışlardır. Elde etmiş oldukları sonuçlarda açık üretim alanları için en uygun bölgenin *CDP* ve *RI* değerinin sırasıyla 1.62 ve 0.38 değerlerine sahip olan Tokat bölgesi olduğunu, açık

Üretim alanlarındaki su tüketimi ile sera alanlarındaki elektrik tüketimine ait CE_xC değerlerinin yüksek olduğunu beyan etmektedirler. Verilen bölgelerde suyun pompalanması ve elektrik üretimi için kullanılan temel kaynağı fosil yakıtlar olduğunu belirten yazarlar sulama sistemi ve elektrik üretimi için sadece fosil yakıtlar kullanılması durumunda en iyi yenilenebilirlik gösterge değerinin seraların bulunduğu Antalya bölgesi olacağını ifade etmektedirler.

Bardant vd. (2018) Endonezya'nın Ganboeng ayı bitkisine ait sürdürülebilirlik değerlendirmesini gerçekleştirebilmek için RI ve CDP göstergelerini kullanarak daha önce Karadeniz'de gerçekleştirilen Rize ayı ile elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Ganboeng ve Rize ayına ait enerji ve ekserji değerlerini sırasıyla 1496.38 MJ/t ile 821.86 MJ/t ve 807.83 MJ/t ile 273.43 MJ/t olarak tespit etmişlerdir. Bu çalışmanın devamı olarak sundukları çalışmalarının ikinci kısmında Bardant vd. (2018) ise Ganboeng ayı için temin edilebilirlik, temiz enerji ve uygun iklim koşulları oluşturmak amacıyla tahta yumakların ortam şartlandırma kontrolü ile kullanılma durumunda RI ve CDP göstergelerini tekrar kullanmışlardır. Ganboeng ayının ekserji kullanımı ve ekserji yıkımının sırasıyla 11,293 MJ/ton ve 9,718 MJ/ton olarak tespit eden yazarlar Rize ayına ait değerler ile karşılaştıklarında Ganboeng ay fabrikasında kullanılan kurutma prosesinin hemen hemen ısı kaybının yaşanmadığı teorik değeri eşıt şartlarda gerekleştiiğini ve ayrıca Ganboeng ayının CDP değerinin 0.814 ile Rize ayına ait 0.465 CDP değerinden daha büyük olmasının sebebini, tahta yumak kullanımı ile sistemdeki toplam enerjinin %11'i gibi bir değere karşılık geldiğini ve ek olarak Ganboeng ayının ekserji veriminin 0.75 olduğunu ifade etmektedirler.

Rodriguez-Merchan vd. (2019) kaynak kullanımının verimi ve etkili yönetimi ile ilgili kapsamlı bir anlayışın Nexus konsepti şeklinde geliştiiğini ve bu doğrultuda Şili ülkesinin enerji sektörünü değerlendirmek için LCA , CE_xC ve CDP analiz metotlarını su-enerji-toprak Nexus (WELN) kapsamında kaynak ilişkilerinin verimini incelemişlerdir. Sonuç olarak bir MWsaat miktarındaki elektrik için gerekli olan enerji kaynaklarının 17.3 GJex değeri kadar olup, bu enerjinin %99 oranında fosil ve yenilenebilir kaynaklar olduğunu, yenilenemeyen kaynaklara ilişkin yüksek teknolojik verimi ve düşük CE_xC sebebiyle yenilenebilir enerji teknolojilerinin su-enerji-toprak için CDP değerinin yükseldiğini ve ek olarak su ile toprak kaynaklarının toplam ekserji akışlarında oldukça küçük bir katkı yaptığını belirlemişlerdir.

Wang vd. (2019) atık ısı güç üretimi için kullanılan bir organik rankine çevrimi (ORC) için ekolojik kümülatif ekserji tüketimi (ECE_xC) analizini gerçekleştirmişlerdir. Ekolojik yaşam döngüsü analizlerine dayanan bu metot ile kaynak tüketimi, mali sermaye, çevresel etkiler hesaplanarak farklı optimizasyon amaçları, çevre şartları ve iş akışkanları değişkenlerinin kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar şu şekildedir;

- Verilen şartlar altında ORC sisteminde R134_a iş akışkanı olarak kullanıldığında ECE_xC değeri 1.89E+10 sej/kWh olup, mali sermayenin en yüksek değerinde olduğu toplam ECE_xC değeri %53.02, çevresel etki %30.17 ve minimum kaynak tüketimini ise %16.81 olmaktadır.
- R134_a iş akışkanı ile yenilenebilir kaynak tüketiminin 8.92E+08 sej/kWh değerinde olup nitrojenin tüketimi oranına bağlı olmakla beraber manyetik demir tozunun ECE_xC_{RC} (kaynak tüketimi için ECE_xC) değeri sırasıyla %24.01 ve %9.99'dur. Çevresel etkiler için ECE_xC_{EI} değeri ise karbondioksit emisyonu ve tuzun etkisi dikkate alındığında sırasıyla %69.44 ve %16.51 olarak elde edilmiştir.
- ORC sisteminin ECE_xC değeri 1.89E+01 sej/kWh ile kömür yakıtlı güç tesislerinden 1.41E+12 sej/kWh olup daha düşüktür.
- R1336mzz ve R1233zd iş akışkanlarının kullanıldığı ORC sistemlerinde daha iyi bir sürdürülebilirliğe sahip olduğunu ve her sistem birimi için toplam ECE_xC değeri ısı kaynağının giriş sıcaklıkları arttıkça, azalmaktadır.

Kriechbaum ve Kienberger (2020) Avusturya gibi gelişen ülkelerde yenilenebilir enerji potansiyeli ihtiyacının giderek artmakta olup bunun için değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu mümkün kılan enerji sistemlerinin yanı sıra birincil enerji verimliliği önlemlerinin alınmasının şart olduğunu belirterek yerel yönetim hizmetlerinin müşterilerine hizmet olarak sağladığı ısı ve elektrik enerjisinin kümülatif tüketim minimizasyonu analizini gerçekleştirmişlerdir. Ekserji verimi yüksek tesislerin, düşük olanlara nazaran birincil harcamalarının aynı olabilmesi için daha yüksek bir kapasite faktörüne sahip olması ve de yenilenebilir enerji kaynakları çeşitliğinin de yüksek kapasiteye sahip taşınabilir ikincil tesisleri ve ek yükleri gerektirdiğine vurgu yapan yazarlar Avusturya'daki elektrik tüketiminin gerçek CE_xC değerini 2.96 olarak tespit edip $s_1=1.25$, $s_2=1.5$ ve $s_3=2$ senaryo değerlerini hassasiyet analizi ile karşılaştırarak yatırım maliyetlerini sırasıyla $sR=\%9.4$, $s_1=\%2.1$, $s_2=\%4.6$, $s_3=\%8$ ve çevrim kayıplarını ise sırasıyla $sR=\%21.8$, $s_1=\%25.1$, $s_2=\%24.7$, $s_3=\%23.4$ olarak

bulmuşlardır. Sonuç olarak yazarlar yerel yönetim hizmet sistemlerinin tasarım ve operasyonel faaliyetlerinde CE_xC minimizasyon yaklaşımı sayesinde enerji taşıyıcılarının akıları ile enerji ve maliyet akıları arasındaki açığın üstesinden gelinebileceğini ifade etmektedirler.

İbrahim ve Adedeji (2020) Nijerya gibi yarı tropikal iklime sahip bölgelerde sandcrete (SC) ve burnt brick walled (BC) yapıları için ekserji tüketim değerini hesaplamayı amaçlamışlardır. Bunun için özellikleri incelenen yapıların enerji ihtiyacını saptayıp, elektriğin ekserjetik faktörünü kullanarak ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir. SC, BC ve tasarladıkları model duvarlar için CE_xC miktarını sırasıyla 246,074.4 MJ/yıl, 128,595.6 MJ/yıl ve 124,646 MJ/yıl olarak bulmuşlardır. Yazarlar ek olarak modelde tasarlayıp kullandıkları SC ve BC duvar yapılarının var olan yapılara nazaran daha da esnek, solar ısı emilimini daha iyi yalıtın ve enerji verimliliği açısından %48 daha fazla verimli olduklarını beyan etmektedirler.

Prestipino vd. (2021) yüksek nem içeriğine sahip biyokütlelerin yakıt olarak kullanıldığı kojenerasyon sistemlerinden elde edilen elektrik üretiminin etkilerini, sistemde kurutma prosesine entegre edildiği ve ıslak ham maddelerin kullanıldığı W senaryosu ile kuru hammaddenin kullanıldığı D senaryosunu oluşturarak sisteme ait termodinamik performans, yenilenemeyen kaynakların CE_xC , enerji ve ekserji verimi, maliyetin ekserji ve enerji geri dönüşünü ve yeni bir yenilenebilirlik indikatörü olan bütünleşik yenilenebilirlik (Integrated Renewability) verilerini elde etmişlerdir. Yazarlar sonuçları şu şekilde ifade etmektedirler;

- LCA gösteriyor ki, ayrıştırma prosesi sistemi sürdürülebilirliğine olumsuz yönde etki göstermektedir.
- D ve W senaryolarına göre ortalama ekserji verimleri sırasıyla 0.29 ve 0.24 tür.
- İtalya'nın elektrik şebekesinden (R) üretilen elektrik ile kıyaslandığında W ve D senaryoları daha düşük bir yaşam döngüsü ekserji verimlerine sırasıyla 0.34 ve 0.24, 0.20, daha yüksek IR değerlerini (0.9 ve 3.1, 1.5), daha düşük CE_xC (1.9 ve 0.32, 0.33) ve daha düşük iklim değişikliği etkilerini (447 ve 332, 1.29) gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Hossain vd. (2020) elektrik gücü üretim tesislerinde sürdürülebilirliğin ve enerji tüketim miktarının azaltılmasının önemine değinerek, 2007 ve 2016 yılları arasında Bangladeş'in öğrenim sektörüne ait enerji ve ekserji kullanımını incelemiştir. Yazarlar Bangladeş için bu zaman diliminde enerji ve ekserji verimi oranının sırasıyla %34.9 -

%36.3 ile %35.30 - %39.20 olarak tespit edip, ısı güç tesislerinin hidro-güç tesislere nazaran daha yüksek ekserjetik geliştirme potansiyelinin mevcut olduğunu ifade etmektedirler. Ekserji ve çevresel sürdürülebilirlik arasında sürdürülebilirlik endeksleri aracılığıyla bağıntı kuran yazarlar depletion oranının 0.61 ile 0.65 arasında değişim gösterirken, ekserjetik sürdürülebilirlik indisini ise 1.54 ile 1.64 değerleri arasında değiştiğini ifade etmektedirler.

Mobtakar vd. (2020) Güneş panelleri sistem uygulamalarını alternatif bir temiz enerji kaynağı olarak kullanılmak üzere İran'da 100 hektarlık verimli bir arpa ekim bölgesinde tarımsal sulamayı ve çevresel sürdürülebilirliği gerçekleştirmek amacıyla, yüzeysel sulama (SFI) ve yağmurlama sulama (SPI) yöntemlerinin simülasyonunu tasarlamışlardır. Yazarlar güneş panelleri sistemleri için SFI ve SPI senaryolarını *TRNSYS* programı ile gerçekleştirdikleri simülasyonda *ReCiPe2016* yaşam döngüsü değerlendirme metodunu kullanarak bütün senaryolar için çevresel etkileri incelemiştirler. SFI-PV ve SPI-PV yöntemi ile elde edilen enerji kullanım verimlerini sırasıyla 2.85 ve 2.80 olarak tespit etmişlerdir. Senaryolardaki tarım emisyonları içinde çevresel etkilerin odak noktasında SFI, SPI, PV panelleri, SFI-PV VE SPI-PV kaynaklanan elektrik tüketiminin sebep olduğunu, CE_xC ile elde edilen sonuçlara göre arpa üretimi için kullanılan fosil yakıtların ve yenilenebilir olmayan kaynakların temel olarak dizel yakıtı ve elektrikten kaynaklı olduğunu ifade etmektedirler. Yazarlar ayrıca enerji ve çevresi hasar cinslerinin yenilenebilir enerji teknolojileri kullanılarak önemli derecede iyileştirilebileceğini belirtmektedirler.

Nikkah vd. (2021) İtalya'da bulunan 9 tür çeltik pirinci üretim sistemlerinin tercih edilmesi durumunda, ekserji akışlarının nasıl değiştiğini incelemek için gerçekleştirdikleri CE_xC analizinde pirinç çeşitleri için CE_xC değerlerinin 16.09 ile 25.80 GJha-1 değerleri arasında olduğunu ve fosil yakıtlar ile kimyasal gübre tüketiminin incelenen bütün türler için en yüksek toplam enerji tüketimini oluşturduğunu açıklamışlardır. Bunun yanında pirinç türlerinin *CDP* değerlerinin 3.98 ile 7.96 değerleri arasında iken yenilenebilirlik indikatör değerlerinin ise 0.75 ile 0.88 değerleri arasında olduğunu belirterek Luna isimli pirinç türünün *CDP* değerini 7.96 ve yenilenebilirlik göstergesinin 0.88 olarak saptanmasıyla İtalya'daki en çok ekserji verimi yüksek pirinç türü olduğunu da eklemektedirler.

1.2.3. Genişletilmiş ekserji analiz metodu (EEA)

Sciubba (2001) enerji çevrim sistemlerine ayrıcalıklı bilgi veren üretim zincirine ait maliyet hesaplamalarında yeni bir ereve sunmakta olup, herhangi bir karmaşık üretim zincirinin modüler olarak kendi içinde ayrılması ve her modül için kütle ve enerji dengesi oluşturulduktan sonra sunduğu yeni yaklaşım ile ekserji ve maliyet analizini gerçekleştirmektedir. Maliyet hesaplamalarında parasal birim yerine işgücü, finansal kaynaklar ve çevresel iyileştirme maliyetleri hakkında bilgi sunup, kaynak temelinde llebilirliği temin eden EEA metodunu kullanmıştır. Yazar bu yeni tekniği bir gaz türbinli kojenerasyon tesisi için kullanıp elde ettiği sonuçları mevcut mühendislik ekonomik ve ısı ekonomik tekniklerine göre kayda değer bir ilerleme gösterdiğini ifade etmektedir. Yazar ele almış olduğu gaz türbinli kojenerasyon sistemi için 2. yasa verimi 0.4 ile 0.5 arasında iken EEA temelindeki veriminin ise 0.24 ile 0.32 değerleri arasında olduğunu ve çalışmada kullanılan kabullere göre işgücünün ekserjetik eşdeğerlilik değerinin toplam ekserjetik harcamalarının %2 ila %3 arasındaki değerlerde olduğunu belirtmektedir.

Ertesvag (2004) Norveç toplumunun 2000 yılında yararlanmış olduğu materyaller, enerji iletim hatları, dönüşüm, hammadde tüketimini 7 adet ara sektöre ayırıp, E_xE değerlerinden işgücü ve maliyet akılarına ek olarak termodinamik ve kimyasal ekserji değerlerinin kullanıldığı EEA metodunu ile incelemiştir. Hammadde tüketim sektörü için ekserji ve E_xE dönüşüm birimlerinin ikisi için de %95 ve dönüşüm sektöründe ise bu değerin %76 olduğunu tespit etmişlerdir. Bu iki sektörün ağırlıkla sırasıyla petrol-gaz hammaddeleri ve hidroelektrik dönüşüm sistemlerinden yaralandığını göstermektedir. nc sektör olan tarım, ormancılık, balıkçılık ve yemek endüstrisinin ekserji çıkış-ėirdi oranının 0.45 gibi düşük değerde iken E_xE dönüşüm veriminin ise %62 olduğunu, 4. sektör olan kğıt, metal ve kimyasal içerikli endüstrilerin yoğunlukta olduğu üretim endüstrisi, işgücü ve maliyet akılarının ağırlıkta olduğu 5. sektör olan taşımacılık sektörü ile hizmet sektöründeki E_xE ve ekserji verimlerinin ise sırasıyla %50 ve %69, %63 ve %75 ile %19 ve %26 olarak elde etmiştir. 7 sektör olarak tanımladıkları yöresel sektörlerin diğer sektörler ile kaynak ve ürün etkileşiminde bulunmaması ve sadece atıkların kullanılarak geri dönüşüm yolu ile kullanılmasına rağmen sıfıra yakın bir enerji ve ekserji çıktısının gerçekleştiğini belirtmektedir. Ayrıca 7. sektör için bu sektörden diğer sektörleri işgücü katkısı olması sebebiyle E_xE ıktısının, E_xE ġirdisinden daha da büyük olduğunu ifade etmektedir.

Sciubba (2005) karmaşık sistemlerde daha anlamlı ve doğru sonuçlar ortaya koyan parasal maliyetlerin aksine olarak kaynak esaslı eşdeğer verileri kullanarak geliştirdiği *EEA* yöntemini tanımlamaktadır. Çevresel maliyetler, sermaye ve işgücü akılarını sistem içinde dengeleyerek *EEA* metodunu sunmuştur.

Ptasinski vd. (2006) Hollanda enerji sektörünün işletme, dönüşüm ve enerji dağıtımını ara sektörlerine ayırarak performans değerlendirmesini standart ekserji ve hammaddenin kümülatif ekserji tüketimi ve parasal değerde maliyet ekserji dönüşüm faktörleri kullanarak *EEA* analizini gerçekleştirmişlerdir. Kümülatif ekserji tüketimine dayalı performans göstergelerinin enerji ve ekserji konseptine dayalı değerlerden daha düşük olduğunu göstermişlerdir. *EEA* analizinin ise yemekhaneler, rafineler, merkezi elektrik üretimi ve dağıtımını olmak üzere 4 arabirimi inceleyen yazarlar sonuç olarak genişletilmiş ekserjinin parasal eşdeğerinin üretimi değerlerinden daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca *EEA* analizine dayalı seçilen enerji biriminin performans göstergeleri değerleri kümülatif ekserji tüketimine bağlı analiz metodu değerlerinden çok daha düşük olduğunu göstermişlerdir.

Belli ve Suciubba (2007) *EEA* analiz yönteminin *SWOT* analizini gerçekleştirerek *EEA* yönteminin güçlü ve kısıtlı yönlerini detayları ile beraber değerlendirmişlerdir. Bu çalışmanın önemini, bütün emtia üretim sistemlerinin kütle, enerji ve ekserji dengelerini matris formunda bağlı bir uygulamasını formunda göstermek ve birincil tüketim ekserjisinin bir üretim hattının en önemli 2 göstergesi olan birincil verim ve ekolojik maliyet şeklinde ele alınabileceğini vurgulamışlardır. Ayrıca yazarlar *EEA* metodunun standart ekserji, *CEC* veya *TEA* yöntemlerine alternatif bir analiz metodu olmaktan çok diğer metotlar ile uygulanması oldukça zor olan görevleri yerine getiren verimli ve benzersiz bir araç olduğunu vurgulamaktadırlar.

Sciubba vd. (2008) ekserji ve *EEA* metodunu geniş karmaşık sistemlere uygulamayı amaçlayan yazarlar, sistemleri sürekli halde kabul edip, madde ve enerjinin giriş ve çıkış akışlarını ekserji birimi şeklinde ifade etmişlerdir. Bu sebep ile yerel ve temiz jeotermal kaynağı sayesinde verimli ölçüde elektrik üretiminin gerçekleştiğini ve düşük nüfus yoğunluğuna sahip önemli turistik bölgesi ile sıkı bir ilişkisi bulunması sebebiyle bundan en çok getiri sağlayacak sektörün İtalya ortalamasının oldukça üzerinde bir ekserji ve *EEA* verimine sırasıyla %33 ve %85 sahip olan ticaret sektörü olduğunu belirtmektedirler. Diğer sektörler için ise temel olarak işgücünün yapısal yüksek ekserjetik maliyetlerine sahip olması nedeniyle İtalya ortalamasının altında verilere sahip olduğunu

göstermektedirler. Yazarlar bu çalışmanın ilgi çekici bir sonucunu düşük endüstriyel yoğunluğa ve ekonomisi iyi organize edilmiş bir ticari sektöre sahip Siena gibi bir bölgenin küçük çapta birincil kaynak tüketimine haiz olmasının yanında yüksek kalitede enerji ve ekserji çıktısına sahip olması şeklinde ifade etmektedirler. Son olarak verimsizliği en fazla olduğu sektörün, ekserji ve *EEA* veriminin sırasıyla %10 ve %30 olarak taşımacılık sektörü olduğunu belirtmektedirler.

Sciubba (2010), *EEA* hesaplamalarında kullanılan işgücü ve sermaye ekonomik faktörlerinin ekonometrik katsayıları olan alfa ve betanın daha önce yapılan *EEA* çalışmaların aksine tahmini değerler yerine tam değerinin nasıl hesaplandığını ve elde edilen değerlerde işgücü ekserji maliyetinin tahmini değerlerden çok da farklı olmadığını ama maliyet ekserjisinin ise yaklaşık 5 kat daha büyük bir değer ile hesaplandığını göstermiştir.

Dai ve Chen (2010) Çin toplumundaki kısıtlı kaynaklar ile yüksek hızdaki ekonomik yapılandırma arasındaki çatışmayı indirgeme ihtiyacının gerekliliğinden dolayı 2007 yılına ait verileri kullanarak ekolojik yatırımların dağılımını belirlemek için içindeki 30 eyaletin fosil yakıtları indikatörlerine dayalı *EEA* analizini gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar sonuç olarak fosil yakıtların erkserji kullanımında Beijing, Shagai, Guagzhou ve çevresinin öne çıkarken Shaxi, Shadong, Moğolistan gibi kaynak zengini bölgelerin yerel kaynakları aşırı tükettiğini, hem toplam hem de birim kişi başına olmak üzere ekserji kullanımında Kuzey Çin'in Güney Çin'den daha fazla miktarda fosil yakıt tükettiğini, Kuzey Çin'e nazaran Güney'in daha düşük EEP değerine sahip olması sebebiyle materyal kullanımından kaynaklı yüksek verimde parasal transferlerin gerçekleştirdiğini ifade etmektedirler. Ayrıca yazarlar yüksek arz talebi ve verimsizlikten dolayı Kuzey Çin'in enerji kullanım politikasını miktardan ziyade kaliteye odaklanmasını, alternatif enerji kaynakları ve yüksek performans teknolojileri kullanımının gerekliliğini bildirmektedirler.

Seçkin vd. (2012) 2006 yılındaki verilere dayanarak Türk toplumunun sürdürülebilirlik seviyesinde iyileştirmeyi amaçlayan olası yapısal müdahaleleri açıklayabilmek için işgücü hizmet akışlarının dışsallıkları, maliyet ve çevresel iyileştirmeleri ekserjetik eşdeğerliklerine dönüştüren ve daha kapsamlı ve derin çevresel etki ve kaynak tüketimine izin veren *EEA* metodunu kullanmışlardır. Sürekli, açık, çevre ve yurtdışı gibi dışsallıklarla etkileşimde olan bir termodinamik sistem olarak ele alınan Türk toplumunun hammadde eldesi (EX), dönüşüm (CO), Taşımacılık (TR), Tarım (AG),

Endüstriyel (EN), Eğitim (TE) ve Yerel (DO) sektörleri değerlendirmişlerdir. Yazarlar sonuç olarak EX, TE ve DO sektörlerinin haricinde kalan sektörler için ekserji kullanımının geliştirilmesi amacıyla daha gerçekçi ve dikkatlice planlanmış bir çabaya gereksinim duyulduğunu ve ayrıca her sektör için sadece EEA verimine değil aynı zamanda yüksek tüketime sahip bir sektör için küçük bir iyileştirme çabası bile problemi çözmeye yönelik ucuz, makul ve acil bir adım olması sebebiyle toplam genişletilmiş ekserji tüketiminin dikkate alması gerektiğini ifade etmektedirler. Aynı yazar veya beraberindeki arkadaşları tarafından çevresel iyileştirme maliyet analizi çalışmaları; Türkiye'nin 2010 yılı için katı atık kullanımı sektörünün genişletilmiş ekserji maliyetini materyal geri dönüşümü, fırınlama, biyogaz üretimi ve arazi kullanımına ait nümerik bir çalışma Seçkin (2016), rafineri ve asitli içeceklerin katı atıklarından enerji elde edilmesi prosesi (Seçkin, 2016), şehir içi su atıklarının geri dönüşüm prosesi Seçkin vd. (2013) şeklindedir.

Dai vd. (2012) tüketim ve çevresel kaynaklar arasındaki belirgin çelişkinin sosyal-ekolojik toplumsal denge üzerinde önemli bir etkiye sahip olması ve kaynak yerleşimlerinin, kullanımlarının, verimlerinin ve çıktılarının karmaşık tüketim sistemleri için yapısal ve fonksiyonel karakteristik özellikleri ortaya çıkarmanın önemine değinerek, yapının yanında materyal ve enerjinin girdi-çıktı dengesi gözetilerek sistem merkezli modelleme tekniğinin sağladığı ilişki ağını mevcut sosyal, ekonomik ve çevresel etkilerin ilişki içinde olduğu enerji tüketimi, iş gücü, çevresel emisyon ve mali harcamalara potansiyel bir ölçek sunan EEA metodunu Çin ülkesine uyarlamışlardır. Bunun için öncelikle Çine ait tüketim sistemini 2007 yılı için var olan veri tabanının tarım, hammadde üretimi, dönüşüm, endüstriyel, taşımacılık, yüksek öğrenim ve yerel sektörlerine ayrılmışlardır. Sonuç olarak birincil kaynak sektörlerinin sosyo-ekolojik yapı tüketiminin ana kaynağı olduğu ve ek olarak tarım, endüstriyel, taşımacılık ve yüksek öğrenim sektörlerinin bütün sosyo-ekonomik sistem içerisinde ekserjinin iletimi açısından önemli rol oynadığını ifade etmektedirler. Başka bir sonuç olarak yazarlar daha da sürdürülebilir sistem döngüsünün sağlanabilmesi için farklı sektörlerin alması gereken farklı tedbirleri şu şekilde sunmuşlardır.

Rocco vd. (2014) geleneksel ve ileri ekserji analiz yöntemlerinin karşılaştırıldığı bu yazıda yazarlar EEA yönteminin teorik temellerini detaylarıyla beraber dinamik bir sistemde analiz etmişlerdir. Yazarlar EEA yöntemine ait harici ekserji maliyeti denkliği ile genişletilmiş ekserji maliyeti (Extended Exergy cost, eec) gibi temel 2 özelliğin enerji

çevrim sistemlerinin herhangi bir karşılaştırılmalı analiz yoluyla hem küresel hem de bölgesel çapta daha fazla bilgi ve verinin elde edilebileceğini, dinamik bir sistemin ortalama kaynak tüketimini örnek vererek göstermişler. Bu çalışmada dinamik bir sistemi toplam eşdeğerlilik birincil kaynakların değerlendirilmesi için ekserjiye dayalı geniş çaplı bir analitik yöntem ve *EEA* metodunun teorik bir incelenmesini sunmaktadırlar. Ayrıca E_xE maliyet fonksiyonu geleneksel ısıl-ekonomik metodu çerçevesinde ekonomik maliyet fonksiyonu ile değiştirilmesi ile kullanılabilmektedir. Yazarlar elektrik gücü iletim hattının üzerinde gösterdikleri numerik bir örnekte *EEA* eniyileme tasarım açısından CE_xC eniyileme analizlerine karşılık olarak ekonomik eniyileme, parasal tasarruf gibi operasyonel parametrelerinin ortalama kaynak tüketiminde bir azalmanın gerçekleştiğini göstermektedirler.

Dai vd. (2014) aşırı enerji tüketimi, çevresel kirlilik ve ekolojik hasar sorunlarının sosyal, ekonomik, doğal karmaşık sistemlerin gelişimine engel teşkil ettiğini, milli-ekolojik ve ekonomik sistemlerin kaynak değerlendirmelerini nasıl yapmaları, kaynak dönüşümlerini etkin bir şekilde kullanabilmeleri ve çevresel emisyonlarının verimli ölçümlerini yapabilmelerinin sürdürülebilir gelişim yönetimi açısından esas olduğunu ifade ederek 2010 yılı için Çin'in mevcut kaynakları ve yüksek hızdaki gelişimi arasındaki çelişkiyi ifade etmek üzere üretimden tüketim prosesine sistematik bir yaklaşım getiren *EEA* analizini gerçekleştirmişlerdir. Tüm toplumun AG, EX, CO, TR, IN, TE ve DD sektörlerine ve karakteristik özelliklerine göre değerlendirildiği bu çalışmada geleneksel enerji, yenilenebilir enerji, mineral elementi ve diğer doğal kaynakların yanı sıra kaynak esaslı ikincil ürünlerin veri tabanlarının elde edildiği sisteme ait ekserji işi akışları yapılandırılarak dışsal eşdeğerlilik ekserji değerini hesaplamak üzere çevresel emisyon yöntemini kullanmışlardır. Sonuç olarak 2010 yılı için Çin'e ait *EEA* değeri 1.80×10^{14} MJ olup yüksek değerde artış gösterdiğini, *EEA*'ya dayalı sürdürülebilirlik gösterge değerinin 0.23 olduğu ve bu değer kritik değer olan 1'den çok daha küçük olması sebebiyle Çin için düşük bir sürdürülebilirlik seviyesi ve yüksek enerji tüketimi aşamasında olan ve hala gelişen bir ülke statüsünde olduğunu vurgulamaktadırlar.

- Dönüşüm sektörü için Çin'de var olan enerji üretim yapılarında değişikliğe giderek birincil ekserji girdisinin azaltılması hem doğal kaynakların tüketimi hem de çevresel emisyon açısından ısıl elektrik gücü girdisinin azaltılması ve ek olarak yenilenebilir enerji kullanımının uzun vadede arttırılması gerekmektedir.

- Taşımacılık sektörü için temel olarak fosil yakıtları kullanan bu sektörün çevresel emisyonların en yüksek olduğu sektör olması sebebiyle trafik yollarının eniyilemesi, enerji tüketimini azaltan gezi metotları ve daha temiz taşımacılık yakıtının geliştirilmesi zorunludur.
- Tarım ve eğitim sektörü için işgücünden teknik merkezli metotlara geçişin sağlandığı bu sektörlerde yaşlanma oranı ve işgücünün dalgalanması büyük bir etki göstermesi mümkündür.

Yang ve Chen (2014) biyogazın yaşam döngüsü boyunca işlem gördüğü bütün aşamalarda akışların materyal, enerji, ekonomik ve sera gazları salınım ölçütlerini birleştiren Çin'deki biyogaz üretiminin sürdürülebilirliğini değerlendirmek için *EEA* analizini gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar tespit etmiş oldukları sonuçları şu şekilde izah etmektedirler

- Ekonomik maliyetler tesisi inşa edilmesi aşamasında yoğunlaşmaktadır.
- Sera salınımları temel olarak %36.23 ve %34.91 ile sırasıyla tuğlalar ve çimentodan kaynaklıdır.
- En yüksek kaynak tüketim oranı %87.06 ile operasyonel fazda, hammadde tüketiminde görülmektedir.
- Yenilenebilir enerji dönüşüm sistemleri ile karşılaştırıldığında biyogaz prosesinin 0,925 ile daha yüksek yenilenebilirliği, yatırım maliyetine karşılık ekonomik getiri oranı 6.82 ve 0,012 ile daha düşük sera gazı emisyon yoğunluğuna sahiptir.

Johangir vd. (2015) Pakistan'ın Karaçi kentindeki farklı kentsel sektörlerin tüketimlerinin kentsel metabolizma prosesleri hakkında bilgi veren ekserjiye dayalı analiz gerçekleştirmişlerdir. Ekserji eşdeğerlilik, işgücü ekserjisi sonuçlarına dayanarak Karaçi şehrindeki işgücü ekserji miktarının toplam ekonomik maliyet ekserjisinin 2 katı kadar olduğu, tüm şehrin toplam işgücü çıktısından daha az bir ekonomik maliyete sahip olduğunu ifade eden yazarlar kente ait enerji sektöründe verimlilik iyileştirmeleri için işgücü üretiminin artırılması ve net girdi kaynaklarının azaltılmasıyla çözülmesi gereken birçok sorunun olduğunu ifade etmektedirler. Ek olarak yazarlar, *EEA* yönteminin şehirde ve şehir yaşamına destek olan bölgelerde kentsel metabolik prosesi sırasında tüm materyal akıları ve enerji bütünleştiren kabiliyetli bir araç olduğunu, *CEC*, iş gücü, maliyet ve çevresel etkilerin kente ait dönüşüm verimi prosesinin tanımlanması ve gerçek kaynak tüketiminin değerlendirilmesi için bir araya getirildiğini ifade eden yazarlar *EEA*

sonuçlarının dürdürülebilir bir kentsel gelişim için, kentsel enerji planlaması ve yönetimin optimizasyona yardımcı olması gerektiğini savunmaktadırlar.

Colombo vd. (2015) gaz akışkanlı bir gaz türbinli motor santraline fotovoltkaik (PV) panel sitesinin entegre edilmesiyle ekonomik maliyet ve küresel çapta kaynak tüketim miktarı açısından etkisini senaryo 0 ile 4 arasında sırasıyla PV ile yararlanma oranını arttırarak değerlendirilmiştir. Parasal yaklaşım açısından maliyet fonksiyonun ve de termo-ekolojik maliyetinin en iyi olduğu değerlerin 4. senaryo olduğunu göstermektedir. Ayrıca kaynak tasarrufu için en iyi yaklaşım olan *EE* analizine göre en iyi değerlerin ise PV katkısının olmadığı 1. senaryoda gerçekleştiğini göstermektedir.

Jawad vd. (2015) Ekonomik düzen ölçümü (EOQ) modelinin son zamanlarda kullanımının oldukça yaygınlaştığı ve bunun üzerine Çin, ABD ve Almanya'da bulunan 3 farklı firmaya ait EQQ envanter politikalarını belirlemek üzere sürdürülebilirlik faktörleri de içeren bir ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar elde etmiş oldukları 3 firma için ekserji envanter politikasına ait veriler Tablo 1.2.'de görülmektedir. Varılan sonuçlar ise şu şekildedir:

Tablo 1.2. Üç firmaya ait ekserji envanter politika verileri (Jawad vd. 2015)

	ABD	Almanya	Çin
EOQ (units)	1204	1196	1126
Cycle time (yr)	0.60	0.60	0.55
Total Cost (MJ/yr)	23,924.14	23,553.62	44,130.50

- Her ülke için farklı EOQ sonuçları ortaya çıkmaktadır. Çünkü her ülkenin işgücü, sermaye ve çevresel iyileştirme maliyetlerinin eşdeğerlilik ekserji değerleri farklıdır.
- Ekserjetik envanter modeli mevcut ülkelerin şu anda uymakta oldukları ekonomik model ile uyum göstermemektedir. Çünkü model sürdürülebilirliği küresel ölçekte ele almaktadır.
- Ekserjetik EOQ modelinin en önemli anahtarı farklı yer ve zamanda birebir aynı ürünü üreten farklı firmalar arasında anlamlı karşılaştırmalar yapılmasına izin vermesidir.
- EOQ modeline göre en az maliyete haiz çözüm önerileri en kötü ekserjetik çözüm olduğunu göstermektedir.

Song ve Chen (2016) çimento endüstrisinin yüksek yoğunluktaki enerji tüketimi ve karbondioksit emisyonunu azaltmaya yönelik potansiyeli ortaya koymak için sistemin çalışma verimliliği ve çevresel maliyetini ekserji yöntemiyle analiz etmişlerdir. Ayrıca yazarlar çalışmalarından mevcut hedefleri doğrultusunda farklı optimizasyon senaryolarını da dahil ederek dinamik tahmine dayalı bir gelecek emisyon trendinin simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında çevresel etki değeri $1.87E+11$ kJ ile belirlemiş oldukları 8 adet ara proseslerden ufalama prosesinin %64.52 gibi bir değer ile en yüksek etki oranına sahip olduğunu ifade etmektedirler.

Fan vd. (2017) toplam ekserji tüketim miktarı 2.52 EJ olan bir endüstriyel park için materyal tüketimi, sosyal yatırım ve çevresel etkileri de içeren *EEA* analizinde ekserji tüketim miktarının en fazla olduğu alanları sırasıyla materyal-esaslı, maliyet, çevresel ve çalışanların oluşturduğu ekserji yükleri olduğunu ifade eden yazarlar elektronik bilgi endüstrisinin 70 RMB/Gj diğer ile en fazla ekserji kapasitesini oluşturduğunu ve materyal tüketimi açısından diğer endüstrilerin elektronik bilgi servisinden çok daha fazla ekserji tükettiğini, çevresel açıdan ise diğer endüstri servis hizmetlerinin aynı maliyete karşılık daha fazla kirleticiyi yaydığını göstermektedirler. Endüstriyel bir parkın çevresel yönetimi ve endüstriyel yapısının eniyilemesi için yazarlar diğer endüstrilerin acilen güncellendirilmesini önermektedirler.

Manso vd. (2017) ekserji verimin değerlendirilmesinde kullanılan Energy Resources Exergy Accounting (*EREA*), Natural Exergy Accounting (*NREA*) ve Extended Exergy Accounting (*EEA*) yöntemini Portekiz ülkesinin 2000 ve 2012 yılları arasındaki tarım, ormancılık ve balıkçılık faaliyetleri (TOB) üzerinde kullanmış olup analiz yöntemleri arasında karşılaştırma yapmışlardır. Bu çalışmada Portekiz'in TOB sektörlerinde *EREA* ile %30'luk bir verim artışı gerçekleşirken, *NREA* ve *EEA* ile sırasıyla %27 ve %43'lük verim artışı değeri elde edilmiştir. Sonuçlar TOB sektörleriyle uyumlu olsa da *EREA* ile ekserjetik verimi %14 artan, *NREA* ile de ekserjetik verimi %42 azalan balıkçılık sektörünün alt birimlerinin uyum göstermediğini tespit etmişlerdir. Bu durumu daha iyi bir termodinamik verimi gösteren yararlı ekserji çıktısı oranının, balıkçılık ile uğraş verenlerin aynı balığı yakalamak için denizde seyretmek zorunda olduklarından daha yüksek bir enerji hizmet verimine dönüştürememeleri olarak izah etmektedirler. Ayrıca yazarlar *EREA* ve *NREA* yöntemlerinin çevreden temin edilen yenilenebilir akılar için daha da sürdürülebilir gerçekçi bir ekserji verimini ifade

ettiklerini, diğer taraftan *EEA* yönteminin sermaye, çevresel etki ve materyal ile materyal olmayan girdiler arasındaki merkezi ağırlıkları saptamada etkin olduğunu ifade etmektedirler. Aynı şekilde Kanada'nın Nova Scotia bölgesinin 2006 yılındaki verilerine dayanarak ekonomik değerlendirmesi için Bligh vd. (2012), Çin'in 2005 verilerini kullanarak Chen (2009) *EEA* analizi gerçekleştirmişlerdir.,

Aghbashlo vd. (2018) standart ekserji ve *EEA* yöntemlerini İran'ın Kuzey bölgesinde yerleşik bir rüzgâr türbini sitesi üzerinde uygulamışlardır. Standart ekserji ve *EEA* metodu ile rüzgâr türbini sitesinin verimleri sırasıyla %63.32 ve %15.76 olarak elde etmişlerdir. *EEA* metodundan elde edilen düşük ekserjetik verimin temel olarak enerji ve enerjetik olmayan materyal içerik girdilerinin de eklenmesi ile, kısmen de ekserjetik hesaplamalardaki sermaye akışından kaynaklı olduğunu belirtmektedirler. Ekserji yıkımı açısından standart ekserji yöntemiyle elde edilen değer, standart yaklaşımda harici etkilerin ihmal edilmesi sebebiyle *EEA* yöntemi ile elde edilen değerden önemli ölçüde düşük bir değerde olduğunu ve *EEA* yönteminin sürdürülebilirlik açısından daha doğru sonuçlar verdiğini ifade etmektedirler.

Meng vd. (2019) doğal kaynakların kullanımı ve ekosistem hizmetlerinin analiz metotlarının temel olarak doğal sermaye maliyetlerine dikkatlerini vererek insan sağlığına etkisi, biyoçeşitlilik kaybı, işgücündeki dolaylı ekserji tüketimi gibi maliyetleri ihmal ederek doğal kaynakları içeren üretimin tüm maliyetlerini kapsamlı bir açıda sunan ve *EEA* modelini geliştiren bir birleşik-ekolojik *CE_xC* metodunu önermektedirler. Bunun için Çin'deki bir çelik üretim prosesini ele alan yazarlar çelik üretiminin toplam maliyetinde, insan kaynaklı maliyet oranının %9.7 iken bu oranın en fazla %61.65 ile doğal kaynakların ekolojik kümülatif ekserji maliyeti oluşturduğunu tespit etmişlerdir.

Ehyai vd. (2019) rüzgâr potansiyeli orta ve yüksek değerlerde olan sırasıyla Tahran ve Manjil'de bulunan, nominal gücü 10 kW olan Bergey Excel-S rüzgâr türbininin ekserjetik analizlerini gerçekleştirmişlerdi Tahran ve Manjil'deki rüzgâr türbininin enerji verimleri, rüzgâr türbini tarafından üretilen elektriğin maliyetini sırasıyla %1.08 ve %3.33 ve 0.23 US\$/kWh ve 0.73 US\$/kWh olarak hesaplamışlardır. Yazarlar ileri ekserji analizi yöntemiyle rüzgâr türbinlerinin yüksek rüzgâr hızlarında kaçınılabılır ekserji yıkımı oranının arttığını göstermişlerdir. Ayrıca yapmış oldukları *EEA* analizi ile bol rüzgârlı alanlarda en yüksek ekserji oranı sistemin girdi ve çıktı ekserji akışlarında %88.7 gibi bir değer ile gerçekleşirken, nominal rüzgar hızına sahip alanlarda ise ekserjinin ana

maliyet akılarının eşdeğer genişletilmiş ekserji içeriğine %58.9 eşit olduğunu göstermişlerdir.

Song vd. (2019) yüksek miktarda karbondioksit emisyonu gerçekleştiren bir çimento endüstriyel üretim merkezinin, gerçek ekolojik maliyet değerlerini ve önemli ekserji kayıplarının gerçekleştiği sektör ara birimlerini tespit etmek için *EEA* analizini gerçekleştirmişlerdir. Çimento fabrikasının çevresel ekserji iyileştirmeleri *EEA* analizi ile detaylı bir şekilde karşılaştırmak için karpit mıcırı, saman çöpü ve atık ısı geri dönüşümü senaryolarını oluşturmuşlardır. %50, %80 ve %100 karpit mıcırı senaryosunda toplam genişletilmiş ekserji ve kümülatif ekserji dönüşüm verimi ve ekserji kayıpları değişiminin az miktarda değiştiğini belirlemişlerdir. Bunun yanında karpit mıcırının kolayca geri dönüşümünün gerçekleşmesinden dolayı ekserji girdisinin korunabileceği ve karbondioksit emisyonunun iyileştirme maliyeti ekserjisinin azaltılabileceğini tespit etmişlerdir. %20, %30 ve %80 oranlarındaki saman çöpü senaryosunda ise ekserji dönüşümü değeri hafifçe gelişmesinin yanında ekserji kayıplarının önemli ölçüde azaldığını lakin bu senaryoda SO₂ emisyon değerleri çevresel açıdan sorun teşkil ettiğini tespit etmişlerdir. Yazarlar atık ısı geri dönüşümü senaryosunda ise ısıнын geri dönüşüme ve ek maliyetlere rağmen kümülatif ekserji dönüşüm veriminin aynı değerlerde olduğunu belirtmişlerdir.

Aghbashloa vd., (2020) güneş panel sitinin İran'da hangi bölgede kullanımın daha fazla verim sağlayacağını tespit etmek amacıyla, farklı çevresel ve iklim şartları altında güç üretimi, ekserji verimi ve *EEA* performansı kriterlerini göz önünde bulundurarak İran'ın güneydoğu, kuzeybatı ve merkez lokasyonlarında kullanımının daha uygun olacağını ortaya koymaktadırlar. Aylık toplam parlaklık ortalaması ve parlaklık ekserjisi için elde edilen değerlerin sırasıyla 120-184 kWh/m²/ay ve 112-172 kW/m²/ay değerleri arasında olduğunu ifade eden yazarlar tesis için ortalama aylık güç üretimi, ekserji verimi ve *EEA* performans değerlerini sırasıyla 45.3-66 MWh/ay, %13.6 ile %14.8 ve %9.46 ile 10.5 değerleri arasında olduğunu göstermektedirler.

Chen vd. (2020) sadece dolaylı ve dolaysız enerji girdileri ve materyal girdilerini ele alan *CEROI* hesaplamalarını, yatırımdaki enerji getirisini ekserji ile ilişkilendirerek iş gücü girdileri, yardımcı hizmet girdileri ve çevresel girdileri de kapsayan *ExEROI* yöntemini Çin'deki bir petrol gazı üretimi enerji çevrim sistemine uygulamışlardır. Araştırmalarının sonucunda Sichuan Havzasındaki gaz kaynaklarının *ExEROI* değeri 9.68 olup, standart *EROI* değeri olan 82.95'ten oldukça düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Elde edilen E_xEROI değerinin geleneksel fosil kaynaklı yakıtların E_xEROI değeri olan 10'dan küçük olması sebebiyle ilgi ve enerji odağının başka bir kaynak arayışına yönltilmesi gerektiğini ifade etmektedirler

Amiri vd. (2020) 2017 ve 2018 yılları arasında İran Hhorremabad şehrinde bulunan ticari ve geleneksel kanola üretim sistemlerinin sürdürülebilir döngülerini anlamak için EEA analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarından geleneksel sisteme ait çevresel iyileştirme maliyetinin, ticari sisteme nazarında 2.69.10 MJha⁻¹ değerinden daha az olduğu ve buna bağlı olarak geleneksel sistemlerdeki ekolojik sürdürülebilirlik ticari sistemlerden 2 kat daha da büyük bir değer olduğunu tespit etmişlerdir. Bunun yanında geleneksel sistemdeki girdilerin yüksek ölçüde tüketilmesi ile artan kümülatif ekserji tüketimi ve buna bağlı olarak da geleneksel sistemin termodinamik indisinin azaldığını göstermektedirler. Diğer taraftan ticari sistemlerde ise gübre gibi kimyasalların yüksek miktarda tüketilmesi ile çevresel iyileştirme maliyetlerinin attığını ifade etmektedirler.

Ünal vd. (2021) suyun ekonomik gelişime, küresel sürdürülebilirliğine, dünya ve insan için katkılarına önemini vurgulayarak kuraklık ve su kirliliğine dikkat çekip, yeni tip ev ölçekli, solar enerjili, reverse osmosis teknolojisine sahip suyu tuzdan ayıran bir arıtma sistemi için enerji, performans ve sürdürülebilirlik hakkındaki değerlendirmeleri EEA analizi sunmuşlardır. Bunun için yaz dönemlerinde su ihtiyacı artan, deniz kenarında yüksek bir turizm potansiyeline sahip İzmir şehrini ele alarak elde ettikleri sonuçları ve tavsiyeleri şu şekilde açıklamaktadırlar.

- Yıllık Genişletilmiş ekserji değeri 27406.60 GJ, yıllık ekserji yıkımı 27376.726 GJ, yıllık ürün ekserjisi 389.706 GJ ve ekserji verimi 0.014'tür.
- Sistemin oldukça düşük bir ekserji verimine sahip olması yanında yüksek bir ekserji yıkım oranına sahip olması, temel enerji kaynağı yenilenebilir ve çevresel hasarı olmayan solar enerji olmasından kaynaklanmaktadır.
- Su üretimi yerine hidrojen ve bazı kimyasallar gibi yüksek özgül ekserji içeriğine sahip ürünler üretilir.
- Daha büyük sistemler küçüklere nazaran daha da verimli bir şekilde işlev yapabileceği için gelecek çalışmalar için uygun bir başlıktır.

Erzen vd. (2021) güneş panelleri hücrelerinden oluşan bir hibrit sistem, alkali elektrolizer ve PEM yakıt hücrelerinden oluşan solar güdümlü bir sistem için literatürde var olan bazı sürdürülebilirlik cinsleri aracılığıyla inceleyip, karşılaştırırken bazı yeni indisler ortaya koymuşlardır. Yeni indisleri tersinmezliklerin ısıl-ekolojik maliyetleri

(*TEC*), genişletilmiş *TEC*, E_{xE} 'ye dayalı sürdürülebilirlik endeksi ve E_{xE} ekolojik endeks olarak tanımlanmışlardır. Yazarlar bir yıl boyunca gerçekleştirdikleri günlük performans analizlerine göre ekserji verim değerlerinin 0.027 ile 0.121 değerleri arasında değişirken, E_{xE} verim değerlerinin ise 0.05 ile 0.14 değerleri arasında olduğunu literatüre ve sunulan indislerin çevresel döngülerinin tasarlanması, çalışma şartları altında çevresel etkilerin değerlendirilmesi ve de sürdürülebilirliğin her açıdan incelenmesi yönünden önem arz ettiğini ifade etmektedirler.

Açıkkalp vd. (2021) bir gaz türbin sistemini dikkate alarak ortaya koydukları yeni bir ekserji metodunu E_{xE} ileri ekserjiyi (Extended Advanced Exergy, *EAE*) tam olarak E_{xE} olmadığı gibi ileri ekserji (Advanced Exergy, *AE*) de olmadığını lakin amaca ulaşmak için kriterlerinin aynı olduğu bir metod yöntemi geliştirmişlerdir. *EAE* ile yapılan çalışmanın sonuçları E_{xE} ve *AE* analiz sonuçlarının farklı olduğunu ve bu farklılığın analizdeki bileşenler ve geliştirme potansiyelleri yerine çeşitli termodinamik analiz yöntemlerinin tüm materyaller, maliyetler, işgücü, enerji ve çevreye etkilerinin kapsayıcı bir bağı olmasından kaynaklandığını ifade etmektedirler. Buna rağmen yeni yöntemde bütün bu analiz yöntemlerinin basit bir metodoloji ile birleştirilerek mini bir gaz türbin motoru örneği üzerinden ekserji ve E_{xE} verimlerini sırasıyla %28 ve %30.1 olarak elde eden yazarlar bu sonuca göre işgücü, maliyet ve çevresel girdilerin etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedirler. Ayrıca dışsal ekserji yıkımı oranının (159 kW), *EAE* analizinde elde edilen yıkım oranından (384 kW) daha düşük olmasının sebebini, bileşenlerin türbin ile ilgili aralarındaki ilişkilerin arttığını ve maliyet, enerji, kütle akışlarının ve çevresel değerlerinin diğer bileşenler ile sıkı bağ kurduğundan uygun bir sonuç olduğunu açıklamaktadırlar. Son olarak türbin için kaçınılmaz dışsal ekserji yıkımının 374 kW değerinden 833 kW değerine yükselmesini E_{xE} 'ye dayalı performansın çoğunlukla yanma odası ile ilişkili olduğunu açıklamaktadırlar.

1.2.4. Tezin önemi ve amacı

Bu tezde bir uçak motoru için üretim aşamasından itibaren iş elde edilmesi sürecine kadar ki enerji, materyal, iş gücü, maliyet ve çevresel etkilerinin ekserjetik akışlarına indirgenip uygun koşul ve kabullerin altında bir gaz türbinli uçak motorunun ekserji, ekserjo-ekonomi analizinin yanında *EEA* analiz metodu gerçekleştirilmiş olup, iş üreten yüksek teknolojik gaz türbinli uçak motoru sistemlerinin enerji ve verimlilik analizlerine yeni bir boyut kazandırılmıştır. Çalışmada kullanılan *EEA* metodunun tüm parametreleri

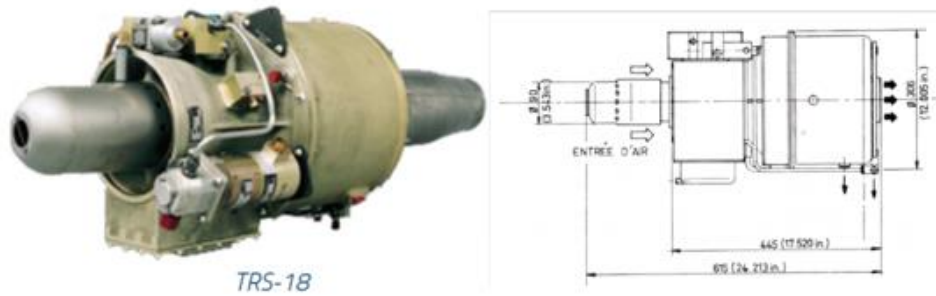
ile beraber bir gaz türbinli uçak motoru için daha önce uyarlanmış veya uygulanmış bir çalışma mevcut literatürde bulunmamaktadır. Bu tezde bir gaz türbinli motordan elde edilen itki ile yararlı işin, termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları yanında materyal girdisi, ekonomik, işgücü ve çevresel faktörlerin de değerlendirilmesiyle, sistemin çevre ile arasındaki ilişkisini muhtemel tüm boyutları ile beraber göz önüne sermektir. Literatürde materyal girdisi ve çevresel etkileri ile beraber incelenen ilk gaz türbinli motor örneği olması açısından önem arz etmektedir. Çalışmanın amacı, eylem yapıcı birimler için, jet motoru üretimi, çalışma faaliyeti ve çalışma şartları hakkında kaynak kullanım kalitesinin değerlendirilmesi, daha kararlı ve sürdürülebilir bir çizgide faaliyetlerine devam ettirmesi için verimli ve faydalı müdahale noktalarının bildirilmesidir.



2. ANALİZ

2.1. Sistem ve Kabuller

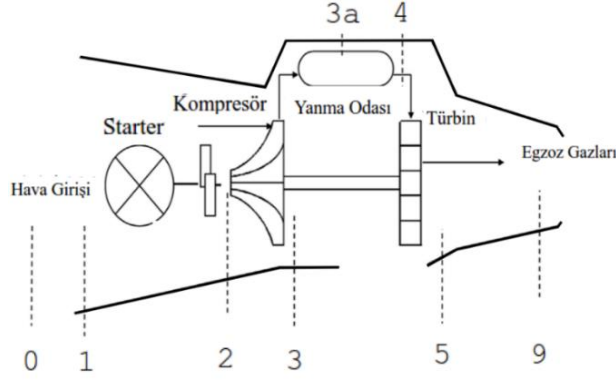
Bu tezde insansız hava araçları ve hafif uçaklarda kullanılabilecek şekilde Gasturb yazılımı aracılığıyla verileri elde edilen, 1.2 kN itki gücüne sahip teorik bir gaz türbinli motorun (GTM) analizi gerçekleştirilmiştir. Kıyas açısından verilen özelliğe haiz ve literatürde önemli çalışmaların gerçekleştirildiği en yakın jet motoru olarak Şekil 2.1.'de teknik detaylarına yer verilen TRS-18 jet motorunun simülasyon ile gerçeklik değerlerine yakınlığı, birim ağırlık başına ürettiği güç ve düşük maliyeti açısından önemli benzerlikler göstermektedir (<http-1>). TRS-18 jet motorunun ekserjetik performans analizi ile ilgili; Turan (2016), Aygun ve Turan (2021), Aygun vd., (2021), Aydın vd. (2018) yazarların yanında çevresel emisyonlar açısından ise; Jet A-1, JP8, sentetik yakıtların kullanılmasıyla CO, NO_x ve PM emisyonları ile ilgili olarak Davison ve Chishty (2011), Chishty vd., (2011), Chishty vd., (2017) ve Kroyan vd. (2022) gibi yazarlar tarafından birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ise kümülatif ve genişletilmiş ekserji metodu analizi yöntemleri adı geçen yazarların çalışmaları ışığında hem gasturb simülasyonundan hem de TRS-18 motoruna ait teknik verilerden yararlanılarak gerçekleştirilecektir.



Şekil 2.1. TRS-18 motoru ve teknik çizelge görseli (<http-1>)

TRS-18 gaz türbinli jet motoru havanın sıkıştırılması ile yanma odasına yakıt ile beraber yanma reaksiyonunun gerçekleşmesinin ardından, yanma sonu ürünlerinin güç ve itki üretmek amacıyla türbinden ekzoz alıklarına yönlendirildiği sistemin şeması ve bileşenleri Şekil 2.2. ile gösterilmiştir. Genişletilmiş ekserji analizinin gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan teorik verilerin yetersizliği sebebiyle teorik verilerin standartlarına önemli ölçüde benzerlik gösteren gerçek TRS-18 motoruna ait

teknik ve performans değerlerinden de yararlanarak (Tablo 2.1) analizin gerçekleştirilmesi ve gerçek değerlere daha yakın bir yaklaşımın sunulması amaçlanmıştır.



Şekil 2.2. TRS-18 jet motoru sisteminin şematik gösterimi (Aygün ve Turan, 2021)

Tablo 2.1. Teorik GTM'nin referans aldığı TRS-18 motoruna ait teknik ve performans değerleri (http-2).

TRS-18 motoru teknik ve performans özellikleri	
Çap	325 mm.
Yükseklik	350 mm
Uzunluk	650 mm
Kuru ağırlık	32,0 kg
Donanımlı ekipman ağırlığı	33,4 kg
Maksimum rejimdeki devir	45.000 rpm
Maksimum sürekli rejimdeki devir	44.000 dev/dak
Maksimum itki	1100 N
Maksimum devirdeki basınç oranı	3,8 / 1
Maksimum EGT	700 °C
Özgül yakıt tüketimi	1,20 kg/(daN.h)

GTM'ye ait termodinamik veriler GasTurb motor simülasyonu yazılımından elde edilmiş olup, uçuş simülasyonuna ait uçuş bilgileri, ortam şartları verileri ve motor bileşenlerine ait termodinamik veriler (Tablo 2.2-Tablo 2.5) ile sıralı şekilde devam eden tablolarda gösterilmektedir. Uçak bütün uçuşları aynı menzil içerisinde, aynı olan hava şartlarında ve aynı olan uçuş profillerinde gerçekleştirmektedir. Uçuş profili eşit zaman dilimlerini içerecek şekilde taksi, kalkış, tırmanma, düz uçuş -1, düz uçuş -2, düz uçuş -3, alçalma, yaklaşma ve iniş evreleri şeklinde 9 safhaya bölünmüştür. 30 dakikalık her uçuşun evreleri eşit sürelerle ayrılmış olup yıllık toplam uçuş süresi 250 saattir. Analizde yıllık uçuş süresi temelinde karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2.2. *GTM ve çevre şartlarına ait uçuş verileri*

Uçuş Evresi	Ortam Sıcaklığı (K)	Ortam Basıncı (kPa)	Net İtke (kN)	Yakıt debisi (kg/s)	İrtifa (km)
Taksi	287.15	101.32	1.14	0.04	0
Kalkış	288.10	101.32	1.10	0.04	0-6
Tırmanma	247.75	48.42	0.72	0.02	6-9
Düz uçuş-1	228.15	30.24	0.54	0.02	9
Düz uçuş-2	228.15	30.24	0.52	0.02	9
Düz uçuş-3	228.15	30.24	0.30	0.01	9
Alçalma	228.15	30.24	0.32	0.02	9-6
Yaklaşma	248.75	47.10	0.73	0.02	6-0
İniş	287.15	101.32	1.16	0.04	0

Tablo 2.3. *GTM için uçuş verileri*

Uçuş Evresi	V ₀ (m/s)	Uçuş Hızı (m/s)	Hava Debisi (kg/s)	Yanma sonu ürünleri debisi (kg/s)
Taksi	54.00	510.00	2.52	2.55
Kalkış	70.00	508.75	2.54	2.57
Tırmanma	175.46	545.85	1.56	1.58
Düz uçuş-1	186.65	552.25	1.11	1.13
Düz uçuş-2	170.55	554.42	1.08	1.10
Düz uçuş-3	170.55	475.20	0.97	0.98
Alçalma	186.65	472.74	1.01	1.02
Yaklaşma	192.23	545.58	1.61	1.63
İniş	48.15	510.18	2.50	2.54

Tablo 2.4. *GTM bileşenlerine sıcaklık verileri*

Uçuş Evresi	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
Taksi	290.48	425.42	1010.86	874.65
Kalkış	291.25	428.68	1002.60	866.45
Tırmanma	265.12	405.84	1040.65	901.56
Düz uçuş-1	248.24	392.45	1070.65	930.05
Düz uçuş-2	246.12	389.45	1074.45	934.45
Düz uçuş-3	246.12	354.45	798.21	680.45
Alçalma	248.68	355.65	784.12	671.05
Yaklaşma	270.25	409.89	1044.24	899.58
İniş	290.12	425.20	1012.54	882.85

Tablo 1.5. *GTM bileşenlerine ait basınç verileri*

Uçuş Evresi	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
Taksi	102.16	329.12	319.45	180.45
Kalkış	103.48	330.85	322.23	181.25
Tırmanma	58.40	206.45	201.54	112.45
Düz uçuş-1	40.21	152.45	148.45	82.64
Düz uçuş-2	37.66	148.78	144.12	80.45
Düz uçuş-3	38.85	114.85	110.85	62.01
Alçalma	41.54	118.21	113.12	63.89
Yaklaşma	61.45	213.45	206.45	114.75
İniş	101.88	328.88	318.89	180.05

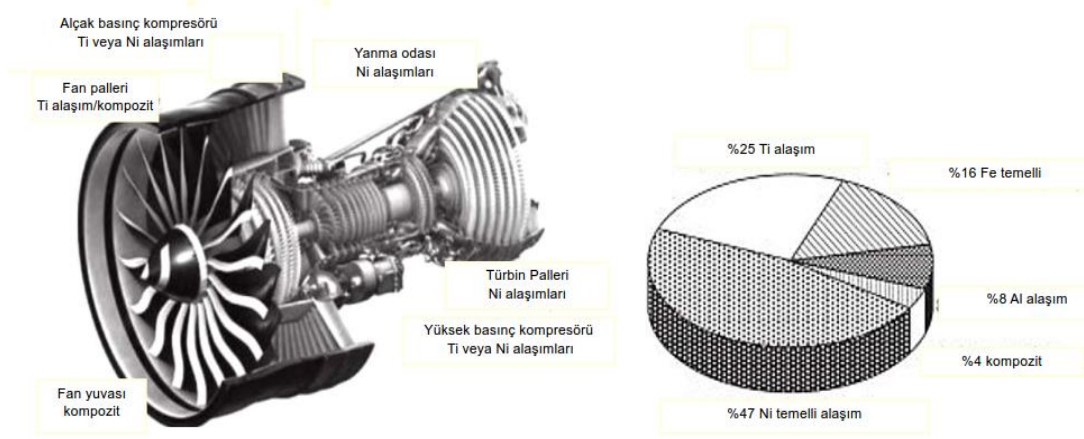
Aşağıda bu analizde kullanılan kabuller listelenmiştir:

- Motor içindeki akışın ideal gaz olduğu kabul edilmiştir.
- GTM’de iş akışkanı olarak kimyasal formülü $C_{12}H_{23}$ olan ve alt ısı değeri 42,800kJ/kg olan Jet-A1 yakıtı kullanılmıştır.
- Motor içerisindeki akışkan, yanma odasına kadar hava, yanma odasından sonra yanma sonu ürünleri olarak kabul edilmiştir.
- Motor içerisinde egzoz lüleleri haricindeki bileşenlerde akışa ait kinetik ve potansiyel ekserjiler ihmal edilmiştir.
- Sistem elemanları adyabatiktir.
- Yanma olayı tam yanma olup, hava içerisinde bulunan nem yani su buharı ihmal edilmiştir.
- GTM’nin gerçekleştirdiği uçuşlar yıllık toplamda 250 saat olup, her uçuşun aynı menzile, aynı şartlar ve birbirine benzer şartlardaki uçuş profilinde gerçekleştiği varsayılmıştır.

2.1.1. Kütle ve materyal tayini

EEA analiz metodunda materyal girdilerinin akış ekserji karşılıklarının belirlenmesi ve değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu sebeple ilgili sistem olan bir gaz türbinin materyallerine ait ekserji akışlarının değerlendirilebilmesi için hem genel hem de bileşen yapısı temelinde gaz türbinli motora ait materyal içeriklerinin neler olduğu ve bu materyallerin bileşenlere göre ne kütleli düzeyde ne oranda dağılım gösterdiği belirlenmelidir.

Akademik düzeyde gaz türbinli uçak motorunun her bileşeni ve her bileşenine ait olan parçaların elde edilmesi mümkün değildir. Bu sebeple mevcut literatürde yer alan ve ele aldığımız sistem olan gaz türbinli uçak motorlarına ait bir örnek veri incelediğimizde; yakıt maliyeti, uçuş emniyeti ve ağırlık gibi faktörlerin etkisi göz önüne alınarak uçak motorlarındaki materyallerin tasarımında daha ileri teknoloji kullanan Boeing 787 uçağına ait Genx motorunun kütleli olarak %47 nikel temelli alaşımlar, %25 titanyum alaşımlar, %16 demir temelli alaşımlar, %8 alüminyum alaşımlar ve %4 oranında ise kompozitlerden oluştuğu Şekil 2.3.’te görülmektedir.

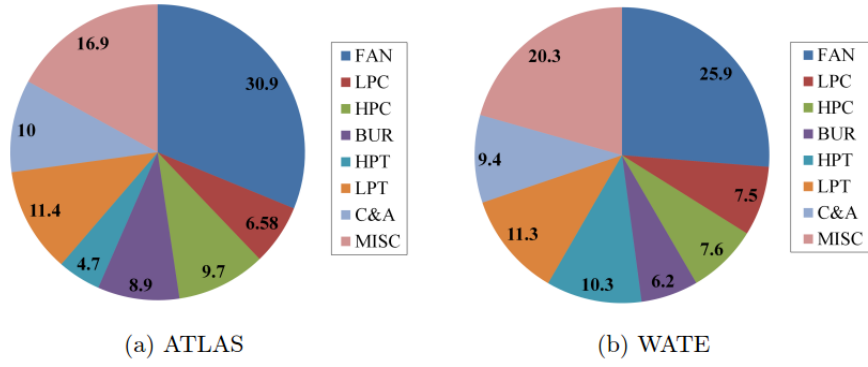


Şekil 2.3. Boeing 787 GENx motoru kesiti ve Boeing 787 General Electric CF6 motorunun materyal dağılımı (Okura, 2015)

Literatürde bir gaz türbinli uçak motoru ve bileşenlerine ait materyallerin bileşen temelli kütleli içeriğini tam olarak sunan bir çalışma olmadığından, ilgili verinin temin edilmesi bu alanda yapılan çalışmaların kısıtlı bileşenler veya materyal içerikleri ile deneysel çalışmalardan ya da ağırlık tahminlerine dayalı teorik çalışmalardan elde edilen programlar aracılığı ile temin edilebilmektedir.

İlgili araştırma konusunun sistem açısından çeşitliliği dikkate alındığında teorik hesaplamaların daha isabetli sonuçlar doğuracağı açıktır. Bu sebep ile gaz türbinli uçak motorunun bileşenleri arasındaki ilişkiden kaynaklı fiziksel kuvvetleri ve motorun çalışma şartları materyal içeriklerinin belirlenmesinde en önemli belirleyici faktörlerdir. Ayrıca havacılıkta kullanılan materyallerin çalışma şartları dikkate alındığında materyal seçiminin de kolaylaştırıcı bir etkisi bulunmaktadır. Ek olarak bir uçak motoruna ait bileşenlerin materyal içeriğine ait malzemelerin içeriği kullanılarak bir uçak motoruna ait temel bileşenlerin ortalama kütlesi ve kimyasal içerik oranı bu tezde gerçekleştirilmiş olacaktır.

Lolis (2014), uçak motoru bileşenlerinin motor içindeki kütleli oranlarının tahmini değerlendirilmesinde yönelik olarak gerçekleştirdiği çalışmasında tahmini değerlerinin gerçek değerlere ne kadar yakın olduğunu göstermek için referans olarak CFM56-7B27 ve Trent 892 motorları bileşenlerinin kütleli oranlarını ATLAS ve WATE yaklaşım metotları ile elde ettiği tahmini değerler ile kıyasladığında sırasıyla (Şekil-2.4.), %-4.97 ve %-5 hata payı ile gerçek değerlere yakınlık göstermiştir



Şekil 2.4. CFM56-7B27 ve Trent 892 motorları bileşenlerinin kütle oranları Lolis (2014)

Lolis'in elde etmiş olduğu yaklaşımın hafif ölçekteki motorlar için de geçerli bir yaklaşım olduğunu öne sürmesi sebebiyle GTM için donanım materyalleri ile beraber fan, kontrol aksesuarları ve diğer kalan aksesuarlar için verilerdeki ortalama oranların kullanılmasıyla elde edilen kütle tayini değerleri kompresör için 7.13 kg, yanma odası için 3.8 kg, türbin için 8.08 ve aksesuar, kaplamalar ile diğer parçalar için ise 14.46 kg olarak hafif uçak motoru için uçuşu sırasında elde edilen tahmini kütle değeri toplamda 33.46 kg olarak belirlenmiştir. Herhangi bir gaz türbinli uçak motoru bileşenlerinin kimyasal içerikleri hakkındaki veriler literatürde sınırlı sayıdaki komponentler, component bileşenleri ve parçaları için mevcut olması sebebiyle GTM'nin kütleli bileşiminin belirlenmesinde yapılan kabuller şu şekildedir.

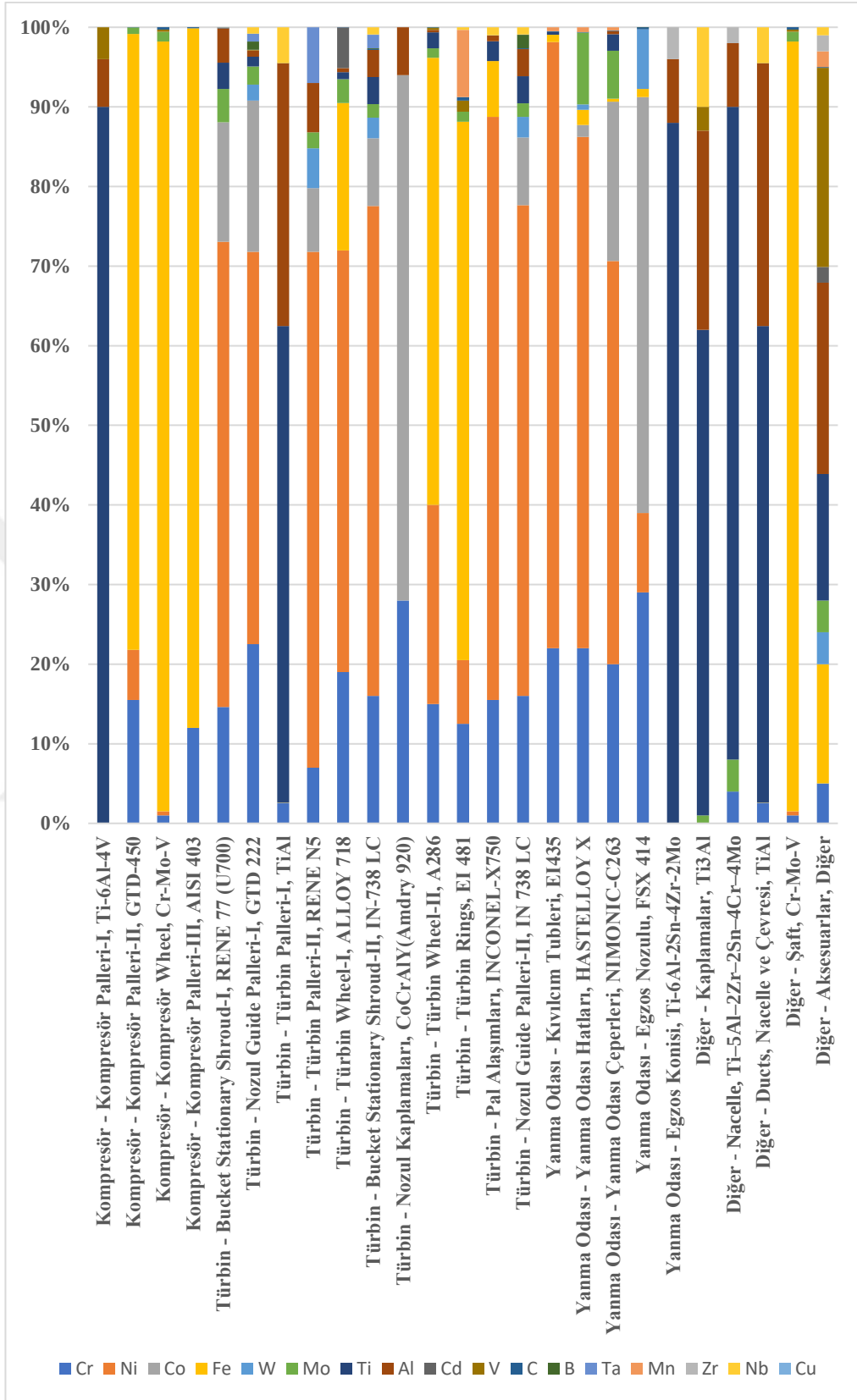
EEA analiz metodunda GTM'nin kütle tayininde kullanılan kabuller şu şekildedirler;

- Gaz türbinli motorların çalışma şartları dikkate alındığında bir temel bileşene ait olan diğer bileşenlerin materyal içerikleri verilen temel bileşene ait içerik ile benzer olarak seçilmiştir.
- Seçimi gerçekleştirilen bir materyalin bölgesel yoğunluğu bulunduğu temel veya alt bileşende eşit dağılımlı olarak kabul edilmiştir.
- Gaz türbinli motor bileşenlerine ait materyal içerikleri temelde, bileşenin maruz kaldığı gerilme, sıcaklık, basınç, titreşim vb. Fiziksel özellikler için tasarlanan materyaller arasından tercih edilmiştir.
- Gaz türbinli motoru bileşenleri için aynı bölge veya parçada kullanılmak üzere üretilen farklı veya alternatif alaşımlar arasından sadece biri tercih edilmiş olup,

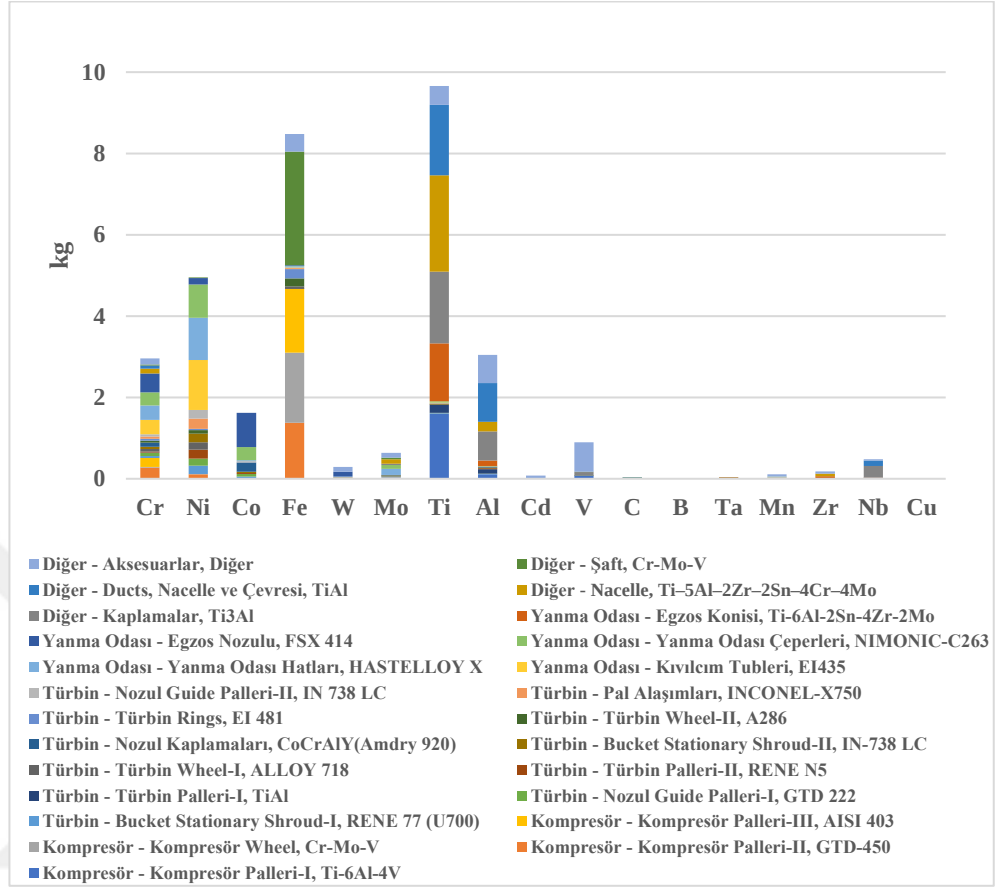
aynı bileşene ait diğer her bölge veya parçalar için de içerikleri birbirine yakın olmak suretiyle mevcut literatürden seçim gerçekleştirilmiştir.

- Her bileşene ait bölgesel bileşenlerin bilinmeyen çok sayıdaki diğer parçaları için en yakın noktadaki bilinen bileşene ait özellikler kullanılmıştır.
- Motora ait bileşenlerin kütesel değerleri literatürde bahsedilen mevcut sınırlar arasında olacak şekilde rastgele seçilmiştir.

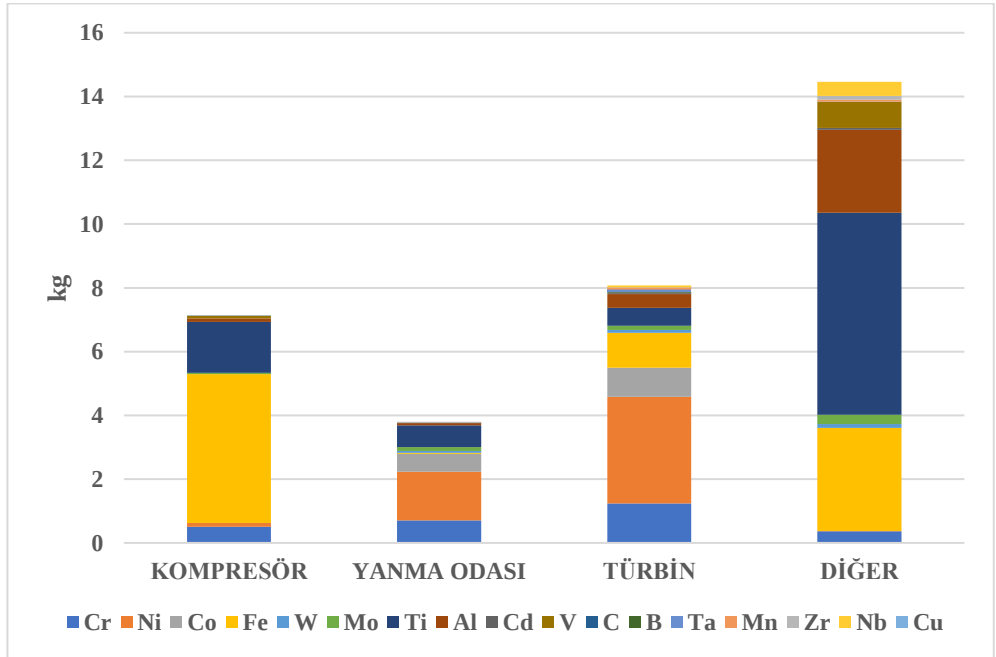
Materyal içeriklerinin hem bileşen temelinde hem de bileşenlerin parçaları açısından tercihinde karar alma süreci hakkında kümülatif ekserji tüketimi başlığı altında literatürden elde edilen materyal verileri ile beraber detaylı bir şekilde değerlendirilecektir. Literatürde uçak motoru bileşenlerinde kullanılan materyallerin bulunduğu veriler ile beraber yukarıda elde edilen bileşen bazlı kütesel verilerin kullanılmasıyla GTM'nin kütesel dağılımında kullanılan materyaller için bir tahmin modeli yürütülmüştür. Motora ait bileşenlerdeki materyallerin kimyasal içeriklerinin kütesel dağılımı ve verileri yukarıda bahsi geçen kabuller ışığında elde edilen tahmini kütesel veriler ve kimyasal içerikleri Şekil 2.5, Şekil 2.6. ve Şekil 2.7 görülmektedir. Titanyum metalinin yoğunlukla kullanıldığı GTM'nin en yüksek kütleye sahip olan bileşenin şaft, donanım aksesuarları, bağlantı elemanları ve kaplamaların dahil edildiği DİĞER olarak adlandırılan bileşendir. Kütesel tutarsızlık gibi görünen Şekil 2.6 için aynı alaşım türlerinin uçak motoruna ait farklı bileşenlerinde de kullanıldığı ve tutarsızlığın bu sebep ile kaynaklandığına dikkat edilmelidir.



Şekil 2.5. GTM bileşenlerinde kullanılan alaşımların kimyasal içeriklerinin birim kütledeki oranı (Sjöberg 2008, Viswanathan vd., 2003, Schilke vd., 1991, Mouritz 2012, Viswanathan vd., 2003, Muktinutalapati 2011, Čerňan vd., 2016, Okura 2015)



Şekil 2.6. GTM bileşenlerindeki materyallerin kimyasal içerikleri ve kütleli dağılım oranı



Şekil 2.7. GTM materyallerinin bileşenlere göre dağılım oranı

2.2. Enerji Analizi

Enerjinin yoktan var olamayacağını, var olan enerjinin ise yok olamayacağını belirten termodinamiğin birinci yasasıdır. Termodinamik açıdan; “sisteme giren ve çıkan enerjiler arasındaki fark sistemdeki enerji değişimine eşittir.”

Sürekli akışlı kabul şartlarında bir termodinamik sistem için sistem sınırlı içerisindeki birim zamandaki kütle değişimi;

$$\dot{m}_g - \dot{m}_\zeta = \Delta \dot{m}_{sis} = 0 \quad (2.1)$$

Sürekli akışlı sistemler için enerji dengesi ise;

$$\dot{E}_g - \dot{E}_\zeta = \Delta \dot{E}_{sis} = 0 \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \sum (h + ke + pe)_g \dot{m}_g - \sum (h + ke + pe)_\zeta \dot{m}_\zeta + \sum \dot{Q}_g - \sum \dot{Q}_\zeta + \\ \sum \dot{W}_g - \sum \dot{W}_\zeta = 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Denklem

(2.3)’te kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edildiğinde;

$$\begin{aligned} \dot{E}_g - \dot{E}_\zeta = \sum (h)_g \dot{m}_g - \sum (h)_\zeta \dot{m}_\zeta + \sum \dot{Q}_g + \sum \dot{W}_g - \sum \dot{Q}_\zeta - \\ \sum \dot{W}_\zeta = 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

2.3. Ekserji Analizi

Termodinamiğin birinci yasası enerjinin niceliğiyle ilgili olup enerjinin var veya yok edilemeyeceğini vurgular. Termodinamik bir özellik olan enerji bir etkileşim esnasında şekil veya form değiştirerek diğer başka bir şekle veya forma dönüşebilir, ancak toplam enerji miktarı değişmez. Birinci yasa, bir hal değişimi esnasında enerji dengesini sağlamak için bir yöntem ortaya koyar. Enerji sistem sınırlarından ısı veya iş olarak geçiş yapabilir. Enerji geçişi, sistemle çevresi arasında bir sıcaklık farkı sebebiyle gerçekleşiyorsa ısı geçişi olarak, şayet sıcaklık farkı olmuyor ise iş olarak tanımlanır.

Termodinamiğin ikinci yasası ise, hal değişimlerinin hangi yönde gerçekleşebileceklerini, enerjinin niceliği yanında niteliğini yanında gerçek prosesler için enerji kalitesinin azalma eğiliminde olduğunu gösterir. Bir sisteme giriş yapan toplam enerjinin bir kısmı; sistemde yanma reaksiyonu, sürtünme, entropi oluşumu vb. tersinmezliklerden dolayı yok olurken giren enerjinin iş yapabilme kabiliyeti diğer bir deyiş ile niteliği ise azalır. Bu sebeple, literatürde termodinamiğin ikinci yasası için

kullanılabilir enerji, kullanılabilirlik, yararlı enerji veya ekserji analizi ismi verilmiştir (Çengel ve Boles, 1996). Termodinamiğin 2. Yasası ısı makinalarını tarif eden Kelvin-Planck ile soğutucular ve ısı pompalarını tarif eden Clausius ifadeleri olarak iki ayrı tanım ile esasında birbirine denk olan ifadelerdir.

2.3.1. Kelvin-planck ifadesi

Kelvin-Planck ifadesi ısı makineleri ile ilişkilidir ve bir ısı makinesine yüksek sıcaklıktaki bir ısı deposundan aktarılan ısının tamamen işe dönüşmeyeceğini, dolayısıyla giren ısının bir miktarının çevreye atık ısı olarak verilmesi gerektiğini ifade eder. Bu ifade ile; “tek bir ısı kaynağıyla etkileşimde olup net iş üreten bir ısı makinesi yapmak mümkün değildir” (Çengel ve Boles, 2008) sonucuna ulaşılır.

2.3.2. Clausius ifadesi

Clausius ifadesi soğutucular ve ısı pompaları ile ilişkin olarak doğal halde iken, ısının her zaman sıcak olan kaynaktan soğuk olan kaynağa aktarıldığını belirterek, doğal olmaması durumunda yani bu çevrimin tersinin gerçekleşmesi durumunda çevrime dışarıdan iş verilmesi gerektiğini söyler. Clausius ifadesi “çevre ile enerji etkileşimi olmaksızın soğuk kaynaktan sıcak kaynağa ısı aktaran bir çevrim yapmak olanaksızdır” olarak ifade edilir (Çengel ve Boles, 2008).

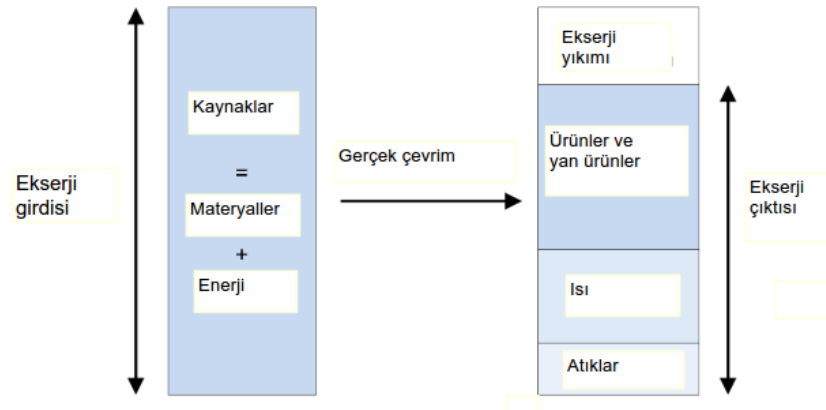
Ekserji; kütle, ısı ve iş geçişleri sırasında, bir sisteme verilebilecek minimum ya da sistemden alınabilecek maksimum miktarda kullanışlı enerji miktarını temsil etmekte olup, ekserji yıkımı ise entropi üretimiyle orantılıdır. Termodinamiğin ikinci yasasına bağlı olarak ekserji her zaman yıkılır. Yıkılan ekserji ya da üretilen entropi, bir sistem için öngörülen teorik verim miktarından daha düşük verim değerine sahip olmasına sebep olur. Ekserji hesapları ile, bir sistemin ekserji dağılımı belirlenir. Böylelikle bileşenlerin ve mekanizmaların hangisinde ekserji yıkımının daha fazla olduğu tespit edilerek sistemlerin ve proseslerin geliştirme potansiyelleri ortaya çıkarılır (Bejan, 2002).

Belirli iki durum arasında gerçekleşen hal değişiminde en fazla iş eldesi tersinir hal değişimiyle mümkündür. Bu nedenle sistemde mevcut olan iş potansiyelini belirlemek için ekserji analizi ile tersinmezlikler göz önüne alınır. Bir hal değişimi sırasında en fazla iş eldesi için sistemin ölü halde olması gereklidir. Ölü haldeki bir sistem çevresi ile aynı sıcaklık ve basınç değerine sahip olup, çevresi ile kimyasal bir etkileşime girebilecek bir

kinetik, potansiyel enerjisine ve dengelenmemiş manyetik, elektrik, yüzeysel gerilme etkilerine sahip değildir (Cengel & Boles, 2006).

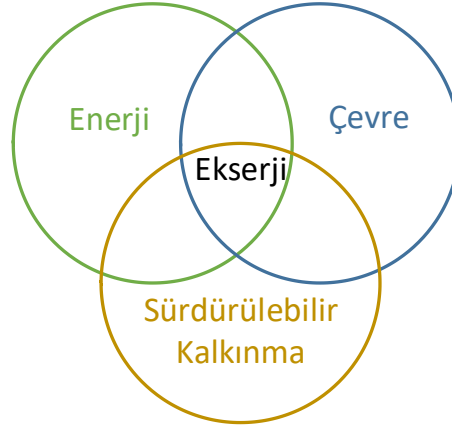
Ekserji analizinin önemi Şekil 2.8'den anlaşılacağı üzere şu şekilde sıralanabilir (Dincer, 2002):

- Enerji kaynaklarının tüketilmesiyle ortaya çıkan çevresel etkilerin saptanmasında önemli bir araçtır.
- Termodinamiğin ikinci yasasıyla beraber kütle ve enerjinin korunumu prensiplerini kullanarak enerji sistemlerinin tasarımı ve analizi için kullanılan etkin bir yöntemdir.
- Bir sistemdeki atık ve kayıpların yerleri, tipleri ve boyutları hakkındaki bilgi vererek daha yüksek verimde kaynak tüketimi kullanımını destekleyen uygun bir tekniktir.
- Mevcut sistemlerdeki verimsizlikleri belirleyerek, sistem iyileştirmelerinin nasıl gerçekleştirileceğini gösteren etkin bir tekniktir.
- Sürdürülebilir gelişme açısından yol göstericidir.
- Enerji politikalarının oluşturulmasında kullanılabilecek önemli bir araçtır.

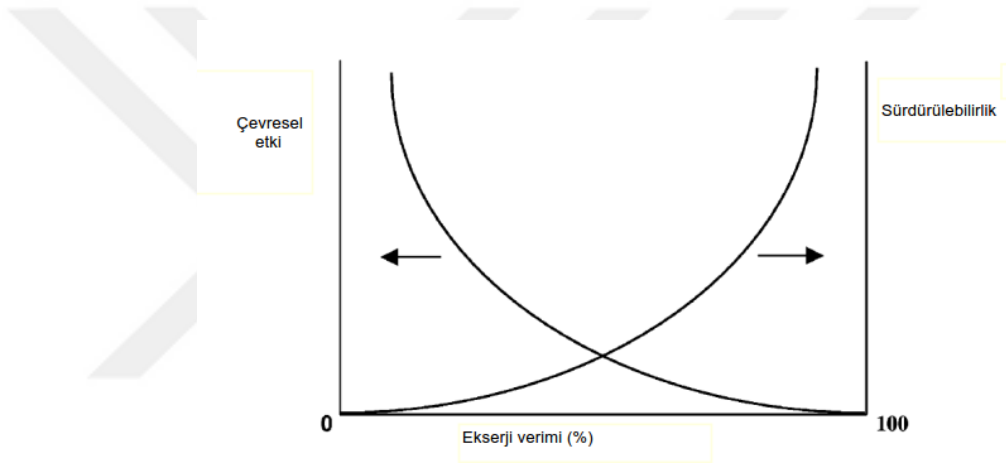


Şekil 2.8. Gerçek proseslerde ekserji yıkımı (Dewulf vd., 2008)

Yukarıda bahsedilenler çerçevesinde ekserjinin çevre, enerji ve sürdürülebilirlik arasında disiplinler arası bir ilişkilerinin olduğu bir tanım olduğu Şekil 2.9 ve Şekil 2.10' da görülmektedir.



Şekil 2.9. Ekserjinin disiplinler arası ilişkisi (Bejan, 2002; I. Dincer, 2002)



Şekil 2.10. Bir prosesin ekserji verimi, sürdürülebilirlik ve çevresel etkileri arasındaki ilişki niteliğinin grafiği (Rosen ve Dincer 2001).)

Sürekli akışlı açık bir sistem için, sisteme giren ısı ve sistemden çıkan ısı pozitif olarak tanımlanır ise, genel ekserji denklemi Denklem (2.5) şeklinde gösterilebilir (Cengel & Boles, 2006).

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum_{\text{giren}} \dot{m} \psi - \sum_{\text{çıkan}} \dot{m} \psi - \dot{E}_{x_D} = 0 \quad (2.5)$$

$$e_{x_{Akış}} = \psi = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (2.6)$$

$$\psi = C_p \left(T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right) + RT_0 \ln \frac{T}{T_0} \quad (2.7)$$

Sistem içerisinde kimyasal reaksiyon oluşumu gerçekleşmesi durumunda, tepkimede yer alan kimyasal türlerin molar derişimlerinde meydana gelecek olan değışimler göz önüne alınarak, kimyasal ve fiziksel ekserji,

$$\dot{E}x = \dot{E}x_{KM} + \dot{E}x_{FZ} \quad (2.8)$$

$$\dot{E}x_{FZ} = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (2.9)$$

Gaz karışımı için entalpi:

$$h_m = \sum_{k=1}^i x_k h_k \quad (2.10)$$

$$\bar{h}_m = \sum_{k=1}^i y_k \bar{h}_k \quad (2.11)$$

Belirli bir sıcaklık ve basınçtaki entropi ise (2.12) ile bulunabilir (Bejan et al., 1996).

$$\bar{s}_k(T_k, P_k) = \bar{s}^0(T_k) - \bar{R} \ln \frac{x_k P_k}{P_{ref}} \quad (2.12)$$

$$\bar{s}^0 = \int_0^T \frac{\bar{C}_p dT}{T} \quad (2.13)$$

Karışımın entropisi ise;

$$s = \sum_{k=1}^i x_k s \quad (2.14)$$

$$s_m = \sum_{k=1}^i y_k s_k \quad (2.15)$$

Gaz karışımının kimyasal ekserjisi, standart molar kimyasal ekserji ($\bar{e}^{ch}$) ve her bir gazın mol kesri (y_k) bilindiğinde Denklem (2.16)'deki gibi hesaplanabilir (Bejan et al., 1996).

$$\dot{E}x_{KM,k} = \dot{n} \left(\sum y_k \bar{e}^{ch} + \bar{R} T_0 \sum y_k \ln y_k \right) \quad (2.16)$$

Yakıtın kimyasal ekserjisi (Bejan et al., 1996);

$$\dot{E}x_{KM,y} = \dot{n}(\sum y_k \bar{e}^{ch}) \quad (2.17)$$

$$\dot{E}x_{KM,y} = \dot{m}(\sum \frac{x \bar{e}^{ch}}{MW}) \quad (2.18)$$

Bu durumda sistem sınırları içerisinde ekserji dengesi:

$$\dot{E}x_g - \dot{E}x_\zeta - \dot{E}x_D = 0 \quad (2.19)$$

Çevreye atılarak kullanılamayan ekserji ise ekserji kaybı olarak değerlendirilebilir (Midilli & Dincer, 2009).

$$\dot{E}x_{kayıp} = \sum_{çıkan}(\dot{E}x_{KM} + \dot{E}x_{FZ}) \quad (2.20)$$

Bir sistemin ekserjiye bağlı termodinamik performansını değerlendirmek için ek parametreler kullanılabilir. Ekserji verimi aşağıdaki gibi tanımlanabilir (İ. Dincer, 2007);

$$\varepsilon = 1 - \frac{\dot{E}x_{kayıp} + \dot{E}x_D}{\dot{E}x_g} \quad (2.21)$$

Veya;

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}x_\zeta}{\dot{E}x_g} \quad (2.22)$$

Ekserji verimi tanımı ile çıkan ekserjinin ürün ya da sistemden istenen fayda, yarar olduğu belirtilmelidir (Hepbasli, 2008). Van Gool (1997) ekserjetik geliştirme potansiyelinin termodinamik prosesleri değerlendirmek için önemli bir araç olduğunu belirtmiştir.

$$IP = (1 - \varepsilon)(\dot{E}x_g - \dot{E}x_\zeta) \quad (2.23)$$

Ekserji yıkımı da önemli bir performans kriterlerinden bir tanesidir. Ekserji yıkımı bir sistem için yakıt ve ürün ekserjisi biçiminden ifade edilebilir.

$$\dot{E}x_D = \dot{E}x_F - \dot{E}x_P \quad (2.24)$$

Ekserji yıkım oranı, sistemin herhangi bir bileşenindeki ekserji yıkımının, sistemdeki toplam ekserji yıkımına oranı olarak tanımlanmaktadır (Aydin et al., 2015; Tsatsaronis, 2007).

$$X_k = \frac{\dot{E}x_{D,k}}{\sum \dot{E}x_{D,k}} \quad (2.25)$$

Yakıt ekserjisi tüketim oranı, herhangi bir bileşendeki ekserji yıkımının, toplam yakıt ekserjisine oranı olarak ifade edilir (Aydin et al., 2015; Tsatsaronis, 2007).

$$\delta_k = \frac{\dot{E}x_{D,k}}{\sum \dot{E}x_{F,k}} \quad (2.26)$$

Yakıt ekserjisi tüketim oranına benzer şekilde, ürün ekserjisi kaybı, ekserji yıkımı dolayısıyla ne kadar ürün ekserjisi kaybı meydana geldiğini göstermektedir (Aydin et al., 2015; Tsatsaronis, 2007).

$$\xi_k = \frac{\dot{E}x_{D,k}}{\sum \dot{E}x_{P,k}} \quad (2.27)$$

Atık ekserji oranı, sistem sınırlarından çıkan atık ya da kayıp ekserjinin, toplam ekserji girişine oranı olarak tanımlanmaktadır (Aydin et al., 2015; Tsatsaronis, 2007). Bir gaz türbin motorunda, egzozdan çıkan gazların tekrar kullanılmamak üzere çevreye atıldığı noktadaki ekserji, atık ekserji olarak değerlendirilebilir.

$$r_{we} = \frac{\text{toplam atık ekserji}}{\text{toplam ekserji girişi}} \quad (2.28)$$

Ekserji yıkım faktörü, toplam ekserji yıkımının, toplam ekserji girişine oranını göstermektedir (Aydin vd., 2015).

$$f_D = \frac{\sum \dot{E}x_{D,k}}{\sum \dot{E}x_{F,k}} \quad (2.29)$$

Ekserji analizi esaslı çevresel etki faktörü, sistemin sürdürülebilirliğini incelemek için önemli bir faktördür (Aydin et al., 2015; Midilli & Dincer, 2009). Ekserji yıkımlarının ve atık ekserjinin, sistemin sahip olduğu ekserji verimiyle birlikte çevresel boyutta değerlendirilmesini sağlamaktadır.

$$r_{eef} = \frac{r_{we}}{\varepsilon} \quad (2.30)$$

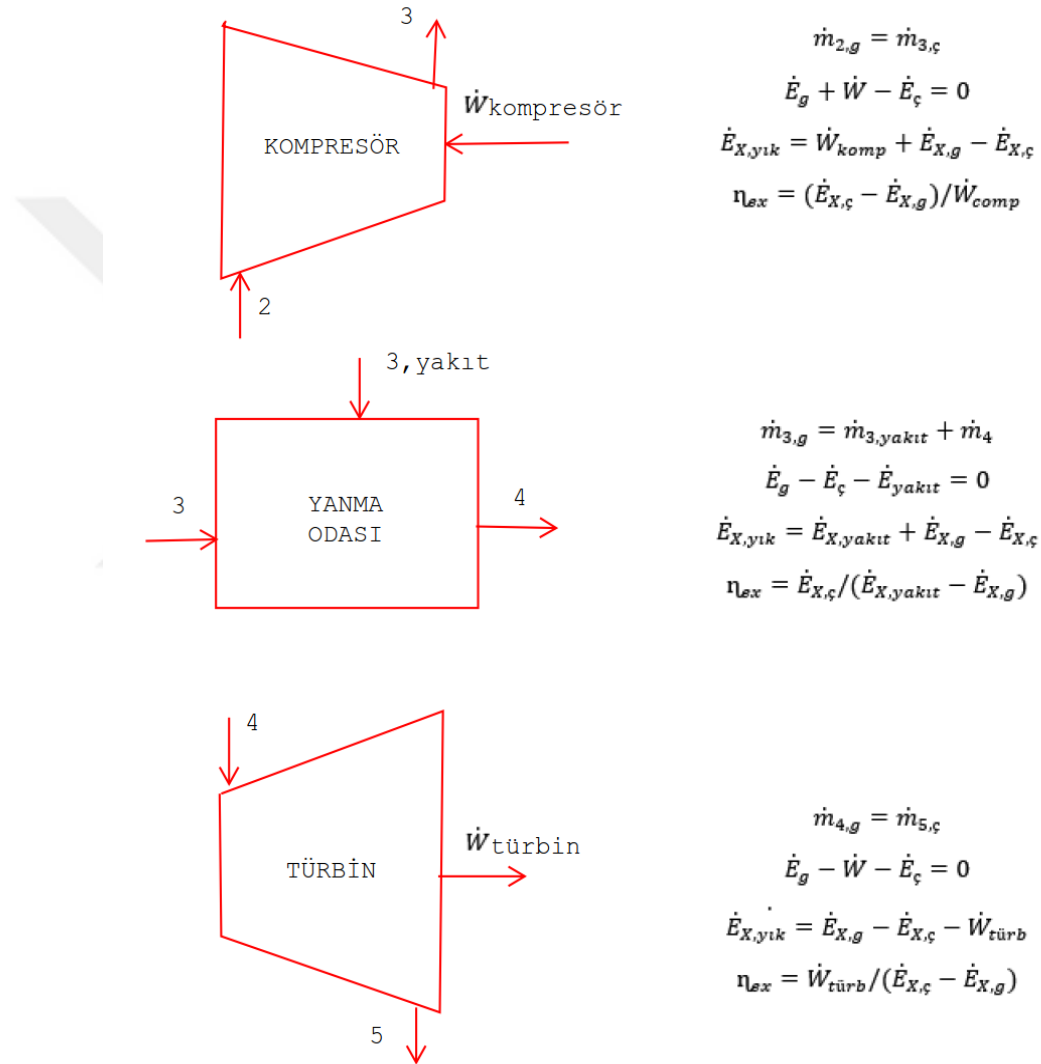
Ekserjetik sürdürülebilirlik endeksi ise (Aydin et al., 2015; Midilli & Dincer, 2009);

$$\theta_{esi} = \frac{1}{r_{eef}} \quad (2.31)$$

şeklindedir.

2.3.3. Hesaplamalar

Hava kompresörü, yanma odası ve türbinden bileşenlerinden oluşan GTM'nin ekserji analizi gerçekleştirilmeden önce motor bileşenlerine ait kütle, enerji ve ekserji dengesi denklemleri Şekil 2.11'de gösterilmektedir.

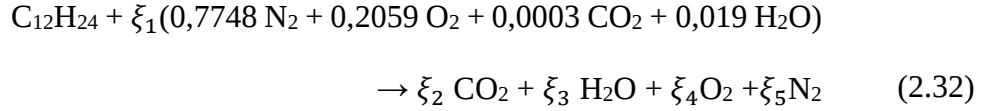


Şekil 2.11. GTM bileşenlerine ait kütle, enerji ve ekserji parametreleri

Motorda iş akışkanı olan hava itki üretmek için yanma odasında yakıt ile yanma reaksiyonuna girmeden önce sıkıştırılmak üzere kompresör kademelerinden geçer. Bu proses sırasında havanın sıkıştırılması için gereken enerji ($\dot{W}_{komp}$) türbinden elde edilir.

Sıkıştırılan hava, yanma odasında yakıt ile beraber yanma reaksiyonu sonucunda yanma sonu gazlarını oluşturup türbinde genişterek itki için gerekli olan temel iş enerjisini ($\dot{W}_{türb}$) meydana getirirler.

Yanma reaksiyonu sırasında yakıt için yanma denklemi;



şeklindedir. Havaya ait girdi mol oranları Bejan (1996) kaynağı ile değerlendirilmiştir.

Yakıt ekserjisi oranı ise, $\varepsilon_{yakıt}$ kullanılan yakıtının özgül ekserjisi olmak üzere:

$$E_{X,yakıt} = \dot{m}_{yakıt} \varepsilon_{yakıt} \quad (2.33)$$

şeklindedir. $C_xH_yO_zS_\sigma$ içeriklerine haiz bir yakıt için birim kütledeki özgül kimyasal ekserjisinin ifadesi;

$$\begin{aligned} \varepsilon_{kimyasal,yakıt} = Y_{yakıt} \cong & 1.0401 + 0.01728 \frac{y}{x} + 0.0432 \frac{z}{x} \\ & + 0.2196 \frac{\sigma}{x} (1 - 2.0628 \frac{y}{x}) \end{aligned} \quad (2.34)$$

şeklindedir (Hepbaşlı, 2008, Dinçer, 2014). $Y_{yakıt}$ değeri düşük ısı değeri 42,800 kJ/kg olan $C_{12}H_{24}$ için 1.06789 olarak elde edilmiştir.

Hava ve yanma sonu gazlarına ait sabit basınçtaki özgül ısı denklemleri ise sırasıyla (Ballı,2008):

$$\begin{aligned} C_{P,gaz}(T) = & 0,935301 + \frac{0,010577}{10^2} T + \frac{0,017218}{10^5} T^2 \\ & - \frac{0,072386}{10^9} T^3 \end{aligned} \quad (2.35)$$

$$\begin{aligned} C_{P,hava}(T) = & 1,04841 - 0,000383719 T^2 + \frac{9,45378}{10^2} T^2 \\ & - \frac{5,49031}{10^{10}} T^3 + \frac{7,92981}{10^{14}} T^4 \end{aligned} \quad (2.36)$$

olarak ifade edilir.

GTM'nin gerçekleştirdiği uçuş boyunca uçuş evrelerini de kapsayacak şekilde elde edilen sonuçlar Tablo 2.6'da görülmektedir.

Tablo 2.6. GTM için elde edilen ekserji parametreleri

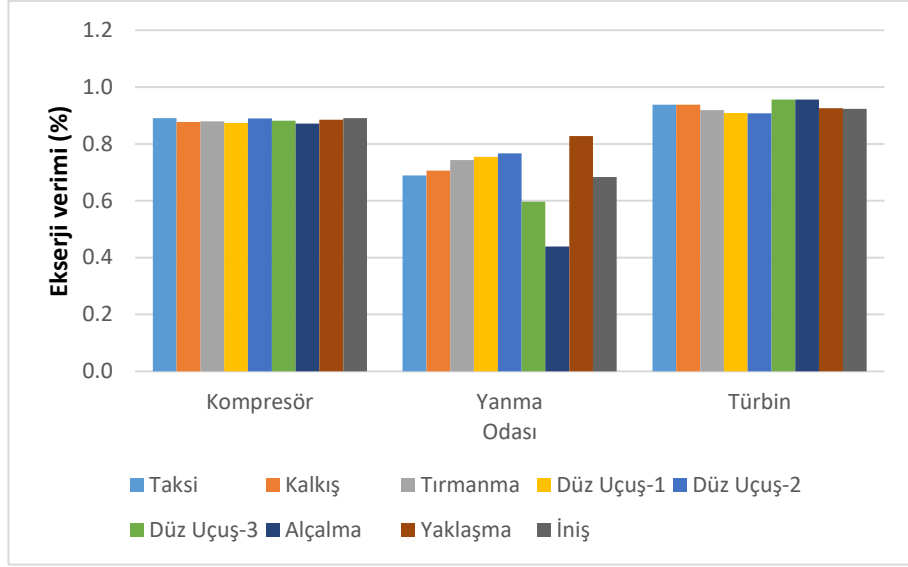
Uçuş evreleri	Toplam yakıt ekserjisi	Yararlı ekserji	Ekserji kaybı	Ekserji yıkımı	Ekserji verimi	Ekserjetik geliştirme potansiyeli	Atık ekserji oranı	Ekserji yıkım faktörü	Çevresel etki faktörü	Ekserjetik sürdürülebilirlik endeksi
	$E_{x,yakıt}$	$\dot{E}x_{yararlı}$	$\dot{E}x_{kayıp}$	$\dot{E}x_D$	ε	IP	r_{we}	f_D	r_{eff}	θ_{esi}
Taksi	1.67	0.06	0.93	0.68	0.04	1.55	0.56	0.41	15.02	0.07
Kalkış	1.60	0.08	0.89	0.63	0.05	1.45	0.56	0.40	11.55	0.09
Tırmanma	1.13	0.13	0.61	0.40	0.11	0.89	0.54	0.35	4.84	0.21
Düz uçuş-1	0.89	0.10	0.49	0.30	0.11	0.70	0.55	0.33	4.89	0.20
Düz uçuş-2	0.86	0.09	0.50	0.27	0.10	0.69	0.58	0.32	5.62	0.18
Düz uçuş-3	0.57	0.05	0.23	0.29	0.09	0.48	0.40	0.51	4.53	0.22
Alçalma	0.82	0.06	0.22	0.55	0.07	0.71	0.26	0.66	3.66	0.27
Yaklaşma	1.03	0.14	0.62	0.27	0.14	0.77	0.60	0.26	4.44	0.23
İniş	1.68	0.06	0.93	0.70	0.03	1.57	0.55	0.42	16.57	0.06

2.3.4. Sonuçların karşılaştırılması

Ekserji analizi sonucunda ekserji verimi, ekserji yıkım oranı, yakıt ekserjisi tüketim oranı, ürün ekserjisi kaybı, ekserjetik iyileştirme potansiyeli, atık ekserji oranı, ekserji yıkım faktörü, çevresel etki faktörü ve ekserjetik sürdürülebilirlik endeksi değerleri elde edilmiştir.

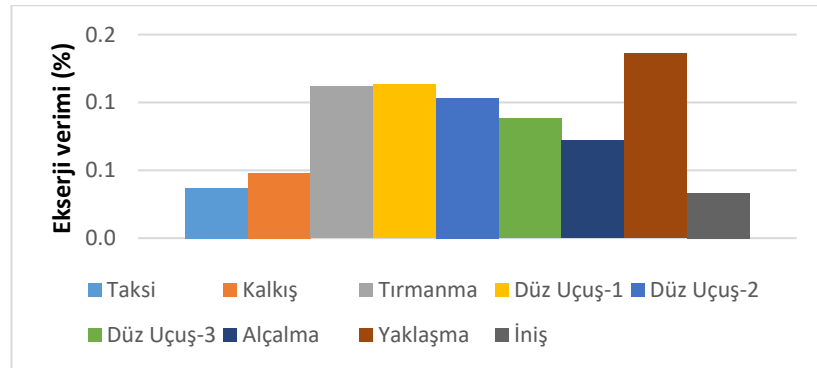
2.3.4.1. Ekserji verimi

Kompresör, yanma odası ve türbinden oluşan GTM bileşenlerinin uçuş seyrine göre ekserji verimleri değişimi Şekil 2.12.'de görülmektedir. Kompresör ve türbin bileşenlerinin ekserji verimi uçuş boyunca sırasıyla, %87 ila %89 ve %90 ila %95.6 oranlarında bir ekserji verim değerine sahip olduğu görülmüştür. Bunun yanında yanma odası tarafında ekserji verimi değerleri uçuş boyunca %44 ile %82,5 oranları arasında değişim göstermektedir. Yanma odası ekserji verimi oranlarının düşük olması, yakıtın yanma olayı sırasında kimyasal enerjisinin tersinmez bir şekilde ısı enerjisine dönüşmesiyle beraber yüksek oranda ekserji akımı kayıplarının gerçekleştiğini göstermektedir. Uçuş seyri açısından kompresör ve türbin bileşenlerinde ekserji veriminde önemli bir değişim gerçekleşmez iken, yanma odasının düz uçuş-3 ve alçalma evresinde ekserji verimi oranı %60'tan %44 oranına düştüğü ve yaklaşma evresinde ise %83 oranına keskin bir şekilde yükseldiği görülmektedir.



Şekil 2.12. GTM bileşenlerinin uçuş seyrine göre ekserji verimleri değişimi

Diğer taraftan genel olarak GTM'nin uçuş evrelerine göre sağlamış olduğu yararlı iş olan itkinin değerlendirilmesi bakımından ekserji verimi oranı değişimi Şekil 2.13. üzerinde görüldüğü üzere minimum ekserji verimi değeri iniş evresinde %3 oranında iken, maksimum ekserji verimi değeri ise %13,6 oranında yaklaşma evresinde gerçekleşmektedir. Bu durum uçuş aracının ağırlığı, havanın kaldırma kuvveti ile itki kuvvetinin bileşke kuvvetler dengesinden kaynaklı olduğunun açık göstergesidir.

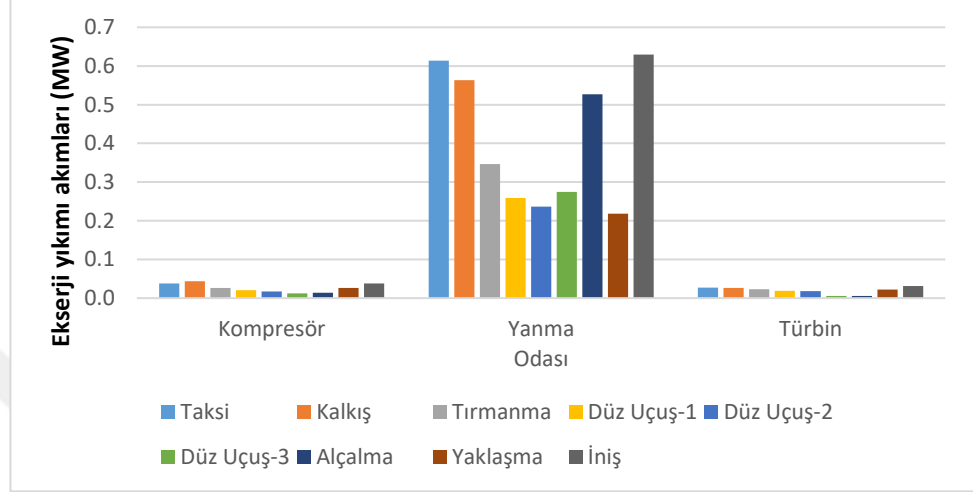


Şekil 2.13. GTM'nin uçuş seyrine göre ekserji verimleri değişimi

2.3.4.2. Ekserji yıkım oranı

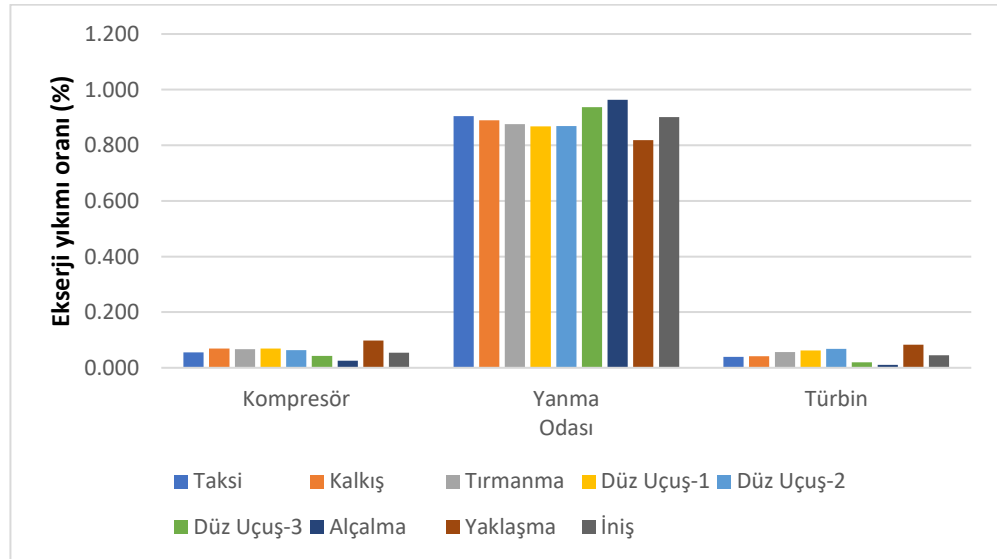
Sistemdeki tüm bileşenler içerisindeki ekserji yıkımlarının konumu ve büyüklüğü bakımından meydana gelen ekserji yıkımlarının bileşenlere göre dağılım oranlarının belirlenmesi, sorumlu kaynağın belirlenmesi önem arz etmektedir. GTM uçuşu boyunca

uçuş evrelerindeki ekserji yıkımı akımları 0.27 MW ile 0.70 MW değerleri arasında değişim göstermektedir. Şekil 2.14'te ise GTM sistemine ait bileşenlerin ekserji yıkımı akımlarının değişimlerinin türbin için 0.068 MW 0.032 MW, kompresör için 0.012 MW ile 0.038 MW ve yanma odası için ise 0.22 MW ile 0.63 MW değerleri arasındadır.



Şekil 2.14. GTM bileşenlerinin uçuş evrelerine göre ekserji yıkımı akım değerleri

Bileşenlerin ekserji yıkımı oranlarının Şekil 2.15'te görüldüğü üzere, en yüksek değere sahip bileşen olan yanma odasının %82 ile %96,5 arasındaki ekserji yıkım oranına sahip olduğu görülmektedir.

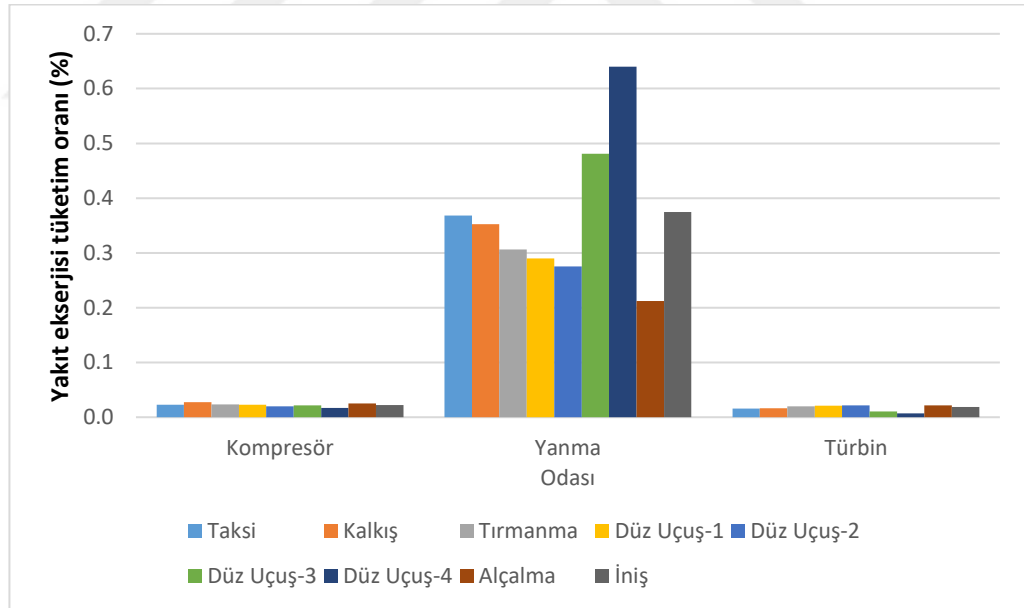


Şekil 2.15. GTM bileşenlerinin uçuş evrelerine göre ekserji yıkımı oranı değerleri

Diğer bir deyiş ile yanma olayı sırasında kullanılmayan ekserji miktarının boyutunu ifade etmektedir. Yanma odası iniş safhasında en yüksek ekserji yıkımı akımına sahip iken, taksi ve alçalma evresi ise uçuş boyunca gerçekleşen en yüksek ekserji yıkım oranına sahip olduğunu ve bu aşamada yanma odasında sırasıyla 0.61 MW ve 0.63 MW değerinde ekserji yıkımına sebep olduğu belirlenmiştir. Çıkarımı yapılabilecek diğer bir önemli nokta ise yanma odası için yaklaşma evresinde ekserji yıkım oranı keskin düşüş gösterirken, kompresör ve türbin bileşenlerinde ise keskin artış gözlemlendiğidir.

2.3.4.3. Yakıt ekserjisi tüketim oranı

GTM'nin yakıt ekserjisi tüketim oranları veya başka bir deyiş ile verimlilik kaybı dağılımı Şekil 2.16'da görülmektedir. Yakıt ekserjisi tüketim oranının en fazla olduğu yanma odası bileşeni için alçalma uçuş evresinde %64 ile en yüksek ve yaklaşma evresinde %21 ile en düşük seviyede gerçekleşmektedir. Yanma odasını, % 2,7 ile kalkış evresindeki kompresör bileşeni takip etmektedir.

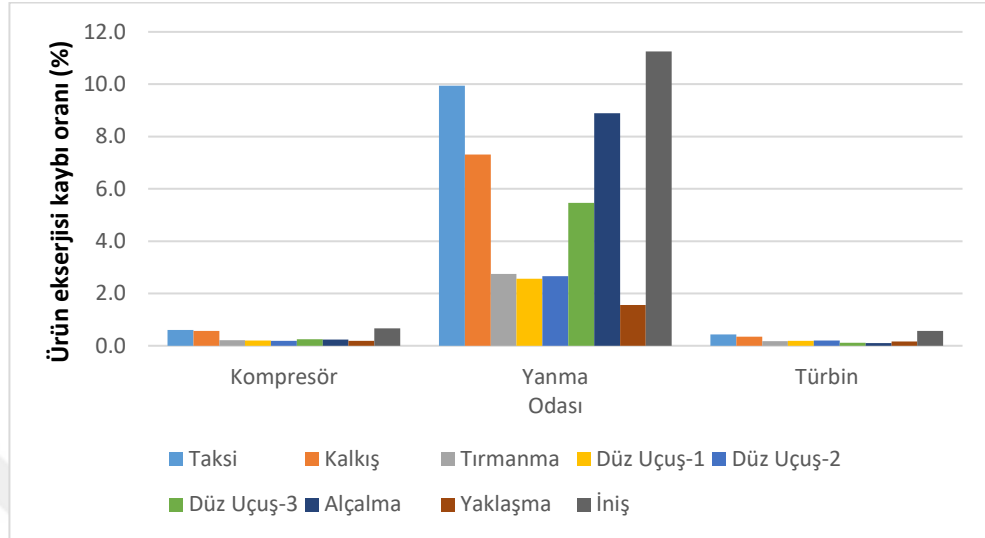


Şekil 2.16. GTM bileşenlerinin uçuş seyrine göre yakıt ekserjisi tüketim oranları dağılımı

2.3.4.4. Ürün ekserjisi kaybı

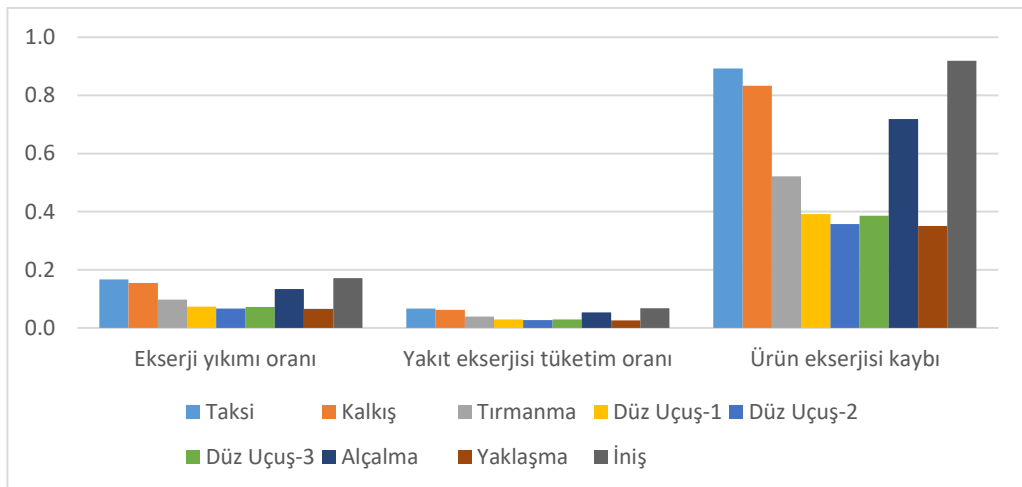
Toplam ürün miktarına göre ekserji yıkımı oranını ifade eden ürün ekserjisi kaybı oranının Şekil 2.17.'de görüldüğü üzere motorun yanma odasında 1.5 ile 11.25 kat arası oranlarda sırasıyla yaklaşma ve iniş evrelerinde gerçekleşirken, kompresör ve türbin için

ise sırasıyla %18 ile %68 arasında yaklaşma ve iniş evrelerinde ve %10 ile %56 oranında alçalma ve iniş evrelerinde gerçekleşmektedir.



Şekil 2.17. GTM bileşenlerinin uçuş evrelerine göre yakıt ürün ekserjisi kaybı oranlarının dağılımı

Ekserji yıkımı, yakıt ekserjisi tüketimi ve ürün ekserjisi kaybı oranlarının GTM'nin sistem içerisindeki bileşenlerine göre ifade edilmesinin yanında uçuş evrelerine göre de bir karşılaştırma Şekil 2.18.'de gerçekleştirilmiştir. Adı geçen parametreler birbirleri ile paralel artış ve azalış göstermelerinin yanında uçuşun taksi aşamasından düz uçuş-3 aşamasına kadar düşüş gösterirler iken, maksimum orana haiz oldukları iniş evresine varmadan önce yaklaşma aşamasında da bir kez daha yükseliş kaydetmişlerdir.

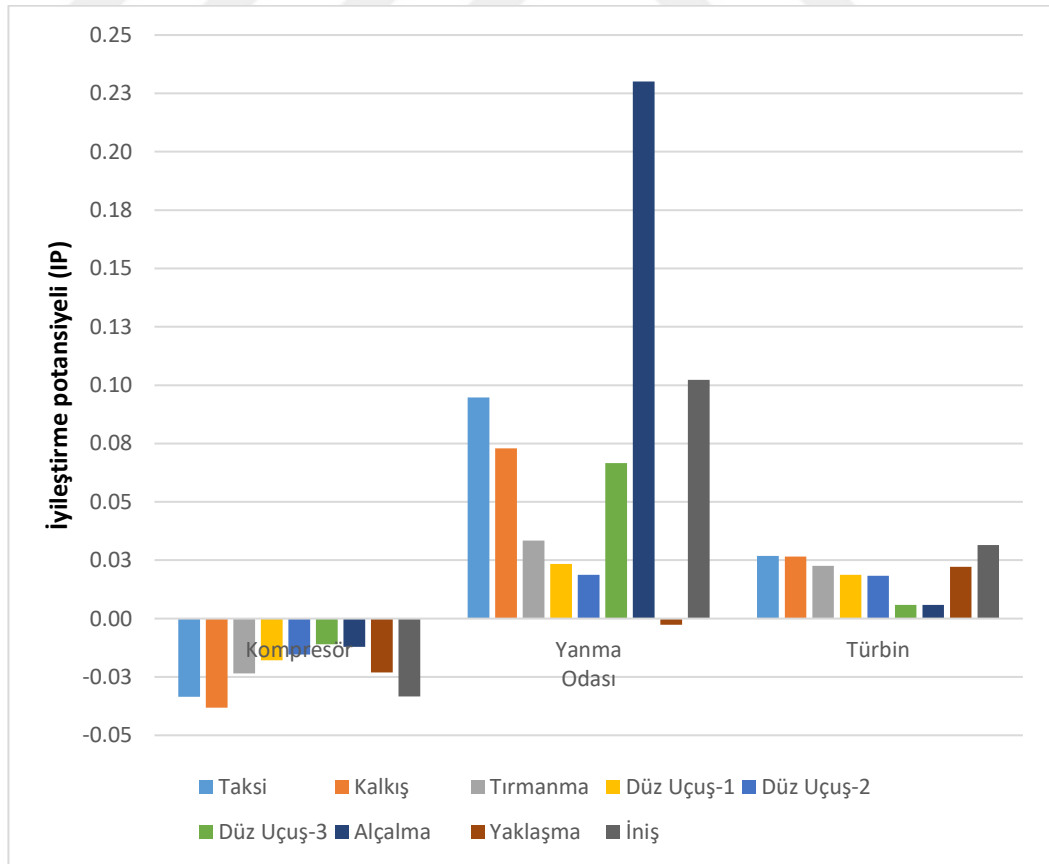


Şekil 2.18. Uçuş evrelerine göre ekserji yıkımı oranı, yakıt ekserjisi tüketim oranı ve ürün ekserjisi kaybı oranının değişimi

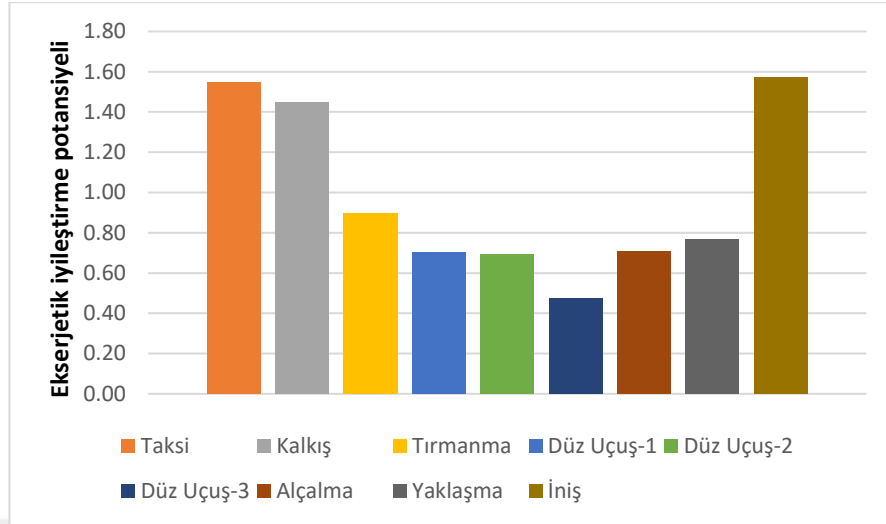
2.3.4.5. Ekserjetik iyileştirme potansiyeli

Ekserjetik iyileştirme potansiyeline sahip olan bileşenler sırasıyla yanma odası ve türbin olup, ekserjetik iyileştirme potansiyeli minimum ve maksimum değerlerinin ise yanma odası için Düz uçuş-2 ve alçalma evresindeki 0.02 MW ve 0.23 MW değerleri iken türbin için ise düz uçuş-3 ve iniş evresi olmak üzere 0.006 MW ve 0.032 MW değerleri arasında olduğu Şekil 2.19. ile gösterilmektedir. Grafikteki kompresör verilerinin negatif bölgede olması, kompresör bileşeninin yakıt olarak türbin tarafından sağlanan enerjiyi kullanması sebebiyle kompresörün ekserjetik iyileştirme potansiyelinin tamamen türbinin ekserjetik iyileştirme potansiyeline bağlı olmasından kaynaklanmaktadır.

Aerodinamik etkiler, ağırlık ve itki kuvvetleri dengesinden kaynaklı olarak GTM'nin uçuşuna ait minimum ve maksimum ekserjetik iyileştirme potansiyeli Şekil 2.20.'de görüldüğü üzere, 0.48 ile düz uçuş-3 evresinde ve 1.55 ile 1.57 değerleri ile taksi ve iniş evrelerinde gerçekleşmiştir.



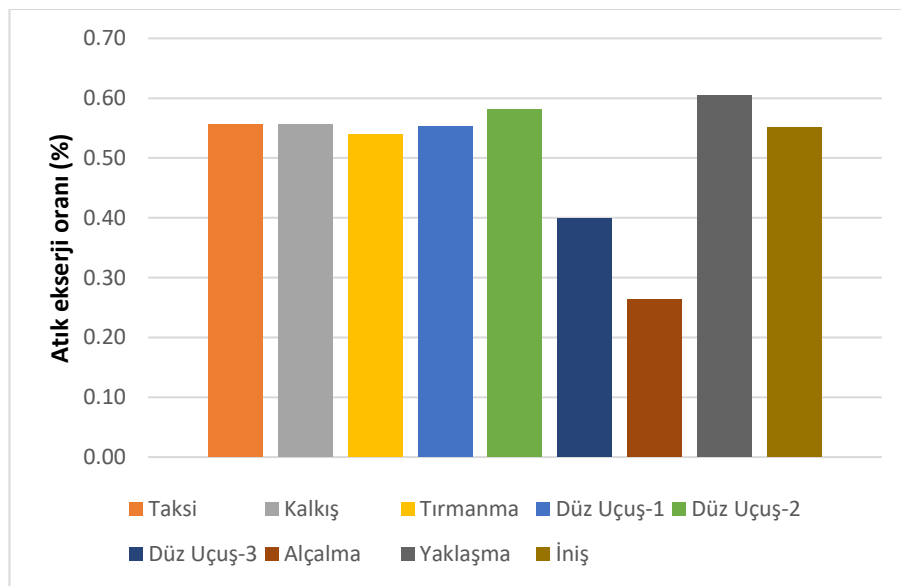
Şekil 2.19. GTM bileşenlerinin ekserjetik iyileştirme potansiyeli



Şekil 2.20. Uçuş boyunca gerçekleşen ekserjetik iyileştirme potansiyeli

2.3.4.6. Atık ekserji oranı

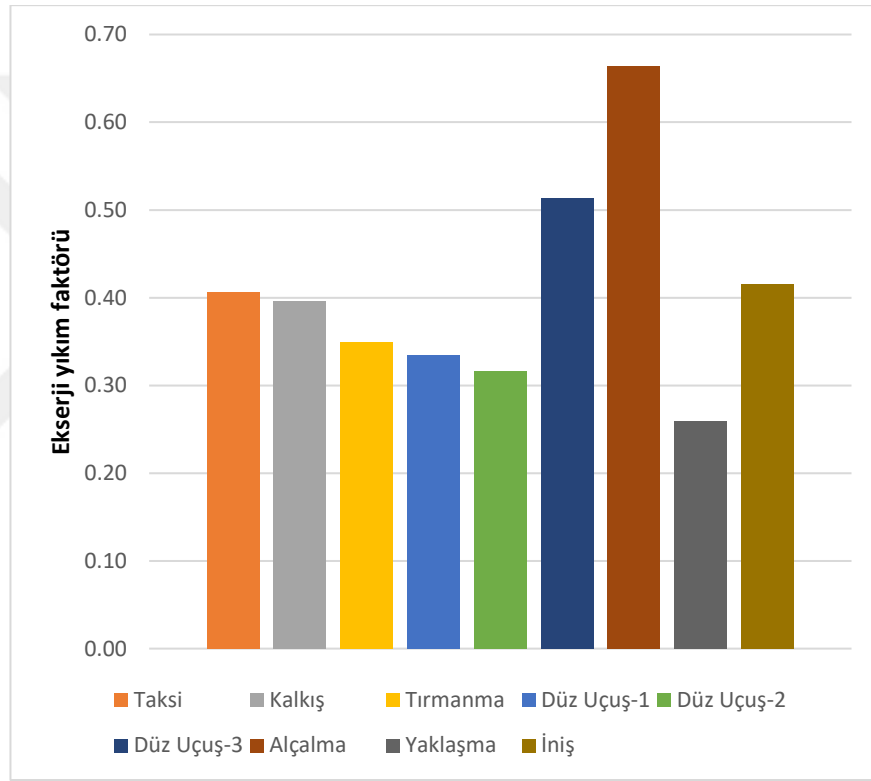
GTM'nin egzoz gazları ile sistem sınırlarından kullanılmamak üzere ayrıldığı nokta olan kayıp ekserjinin, toplam ekserji girişine oranı olan atık ekserji oranının uçuş boyunca değişimi Şekil 2.21'de görüldüğü üzere taksi aşamasından düz uçuş-2 aşaması sürecinde %56 seviyelerinde nazaran yatay seyirde olmasına rağmen düz uçuş-3 ve alçalma aşamalarında sırasıyla %40 ve %26 oranlarındaki bir düşüş sonunda yaklaşma ve iniş aşamaları boyunca sırasıyla %60 ve %55 seviyelerine geldiği görülmektedir.



Şekil 2.21. GTM'nin uçuş evreleri boyunca atık ekserji oranı değişimi

2.3.4.7. Ekserji yıkım faktörü

GTM'nin uçuşu boyunca meydana gelen toplam ekserji yıkımının, toplam ekserji girişine oranını ifade eden ekserji yıkım faktörünün uçuş evrelerine göre değişimi Şekil 2.22'de görüldüğü üzere; taksi evresindeki değeri 0.41 olup Düz uçuş-2 evresine kadar 0.32 değerine kadar kademeli bir şekilde düşüş gösterdikten sonra düz uçuş-3 ve alçalma boyunca sırasıyla, 0.52 ve 0.66 seviyelerinde yükseliş kaydederken yaklaşma evresi ile beraber 0.26 oranı ve sonrasında tekrar iniş evresinde 0.42 oranına yükselmiştir.

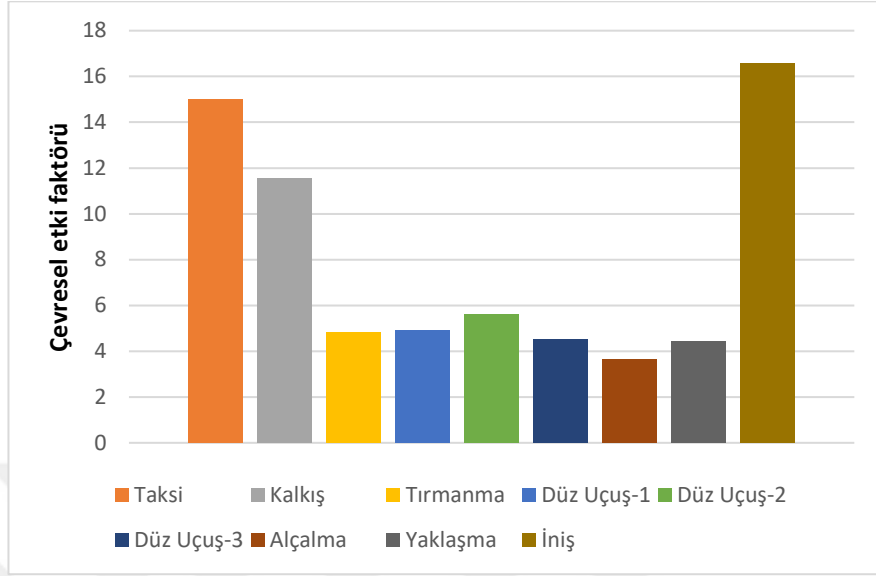


Şekil 2.22. GTM'nin uçuş boyunca ekserji yıkım faktörü dağılımı

2.3.4.8. Çevresel etki faktörü

GTM sisteminin ekserji verimi ile birlikte ekserji yıkımlarının ve atık ekserjisinin, çevresel boyutta değerlendirilmesini sağlayan çevresel etki faktörü Şekil 2.23'te görüldüğü üzere. Yüksek performans ve yakıt tüketimi gereksinim şartlarından uzaklaştıkça veya diğer bir deyiş ile uçuşun taksi evresinden yaklaşma evresi boyunca çevresel etki faktörünün 15 oranından 4.44 oranına kadar düşüş gösterdiği ve iniş

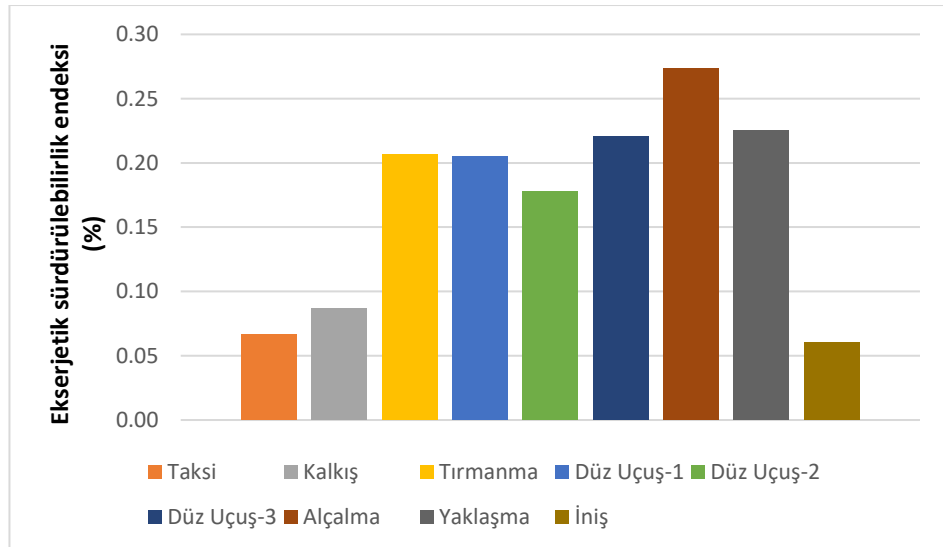
evresinde ise bir önceki evre değerinden yaklaşık 4 kat artış göstererek 16.44 oranına evirilmiştir.



Şekil 2.23. GTM'nin uçuş boyunca çevresel etki faktörü dağılımı

2.3.4.9. Ekserjetik sürdürülebilirlik endeksi

GTM'yi eniyileyen çalışma şartlarının belirlenmesinde önemli bir gösterge olan ekserjetik sürdürülebilirlik endeksi için Şekil 2.24'te görüldüğü üzere en yüksek değeri %27 ile alçalma aşamasında kaydederken en düşük değeri ise iniş aşamasında %6 oranındadır. Motor performansı üzerindeki yük ile ters orantılı olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 2.24. GTM'nin uçuş boyunca ekserjetik sürdürülebilirlik endeksi dağılımı

2.3.5. Ekserji analizi değerlendirmesi

GTM ve bileşenlerinin uçuş evreleri de göz önüne alınarak gerçekleştirilen ekserji analizi sonucunda bileşenlere ve sisteme ait ekserji yıkımı akımları, ekserji verimi değerleri ile beraberinde diğer ekserjetik analiz parametreleri de hesaplanmıştır. Kompresör ve türbin bileşenleri için tüm uçuş evreleri boyunca ekserji verimlerinin birbirine yakın ve yüksek değerde elde edilmesinin yanında, yanma odası bileşeni için yanma tepkimesindeki tersinmezliklerden dolayı ekserji yok oluşunun yüksek değerlerde olması sebebiyle, nazaran daha düşük bir değerde olup Düz uçuş-2 evresinden alçalma evresine kadar doğrusal oranda keskin düşüşler görölmüşür. Uçuş boyunca GTM sisteminin ekserjetik verimi ise taksiden tırmanma evresine kadar artış gösterip, tırmanma evresinden alçalma evresine kadar kademeli düşüşlerden sonra en yüksek verim değeri olan %13,6 değerine yaklaşma evresinde ulaştıktan sonra yine en düşük verim değeri olan %3,3 değerine iniş evresinde ulaşılabilmışür, Verilen durumda ekserjetik sürdürülebilirlik endeksi ise 0.06 ile 0.27 değerleri arasında değişmektedir. Daha verimli uçuşlar için düz uçuş aşamalarının süresini artırmak, ekserji maliyetini düşürebilir.

2.4. Ekserjo-ekonomik Analiz

2.4.1. Ekonomik analize giriş

Bir sistemin ürün oluşum sürecini ve bu süreç sonunda ortaya çıkan ürün hacmini belirleyen en önemli faktörlerden biri maliyetlerdir. Maliyet, bir ürünün elde edilmesi veya üretilmesi için gerçekleşen kaynak harcamalarıdır. Maliyetler; sabit ve değişken maliyetler olmak üzere iki kısımda incelenebilirler. Sabit maliyetler, bir sistemin (tesis, araç) ilk yatırım ve kurulumu için gerçekleştirilen harcamalar ile vergiler, sigortalar, amortisman bedeli (depreciation) vb. diğer bakım maliyetleri şeklindedir. Sabit maliyetlerin ürün üretim miktarı üzerinde önemli bir etkisi bulunmamaktadır. İkinci maliyet türü olan değişken maliyetler ise yakıt, çalışan ücretleri, kaynaklar, hammadde, enerji ve eskalasyon şeklindedir. Değişken maliyetlerin ürün üretim hacmi üzerinde doğrudan etkisi bulunmaktadır.

Bir sistemin ekonomik analizinde ilk adım genelde toplam ilk yatırım maliyetlerinin saptanmasıdır. Ancak, yakıt ve işletme-bakım gibi değişken maliyetlerden farklı olarak ilk yatırım maliyetleri, sistemin çalışma ömrü boyunca sadece bir defa

yapılan harcama türüdür. Bu sebeple sürekli yapılan harcamalar ile bir defa yapılan harcamaları aynı tür altında toplayabilmek için bir takım farklı düzenlemeler gerekmektedir

Ekserjo-ekonomik analiz, ekserji ve ekonomi parametrelerini uygun bir biçimde birleştirerek; bir enerji çevrim sistemindeki harcamaların, yatırım maliyetlerin, enerji maliyetlerinin veya bakım onarım maliyetlerinin hangisinden daha fazla etkilendiğini ortaya çıkarmaktır. Ekserjo-ekonomik analizle ilgili denklemleri geliştirmeden önce, bir sistem için ekonomik bileşenler tanımlanmalıdır.

Şimdiki zamanda sahip olunan belirli bir miktarda para, yatırıma dönüştürülebilmesi nedeniyle bir süre sonra sahip olunacak aynı miktarda paradan çok daha değerlidir. Bu nedenle bir proje çerçevesinde, paranın zaman içinde yapacağı veya yapmış olduğu hareketler önem taşımaktadır. Bu hareketlerin etkileri aşağıda açıklanan bazı yöntemlerin kullanılmasıyla değerlendirilebilmektedir.

PW miktarda bir para, n dilimlik periyotlarda, i bileşik faiziyle bir hesaba yatırılması durumunda, paranın gelecekteki değeri;

$$FW = PW(1 + i)^n \quad (2.37)$$

denklemleri aracılığıyla elde edilir (Bejan, et al., 1996; Ballı, 2008).

Mühendislik sistemlerinde ekonomik analiz gerçekleştirilirken, zaman birimi genelde, yıl olarak ifade edilip, bileşik faiz, bir yıl içerisinde p defa gerçekleşiyor ise, belirli miktardaki bir paranın n zaman sonraki değeri:

$$FW = PW\left(1 + \frac{i}{p}\right)^{np} \quad (2.38)$$

şeklinde elde edilir. Burada, np dönem sayısı, i/p dönem başına faiz oranı ve i ise normal faiz oranı olup, bileşik faizin bir yıl içerisinde p defa yerine bir yılda bir kere aldığı faiz oranı efektif faiz oranı bağıntısı;

$$i_{ef} = \left(1 + \frac{i}{p}\right)^p - 1 \quad (2.39)$$

şeklinde olup, paranın gelecekteki değeri;

$$FW = PW(1 + i_{ef})^n \quad (2.40)$$

denklemleri yardımıyla ifade edilebilir (Bejan, et al., 1996; Ballı, 2008).

Gelecekteki belli bir miktar para için belli bir faiz oranıyla ulaşılabilecek paranın şimdiki miktarı;

$$PW = FW \frac{1}{(1 + i_{ef})^n} \quad (2.41)$$

denklemini ile hesaplanır. Paranın şimdiki değeriyle gelecekteki değeri arasındaki fark ıskonto oranı olarak tanımlanır. Buna bağlı olarak i_{ef} ıskonto oranıdır. Sonuç olarak, paranın şimdiki değer faktörü:

$$PWF = \frac{1}{(1 + i_{ef})^n} \quad (2.42)$$

ifadesiyle hesaplanabilir (Bejan, et al., 1996; Ballı, 2008).

Eşit zaman aralıklarında meydana gelen aynı miktardaki para hareketleri olarak tanımlanan, kredi, sigorta, yakıt ödemeleri, çalışan ücretleri, gelirler, şeklinde örneklendirilen ve. genelde kullanım zaman aralığı bir yıl olan yıllık ödemeler, (A);

$$AC = FW \frac{i_{ef}}{(1 + i_{ef})^n - 1} \quad (2.43)$$

denkleminde hesaplanır (Bejan, et al., 1996; Ballı, 2008).

Bir yıllık ödemenin şimdiki değeri, belirli bir dönem sonundaki yıllık toplam ödemelerinin, efektif faiz oranıyla yıllık ödeme başlangıcında yatırılmış olması durumundaki parasal değeri olarak ifade edilir ve;

$$\frac{PW}{AC} = \frac{(1 + i_{ef})^n - 1}{i_{ef}(1 + i_{ef})^n} \quad (2.44)$$

Bu denklemin sağ tarafı şimdiki değer faktörünün üniform serisidir. Bu değerinin tersi de ilk yatırım maliyetinin geri kazanım faktörü olarak adlandırılır:

$$CRF = \frac{AC}{PW} = \frac{i_{ef}(1 + i_{ef})^n}{(1 + i_{ef})^n - 1} \quad (2.45)$$

ve yukarıdaki bağıntısı ile ifade edilir (Bejan, et al., 1996; Ballı, 2008).

CRF 'nin kullanımıyla ilk yatırım maliyetinin seviyelendirilmiş değeri;

$$CA_{i,k} = \frac{PEC_k(\$)CRF}{5110(h)} \quad (2.46)$$

denklemleri ile hesaplanır. Eşitlikte görülen satın alınan ekipman maliyeti (*PEC*) terimi sistem elemanının satış fiyatını, paydada yer alan 5110 değeri ise bir uçağın bir gün içinde 14 saat uçuğu varsayıldığında bir yıl içerisindeki uçuş süresinin saat cinsinden karşılığıdır.

Enflasyon, bir mal ya da hizmetin kalitesinde herhangi bir artış olmadan (ya da aynı oranda bir artışın olmadığı), aynı mal ya da hizmetin parasal değerindeki artıştır. Enflasyon meydana geldiğinde, maliyetler sürekli değişir. Zamanla kaynakların tükenmesi ve/veya azalması, teknolojik gelişim, talep artışı/azalışı gibi nedenlerden dolayı herhangi bir harcamada meydana gelen değişim eskolasyon olarak adlandırılır (Bejan, et al., 1996; Ballı, 2008).

Herhangi bir harcamaya n yıl boyunca maliyet eskolasyonu uygulandığında, herhangi bir yıla uygulanan eskolasyon bir önceki yıldaki eskolasyondan $(1+r_n)$ katı kadar fazla olacağı uniform olmayan bir seri elde edilir, burada r_n sabit değişim miktarı olup eskolasyon değeridir. Sabit eskolasyonlu seviyelendirme faktörü (*CELF*) olarak bilinen bu terim; ilk yılın başındaki harcamanın miktarı (PW_0) ile artık seviyelendirilmiş değer olarak kabul edilen eşit bir yıllık ödeme arasındaki ilişkiyi ifade etmek için kullanılmaktadır. Hem efektif faiz oranı hem de nominal eskolasyon değerine bağlı olan *CELF*:

$$l = \frac{(1 + r_n)}{(1 + i_{ef})} \quad (2.47)$$

$$CELF = \frac{AC}{PW} = CRF \frac{l(1 + l^n)}{(1 - l)} \quad (2.48)$$

bağıntıları ile elde edilir (Bejan, et al., 1996; Ballı, 2008; Ballı et al., 2010a,b).

Bir sistemin kullanım yılı sonundaki hurda değeri; toplam ilk yatırım maliyeti (*TCI*) üzerinden belirlenen bir hurda değer yüzdesine (μ) bağlıdır ve

$$SV = TCI\mu \quad (2.49)$$

denklemleri ile belirlenir (Kwak et al., 2003; Ballı, 2008; Ballı et al., 2008a,b).

2.4.2. Ekserjo-ekonomi

Ekonomik analiz ile ekserji analizini beraber kullanarak sistem veya proseslerin gerçek ürün maliyetlerinin elde edilmesini temin eden ekserjo-ekonomi, sistem ve proje

yöneticileri, tasarımcılar ve araştırma-geliştirme çalışanları için karar verme sürecinde önemli bir araçtır. Ekserjoekonomi; ekserjinin, çevresiyle etkileşimde olan ısı sistem ve içerisindeki verimsizlik kaynaklarının maliyetlerinin elde edilmesi için kullanılabilir tek gerçek temel olduğunu ifade etmektedir. Sistemlerin ilk yatırım maliyetleri, işletme ve bakım giderleri, vergiler, sigortalar, amortismanlarla birlikte çalışanların maliyetleri, yakıt veya hammadde, enerji ihtiyaçları gibi birçok gider sistemin belirlenmiş bir hizmet ömrü çerçevesinde değerlendirilerek ürünlerin (madde veya enerji akışı) \$ bazında maliyetleri elde edilmiş olur. Örneğin bir elektrik santralinde bu değer cent/kWh iken bir uçak motorunda \$/kN şeklinde olacaktır.

Bir sistemin termodinamik özelliklerinin ekonomik karşılıklarının bilinmesi, ürün ve yakıtların gerçek maliyetlerinin belirlenmesiyle en düşük maliyette ürün elde edilmesinin amaçlandığı ısı-ekonomi ve ekserjo-ekonomi kavramları, birçok akademik ve mühendislik planlamalarının karar verme sürecinde önemli rol oynamakta olup; benzerlikleri yanında önemli ayırım noktalarını (Sciubba, 2005) şu şekilde ifade etmektedir:

“Termo-ekonomi ve ekserjo-ekonomi arasındaki fark, parasal üretim faktörleri ile ilişkilerden ileri gelmektedir: Termo-ekonomi, ekserji cinsinden parasal üretim maliyet optimizasyonunu dikkate alırken, ekserjo-ekonomi parasal harcamaları eşdeğer ekserji akımlarına dönüştürmekte ve sadece ekserji akımları ile çalışan bir optimizasyon uygulamaktadır.”

Sistemlerin ekserji analizlerinde elde edilen ekserji kayıp değerlerinin nitelikleri her sistem için aynı olmayıp aynı sistem içerisinde bile, ilerleyen süreçlerde ekserjinin özgül ekonomik değeri artar (Szargut 2005). Başka bir ifadeyle, ürün tarafındaki ekserji maliyeti yakıt tarafındaki ekserji maliyetinden daha yüksek olup sürecin ürün tarafında meydana gelen kayıpların yakıt tarafındaki kayıplara göre çok daha maliyetli olduğunu ve dolayısıyla ekserji kayıplarının nitelik anlamında aynı olmadığını göstermektedir.

Ekserjoekonomik analiz yönteminde, sistem içerisindeki madde ve enerji akışlarının bütün bileşenlerdeki girdi ve çıktı ekserji maliyetleri dengesi belirlenip elde edilen değerler ve yardımcı denklemlerle birlikte amaç fonksiyonu olan ürün maliyeti ortaya çıkmaktadır.

Termoekonomik ya da ekserjoekonomik analiz için literatürde bulunan birçok yaklaşım metotları mevcut olup bu çalışmada Lazzaretto ve Tsatsaronis, (2006) tarafından sunulan SPECO (Specific Exergy Costing) yaklaşım metodu kullanılmıştır. Bu yöntem oluşturan adımlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır;

- Sistem içerisindeki tüm bileşenler için giriş ve çıkış ekserji dengesinin belirlenmesi,
- Yakıt ve ürün olarak ifade edilen ekserji akışlarının her bir sistem için ayrı ayrı hesaplanması,
- Bulunan ekserji değerlerine maliyetlerin atanması.

Sistem içerisinde giriş ve çıkış yapan madde/enerji akışlarının, ısı ve iş ile ilgili olan ekserji değerleri;

$$\dot{C}_g = c_g \dot{E}x_g \quad (2.50)$$

$$\dot{C}_\zeta = c_\zeta \dot{E}x_\zeta \quad (2.51)$$

$$\dot{C}_w = c_w W \quad (2.52)$$

$$\dot{C}_q = c_q \dot{E}x_q \quad (2.53)$$

olarak maliyet akımlarına dönüştürülmektedir. Denklem (2.47) ve (2.50) arasındaki bağıntılarda c_g , c_ζ , c_w ve c_q parametreleri $\$/GJ$ olarak, ilişkili bulundukları ekserji akışlarının ortalama maliyetlerini gösterirken, $\dot{C}_g$, $\dot{C}_\zeta$, $\dot{C}_w$ ve $\dot{C}_q$ terimleri ise $\$/h$ cinsinden ait oldukları ekserji akışlarının maliyet akımlarını göstermektedir.

Sistem içerisindeki bir elemanın yakıt ve ürün ekserjilerinin ortalama birim maliyetleri için,

$$c_{F,k} = \frac{\dot{C}_{F,k}}{\dot{E}x_{F,k}} \quad (\$/GJ) \quad (2.54)$$

$$c_{P,k} = \frac{\dot{C}_{P,k}}{\dot{E}x_{P,k}} \quad (\$/GJ) \quad (2.55)$$

bağıntıları kullanılır. Ürün ve yakıt maliyet akımları ile ürün ve yakıt ekserji değerlerinin bilinmesiyle yakıt ve ürün için birim ekserji başına ortalama maliyetler her bir bileşen için 1 GJ yakıt harcamasına ve ürün çıktısına karşılık gelen maliyet elde edilmiş olur.

Yakıtın kaynak ve elde edilmek istenen işin ise ürün olarak göz önüne alındığı SPECO metoduna göre, sürekli akışlı bir control hacminin genel ekserjetik maliyet dengesi (Coban vd., 2017),

$$\sum_{giriş} \dot{C} + \dot{Z}^T = \sum_{çıkış} \dot{C} + \dot{C}_w \quad (2.56)$$

şeklindedir. $\dot{C}$ ve $\dot{C}_w$ akış ekserjisi ile güç ile ilişkili olan ekserji maliyetidir. \$h^{-1}\$ birimine haiz olan $\dot{Z}^T$ ise yatırım maliyeti (CIC) ile çalışma ve bakım maliyetlerinin (OM) toplam seviyelendirilmiş maliyetidir ve sistemdeki k bileşeni için,

$$\dot{Z}_k^T = \dot{Z}_k^{CIC} + \dot{Z}_k^{OM} \quad (2.57)$$

şeklinde yazılır. Bu noktada sistemin yatırım maliyetleri belirlenmelidir. Vites dişli kutusu, aksesuarlar vd. ikincil uçak motoruna ait ikincil ekipmanların maliyeti, GTM'ye ait güncel fiyat bilgisinin bulunamaması ve bileşen maliyetlerinin literatürdeki diğer çalışmalar ile orantılı ve benzer değerlerde olması sebebiyle motorun temel bileşenlerinin satın alma maliyetine (PEC) eklenmiştir. Bu durumda sistemin şimdiki parasal karşılığı:

$$PW = PEC - SV.PWF \quad (2.58)$$

şeklinde olup şimdiki değe faktörü:

$$PVF = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (2.59)$$

Yıllık yatırım maliyeti:

$$ACC = PW (\$).CRF(h^{-1}) \quad (2.60)$$

Sisteme ait yıllık ekipman maliyeti:

$$\dot{Z}_{sistem}^T = \frac{\phi ACC_{sistem}}{3600\tau(\frac{h}{s})} \quad (2.61)$$

bağıntısından elde edilir. Burada ϕ bakım işletme faktörü olup genelde 1,06 alınır (Moran, 1982; Kim et al., 1998; Kwak et al., 2003; Ballı, 2008) ve τ ise sistemin yıllık çalışma süresidir. Tablo 2.7'de yer alan yıllık çalışma ve bakım maliyeti verisi ile TRS-18 sistem için ilk yatırım maliyeti (CIC) ile çalışma ve bakım maliyetlerini (O&M) bileşen temelinde saatlik seviyelendirilmiş yatırım maliyetleri;

$$\dot{Z}_{sistem}^{CIC} = \frac{ACC_{sistem}}{\tau(\frac{h}{s})} \quad (2.62)$$

her bir bileşen için yukarıdaki denklem

$$\dot{Z}_{sistem}^{CIC} = \dot{Z}_{sistem}^{CIC} \frac{PEC_k}{\sum PEC_{sistem}} \quad (2.63)$$

ve

$$\dot{Z}_{sistem}^{OM} = \dot{Z}_{sistem}^{OM} \frac{PEC_k}{\sum PEC_{sistem}} \quad (2.64)$$

şeklinde ifade edilir.

Tablo 2.7. GTM'ye ait Kabul edilen ekonomik parametreler (Aygün ve Turan, 2021)

Faiz oranı, i	0.1	-
Yıllık faaliyet süresi	250	saat
Hurda oranı (salvage) j	0.15	-
Motor ömrü, n	30	yıl
Yatırım maliyeti, CIC	130000	\$
Çalıştırma ve bakım maliyeti, COM	14000	\$/yıl
Yakıt maliyeti/kilogram	0.65	\$/kg
Bakım işletme faktörü, φ	1.0678	-
Kompresör ekipmanı satın alma maliyeti,	50000	\$
Yanma odası ekipmanı satın alma maliyeti,	30000	\$
Türbin ekipmanı satın alma maliyeti,	50000	\$

GTM için elde edilen seviyelendirilmiş ilk yatırım maliyeti (CA), seviyelendirilmiş toplam yatırım (CIC) ve bakım maliyetlerinin (O&M) toplamı olan Z_k Tablo 2.8.'de gösterilmektedir.

Tablo 2.8. GTM için elde edilen seviyelendirilmiş ilk yatırım maliyeti (CA), seviyelendirilmiş toplam yatırım (CIC) ve bakım maliyetlerinin (O&M) toplamı olan Z_k ve Z_{GTM} .

Bileşen	CA	L_{CIC}	L_{O&M}	Z_k	Z_{TRS-18}
Kompresör	21.216	18.958	21.538	40.497	105.292
Yanma Odası	12.730	11.375	12.923	24.298	
Türbin	21.216	18.958	21.538	40.497	

Enerji akımı temelinde seviyelendirilmiş yakıt maliyeti;

$$FC_e = \frac{Pr \dot{m}_f \tau (3600 h/s)}{p_f} \quad (2.65)$$

bağıntısı ile belirlenir. $Pr, \dot{m}_f$ ve p_f sırasıyla yakıtın satış fiyatını, debisini ve yoğunluğunu gösterir. Ekserjetik temelinde ise;

$$\dot{C}_f = \frac{F \dot{C}_e LHV}{\tau. ex^{ch}} \quad (2.66)$$

denkliğinden elde edilir. LHV ve ex^{ch} ifadeleri sırasıyla yakıtın düşük ısı değeri ile yakıtın kimyasal ekserji değeridir.

Sistemlerin tasarımında ekserji kayıplarının en aza indirgenmesi, ya sistem bileşenlerinin uygun teknoloji ile yapılandırılmış olması ya da sistemin kayıpları en aza düşürecek şekilde tasarlanması ile mümkündür. Ekserjo-ekonomik analiz ile mevcut kayıpların azaltılması için yapılması gereken mali kayıpların azaltılması önemli bir fonksiyon olarak ortaya çıkmaktadır.

Bejan ve ark. (1996), ekserji yıkımın maliyetleri için aşağıdaki iki bağıntıyı önermektedirler

$$\dot{E}_{F,k} = \dot{E}_{P,k} + \dot{E}_{L,k} + \dot{E}_{D,k} \quad (2.67)$$

$$c_{P,k} \dot{E}_{P,k} = c_{F,k} \dot{E}_{F,k} - \dot{C}_{L,k} + \dot{Z}_k \quad (2.68)$$

olup $\dot{E}_{F,k}$ ve $\dot{E}_{P,k}$ değerlerinin yok edilmesiyle ekserji yıkım maliyeti için sırasıyla;

$$\dot{C}_{D,k} = c_{F,k} \dot{E}_{D,k} \quad (2.69)$$

$$\dot{C}_{D,k} = c_{P,k} \dot{E}_{D,k} \quad (2.70)$$

olarak elde edilir. Yakıt ortalama birim maliyetinin ürün ortalama birim maliyetinden daha düşük olması nedeniyle denklemlerden birincisi alt limiti, ikincisi ise üst limiti göstermektedir.

Ekserjoekonomik analizlerde izafi maliyet farkı r_k , bir bileşene ait yakıt ve ürün arasındaki birim ekserji başına ortalama maliyet artışını gösterir ve bu parametre optimizasyon için de kullanılmaktadır (Bejan ve ark., 1996).

$$\begin{aligned} r_k &= \frac{c_{P,k} - c_{F,k}}{c_{F,k}} = \frac{c_{F,k}(\dot{E}_{D,k} + \dot{E}_{L,k}) + (\dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM})}{c_{F,k} \dot{E}_{P,k}} \\ &= \frac{1 - \varepsilon_k}{\varepsilon_k} + \frac{\dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM}}{c_{F,k} \dot{E}_{P,k}} \end{aligned} \quad (2.71)$$

Belirli bir sistem bileşeni için ekserji yıkımı ve ilk yatırım ve bakım işletme gibi maliyetleri değerlendirilebilmesi sistemin tasarımı ve işletmesinde verilecek kararlar için önemli olup, ekserjoekonomik faktör (f);

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + c_{F,k}(\dot{E}x_{D,k} + \dot{E}x_{L,k})} \quad (2.72)$$

bağıntısı ile elde edilir (Bejan ve ark., 1996).

2.4.3. Hesaplamalar

GTM bileşenleri için ekserjoekonomik denge denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

Hava kompresörü için;

$$\dot{C}_{2,g} + \dot{C}_{w,c} + \dot{Z}_K = \dot{C}_{3,\zeta} \quad (2.73)$$

Yanma odası için;

$$\dot{C}_3 + \dot{C}_{3,f} + \dot{Z}_{YO} = \dot{C}_4 \quad (2.74)$$

Gaz türbini için;

$$\dot{C}_4 + \dot{Z}_{GT} = \dot{C}_{w,GT} + \dot{C}_5 \quad (2.75)$$

Egzoz nozulu için;

$$\dot{C}_9 = \dot{Z}_{EN} + \dot{C}_5 \quad (2.76)$$

GTM için;

$$\dot{C}_2 = 0, \quad \dot{C}_2 + \dot{C}_{3,f} + \dot{Z}_{TRS18} = \dot{C}_9 \quad (2.77)$$

Her bir motor elemanına ait $\dot{Z}_k$ değerleri ile yakıtın c_{fuel} değerinin bulunduğu kabul edildiğinde denklemlerim çözümünün gerçekleştirilebilmesi için ortalama birim maliyetler denklemlerinde yer alan bazı parametreler üzerinden kabuller gerçekleştirilir. Bu kabuller aşağıdaki gibidirler:

- Motora giren havanın maliyeti sıfırdır:

$$\dot{C}_{2,g} = 0 \quad (2.78)$$

- Kompresör için yapılan işin ortalama birim maliyeti türbinden alınan işin ortalama birim maliyetine eşittir:

$$c_{w,K} = c_{w,GT} \quad (2.79)$$

- Türbin girişi ve çıkışındaki akışların toplam ortalama birim maliyetleri birbirine eşittir. Türbin için denklem:

$$\frac{\dot{C}_5}{E_{x5}} = \frac{\dot{C}_4}{E_{x4}} = c_f \text{ (F kuralı)} \quad (2.80)$$

- Egzoz bileşeni için ekserjetik maliyet oluşturmayan Z'k değeri ihmal edilmiştir.

şeklinde gerçekleştirilen kabuller ile ekserjo-ekonomik denklemler, ortalama birim maliyetleri matris denklem sistemi tablo formunda Tablo 2.9.'da düzenlenmiştir.

Tablo 2.9. GTM'nin çözümüne yönelik ekserjo-ekonomik denklemlerin, ortalama birim maliyetlerin matris denklem sisteminin tablosal formu.

c ₃ (\$/GJ)	c ₄ (\$/GJ)	c _{w,k} =c _{w,GT} (GJ/saat)	sbt. (\$/saat)
-1.11	0.00	1.24	-40.50
0.00	1.55	-1.24	-40.50
1.11	-4.91	0.00	-104.29
-1.14	0.00	1.28	-40.50
0.00	1.56	-1.28	-40.50
1.14	-4.87	0.00	-101.00
-0.78	0.00	0.80	-40.50
0.00	1.00	-0.80	-40.50
0.78	-3.61	0.00	-78.65
-0.59	0.00	0.58	-40.50
0.00	0.74	-0.58	-40.50
0.59	-2.86	0.00	-67.03
-0.56	0.00	0.56	-40.50
0.00	0.72	-0.56	-40.50
0.56	-2.80	0.00	-65.50
-0.40	0.00	0.38	-40.50
0.00	0.48	-0.38	-40.50
0.40	-1.46	0.00	-51.69
-0.42	0.00	0.39	-40.50
0.00	0.48	-0.39	-40.50
0.42	-1.48	0.00	-63.74
-0.84	0.00	0.82	-40.50
0.00	1.07	-0.82	-40.50
0.84	-3.76	0.00	-73.61
-1.11	0.00	1.24S	-40.50
0.00	1.49	-1.24	-40.50
1.11	-4.89	0.00	-104.94

Yukarıda verilen termodinamik ve ekonomik bağıntılar aracılığıyla itki maliyeti değeri elde edilmelidir. GTM için en önemli performans parametreleri itki ve özgül yakıt

tüketimi değerleri oluşturmaktadır. Bu parametrelerin ve sistem tanımı esnasında gerçekleştirdiğimiz kabullerin yardımıyla özgül itki maliyet akımı (STC),

$$\dot{C}_{3,f} + \dot{Z}_{TRS18} = \dot{C}_9 \quad (2.81)$$

$$STC_{TRS18} = \dot{C}_9 / \dot{T} \quad (2.82)$$

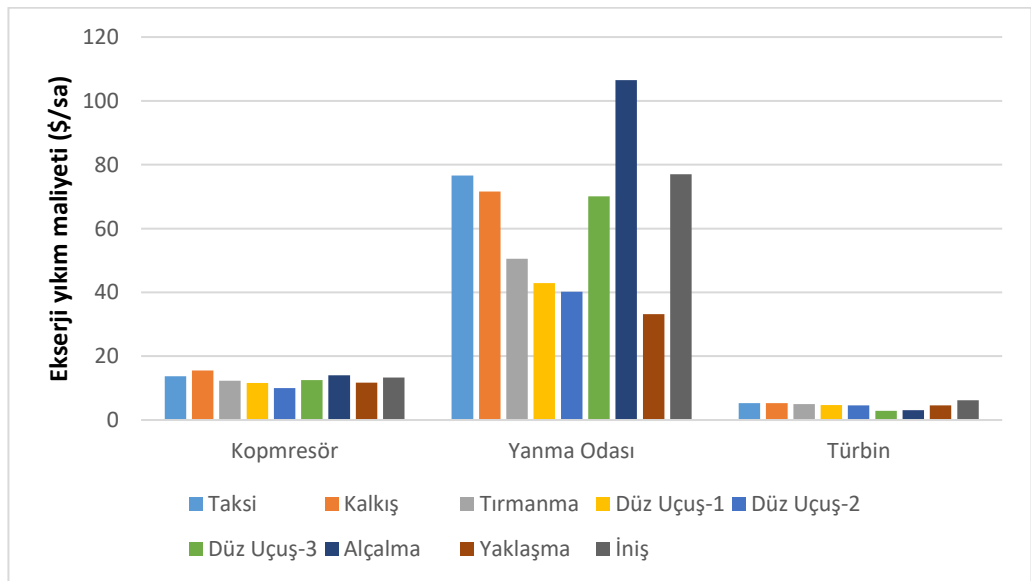
denklemleri ile elde edilir. T alt indisi kN cinsinden itkiyi göstermekte olup STC indisi ise $\$/hkN$ cinsinden itki maliyet oranını göstermektedir.

2.4.4. Sonuçların karşılaştırılması

GTM ile ilgili ekonomik girdiler tanımlandıktan sonra, ekserjik ve ekonomik sonuçlar, Gauss Eliminasyon yöntemiyle ekserjo-ekonomik lineer denklemleri çözümlenerek motora ait her bileşen için akımların birim maliyet değerleri elde edilmiştir. Ekserji yıkım maliyeti, özgül akış maliyeti, ekserjo-ekonomik faktör, izafi maliyet farkı ve özgül itki maliyeti ekserjo-ekonomik parametreleri için uçuş evreleri boyunca bileşen ve motor üzerindeki değişimleri incelenmiştir.

2.4.4.1. Ekserji yıkım maliyeti

Şekil 2.25.'te görüldüğü üzere, yanma odasının diğer bileşenlere göre nispeten oldukça yüksek bir oranda ekserji yıkım maliyeti vardır.

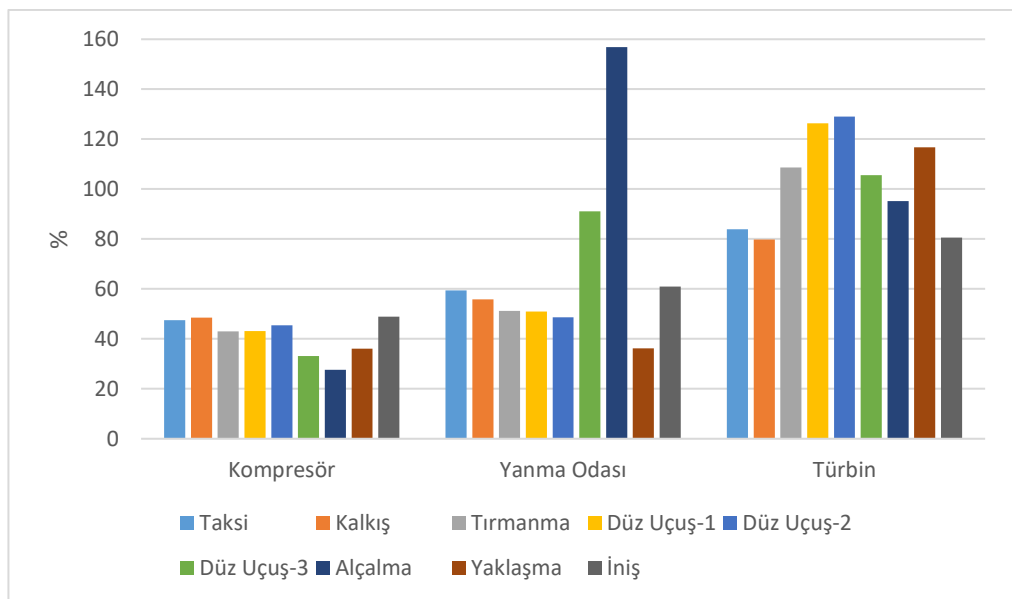


Şekil 2.25. GTM bileşenlerinin ekserji yıkım maliyetinin uçuş evreleri boyunca değişimleri

Yanma odasının ekserji yıkım maliyeti 33.168 \$/saat ile 106.46 \$/saat arasında değişirken, bu değer kompresör için 10 \$/saat ile 15.48 \$/saat ve türbin için ise 2.85 \$/saat ile 6.2 \$/saat arasında değişmektedir. Bir uçuş aşamasından diğerine, yanma odasının ekserji yıkım maliyetinde yüksek ve dalgalı değişimler gerçekleşirken diğer bileşenlerdeki değişimler ise hemen hemen yatay seyrededir. Ekserji yıkım maliyetinin iki bileşeni olduğu ve bunların ekserji yıkımı ve birim ekserji maliyeti olduğu, ekserji yıkımının ekserji yıkım maliyeti üzerinde düşüş gösterdiği durumlarda birim ekserji akışı maliyeti üzerinde ise yükselişe sebep olduğu bilinmektedir. Bu nedenle artan irtifaya bağlı olarak ekserji yıkım maliyetinin etkisinin taksi aşamasından düz uçuş-2 aşaması boyunca azalırken, düz uçuş-3 ile alçalma arasında da bir artış görülmektedir.

2.4.4.2. İzafi maliyet farkı

Şekil 2.26’da görüldüğü üzere motor bileşenlerinin uçuş seyrine göre yakıt ve ürün arasındaki birim ekserji başına ortalama maliyet artışını ifade eden izafi maliyet farklarının oransal değişimini göstermektedir. Bu değerın yüksek olması uçuşa ait maliyetlerin de yüksek olacağı anlamına gelmektedir. Bu anlamda en düşük maliyet değişimini gerçekleştiren bileşenin kompresör iken en yüksek ise türbin olduğu görülmektedir.

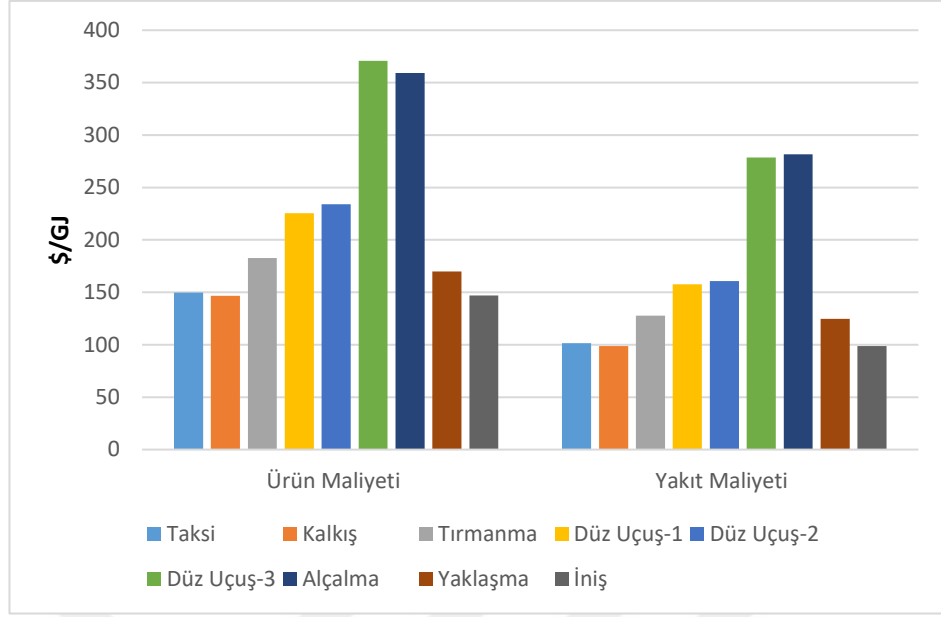


Şekil 2.26. GTM bileşenlerinin uçuş seyrine göre izafi maliyet farkı dağılımları

Kompresör, yanma odası ve türbin için izafi maliyet farklarının en düşük ve en yüksek değerleri sırasıyla %27.56 ile %48.95, %36.20 ile %156.87 ve %79.78 ile %1129.07 arasında değişmektedir. Hemen hemen bütün uçuş evreleri boyunca bileşenler arasında izafi maliyet farkının artış oranları belirli bir oranda olduğu görülürken, istisna olarak alçalma aşamasında yanma odasının izafi maliyet farkı kompresördeki duruma nazaran 5.69 kat daha fazla iken aynı zamanda türbine göre %61 oranında daha da yüksek bir değere sahip olduğu görülmektedir. Bunun temel sebebi ise fiziksel açıdan uçağın daha kontrolü bir aşama olan yaklaşma evresine geçmeden önce gerçekleştirdiği yakıt sarfiyatının yerçekimine karşı durmak veya aerodinamik kuvvetlere tutunmak için harcamak zorunda olmadığını göstermektedir.

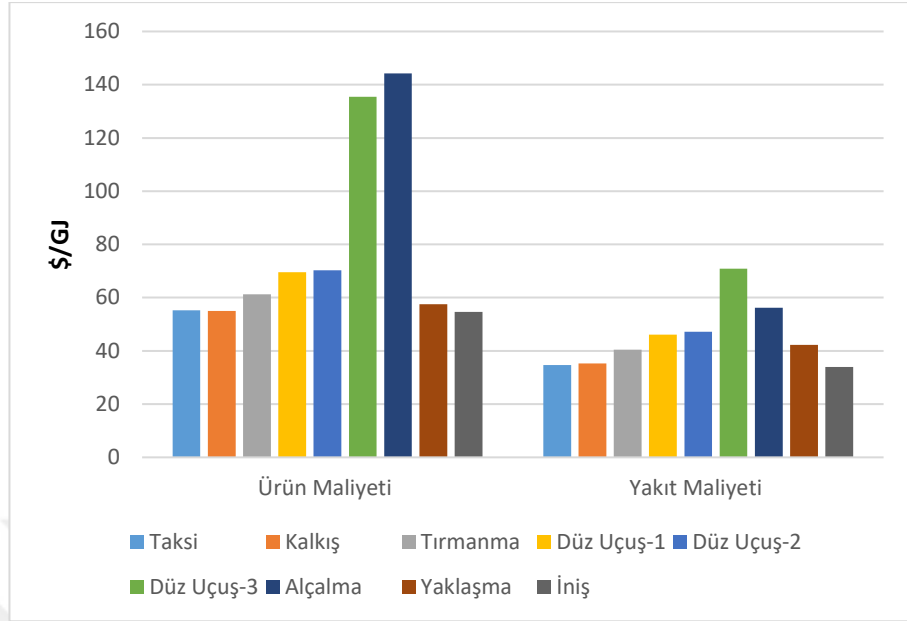
2.4.4.3. Özgül akış maliyeti

Özgül akış maliyetleri, bileşen akışlarının özgül akış maliyetlerini yakıt ve ürün olarak sunmaktadır. Buradaki "yakıt maliyeti" terimi, bileşene giren akışın maliyetini, "ürün maliyeti" terimi ise bileşenden çıkan akışın maliyetini ifade eder. Bileşen akışlarının birim maliyetleri ayrı ayrı analiz edildiğinde, kompresör akışının birim maliyeti, diğer iki bileşen akışına göre daha yüksek bir değer olarak görülür (Şekil 2.27), Bunu gaz türbin akış birim maliyeti takip eder. Yanma odası akışının yakıt ve ürün maliyetleri ise en düşük maliyetlere sahiptir. Ayrıca her bileşen için ürün maliyetinin, yakıt maliyetinden daha yüksek olduğu her üç şekilde de açıkça görülmektedir.

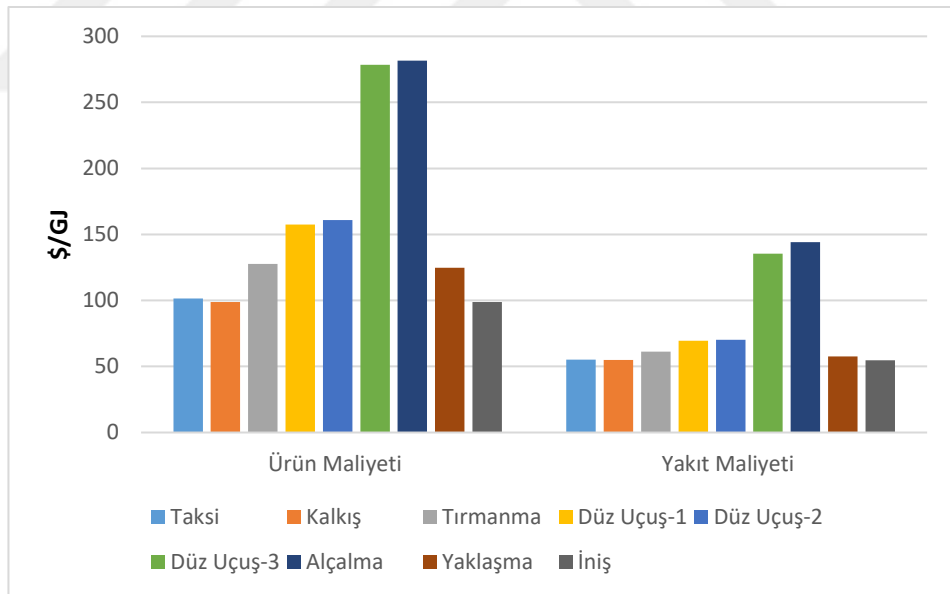


Şekil 2.27. GTM'nin kompresör bileşeninin uçuş seyrine göre özgül akış maliyet değişimi

Kompresör akışının yakıt maliyeti (c_w), taksi, kalkış ve iniş aşamalarında düşük değerler olarak hesaplanırken, düz uçuş-3 ve alçalma aşamalarında 278.52 \$/GJ ve 281.63 \$/GJ olarak hesaplanmıştır. Kompresör akışının ürün maliyeti (c_3) açısından, en yüksek değerler düz uçuş-3 ve alçalma aşamalarında 370.7 \$/GJ ve 359.2 \$/GJ değerlerinde iken, taksi, kalkış ve iniş aşamalarında birbirlerine yakın değerlerde olup ortalama 147 \$/GJ değeri olarak hesaplanmıştır. Bu eğilim, yanma odası ve gaz türbin akışları için farklı değerler ile hemen hemen aynı orantı ile gerçekleşmektedir. Yani, Şekil 2.28.'de gösterildiği üzere, yanma odası akışının yakıt ve ürün maliyetleri, taksi, kalkış ve iniş aşamalarında ortalama 35 \$/GJ ve 55 \$/GJ ile hesaplanırken, bu maliyetler düz uçuş-3 ve alçalma aşamalarında yaklaşık 135 \$/GJ ile 144 \$/GJ yakıt maliyeti ve 71 \$/GJ ile 56 \$/GJ ürün maliyeti ile en yüksek değerlere sahiptir. Dikkat edilirse yanma odasının yakıt maliyet akışının alçalma aşaması düz uçuş-3 aşamasına nazaran, ürün maliyet tarafının aksine düşüş gerçekleştiği gözlemlenmektedir. Bu alçalma aşamasında iken güç ayarında belirli bir süre için düşüş gerçekleştirilmesi diğer bir değiş ile GTM'nin alçalma aşamasında iken kısmi güç değerlerinde kullanılmasıyla açıklanabilir. Aynı durum diğer bileşenler için de daha net açıklayıcı olabilir. Son olarak, Şekil 2.29.'da, gaz türbininin birim akış maliyetleri gösterilmektedir. Türbin akışının yakıt maliyetinin minimum ve maksimum değerleri 54 \$/GJ ile 135 \$/GJ arasında değişirken, ürün maliyeti ise 98 \$/GJ ile 278 \$/GJ arasında değişmektedir.



Şekil 2.28. GTM'nin yanma odası bileşeninin uçuş seyrine göre özgül akış maliyet değişimi



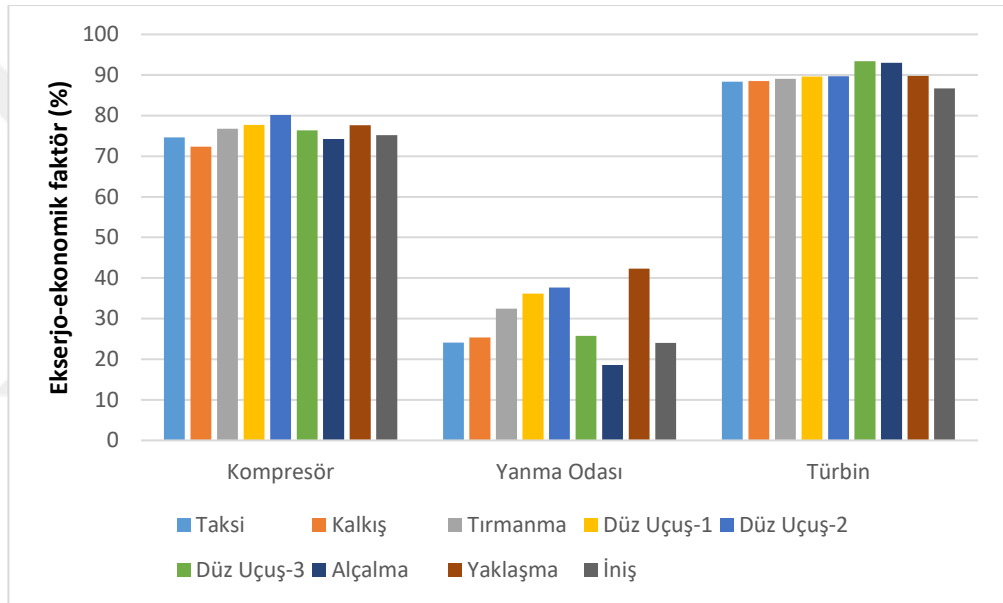
Şekil 2.29. GTM'nin türbin bileşeninin uçuş seyrine göre özgül akış maliyet değişimi

2.4.4.4. Ekserjo-ekonomik faktör

GTM ve bileşenleri ile ilgili ekserjo-ekonomik faktörler, Şekil 2.30 ve Şekil 2.31.'de gösterilmiştir. Bu parametrenin hesaplanması için akışın birim yakıt maliyeti

tercih edilmiştir. Bu şekilleri göz önünde bulundurarak, kompresör ve gaz türbininin ekserjo-ekonomik faktörlerinin %50'den fazla değere sahip olduğu, ancak yanma odasının tam tersi durumda olduğu görülmektedir. Bu durum, bu bileşende meydana gelen yüksek ekserji yıkımına ve yanma odası için ekserji yıkımı ve kayıpların azaltılmasına yönelik iyileştirme çalışmalarının gerekliliğine atfedilebilir.

Şekil 2.30'a göre, bileşenlerin ekserjo-ekonomik faktörü, kalkış ve iniş aşamalarına kıyasla düz uçuş aşamaları daha yüksek değerlere sahiptir. Bu durum bileşenlerin ekserji yıkım maliyetlerinin kalkış ve iniş aşamalarında düşük değerlerde olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.30. GTM bileşenlerinin uçuş seyrine göre ekserjo-ekonomik faktör değişiminin dağılımı

Üç bileşen için ekserjo-ekonomik faktörün uçuş aşaması boyunca etkisini dikkate alarak elde edilen temel bulgu, düz uçuş aşamalarında yanma odasına ait ekserjo-ekonomik faktörün uçuş aşamasındaki değişime daha duyarlı olmasıdır. Yanma odasının ekserjo-ekonomik faktörünün göreceli olarak daha düşük olduğu önemli noktalara odaklanılması en verimli seviyedeki ekserji maliyetinin belirlenmesi açısından önem arz etmektedir. Bu sebeple bileşenin satın alma maliyeti sabit tutulurken ekserji yıkım maliyetinin ise uçuş aşamasına bağlı olarak değiştiği gözlemlenir. Herhangi bir bileşen için ekserjo-ekonomik faktör değeri %50'den yüksek ise, bileşen satın alma maliyeti, ekserji yıkım maliyetinden daha baskın olur. Bu nedenle yanma odası için, satın alma

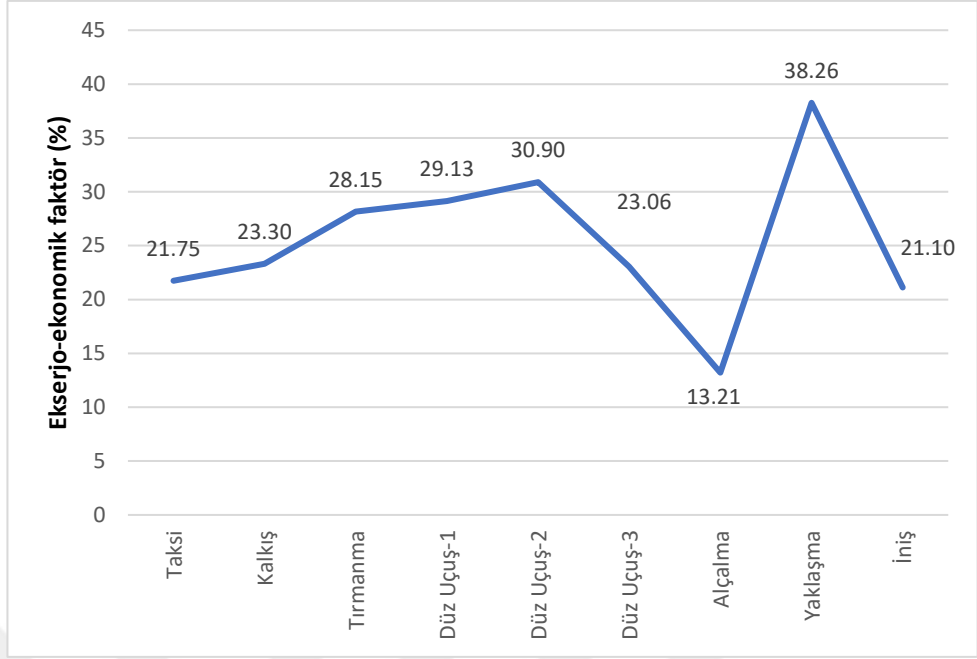
maliyeti yerine ekserji yıkım maliyetine odaklanmak, genellikle yanma odasının ekserjo-ekonomik faktörünün %50'den düşük olması nedeniyle daha faydalı olacaktır.

Ekserjo-ekonomik faktör ne kadar düşükse, ekserji yıkım maliyeti o kadar yüksektir veya tam tersi. Dikkat edilirse uçuş aşamalarına göre kompresörün ekserjo-ekonomik faktörü tüm uçuş noktaları için %72'den daha yüksek olarak elde edilmiştir. Bu da ekserjetik olmayan satın alma, işletme ve bakım maliyetlerinin uçuş boyunca ekserji yıkım maliyetinden daha yüksek oranda olduğunu göstermektedir.

Ayrıca yanma odası için bu parametre tüm uçuş noktaları için %50'den fazla değeri geçmediği için, ekserji yıkım maliyetinin yüksek olduğunu açıkça ifade edebiliriz. Bu oran, uçuş aşamaları boyunca %23 ile %43 değerleri arasında değişmektedir. Diğer iki bileşenle karşılaştırıldığında, yanma odasının ekserji maliyetini azaltmak için yanma daha verimli gerçekleştiği şartların gerçekleştirilmesi, şartlara uygun alternatif yakıtların kullanılması önerilebilir. Aksi takdirde, motor yüksek ekserji maliyetine sebep olmaya devam edecektir.

Kompresör için belirtilen değerlendirmeye benzer olarak, türbin bileşeni için mümkün olduğunca az olmak üzere ekserjetik olmayan maliyetler azaltılmalıdır. Türbin biriminin ekserjo-ekonomik faktörü %86.7 ile %93.4 arasında değişmektedir.

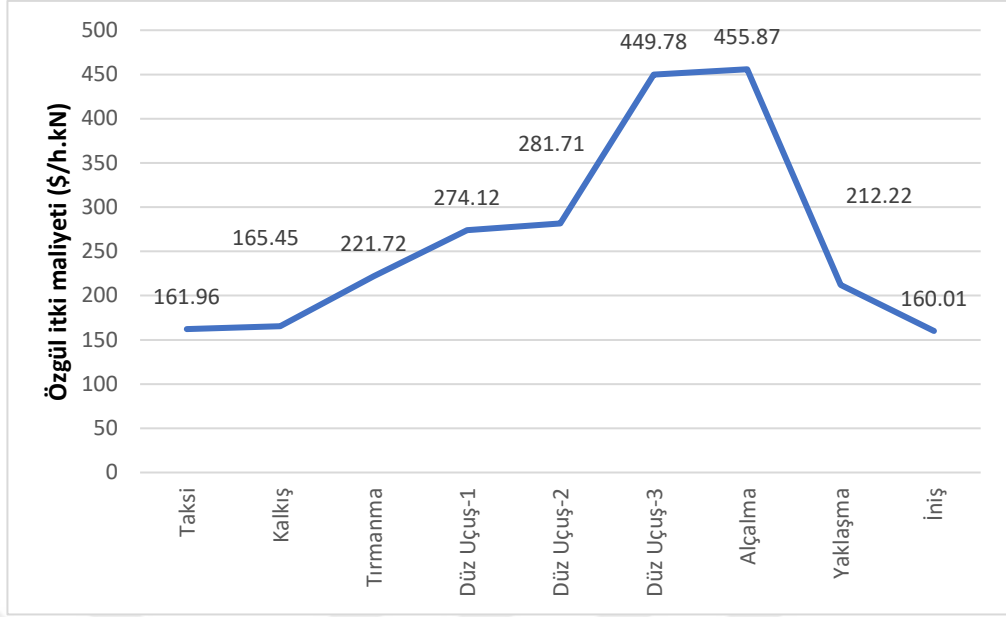
Şekil 2.31'de görüldüğü gibi, GTM'nin uçuş evrelerine göre ekserjo-ekonomik faktörleri, tüm uçuş noktaları için %13.21 ile %38.26 arasında değişmektedir. GTM ekserjo-ekonomik faktör sonuçları, ekserji yıkım maliyetine nazaran yüksek olduğu durumlar dışında ekserjetik olmayan maliyetlerinden daha fazla paya sahip olduğunu göstermektedir. Taksir, kalkış ve iniş aşamalarında bu parametre ortalama olarak %22'ye ulaşırken, düz uçuş-1 ve düz uçuş-2 evrelerinde %29.12 ile %30.9 değerlerine haiz iken düz uçuş-3 ve alçalma evrelerinde ise %23 ve %13.2 seviyelerine keskin bir düşüş gerçekleştirdiği görülmektedir. Daha önce belirtildiği gibi, bu parametre toplam ekserji yıkım maliyeti ve toplam ekserjetik olmayan maliyetler ile ilişkilidir. Şekil 30 ile anlaşılacağı üzere, nispeten yüksek irtifada uçmak, ekserji yıkım maliyetini azaltmak için bir çözümdür. Bu parametre sayesinde mali olarak etkin olmayan uçuş noktaları net bir şekilde anlaşılabilir. Diğer yandan, bu sonuçların ışığında, GTM'nin ekserjo-ekonomik faktörünün uçuş noktaları ile yüksek bir ilişkiye sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 2.31. GTM'nin uçuş seyrine göre ekserjo-ekonomik faktör değişimi

2.4.4.5. Özgül itki maliyeti

Şekil 2.32 ile GTM'nin özgül itki maliyeti uçuş aşamalarına bağlı olarak 160.014 \$/saatkN ile 455.86 \$/saatkN arasında değerler almaktadır. Ortalama itki maliyeti ise 264.75 \$/saatkN olarak hesaplanmıştır. GTM özgül itki maliyeti ortam şartlarındaki aerodinamik etkilerden önemli ölçüde etkilenmiştir. İniş ve tırmanma aşamalarında, özgül itki maliyeti ortalama maliyete yaklaşır, yaklaşık 220 \$/saatkN değerine ulaşır. düz uçuş-1 ve düz uçuş-2 ile düz uçuş-3 ve alçalma aşamaları karşılaştırıldığında, motorun kısmi güçte çalıştığı durumun akış maliyetleri ile elde edilen verilere uygun ve orantılı bir şekilde özgül itki maliyetini artırdığı görülebilir.



Şekil 2.32. GTM'nin uçuş seyrine göre özgül itki maliyetlerinin değişimi

2.4.5. Ekserjo-ekonomik analizi değerlendirmesi

GTM uçuşu boyunca birinci ve ikinci yasa analizlerinin yardımıyla ekserjo-ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. Küçük boyutlu motorlar için ekserjo-ekonomik parametrelerin farklı uçuş aşamaları için eksikliği, ekserjo-ekonomik çalışmaların önemli zorluklarından birini oluşturur. Sadece tasarım noktasına odaklanarak, motor performansının gerçek etkisinin termodinamik ekonomi parametreleri üzerindeki anlayışı zorlaştırır. Yani, tasarım dışı analizler, farklı uçuş noktalarını karşılaştırarak anlamlı sonuçlar elde edilebilmesini sağlar, böylece daha kesin sonuçlar elde edilebilir. Başka bir deyişle, ekserjo-ekonomik analizler enerji ve ekserji analizi ile birleştirildiğinde, daha gerçekçi sonuçlara ulaşılabileceği açıktır. Ayrıca, ekserjo-ekonomik analiz ile temel amaç, bu geliştirmelerden kaynaklanan ek maliyetlerin yeterince karlı olup olamayacağını belirlemektir. Ayrıca, sistemlerin karşılaştırılması bileşen maliyetlerine göre mümkün olabilir. Bu nedenle, ekserjo-ekonomik analizin belirli durumlar altında farklı sonuçlar üretebileceği ve motorun daha az güvenilir olduğu noktaları bulabileceği söylenebilir.

GTM ile ilgili ekserjo-ekonomik çalışmadan elde edilen önemli sonuçlar ile ilgili olarak bileşenlerin ekserji yıkım maliyeti, düz uçuş aşamalarında azalmaya eğilimlidir. Türbin, kompresör ve yanma odası için ekserji yıkım maliyetleri sırasıyla 2.85 \$/saat ile 6.2 \$/saat, 10 \$/saat ile 14.06 \$/saat ve 33.16 \$/saat ile 77.02 \$/saat değerleri arasında

değişmektedir. Bu durumda, yanma odasının ekserji yıkım maliyetinin düşürülebilmesi ile, motorun ekserji maliyetinin azalacağını kanıtlar.

Bileşenler arasındaki izafi maliyet farkı, farklı uçuş aşamalarında farklı desenler sergiler. Türbin, yanma odası ve kompresör için izafi maliyet farkı ortalama değerleri sırasıyla %102.86, %67.89 ve %41.47 değerlerindedir. En düşük izafi maliyet farkına sahip uçuş noktalarında optimum ekserji maliyeti elde edilebilir.

Kompresör akışının birim maliyeti hem ürün hem de yakıt için her uçuş noktasında en düşük değerlere sahiptir. Aynı şekilde, yanma odası akışının birim maliyeti, düz uçuş-3 ve alçalma en yüksek değerlere sahiptir. Yakıt maliyeti için ortalama 94.09 \$/GJ, ürün maliyeti için yaklaşık 152.55 \$/GJ değeri hesaplanır.

Türbinin ekserjo-ekonomik faktörü, tüm uçuş aşamaları için en yüksek değerlere sahiptir. Yani, %86.71 ile %93.4 arasında değişir. Ancak, yanma odasının ekserjo-ekonomik faktörü en düşüktür ve %18.58 ile %42.28 arasında değişir. Motorun ekserji maliyetini azaltmak için düşük ekserjo-ekonomik faktöre sahip bileşenlere odaklanılmalıdır.

GTM için ekserjo-ekonomik faktörü tüm uçuş aşamaları için %50'den daha azdır. Minimum ve maksimum değerler alçalma aşamasında %13.21 ile yaklaşma aşamasında %38.26 değerleri arasında yer almaktadır. Ekserji yıkım maliyetinden kaynaklanan maliyetin ne kadar azaldığını gösteren faktör ne kadar yüksekse, o kadar iyidir. Motorun irtifa olarak yüksek bir seviyede çalışması, ekserji yıkımı maliyetini azaltmak için bir çözüm olabilir.

GTM'nin özgül itki maliyeti, uçuş noktalarına bağlı olarak 160.01 \$/saat.kN ile 455.86 \$/saat.kN arasında değişir. Ortalama *STC* değeri 264.75 \$/saat.kN olarak hesaplanmıştır. Motorun kısmi güçte çalıştığı düz uçuş-3 ve alçalma aşamalarında en yüksek özgül itki değerinin arttığı görülebilir.

2.5. Genişletilmiş Ekserji Analiz Metodu (EEA)

Ekserji yıkımı termodinamik açıdan saf bir gösterge olup, enerjetik olmayan dışsallıklar ve toksik etkiler gibi özelliklerin ölçümünü gerçekleştirmediğinden kirliliğe ait insan kaynaklı özgül etkiler hakkında bilgi verememektedir. Bunun için yakın zamanda Szargut tarafından ortaya konulan kümülatif ekserji içeriğinin aksine iş gücü, sermaye, çevresel maliyetler gibi materyal ve materyal olmayan enerji dengelerini ekserji şeklinde sunan ve ekolojik bir gösterge olan genişletilmiş ekserji analiz metodu bir

ürünün ham maddeden geri dönüşüm sürecine kadar ki, doğal ve insan etkileşimindeki proseslerin değerlendirilmesinde geniş çapta önem kazanmıştır (Sciubba 2009).

Szargut tarafından 20 yıl evvel önerilen kümülatif ekserji tüketim yönteminin kapsamlı bir uzantısı olarak enerjetik olmayan (anapara, iş gücü, çevresel) dışsallıkları da içeren genişletilmiş ekserji termo-ekonomik yöntemler ile saptanması oldukça zor olan çevresel dışsallıkları belirgin bir şekilde tanımlayabildiğinden dolayı incelenen sistem hakkında bilinen ekserji ve ısı ekonomik analizlerden daha iyi bir yaklaşım göstermektedir (Sciubba, 2003)

“EEA termodinamiğin ekserji konseptine, üretim faktörleri sermayesine, iş gücüne ve maliyetine dayalı olmakla beraber aynı zamanda çevresel maliyetleri de göz önünde bulundurmaktadır. Bu sebeple EEA kimyasal ve enerji değişimlerinin performansını incelemek için çok boyutlu bir gösterge olarak kullanılabilir.” Ptasinski vd. (2006)

“EEA iş gücü sahası, ekonomik sistemler, farklı dağıtım zincirlerinin CE_xC yöntemine dayalı genel bir maliyet teorisidir. Bunun yanında sermaye, işgücü ve çevresel iyileştirmeleri gibi dışsallıkları kümülatif ekserji maliyetlerine dönüştüren ve böylelikle hem geniş çaplı bir kaynak üretim ağının termodinamik verilerini hem de toplum veya sistem içerisinde mevcut olan gizli kaynak maliyetlerinin değerlendirilmesinde kullanılan tek metottur.”

“Analizler çerçevesinde dışsallıkların eşdeğerlik ekserji maliyeti zamana ve toplum tipinin dışsallıklarına bağlı olduğundan (genişletilmiş ekserji maliyeti) eec hem teknolojik sistemlerin termodinamik verimlerine hem de belirli bir toplum yapısının dönüşüm verimlerinde gerçek bir sonuca ulaşmada yardımcı olur”

“EEA metodu sadece materyal içeriklerini ve enerji akışlarını dönüştürmekle kalmaz aynı zamanda iş gücü, maliyetler, çevresel iyileştirmeler, gibi dışsallıkları eşdeğer birincil ekserji akışlarına dönüştürerek sistem ve çevresi arasındaki bütün değişimleri termodinamik bir zeminde sunar”.

“Mevcut karar vericiler ve kamuoyunun genel görüşü sürdürülebilirliğin sistem analizi incelenmesinde bir ihtiyaç olduğunu ve ekserjinin hem global hem de lokal analiz metotlarından gelişmesi açısından gerçek ve uyumlu bir temel olduğu görüşündedirler. Bu görüşlerin uygunluğuna ek olarak EEA metodu yaşam döngüsü ve beşikten-mezara uygulamalarının daha uygun bir şekilde gerçekleştirilebileceği belirli ve özgün özelliklere sahiptir.” Rocco vd. (2014)

2.5.1. EEA yönteminin swot analizi

Belli ve Sciubba (2007) gerçekleştirdikleri EEA yönteminin swot analizini şu şekilde sunmuşlardır.

2.5.1.1. EEA metodunun güçlü yönleri

- EEA metodunun en önemli avantajlı analizini gerçekleştirdiği sistemlerde ekonomik içerikli durumlardan bağımsız olmasıdır. Fiziksel özelliklere bağlı genişletilmiş ekserji (kJ) ile parasal esaslı birimler (€, £ .vb) çok boyutlu farklı üretim faktörlerinin sermaye, enerji, materyal, iş gücü benzetimi gibi bir yapı oluşturmasını sağlar.
- EEA çevresel iyileştirme maliyetlerinin hesaplanmasında doğal ve doğru temelde sonuçlar verirken parasal metotlarda ise bu imkân dahilinde değildir.
- EEA yöntemi ekonomik içerikten bağımsız olduğu için farklı çevre sınır şartları altında çalışan sistemlerin “hemen hemen eşdeğerlilik” bağlamında ve doğrudan karşılaştırılması yapılabilmektedir. Bu durum herhangi bir parasal yöntemin kullanıldığı ısı ekonomik analizlerinde uygulanması mümkün değildir.
- Bir kaynağın boyutsal homojenliği (kJ, cost) materyal olmayan taşınmazları hizmetler, hükümet, eğitim, sağlık, bakımı gibi, üretir ve aynı zamanda benzer hizmetleri sunan sistemler arasında doğrudan bir karşılaştırmaya olanak sağlar
- Ekserji temelli olması ve maliyetinin kJ birim ile ifade edilmesinin aksine, EEA hem enerji üretimi faktörünün ağırlıklı olduğu kimyasal prosesler, enerji çevrim sistemleri gibi sistemlerde hem de enerji üretim faktörlerinin yer aldığı eğitim, enformasyon sistemleri ve yönetim gibi sosyal sistemlerde de uygulanabilmektedir.
- Şayet yeterli sayıda materyal ve farklı tipteki iş gücü için uygun bir veri tabanı temin edilebilir ise, bir EEA analizini gerçekleştirmek hesaplanması zor olmayan oldukça basit bir hal alır.
- Her dahili dengede olan analitik paradigmlar için, EEA yöntemi karmaşıklık ölçüsünde doğruluk derecesini artırır.
- Enerji yoğunluğu, karmaşık bir sistemin aracından oldukça düşüktür. Bu da sermaye, işgücü, materyal ve çevresel iyileştirme faktörlerine nazara enerji üretim faktörünü ihmal edilebilir hale getirmektedir.
- Farklı ekonomik ve sosyal sınır şartları altında çalışan farklı ürünlerin benzer sistemlerde üretilen farklı ürünleri ve farklı çevre şartlarında bulunan benzer sistemleri aynı ürünler arasında doğrudan bir karşılaştırma yapılmasına olanak sağlar.

2.5.1.2. *EEA metodunun kısıtlı yönleri*

- *EEA* metodunu almamı sonuçlar üretebilmesi için her üretim zincirinde kullanılan bütün materyallerin CE_xC analizine ait düzgün biri veri tabanının mevcut olması gerekmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken husus şudur ki; ürünün değerinin parasal bağlardan bağımsız olduğu ve ancak teknolojik zincirinin evveline bağlı olduğudur.
- EEC ve EE_L faktörlerinin iki global sistem verisinin (M_2 ve $E_{xnet,in}$) temeli doğrultusunda hesaplamasıdır ki hali hazırda bir toplum için mevcut olmaması yanında, geniş çaplı karakteristik yüksek değerde doğruluk vermen toplumlarda yöresel ölçekteki hesaplamalar için bile verilerin elde edilememesidir.
- İşgücünün E_xE eşdeğerlilik değeri farklı çalışma sahalarındaki çalışanların katkısıyla elde edilen verilerin yeterli derecede kesin değerler olmayıp, yığınsal verilerden elde edilen yaklaşık değerlerdir.
- Bütün karmaşık sistemlerin değerlendirilmesinde kullanılan metotlar gibi *EEA* metodunun doğumu derecesi, analizin gerçekleştirildiği sistem üzerindeki verilerin yığınsal içerikten uzak durması ölçüde değer kazanır
- *EEA* bir eniyileme aracı değildir. Hassasiyet çalışmaları üzerinde uygulanabilir olmasına rağmen, verilen bir ürünü oluşturmak için gereken “mineral kaynak tüketiminin tanımlanması için genel bir metot bulunmamaktadır. Çünkü, *EEA* yöntemi üretim sistemi yapısındaki hesaplamalarında bariz basitlik sonucunda hafifçe farklı bir üretim hattı, aynı ürünleri büyük çaptaki farklı bir ekserjo-ekonomik maliyeti ile üretebilir.
- *EEA* metodunun güvenilir ve evrensel geçerlilik kazanabilmesi için özgül üretim zincirlerinin kesin ve geniş çaptaki çalışmaları içeren yeterli bir veri tabanı oluşturmak gereklidir. CE_xC ve *EEA* arasında benzerlik bulunmaktadır. Ne derecede sistem analizleri mevcutsa o derecede art arda gelen analiz yöntemleri kesinlik değeri kazanır.

EEA yöntemi kendinden önce ortaya atılan diğer ve metotlar ile bir konsept haline gelerek diğer metotlar ile olan benzerlik ve farklılıkları şu şekildedir Sciubba vd. (2008);

- *LCA* sayesinde *EEA* bir ürünün hammaddeden atık olarak geri dönüşümüne kadar ki bütün süreçlerde yaşam döngüsü yaklaşımına edindiği,
- Geleneksel ekserji analizinde olduğu gibi, *EEA* bir proste dolaylı ya da dolaysız olarak kullanılan her materyal veya materyal olmayan enerji içeriğinin bir ölçüsü olarak ekserji kullandığı,
- *CE_xC* metodunda olduğu gibi, *EEA* bir üretim zincirindeki bütün ekserji girdi ve çıktıların izini takip ederek ürünün barındırdığı ekserji miktarını hesapladığı,
- Embodied ekserji analizinden *EEA* metodu çevresel dışsallıkların iyileştirme yöntemini kullandığı,
- Emergy analizinden ise *EEA* kaynak esaslı bir maliyeti iş gücü, sermaye gibi dışsal üretim faktörlerine katkılarını içeren yöntemin kullandığı bir konseptir.

EEA ile elde edilen yararlı sonuçlar şunlardır;

- Farklı ve göreceli prosesler arasındaki ekserji akışlarını bölüştürür.
- Üretim ürünlerinin ekserji maliyetlerini hesaplar.
- Sisteme ait birincil ekserji dönüşümüne ait verileri global ölçekte bir dizi indikatörler ile ortaya çıkarır.

EEA yöntemine ait genel ekserji dengesi aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$CE_xC_M + Ex_{PHY} + EE_L + EE_C + EE_{ENV} = EE_P \quad (2.83)$$

Bu denklemde yer alan $\dot{Ex}_{PHY}$ ısı, kinetik enerji, mekanik, elektriksel yükler ve kimyasal enerji gibi enerji akışlarının ekserjisini, CE_xC_M fiziksel ve kimyasal ekserjiler de dahil olmak üzere güç üretiminde yararlanılan materyallerin ekserji içeriklerini, $\dot{E}_L$ işgücüne ait eşdeğer genişletilmiş ekserji içeriğini, $\dot{E}_C$ güç biriminin ilk yatırım maliyeti, çalışma, bakım ve sigorta maliyetlerini kapsayan maliyet akışına ait eşdeğer genişletilmiş ekserji içeriğini ve $\dot{E}_{ENV}$ ise sistem çıktısı olan CO_x , NO_x , SO_x , partikül madde vb. kirletici ve zararlı atıkların ölü çevre ile denge haline gelmesini ifade eden çevresel iyileştirmenin eşdeğer ekserji içeriğini, EE_P ise sistemde elde edilen ürünün genişletilmiş ekserjisi olarak ifade etmektedir. Genişletilmiş ekserji verimi ise;

$$EEA_{eff} = \frac{\sum EE_{çıktı}}{\sum EE_{girdi}} = \frac{\sum_{çıktı} E_M + E_{PHY} + EE_C + EE_L}{\sum_{girdi} E_M + E_{PHY} + EE_C + EE_L + EE_{ENV}} \quad (2.84)$$

şeklindedir. Bu denklem jet motoru analizini gerçekleştirdiğimiz uçak motoru için;

$$EEA_{eff} = \frac{\sum EE_{çıktı}}{\sum EE_{girdi}} = \frac{\sum_{çıktı} E_{yararlı iş}}{\sum_{girdi} E_M + E_{PHY} + EE_C + EE_L + EE_{ENV}} \quad (2.85)$$

şeklindedir. Bu noktada incelenen uçak motoru hiç bir gelir getirisi sağlamaksızın incelenmektedir. Sonuçlarda da aktarılacağı üzere gelir getirisi sağlaması durumunda denklemin payına gelir maliyetine eşdeğer miktardaki ekserjetik akım karşılığının $EE_{C, jet motoru gelir getirisi}$ şeklinde eklenmesi gerekmektedir.

2.5.2. Kümülatif ekserji tüketimi akışı (CE_xC)

Szargut CE_xC endeksini birim ürün başına, mevcut sistemdeki üretim prosesi zincirinin bütün bağlantılarına gönderilen doğal kaynakların ekserji değerlerinin toplamı şeklinde tanımlamıştır. Her prosesin ürünlerine ait CE_xC değeri tamamlanmamış ürünlerin toplam CE_xC değeri ile çevreden elde edilen doğal kaynakların ekserji değerinin toplamı olduğundan, CE_xC endeksi Szargut ve Morris tarafından sunulan denge denklemleri kullanılarak elde edilebilir Szargut (1987). Bir ürünün meydana gelebilmesi için gerekli olan toplam ekserji miktarı

$$CExC = \sum_i m_i Ex_{ch,i} + \sum_j n_j r_{(ex-e(k,p,n,r,t),j)} \quad (2.86)$$

şeklinde tanımlanmış olup $CExC_i$ bir ürün veya prosese ait birim kütle başına tüketilen kümülatif ekserji miktarını (MJ), m_i ise i.ci kaynak materyalin kütlesini (kg), $Ex_{ch,i}$ ise i.ci maddeye ait birim kütlesindeki kimyasal ekserji miktarını (MJ/kg), n_j ise j.ci enerji taşıyıcısından sağlanan enerji miktarını (MJ) ve kinetik, potansiyel, nükleer, radyokatif ve ısı enerji içeriklerini barındıran $r_{(ex-e(k,p,n,r,t),j)}$ ise j.ci enerji taşıyıcısına ait ekserji /enerji oranını (MJ/MJ) ifade etmektedir.

Doğal haldeki materyaller için (kömür, bakır cevheri vb) literatürde mevcut olan hesaplama yöntemine göre ekserji akımı değeri belirlenirken, son ürün eldesinde kullanılan enerji ve bileşene ait kümülatif ekserji tüketimi değeri ise enerji veya ekipmandaki materyal içeriğinin ham madde halinden ürün ekserji oluşumu sürecine kadar olan zincire ait ekserji değerlerinin saptanmasıyla elde edilir (Pu ve ark., 2010). Bu sebeple herhangi bir proses veya bileşene ait genel kümülatif ekserji tüketimi denkliği;

$$CExC_i = \sum_m CExC_{m,i} + \sum_e CExC_{e,i} + \sum_d CExC_{d,i} \quad (2.86)$$

şeklinde de yazılabilir. $CExC_i$ sistemdeki i bileşenine ait kümülatif ekserjisi, $CExC_{m,i}$, $CExC_{e,i}$ ve $CExC_{d,i}$ ise sırasıyla i bileşenin materyal, enerji ve ekipmanlara ait kümülatif ekserji akışlarının karşılığı olarak ifade edilebilir.

Üretim prosesi zincirindeki bağlantılarda gerçekleşen ekserji kayıpları belirleyebilmek için bileşenler arasındaki proseslerin ekserji dengesinden yola çıkarak kümülatif ekserji metodunu kullanan Szargut, $CExC$ analizinin temelini oluşturan çalışmasında altı önemli sonuçlar ortaya koymuştur. Bu sonuçlar şu şekildedir:

- Genişletilmiş bir $CExC$ analizi üretim proseslerinin bütün zincirlerindeki eksiklikler üzerinde belirli bağlantıların tesiri hakkında önemli bilgi sağlamaktadır.
- $CExC$ metodu, sadece üretimi tamamlanmamış ürünlerin üretimini içeren ardı-sıra şematik yapısı ve doğal kaynakların kazanımı yöntemiyle analizi gerçekleştirilebilmektedir.
- Ardı-sıra şemasındaki bütün bileşen proseslerini dikkate almak mümkün olmadığından $CExC$ kayıplarının yardımcı prosesler (hammadde kazanımı, tamamlanmamış ürünün taşınımı vb.) ile bağlantısı temin edilip tahmini bir değer vermek kaçınılmazdır.
- $CExC$ metodunun analizi 3 aşamada gerçekleştirilmelidir. 1. aşamada üretim prosesleri zincirindeki bütün bağlantılarda tamamlanmamış olan ürünler ve hammaddelerin tüketimi belirlenmelidir ki bu aşamadaki hesaplama yöntemi üretim prosesleri zincirindeki son bağlantı ile başlanır. 2. aşamada hammaddelerin kazanımı olan ilk bağlantının $CExC$ indisleri hesaplanır. 3. aşamada ise ekserji kayıpları ve kümülatif ekserjinin veriminin ifadesi olan CDP (cumulative degree of perfection) değeri belirlenir.
- CDP'yi değerlendirebilmek için ekserji analizi şarttır. $CExC$ yönteminde ise en önemli parametre kimyasal ekserji olup kimyasal ekserji değerleri ele alınan materyalin kimyasal kompozisyonu ile bu materyale içerik bakımından çevrede en çok bileşeni barındıran kimyasal kompozisyonların karşılaştırılması ile elde edilir.
- $CExC$ analizinin sonuçları hammaddelerine, tamamlanmamış ürünlerine veya üretim prosesleri zincirinden mümkün olduğunca ihmal edilmesi gereken enerji taşıyıcılarına, üretim proseslerinin bütün zincirindeki eksiklikler üzerinde dezavantajlı etkisinden dolayı, işaret eder.

Sistem sınırlarındaki ekserji akışlarının kümülatif ekserji akışlarının yönüne ve içeriğine önemli bir etki oluşturması sebebiyle sistem sınırlarının seçimi dikkat arz etmektedir. Bu tezde sistem sınırları olarak TRS-18 gaz türbinli motorunun farazi bir uçuşu ele alınmaktadır. TRS-18 motorunun kuru ağırlığı 38 kg olup ekipman prosesi yani, motor bileşenlerini oluşturan materyallerin cevher madeninden ayrıştırılmasından itibaren materyallerin saflaştırılması için ısıtılma maruz kalması, materyaldeki atıkların ayrıştırılıp saflaştırılması ve rafine edilmesi, materyallerin yer alacağı bileşenler için kalıplandırılması ve nihai bileşende yer alması süreçlerindeki enerji ve materyal ekserji akışlarının motorun son haldeki materyal ekserjisi değeri yanında oldukça küçük bir değerde olduğu, Feng vd., (2012)'leri tarafından ısı değiştirici üretimi prosesi üzerinden gerçekleştirdikleri kümülatif ekserji tüketimi analiz çalışmalarının sonucunda makineleştirme prosesini içeren ekipman ekserji değerlerinin oldukça küçük bir değerde olduğunu göstermelerine dayanarak ekipmanlar için kümülatif ekserjiler bu çalışmada ihmal edilerek sadece TRS-18 motorunun materyal içeriği, motorun bileşenler ve çevre arasındaki enerji etkileşimine vurgu yapılmıştır. Ek olarak, Pu vd. (2012)'leri tarafından ekipmanın kümülatif ekserji değeri için, ekipmana ait her yapısal parçanın kümülatif ekserji değerleri oranı ile ekipmanların oluşturduğu sistemin kümülatif ekserjisi oranının, ekipman maliyet oranı (C_{di}) ile sistemin gerçek maliyeti (C) arasındaki orantıya denk olduğunu Denklem 2.80'deki bağıntıyı kullanarak iterasyon ile gerçek değere nasıl ulaşılabilirliğini göstermişlerdir.

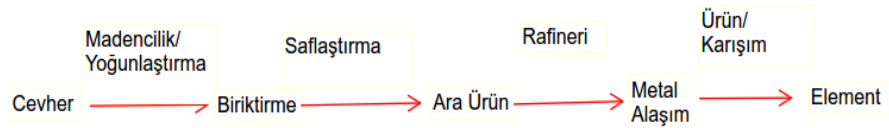
$$E_{n+1} = E_0 + \frac{\sum_i \xi_i + \sum_i C_{d,i}}{C} \quad (2.86)$$

Bağıntıda yer alan n iterasyon sayısı, ξ ekipmana ait taşımacılık, bakım ve onarım, kurulum endeksini ifade etmek üzere ilgili çalışmadaki ısı değiştiricisi için katsayı $\sum_i \xi_i = 3.5$ değerindedir.

2.5.3. Kümülatif enerji arzı (CED)

Motorun materyal kaynaklı ekserji girdilerini ifade eden genel kümülatif ekserji denkleminin birinci ifadesi olan $\sum_m CExC_{m,i}$ kısmı için motorun elde edilmesi için gereken bütün materyallerin üretim hattı boyunca ürün olarak meydana gelme süreçlerindeki enerji etkileşimlerinden elde edilmektedir (Şekil 2.33). Kaynaktan ürün

elde etme süreçleri içerisindeki en önemli enerji kaynağının elektrik enerjisi olduğu anlaşılmaktadır. Materyal ekserji değeri için literatürde uçak motoru yapımında kullanılan materyallerin çeşitliliği göz önüne alındığında ayrı bir tez çalışması gerektireceği ve engin bir veri havuzuna ihtiyaç duyulduğu açıktır. Bu sebep ile her materyale ait üretim hattı boyunca bütün üretim zinciri hattının zaten en önemli enerji kaynağı olan %2 petrol, %34 kömür, %32 doğalgaz ve %32 yenilenebilir enerji (Eurostat, 1998) kaynaklarından elde edilen elektriğin kümülatif üretim hattı boyunca temel enerji kaynağı olduğu varsayımı ile gerçekleştirilmektedir. Bu sebeple kümülatif materyal ekserjisinin toplam değeri, yaşam döngü analizlerinde kullanılan kümülatif enerji arzı değeri ile gerçekte bir eşitsizlik olduğu halde denklik içerisinde sunulacaktır. Bunun için Nuss vd., (2004) tarafından metaller için elde etmiş oldukları Tablo 2.10.'da verilen CED değerlerinden yararlanılarak Tablo 2.11 ve Tablo 2.12'de görüldüğü üzere materyal tüketimi ve bileşenler arasındaki dağılımı hakkında bir yaklaşım elde edilmiştir.



Şekil 2.33. Gaz türbinli motorun üretim aşamaları

Tablo 2.10. Metallere ait birim kütleyle karşılık gelen kümülatif enerji arzı değerleri (MJ_{eq}/kg), (Nuss vd., 2014)

Element	CED (MJ _{eq} /kg)
Cr	40.2
Ni	111
Co	128
Fe	23.1
W	133
Mo	117
Ti	115
Al	131
Cd	53
V	516
C	0.001
B	27.3
Ta	4360
Mn	23.7
Zr	19.9
Nb	172
Cu	53.7

Tablo 2.11. *Alaşımlarda mevcut olan her metal elementi için gerekli olan kümülatif enerji arzı değerleri*

BİLEŞEN - PARÇA, ALAŞIM	CED (MJ/kg)	Ref.
Kompresör - Kompresör Palleri-I, Ti-6Al-4V	203.63	Sjöberg 2008
Kompresör - Kompresör Palleri-II, GTD-450	183.09	Viswanathan vd., (2003)
Kompresör - Kompresör Wheel, Cr-Mo-V	226.79	Schilke vd., (1991)
Kompresör - Kompresör Palleri-III, AISI 403	201.40	Schilke vd., (1991)
Türbin - Bucket Stationary Shroud-I, RENE 77 (U700)	18.97	Schilke vd., (1991)
Türbin - Nozul Guide Palleri-I, GTD 222	16.33	Mouritz 2012
Türbin - Türbin Palleri-I, TiAl	37.65	Viswanathan vd., (2003)
Türbin - Türbin Palleri-II, RENE N5	16.51	Muktinutalapati (2011)
Türbin - Türbin Wheel-I, ALLOY 718	19.84	Viswanathan vd., (2003)
Türbin - Bucket Stationary Shroud-II, IN-738 LC	15.93	Muktinutalapati (2011)
Türbin - Nozul Kaplamaları, CoCrAlY(Amdry 920)	27.69	Viswanathan vd., (2003)
Türbin - Türbin Wheel-II, A286	29.97	Schilke vd., (1991)
Türbin - Türbin Rings, EI 481	159.92	Čerňan vd., (2016)
Türbin - Pal Alaşımları, INCONEL-X750	14.70	Mouritz 2012
Türbin - Nozul Guide Palleri-II, IN 738 LC	15.78	Mouritz 2012
Yanma Odası - Kıvılcım Tubleri, EI435	88.01	Čerňan vd., (2016)
Yanma Odası - Yanma Odası Hatları, HASTELLOY X	110.75	Mouritz 2012
Yanma Odası - Yanma Odası Çeperleri, NIMONIC-C263	115.82	Schilke vd., (1991)
Yanma Odası - Egzos Nozulu, FSX 414	107.11	Schilke vd., (1991)
Yanma Odası - Egzos Konisi, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	182.67	Okura 2015
Diğer - Kaplamalar, Ti3Al	303.83	Mouritz 2012
Diğer - Nacelle, Ti-5Al-2Zr-2Sn-4Cr-4Mo	320.91	Mouritz 2012
Diğer - Ducts, Nacelle ve Çevresi, TiAl	315.29	Mouritz 2012
Diğer - Şaft, Cr-Mo-V	368.39	Schilke vd., (1991)
Diğer - Aksesuarlar, Diğer	508.85	Viswanathan vd., (2003)
GTE	3609.82	

Tablo 2.12. *Alaşımların yer aldığı bileşenlerin GTM içerisindeki toplam kümülatif enerji arzı değerleri*

MATERYAL	KOMPRESÖR	YANMA ODASI	TÜRBİN	DİĞER	GTM
Cr	20.41	28.41	49.78	14.65	113.26
Ni	13.44	169.58	370.75	1.61	555.37
Co	0.00	71.74	117.45	0.00	189.20
Fe	107.79	0.74	25.33	74.67	208.52
W	0.00	8.29	11.91	15.39	35.59
Mo	4.27	13.34	14.90	34.69	67.20
Ti	184.36	79.05	64.62	727.69	1055.72
Al	14.00	8.36	56.35	341.06	419.77
Cd	0.00	0.00	1.98	3.07	5.05
V	39.06	0.00	6.63	421.68	467.37
C	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B	0.00	0.00	0.57	0.00	0.57
Ta	0.00	0.00	310.46	0.00	310.46
Mn	0.00	0.27	1.47	1.37	3.11
Zr	0.00	0.60	0.02	2.30	2.93
Nb	0.00	0.00	10.63	77.12	87.75
Cu	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CED (MJ)	383.34	380.39	1042.86	1715.29	3521.88

Ek olarak Szargut vd. (2005) tarafından sunulan her bir metalin standart kimyasal ekserji değerinin yer aldığı Tablo 2.13 ile verilen değerler yardımıyla bileşenlere ait olan kütleli ölçekteki özgül ekserji karşılıkları Tablo 2.14’ de yer almaktadır.

Tablo 2.13. GTM için kullanılan metallerin standart kimyasal ekserji değerleri

Metal	Cr	Ni	Co	Fe	W	Mo	Ti	Al	Cd
Özgöl Ekserji (MJ/kg)	11.24	4.13	5.29	6.70	4.50	7.61	18.95	32.92	2.65
Metal	V	C	B	Ta	Mn	Zr	Nb	Cu	
Özgöl Ekserji (MJ/kg)	14.14	34.16	58.14	5.38	8.77	11.88	9.68	2.09	

Tablo 2.14. GTM bileşenleri için kullanılan materyallerin standart kimyasal ekserji değerleri

BİLEŞEN	KOMPRESÖR	YANMA ODASI	TÜRBİN	DİĞER	GTM
Cr	5.70	7.94	13.92	4.10	31.66
Ni	0.50	6.31	13.80	0.06	20.67
Co	0.00	2.97	4.86	0.00	7.83
Fe	31.27	0.21	7.35	21.66	60.50
W	0.00	0.28	0.40	0.52	1.20
Mo	0.28	0.87	0.97	2.26	4.37
Ti	30.38	13.03	10.65	119.93	173.99
Al	3.52	2.10	14.16	85.70	105.48
Cd	0.00	0.00	0.10	0.15	0.25
V	1.07	0.00	0.18	11.56	12.81
C	0.27	0.12	0.22	0.41	1.02
B	0.00	0.00	1.21	0.00	1.21
Ta	0.00	0.00	0.38	0.00	0.38
Mn	0.00	0.10	0.54	0.51	1.15
Zr	0.00	0.36	0.01	1.37	1.75
Nb	0.00	0.00	0.60	4.34	4.94
Cu	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Özgöl Ekserji (MJ)	73.00	34.30	69.35	252.57	429.22

Materyal içerikleri bakımından kümülatif ekserji tüketiminin toplamı CE_xC , materyallerin üretilmesi için gerekli olan enerjinin ekserjetik karşılığı olarak kabul ettiğimiz bileşenlerde yer alan materyallerin toplam özgül ekserji karşılıklarının yer aldığı değerlerinin toplamını ifade etmektedir.

Uçak motorunun üretim aşamasındaki 33.46 kg’lık kütesine karşılık toplam kümülatif enerji tüketim miktarı 3951.1 MJ olarak elde edilmiştir.

2.5.4. Fiziksel ekserji akışları (EE_{phy})

Bu bölümde uçak motorunun bileşenleri ve iş akışkanı arasındaki etkileşimlerden dolayı ortaya çıkan fiziksel ekserji akışları hava, yakıt tüketimi ve komponentler arasından etkileşimlerden kaynaklanan ekserji akışı transferleri incelenecektir. Motor için her evresi eşit sürelerle ayrılmış olan yıllık toplam 250 saatlik uçuş boyunca tüketilen yakıt miktarının toplam ekserjetik karşılığının belirlenmesi gerekmektedir. $C_{12}H_{23}$ yakıtı için özgül düşük ısı değeri (LHV) değeri 42800 kJ/kg olup düşük ısı değeri ile ilgili olan β_{LHV} katsayısının 1.0677 olarak daha önce hesaplanmış olup, yakıta ait standart kimyasal ekserji değeri Szargut ve ark. (1988) tarafından sunulan denklem aracılığıyla 45697.56 kJ/kg olarak elde edilir.

$$e_{ch}^0 = \beta_{LHV} \times LHV \quad (2.89)$$

GTM'nin yıllık 250 saatlik uçuşu boyunca gerçekleştirmiş olduğu yakıt tüketiminin uçuş evrelerine göre toplam ekserji değeri ile gerçekleşen ekserji yıkımı değerleri Tablo 2.15'te elde edilmiştir. Hava için yıllık tüketimine ait toplam ekserji tüketim miktarı ise 178,913.23 MJ olarak elde edilmiştir. Unutulmamalıdır ki hava ve yakıt aynı zamanda kümülatif ekserji tüketimi denklemi içerisinde yer alan materyal akışları içerisinde de yer almaktadırlar. Farklı olarak, operasyonel faaliyeti sırasındaki fiziksel etkileşimlerde bulunmasından dolayı fiziksel ekserji akışları içerisinde yer alırlar. Hava ve yakıt için yıllık toplamdaki fiziksel ekserji akışları $EE_{phy,hava} = 178,913.23$ MJ ve $EE_{phy,yakıt} = 640,782.23$ MJ şeklindedir.

Tablo 2.15. GTM motorun yıllık 250 saatlik uçuşu boyunca yakıt ve hava tüketiminin ekserjetik eşdeğeri.

Uçuş Fazı	Yakıt Miktarı (kg/s)	Yıllık Yakıt Ekserjisi (MJ)	Yıllık Yakıt Ekserji Yıkımı (MJ)	$EE_{phy,yakıt}$ (MJ)	Hava Miktarı (kg/s)	$EE_{phy,hava}$ (MJ)	EE_{phy}
Taksi	0.04	166796.09	64097.27	102698.82	2.52	30736.39	71962.43
Kalkış	0.04	159941.46	58980.86	100960.60	2.54	31084.13	69876.47
Tırmanma	0.02	113329.95	36947.36	76382.59	1.56	19517.08	56865.51
Düz uçuş-1	0.02	89110.24	27720.48	61389.76	1.11	14129.64	47260.12
Düz uçuş-2	0.02	85911.41	25464.97	60446.44	1.08	13962.96	46483.48
Düz uçuş-3	0.01	57121.95	28057.67	29064.28	0.97	9321.00	19743.27
Alçalma	0.02	82255.61	53244.51	29011.10	1.01	9450.24	19560.85
Yaklaşma	0.02	102819.51	24020.04	78799.47	1.61	20134.47	58665.00
İniş	0.04	168167.02	66137.85	102029.17	2.50	30577.31	71451.86
Toplam	0.22	1025453.2	384671.01	640782.23	14.87	178913.23	461869.0

EEA metodu çerçevesinde E_{phy} parametresinin karşılığı olarak, uçak motoru ve bileşenleri arasındaki fiziksel ekserji akışlarının ekserjetik karşılıkları incelenmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken unsur, kompresör bileşeninin çalışması için gereken enerjiyi yanma sonu elde edilen enerjinin aktarıldığı türbinden aktarılan güç ile sağlamasıdır. Aktarılan bu enerji ile kompresör dış ortamdan alınan hava akışkanı veya materyalinin yanmaya hazır hale getirilmesi için gereken kümülatif fiziksel ekserji karşılığının, dış ortamdan alınan hava miktarının ekserjetik karşılığına eşit olduğu anlamına gelmektedir.

2.5.5. İşgücünün ekserjetik eşdeğerliliği ve ekonometrik faktörler (EE_L)

L bir yıl için çalışma süreleri ve ee_L ise (MJ/çalışma süresi) işgücünün genişletilmiş ekserji maliyeti olmak üzere sisteme ait işgücü akısının genişletilmiş ekserji içeriği (Seçkin, 2016; Sciubba, 2011);

$$EE_L = L ee_L \quad (2.90)$$

şeklindedir. İşgücünün genişletilmiş ekserji maliyeti ise (Jawad ve ark., 2015);

$$ee_L = \frac{\alpha Ex_{giren}}{N_{wh}} \quad (2.91)$$

olup birincil ekonomik faktör olarak da tanımlanan α işgücü içerisinde barınan birincil ekserjinin bir kısmını, Ex_{in} (MJ/yıl) toplumdaki bütün ekserji akıları girdisini, N_{wh} ise çalışma saatlerinin ardışık sayı miktarını ifade etmekte olup α ;

$$\alpha = \frac{Ex_{kullanilan}}{Ex_{giren}} \quad (2.92)$$

şeklinde hesaplanır. $Ex_{kullanilan}$ (MJ/yıl) ise toplumun hayatta kalabilmesi için milli çapta yararlanmakta olduğu ekserji miktarını ifade etmekte olup aşağıdaki şekilde hesaplanır (Aghbashlo ve ark., 2018);

$$Ex_{kullanilan} = 365 f ex_{surv} N_h \quad (2.93)$$

Bu denklemde yer alan ex_{surv} (1.05×10^7 J/kişi x gün) yaşamak için gerekli olan ekserji tüketim miktarını, N_h nüfus sayısını, f ise topluma ait eğitim, zenginlik, yaşam boyu beklentileri vb. bir dizi istatistiksel kompozisyonu ifade eden insani gelişim

endeksinden (human development index, HDI) türetilerek elde edilen ekserji tüketimi amplifikasyon faktörü olup (Sciubba, 2011);

$$f_{TR} = \frac{HDI}{HDI_0} = \frac{0.792}{0.055} = 14.50 \quad (2.94)$$

Türkiye için 14.50 değerindedir. HDI_0 , ilkel bir topluma ait medeni gelişim endeksi olup 0.055 değerine haizdir. HDI değeri Türkiye için 2006 yılında 0.798 değerindedir (Seçkin ve ark. 2012). Son 5 denklemini kullanarak işgücünün ekserjetik eşdeğerini aşağıdaki şekilde yazabiliriz.

$$ee_L = \frac{365 HDI ex_{sur} N_h}{HDI_0 N_{wh}} \quad (2.95)$$

Yatırım akışlarına yönelik genişletilmiş ekserji maliyeti (ee_c) ise (Sciubba, 2011);

$$ee_c = \frac{\alpha \beta E_{Xgiren}}{M_2 - S} \quad (2.96)$$

şeklindedir. İkincil ekonomik faktör olarak adlandırılan β özellikle finansal aktivitelerin neticesinde elde edilen servet yığılmasını, M_2 (\$/yıl) toplam para miktarını ve S (\$/yıl) ise toplumdaki maaşların ve harcamaların parasal karşılık değerini göstermekte olup;

$$\beta = \frac{M_2 - S}{S} \quad (2.97)$$

olarak ifade edilir (Sciubba, 2011). Elde edilen α ve β değerlerinin ee_c denkleminde kullanılmasıyla;

$$ee_c = \frac{Ex_{kullanılan}}{S} = \frac{365 f ex_{sur} N_h}{S} = \frac{365 HDI ex_{sur} N_h}{HDI_0 S} \quad (2.98)$$

elde edilir.

2.5.5.1. Hesaplamalar

Türkiye için işgücüne ait yukarıda verilen ekonomik faktörler denklemlerinin çözümlenmesi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çözümlemeler ve gerekli olan ekonomik faktör ve parametreler (Tablo 2.16) referans olarak değerlendirilmiştir.

$$Ex_{kullanılan} = 365 f ex_{surv} N_h$$

$$= 365 \left(\frac{\text{gün}}{\text{yıl}} \right) \times 0.792 \times 1.05 \times 10^7 \left(\frac{J}{\text{kişi.gün}} \right) \times 78259264 \text{ kişi}$$

$$Ex_{kullanılan} = 4.31897E + 15 \text{ MJ} \quad (2.99)$$

$$\alpha = \frac{Ex_{kullanılan}}{Ex_{giren}} = \frac{4.31897E + 15}{1,941 \times 10^9} = 0.0054 \quad (2.100)$$

$$\beta = \frac{M_2 - S}{S} = \frac{208,2 \times 10^9 - 170,78 \times 10^9}{170,78 \times 10^9} = 0.219 \quad (2.101)$$

$$ee_L = \frac{365 \text{ HDI } ex_{sur} N_h}{\text{HDI}_0 N_{wh}} = \frac{Ex_{kullanılan}}{N_{wh}} = \frac{4.31897E + 15 \text{ MJ}}{2,83 \times 10^{10} wh} \quad (2.102)$$

$$ee_L = 153,95 \frac{MJ}{wh}$$

$$ee_c = \frac{Ex_{kullanılan}}{S} = \frac{4.31897E + 15 \text{ MJ}}{170,78 \times 10^9} = 25.48 \frac{MJ}{\$} \quad (2.103)$$

Tablo 2.16. Ekonomik faktörler ve bileşenleri, (Seçkin., 2013)

Ekonomik faktörler	Birimi	Değeri
E_{giren}	(TJ)	$1,941 \times 10^9$
HDI	-	0,798
HDI_0	-	0,055
f	-	14,51
$e_{surv.}$	(J/kişi.gün)	$1,05 \times 10^7$
M_2	(\$)	$208,2 \times 10^9$
S	(\$)	$170,78 \times 10^9$
N_{wh}	(saat)	$2,83 \times 10^{10}$
N_h	(kişi)	78259264
α	-	0,00224
β	-	0,219
ee_L	(MJ/Saat)	153,95
ee_c	(MJ/\$)	25,48

2.5.5.2. Gaz Türbinli Motorunun İşgücü Girdisinin Eşdeğeri (EE_L)

Türkiye çapında işgücü girdi değerinin ekserjetik karşılığına ait ekonomik faktörler elde edilmiş olup bu katsayılar yardımıyla sistem yani ülke sınırları içerisinde bulunan herhangi bir işgücü birimine karşılık gelen ekserjetik değerinin belirlenebilmesi için ilgili sistemin üretimi için gerekli olan işgücü mesaisinin doğru bir şekilde tespit edilebilmesi gerekmektedir.

Esasında işgücü mesai saatleri gaz türbinli motorların üretim yöntemleri, kullanılan teknikler ve materyaller hakkında önemli ipuçları vermesinden dolayı ticari sır olarak

erişimi oldukça güç bir veridir. Bu sebeple uçak motorlarının işgücü mesai süresi hakkında ışık tutabilecek veri, literatürde II. Dünya savaşı taraflarının jet uçağı geliştirme aşamasındaki rekabeti mücadelelerini konu alan Giffard (2013), pistonlu uçak motorlarının jet uçaklarına nazaran 2 ila 3 kat arasındaki daha kısa süre zarfında, kalifiye işgücü gözetmeden üretiminin gerçekleşebildiğini ve Jumo 213, Daimler-Benz 603, ile BMW 801 piston-prop uçaklarda kullanılan pistonlu motorlarının üretiminde gerekli olan toplam işgücü süresinin 3000 mesai saati olduğunu ifade etmektedir. Dünyanın ilk operasyonel olarak kullanılan ve seri üretimi gerçekleştirilen, yaklaşık olarak 100 kg'lık Jumo 0004 gaz türbinli jet motorunun üretimi için gerekli sürenin 375 saat (Christopher J., 2013), F35A savaş uçağının üretimi için gereken işgücü süresinin ise toplamda 47,000 saat olarak bilinmektedir (Rogoway T.,2023).

Verilen bilgiler ışığında 33.46 kg gibi bir kütleye sahip günümüz teknoloji ile üretilen gaz türbinli jet motoru için araştırma ve geliştirme faaliyetleri, test aşamaları, güvenlik testleri gibi standartların da eklenmesinden kaynaklı olarak tayin edilen mesai süresi için 2000 saatlik işgücü süresi dikkate alınmıştır.

Ham madde aşamasından, üretim zinciri ve son olarak iş elde edilmesi aşamasına kadar işgücü istihdamının toplam mesai saatinin 2000 saat olduğunu varsayarak GTM için işgücüne ait ekserjetik eşdeğeri Tablo 2.17'de görüldüğü üzere $L_{IG} = 307,900$ MJ değerindedir.

Tablo 2.17. GTM için ekserjetik işgücü eşdeğeri

Toplam mesai saatleri L_{IG} , (saat)	eeL , (MJ/saat)	GTM için ekserjetik işgücü eşdeğeri, $EE_{L,IG}$, (MJ)
2000	153.95	307,900

Yıllık uçuş süresi toplamda 250 saat olan GTM için operasyonel faaliyeti (OF) sırasında gereken işgücünün 1 pilot ve 1 kişilik teknik ekip olduğunu varsayarak GTM'un operasyonel faaliyette bulunabilmesi için 1 yılda gereken toplam mesai saati $L_{OF} = 79,975$ MJ olarak elde edilir (Tablo 2.18).

Tablo 2.18. GTM için ekserjetik işgücü eşdeğeri

Çalışan sayısı, (kişi)	Yıllık mesai saatleri L_{OF} , (saat)	eeL , (MJ/saat)	GTM için ekserjetik işgücü eşdeğeri, $EE_{L,OF}$, (MJ)
2	250	153.95	76,975

2.5.6. Gaz türbinli motorunun yatırım maliyetlerinin ekserjetik eşdeğeri (EE_C)

Gaz türbinli motora ait girdi ve çıktı maliyet değerleri literatürden alınan veriler ve ekserjoekonomik analizinde elde edilen sonuçlara dayalıdır. Maliyet içerisinde mevcut olan ekserji miktarını tespit edebilmek için gereken parasal akışların eşdeğer ekserjetik maliyeti değerini (eeC) 25.48 MJ/\$ olarak elde edilmişti. Gaz türbinli motoru ve bileşenlerine ait yatırım maliyetleri değerleri ile beraber eşdeğer ekserjetik maliyeti değerinin kullanılmasıyla elde edilen eşdeğer ekserjetik mali akış değerleri Tablo 2.19'da görülmektedir.

Tablo 2.19. TRS-18 motoruna ait elde edilen ekserjetik maliyet eşdeğer akışları

Bileşen	Yatırım Maliyeti (\$)	eeC (MJ/\$)	CIC eşdeğer ekserjetik değeri (MJ)
Kompresör	50000	25.4808	1274044
Yanma Odası	30000		764426.4
Türbin	50000		1274044
Diğer	10000		254808.8
GTM	140000		3567323

Maliyet akışlarındaki yatırım maliyetlerinin yıllık %10 faiz oranı ve 30 yıllık geri ödeme süresine bağlı bir kredilendirme ile gerçekleştirildiği farzedildiğinde, yıllık harcama miktarını ekserjoekonomi analizinde kullanılan referans olan, Bejan ve ark., (1996) tarafından literatüre sunulan metodu kullanarak maaş giderleri, sigorta ücretleri, yakıt harcamaları, bakım ve onarım için gerekli olan harcamalar (COM) dahil edildiğinde gaz türbinli motoru ve komponentleri için seviyelendirilmiş eşdeğer ekserjetik değerleri Tablo 2.20'deki gibidir.

Tablo 2.20. GTM ve komponentleri maliyetlerinin seviyelendirilmiş eşdeğer ekserjetik değerleri

Bileşen	Seviyelendirilmiş (CIC) ekserjetik eşdeğeri (MJ)	COM ekserjetik eşdeğeri (MJ)	(CIC+COM) seviyelendirilmiş ekserjetik eşdeğeri= EE_{GTM} (MJ)
Kompresör	135149.63	137204.74	154784.40
Yanma Odası	81089.78	82322.85	154784.40
Türbin	135149.63	137204.74	257974.01
Diğer	27009.73	27414.88	27826.10
GTM	378418.97	384147.21	595368.92

Yakıt tüketimine ait maliyet akışlarının ekserjetik eşdeğeri için ise yıl boyunca kullanılan yakıt ve toplam maliyetinin değerleri tespit edilmelidir. Bunun için birim kg fiyatı başına 0.65 \$/kg olan yakıtın 15 yıllık aynı rota ve menzil boyunca belirlenmiş olan uçuş profilindeki şartlar içerisinde kullanılması durumunda ortalama seviyelendirilmiş yıllık yakıt maliyeti ve kullanılan yakıtın yıllık maliyet akışlarının toplam ekserjetik eşdeğeri Tablo 2.21’de görüldüğü üzere 363234.61 MJ değerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Tablo 2.21. GTM tarafından gerçekleşen yıllık yakıt tüketimi maliyetine karşılık gelen ekserjetik eşdeğeri

Uçuş Fazı	Yakıt Miktarı kg/s	Yıllık yakıt kullanımı (kg)	EE_c (MJ/\$)	Seviyelendirilmiş ortalama yıllık yakıt maliyeti (\$/yıl)	Yıllık yakıt maliyetinin ekserjetik eşdeğeri $=EE_{Cyakıt}$ (MJ)
Taksi	0.04	3650	25.48	2318.69	59082.28
Kalkış	0.04	3500		2223.40	56654.24
Tırmanma	0.02	2480		1575.44	40143.57
Düz Uçuş-1	0.02	1950		1238.75	31564.50
Düz Uçuş-2	0.02	1880		1194.28	30431.42
Düz Uçuş-3	0.01	1250		794.07	20233.66
Alçalma	0.02	1800		1143.46	29136.47
Yaklaşma	0.02	2250		1429.33	36420.58
İniş	0.04	3680		2337.75	59567.89
TOPLAM	0.22	22440		14255.18	363234.61

Materyal üretimindeki temel enerji kaynağı olarak ele alınan elektrik enerjisinin kaynağı ise kömür, petrol, doğalgaz, rüzgar türbinleri ve nükleer enerjiler olarak sırasıyla; %34, %2, %32, %8 ve %24 oranlarında kullanılmasıyla elde edilmiştir (Tzilizakis vd., 2005).

Materyal tüketiminde kullanılmak üzere kullanılan enerji kaynaklarının üretim maliyetlerine ilişkin maliyet faktör değerleri yen para cinsinden (Agency for Natural Resources and Energy, (ANRE), 2011) referansından elde edilmiştir.

Verilen kaynaklardan elde edilmiş olan veriler Tablo 2.22 ile görüldüğü üzere gerekli dönüşüm ve hesaplamalar gerçekleştirilerek enerji kaynaklarının birim enerji miktarına karşılık gelen birim maliyetleri elde edilmiştir. GTM’nin üretimi sırasında kullanılan her bir materyalin toplam kütsel miktarına karşılık olarak kullanılan enerji kaynağının maliyetlerine ait olan eşdeğer ekserji değerlerine ise Tablo 2.23’te yer verilmiştir.

Tablo 2.22. GTM üretiminde kullanılan elektrik enerjisi kaynakları ve maliyet faktörleri

Enerji Kaynağı	Kullanım oranı (%)	Maliyet faktörü (yen/kWh) ₂₀₁₂	Maliyet faktörü (\$/kWh) ₂₀₁₂	Seviyelendirilmiş ortalama yıllık maliyet (\$/kWh)	Seviyelendirilmiş ortalama yıllık maliyeti= EE_{Chava} (\$/MJ)
Kömür	34	6.5	0.08	0.17	0.62
Petrol	2	11.6	0.15	0.31	1.11
Doğalgaz	32	6.7	0.08	0.18	0.64
Rüzgar türbini	8	25	0.31	0.66	2.39
Nükleer enerji	24	5.6	0.07	0.15	0.53

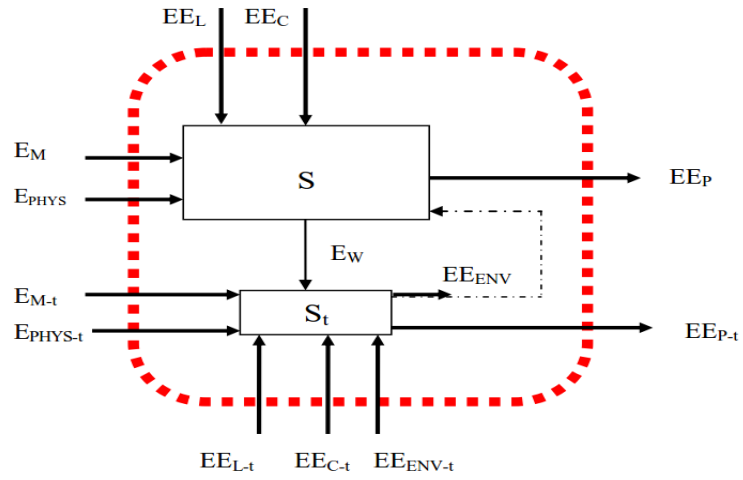
Tablo 2.23. GTM üretiminde kullanılan elektrik enerjisi maliyetinin ekserjetik eşdeğeri

MATERYAL	KOMPRESÖR	YANMA ODASI	TÜRBİN	DİĞER	GTM
Cr	15.46	21.53	37.72	11.10	85.80
Ni	10.19	128.47	280.87	1.22	420.73
Co	0.00	54.35	88.98	0.00	143.33
Fe	81.66	0.56	19.19	56.57	157.97
W	0.00	6.28	9.02	11.66	26.96
Mo	3.24	10.10	11.29	26.28	50.91
Ti	139.67	59.89	48.95	551.28	799.79
Al	10.61	6.34	42.69	258.37	318.01
Cd	0.00	0.00	1.50	2.32	3.83
V	29.59	0.00	5.02	319.45	354.06
C	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B	0.00	0.00	0.43	0.00	0.43
Ta	0.00	0.00	235.20	0.00	235.20
Mn	0.00	0.20	1.11	1.04	2.36
Zr	0.00	0.46	0.02	1.74	2.22
Nb	0.00	0.00	8.05	58.42	66.48
Cu	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$EE_{C,elektrik}$ (MJ)	290.40	288.17	790.04	1299.45	2668.07

2.5.7. Çevresel etki/iyileştirme maliyeti

Bu bölümde gaz türbinli motorun çalışma ve üretimi aşamasından kaynaklanan ve çevreye salınan çevresel atıkların girdilerini saptamak ve motora ait çevresel etki/iyileştirme maliyetlerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Çevresel atıklar çevreye salınan katı, sıvı veya gaz atıkları olup bu çalışmada gaz türbini motoru için hem üretim aşamaları hem de faaliyeti sırasında sadece gaz atıklarından CO₂ salınımı dikkate alınmıştır. Şekil 2.34.'te görüldüğü üzere küresel ölçekteki büyük sistemlerin (S) çevresel etkilerini sistem içerisinde yer alan ve çevresel kirlilikten sorumlu ürün üretimi (EP-t) gerçekleştiren alt birimleri için ayrık bir sistem (St) vasıtasıyla, ayrık sistemin (St) bağlı

olduğu sistemin (S) çevresel ekserjetik akışların (EE_{ENV}) hesaplanması gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 2.34. Sistem (S) ve çevresel etkinin gerçekleşip ele alındığı sistem (St) (Seçkin, 2013)

Bu çalışmada kullanılan sistemin gaz türbinli motor olması, global ölçekte bir karmaşık yapıya haiz olmaması ve çevresel kirlilikten sorumlu olan temel bileşenin yanma odası olması sebebiyle EE_{ENV} değerini literatürdeki verileri kullanarak elde edebiliriz. Gaz türbinli motorun üretimi esnasında kullanılan materyallerin türüne ve CE_{XC} bölümünde öne sürülen tahmini modelde belirtilen orana göre ortaya çıkan CO_2 salınımını belirlemek için, Nuss ve vd. (2014) tarafından uçak motorlarında kullanılan metal elementlerin çevresel etkilerine yönelik gerçekleştirdikleri çalışmalarından yararlanarak elde edilen veriler Tablo 2.24’te sunulmuştur.

Tablo 2.24. GTM üretiminde kullanılan materyallerin CO_2 salınımına ait küresel etki değerleri

Element	Cr	Ni	Co	Fe	W	Mo	Ti	Al	Cd
kgCO ₂ -eq/kg	2.4	6.5	8.3	1.5	12.6	5.7	8.1	8.2	3
Element	V	C	B	Ta	Mn	Zr	Nb	Cu	
kgCO ₂ -eq/kg	33.1	3.57	1.5	260	1	1.1	12.5	2.8	

Elde edilen verilerin GTM üretim süreci ve yaşam boyu dikkate alındığında, ilgili materyallerin 100 yıllık etki değerleri kullanılmış olup gaz türbinli motor üretiminde kullanılan alaşımların veya materyallerin kaplama, ekipman ve aksesuarlar bileşenleri de dahil olmak üzere toplamda 33.46 kg kütlesine karşılık gelen CO_2 salınım miktarının ekserjetik eşdeğerine dönüştürülmüş değerleri Tablo 2.25’te görülmektedir.

Çözümleme sırasında materyallerin her biri için emisyon faktörü değerlerinin elde edilmemesi sebebiyle, Seçkin (2016) tarafından çalışmasında elde edilen katı atık tesisi için elde etmiş olduğu emisyon faktörü değeri olarak 43 MJ/kgCO₂ kullanılmıştır.

Tablo 2.25. GTM üretimi için kullanılan her materyalin birim kütlelerindeki CO₂ tüketim miktarı

MATERYAL	KOMPRESÖR (kgCO ₂ eq/kg)	YANMA ODASI (kgCO ₂ eq/kg)	TÜRBİN (kgCO ₂ eq/kg)	DİĞER (kgCO ₂ eq/kg)	GTM (kgCO ₂ eq/kg)
Cr	52.39	72.94	127.80	37.62	290.75
Ni	33.85	427.00	933.55	4.04	1398.44
Co	0.00	200.04	327.50	0.00	527.54
Fe	300.97	2.06	70.72	208.49	582.23
W	0.00	33.76	48.52	62.69	144.98
Mo	8.95	27.94	31.22	72.67	140.78
Ti	558.37	239.43	195.71	2203.95	3197.46
Al	37.68	22.51	151.68	917.99	1129.86
Cd	0.00	0.00	4.83	7.46	12.29
V	107.75	0.00	18.28	1163.12	1289.16
C	1.24	0.58	1.01	1.89	4.72
B	0.00	0.00	1.34	0.00	1.34
Ta	0.00	0.00	796.09	0.00	796.09
Mn	0.00	0.49	2.67	2.49	5.65
Zr	0.00	1.44	0.05	5.47	6.96
Nb	0.00	0.00	33.22	241.00	274.23
Cu	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ekserji (MJ)	1101.20	1028.19	2744.19	4928.89	9802.47

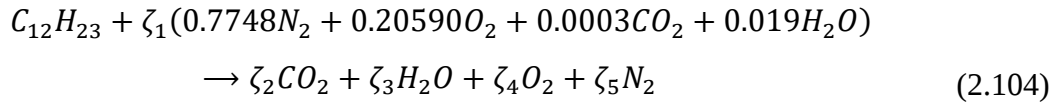
Materyal üretiminin temel enerji kaynağı olarak kabul ettiğimiz elektrik enerjisinin kaynağı olan kömür, petrol, doğal gaz ve yenilenebilir enerji kaynakları ile bu kaynakların materyal içerisinde kullanım oranları hakkında daha önce verilen bilgiler dahilinde çevresel açıdan ortaya çıkan CO₂ miktarının tespit edilmesi gerekmektedir.

Bu noktada birim kullanılan enerji miktarına karşılık gelen CO₂ salınım miktarı olarak, (Houghton, 1996) tarafından elektrik enerjisinin çevresel açıdan kWh başına 0.0612 kgCO₂eq/kg miktarında oluşturduğu CO₂ emisyonu değeri referans alınarak, materyal üretimi için kullanılan elektrik enerjisi kaynağının çevresel yükünün eşdeğer ekserjisi Tablo 2.26’da gösterilmektedir.

Tablo 2.26. GTM materyalleri üretimi sırasında kullanılan elektrik enerji kaynağının çevresel ekserjetik eşdeğeri

MATERYAL	KOMPRESÖR (MJ)	YANMA ODASI (MJ)	TÜRBİN (MJ)	DİĞER (MJ)	GTM (MJ)
Cr	71.67	99.78	174.83	51.46	397.74
Ni	46.31	584.12	1277.08	5.53	1913.05
Co	0.00	273.66	448.01	0.00	721.67
Fe	411.72	2.82	96.74	285.21	796.49
W	0.00	46.19	66.38	85.76	198.33
Mo	12.24	38.22	42.70	99.42	192.59
Ti	763.84	327.53	267.73	3014.98	4374.10
Al	51.55	30.79	207.50	1255.79	1545.64
Cd	0.00	0.00	6.61	10.21	16.82
V	147.40	0.00	25.01	1591.14	1763.55
C	1.69	0.79	1.38	2.59	6.45
B	0.00	0.00	1.83	0.00	1.83
Ta	0.00	0.00	1089.05	0.00	1089.05
Mn	0.00	0.67	3.65	3.40	7.72
Zr	0.00	1.97	0.07	7.49	9.52
Nb	0.00	0.00	45.45	329.69	375.14
Cu	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ekserji (MJ)	1506.43	1406.55	3754.02	6742.67	13409.68

Ayrıca uçak motorunun çalışma sırasındaki CO₂ salınımının ekserjetik eşdeğeri karşılığı da belirlememiz gerekmektedir. Bunun için, uçak motorunun faaliyeti sırasında uçuş evreleri ve toplam uçuş süresince birim zamanda kullanılan yakıt miktarı verilerini ve yanma denklemini kullanarak atmosfere salınan CO₂ miktarını tespit edebiliriz. Bunun için yanma denklemi;



şeklinde olup her evre için kullanılan yakıt miktarına karşılık gelen CO₂ değerinin mol cinsinden kg değerine dönüştürülmelidir. Ek olarak, kullanılan Jet-A yakıtı için yakıt emisyon faktörü 14.0075 MJ/kgCO₂ olarak (SEAI, 2023) referanslı hesaplama aracı ile elde edilmiştir. Genel yanma denkleminin çözümlenmiş hali aşamalar halinde Tablo 2.27’te gösterilmektedir.

Tablo 2.27. Yıllık 250 saatlik uçuşu boyunca gaz türbinli motorun gerçekleştirdiği yakıt sarfiyatının uçuşun evrelerine göre çevresel ekserjetik eşdeğeri

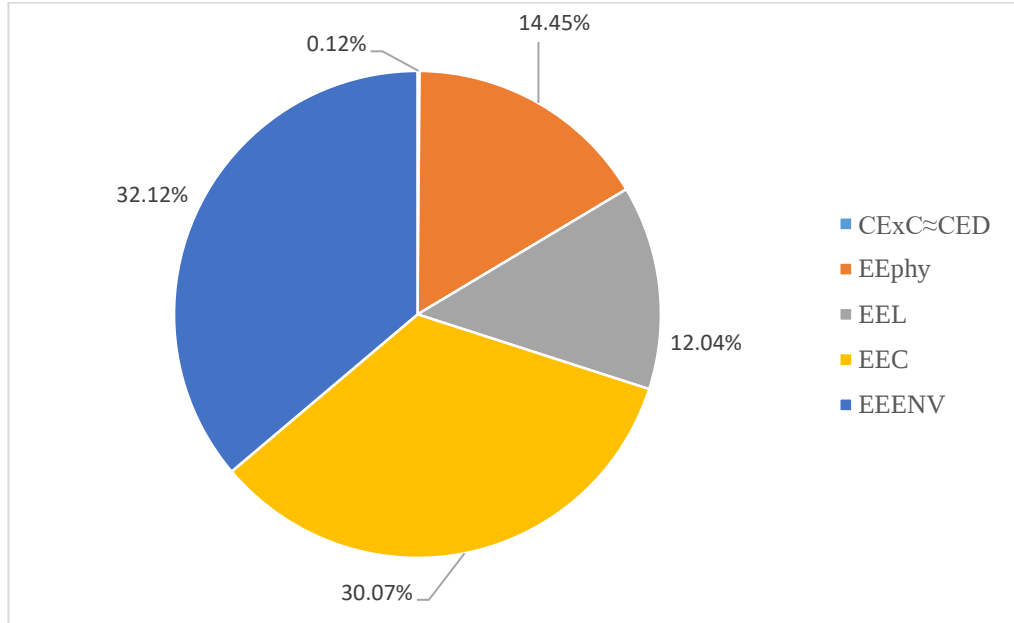
Uçuş Fazı	$nC_{12}H_{23}gir$ (kmol)	Yıllık $mC_{12}H_{23}gir$ (kg)	$nCO_{2çık}$ (kmol)	Yıllık $mCO_{2çık}$ (kgco ₂)	Yakıt Emisyon Faktörü (Jet A-1) (MJ/kgCO ₂)	Yıllık EE_{ENV,CO_2} (MJ)
Taksi	0.000219	3650	0.002648799	11657.36297	14.00756	163291.2588
Kalkış	0.00021	3500	0.002541221	11183.91518		156659.4086
Tırmanma	0.000149	2480	0.001798139	7913.608829		110850.3828
Düz Uçuş-1	0.000117	1950	0.001412677	6217.19025		87087.69085
Düz Uçuş-2	0.000113	1880	0.001362103	5994.614855		83969.95174
Düz Uçuş-3	7.49E-05	1250	0.000908228	3997.110353		55989.77942
Alçalma	0.000108	1800	0.00130382	5738.113983		80376.99935
Yaklaşma	0.000135	2250	0.001633387	7188.536667		100693.888
İniş	0.00022	3680	0.0026702	11751.5512		164610.6066
TOPLAM	0.001344	22440	0.016278574	71642.00429		1003529.966

2.5.8. Sonuçların karşılaştırılması

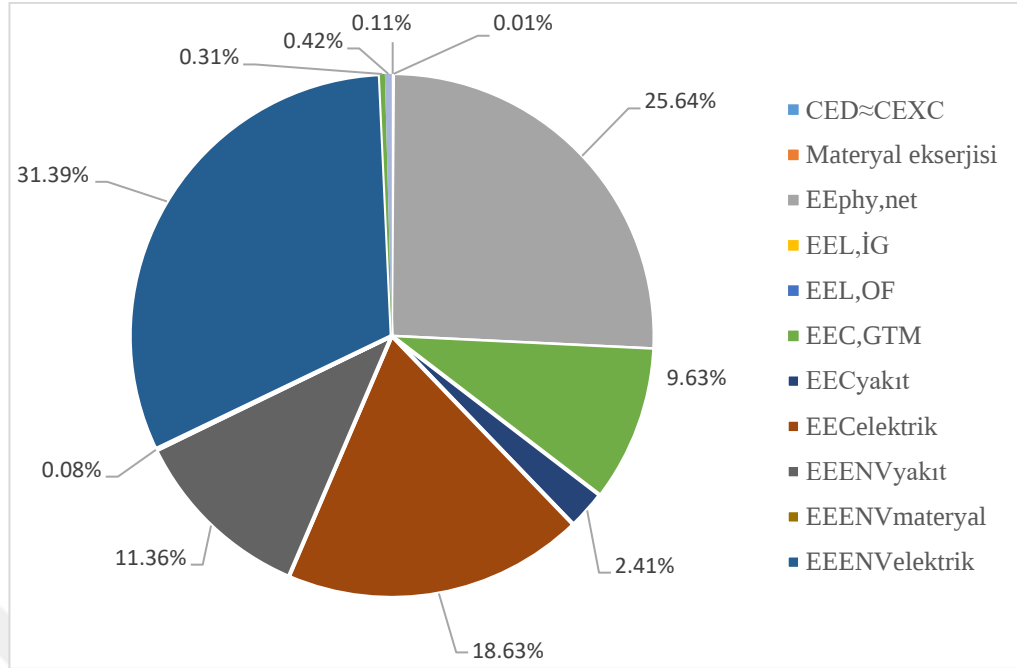
GTM ile ilgili materyal girdileri, ekserji etkileşimi, ekonomik parametreleri, işgücü ve çevresel etkileri tanımlanmış olup karar verici değişkenlerin GTM için üretim hattından uçuş evreleri boyunca bileşen ve motor üzerindeki etkileri incelenmiştir. Değişken parametrelerin GTM'nin üretimi veya faal halde iken durumlarına göre değişimlerini dikkate alarak analiz gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle üretim sonrası faal haldeki ekserjetik akışlar yıllık olarak sunulmuştur. Tablo 2.25'te GTM sisteminin üretiminden faal haldeki yıllık çalışma evresine kadar sınırları içerisinde gerçekleşen ekserjetik akışların ekserjetik eşdeğerleri elde edilmiştir. Teorik uçuş verilerine dayanan GTM'nin yıllık uçuşu boyunca ürettiği toplam itki değeri 264,300 MJ olarak elde edilmiş olup uçuşun mesafe katetmesi için gereken yararlı iş akışı miktarı ise 76,014 MJ değerindedir. Şekil 2.35 ve Şekil 2.36 ise EEA parametrelerini barındıran ekserjetik akışların oranları ve türleri hakkında (Tablo 2.28) elde edilen genel sonuçları yansıtmaktadırlar.

Tablo 2.28. GTM'nin genişletilmiş ekserji metodu çerçevesinde kümülatif ekserji tüketimi, fiziksel ekserji, işgücü girdisi, maliyet ve çevresel ekserjetik eşdeğer akışları

GTM	Akış Türü	Akışlar	Ekserjetik eşdeğeri (MJ)
ÇIKAN	İTKİ	$EE_{giren,1}$	264300.83
	YARARLI İŞ	$EE_{giren,2}$	76014.52
GİREN	CExC	$CED \approx C_{ExC}$	3521.88
		Materyal ekserjisi	429.22
	EEphy	$EE_{phy, yakıt}$	640782.23
		$EE_{phy, hava}$	178913.23
		$EE_{phy, net}$	819695.46
	EEL	EE_L, iG	307900.00
		EE_L, OF	76975.00
	EEC	EE_C, GTM	595368.92
		$EE_C, yakıt$	363234.61
		$EE_C, elektrik$	2668.07
	EEENV	$EE_{ENV, yakıt}$	1003529.97
		$EE_{ENV, materyal}$	9802.47
		$EE_{ENV, elektrik}$	13409.68



Şekil 2.35. GTM'nin genişletilmiş ekserji metodu çerçevesinde kümülatif ekserji tüketimi, fiziksel ekserji, işgücü girdisi, maliyet ve çevresel ekserjetik eşdeğer akışlarının oranı



Şekil 2.36. GTM'nin genişletilmiş ekserji metodu çerçevesinde kümülatif ekserji tüketimi, fiziksel ekserji, işgücü girdisi, maliyet ve çevresel ekserjetik eşdeğer akışlarının ekserjetik akış türlerine göre dağılımı

GTM sisteminin üretiminden faal haldeki çalışma evresine kadar sınırları içerisinde gerçekleşen ekserjetik akışları içerisinde en büyük etki değerine sahip olan ekserjetik akışın %31.39'unu $EE_{ENVyakıt}$, %0.31'ini $EE_{ENVmateryal}$ ve %0.42'sini $EE_{ENVelektrik}$ oluşturmakta olup toplamda %32.12 ile sistemdeki enerji etkileşimlerinden kaynaklanan yıllık CO_2 salınımlarının ekserjetik karşılıkları olarak değerlendirilen EE_{ENV} parametresinden kaynaklanmaktadır. Bu parametre içerisinde neredeyse tamamen etkili olan faktör ise ($EE_{ENVyakıt}$) yakıt tüketiminden kaynaklanmakta olup, sistemin üretilmesi için gerekli olan materyallerin üretim ($EE_{ENVmateryal}$) aşamasının ise EE_{ENV} parametresi içerisindeki etkisi yaklaşık olarak %1 gibi orana tekabül etmektedir.

Sitemdeki genişletilmiş ekserjetik akışların %30.07 kadarını teşkil eden EE_C akışları ise GTM'nin üretim harcamaları ile beraber bakım ve yıllık yakıt tüketimi gibi temel operasyonel faaliyet maliyetleri akışlarından kaynaklanan ekserjetik akışlardır. Bu akışlar içerisinde motor ile yakıt tüketiminin yıllık olarak seviyelendirilmiş maliyetleri arasında 1.63 gibi bir oran bulunmaktadır. Bu yıllık olarak gerçekleşen yakıt tüketim miktarının yaklaşık olarak GTM maliyetinin %63'üne denk olduğunu göstermektedir. Ayrıca materyal üretimi için harcanan elektrik enerjisinin ekserjetik karşılığının EE_C içerisindeki payı %0.027 gibi bir değerde olduğu görülmektedir.

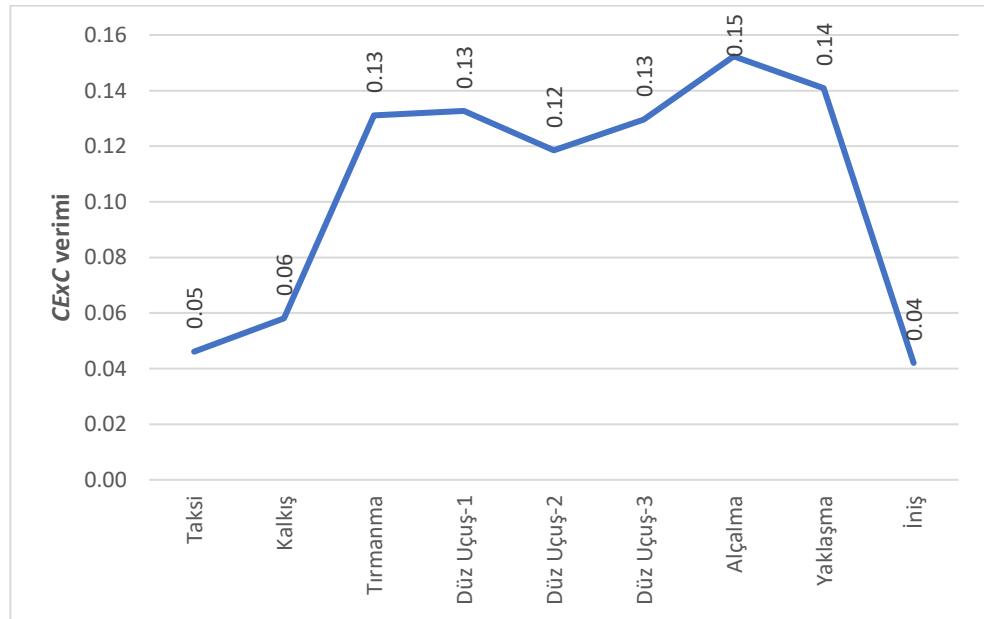
Ekserjetik işgücü girdisinin ($EE_{L, IG}$) ekserjetik akışlar içerisindeki toplam oranı 307900 MJ ile %12.04 olup, üretim aşamasındaki işgücü ekserji girdisi olarak gösterilen $EE_{L, OF}$ değerine nazaran GTM'nin yıllık olarak temeldeki operasyonel faaliyeti sırasındaki işgücü girdisinin tam olarak 4 katı değerinde olduğu görülmektedir. EE_{phy} ve CE_{XC} ise toplam ekserjetik akışları içerisinde sırasıyla %14.45 ve %0.12 gibi ekserji eşdeğeri oranlarına sahiptirler.

2.5.8.1. Kümülatif ekserji tüketimi verimi

Ham madde halindei ürünün üretim hattı boyunca, çalışma faaliyeti sürecinin de eklenmesi üzerine gerçekleşen ekserji yıkımlarının tamamınının üründen elde edile yararlı işe oranı olarak tanımlanır. GTM açısından elde edilen kaldırma ve itki kuvvetlerinin bileşkesi olarak elde edilen yararlı işin kümülatif ekserji tüketimi verimi aşağıda verilen denklem ile hesaplanmıştır.

$$CE_{XC}C_{eff} = \frac{\sum EE_{çıktı}}{\sum EE_{girdi}} = \frac{\sum_{çıktı} W_{yararlı iş}}{\sum_{girdi} (CE_{XC}C + E_{phy})} = 0.16 \quad (2.105)$$

Bütün olarak GTM'nin yıllık faaliyeti açısından kümülatif ekserji tüketimi verim değeri %16 iken bir yıl için çalışma faaliyeti sırasındaki uçuş evrelerine göre kümülatif ekserji tüketimi değerlerinin değişimi ise Şekil 2.37'de görülmektedir.



Şekil 2.37. GTM'nin yıllık çalışma faaliyeti sırasındaki uçuş evrelerine göre kümülatif ekserji tüketimi verim değerlerinin değişimi

Şekilde görüldüğü üzere uçuş boyunca CE_{XC} veriminin en yüksek olduğu aşama yaklaşma evresine hazırlık evresi ve düz uçuşun son aşaması olan Alçalma için %11 iken gerçekleşen en küçük verim değerleri ise %3 gibi hemen hemen birbirine denk bir değer ile Taksi ve İniş evresi olduğu açıkça görülmektedir.

2.5.8.2. Özgül çevresel etki/iyileştirme maliyeti

GTM sistemi için elde edilen verilerden elde edilen en önemli kriterlerden biri olup sistemin üretilmesi ve çalışması boyunca gerçekleşen çevresel etki/iyileştirme maliyetinin bu süreç boyunca sistem tarafından üretilen kütsel temelde toplam atıklardan elde edilerek sisteme özgü olan ekserjetik karşılığıdır. Sistem için gerekli olan geniş veri setleri ihtiyacını sadece basit dönüşüm gerçekleştirerek sağlamaktadır. Analizinin gerçekleştirildiği GTM sistemi için birim kütledeki Jet-A yakıtına karşılık olarak 45.75 MJ değerinde çevresel etki oluşturduğu tespit edilmiştir.

$$ee_{ENV} = \frac{\sum EE_{ENV}}{\sum atık} = \frac{1026742.11 \text{ MJ}}{22440 \text{ kg}_{Jet-A}} = 45.75 \text{ MJ/kg} \quad (2.3106)$$

2.5.8.2. Genişletilmiş ekserji verimi

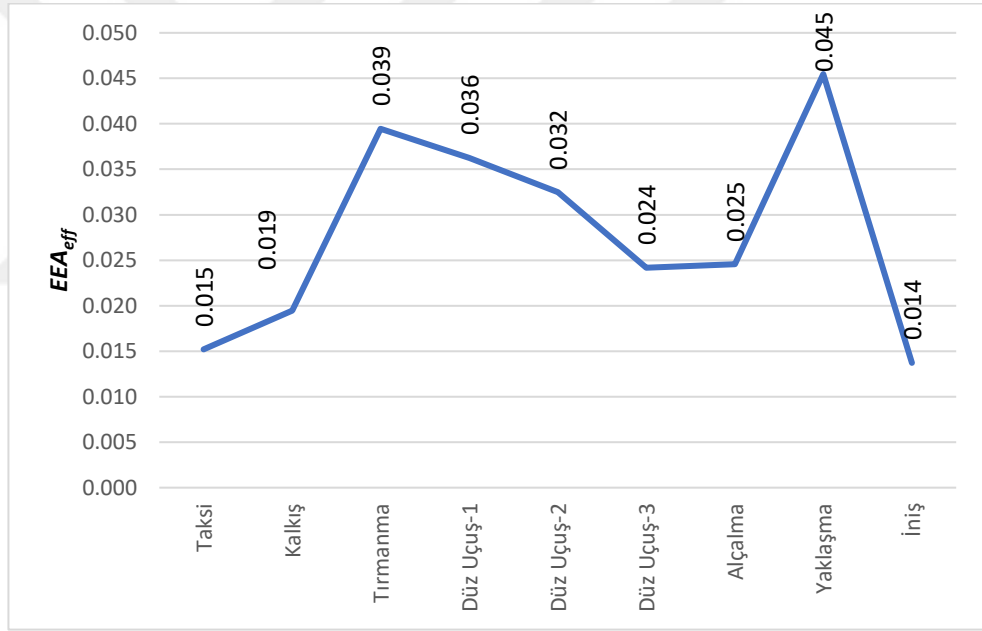
GTM için ham madde aşamasından itibaren üretim zincirilerinden geçerek ürün haline gelerek; parametrelerinde CE_{XC} , EE_C , EE_L , EE_{phy} ve EE_{ENV} 'nin kullanılarak elde edildiği genel genişletilmiş ekserji verimi yıllık olarak $EEA_{eff} = 0.028$ olarak elde edilmiştir. Literatürde yer alan farklı sistemler için çalışmalardan derlenerek elde edilen EEA_{eff} değerleri Tablo 2.29'da görülmektedir.

Tablo 2.29. Farklı sistemler için elde edilen EEA_{eff} değerleri

Çalışma türü	Sistem	Çevre	Ortalama EEA_{eff} (%)	Kaynak
Deneyisel	Bergey Excel-S rüzgar türbini	Tahran-İran	1.24	Ehyaei vd. (2019)
Deneyisel	Bergey Excel-S rüzgar türbini	Manjil-İran	0.6	Ehyaei vd. (2019)
Deneyisel	151 NEG Micon ve Vestas rüzgar türbinlerinden oluşan güç tesisi	Manjil-İran	15.76	Aghbashlo vd. (2018)
Deneyisel	Güneş enerjisi kaynaklı su arıtma tesisi	İzmir	0.013	Ünal vd. (2021)
Teorik	Gaz türbinli motor için durum değerlendirme çalışması	Atmosfer	31	Açıkkalp vd. (2021)
PVsyst software	Güneş panelleri santrali	İran ort. Şartları	9.46	Aghbashlo vd. (2020)

EEA metodu için ele aldığımız sistem olan GTM sisteminin aksine maliyeti düşük, yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan ve çevresel etki maliyeti operasyonel faaliyet sürecinde oldukça düşük değerlere sahip güç sistemleri için %0.6 ila %15 olarak değerleri arasında elde edildiğine dikkat edilmelidir.

EEA_{eff} 'nin GTM için yıllık uçuşu boyunca evrelerine göre değişimi Şekil 2.38'de görüldüğü üzere en yüksek ve en düşük verim değerleri sırasıyla %4.5 ile yaklaşma evresi ile birbirine oldukça yakın değerlerde seyreden taksi ve iniş evresi olduğu görülmektedir. Unutulmamalıdır ki bu ifade termodinamik olarak denge hali ile GTM'un elde edilebilmesi için gereken minimum gereksinimler göz önüne alınarak elde edilmiştir. Bu açıdan EEA_{eff} ifadesindeki önemli değişken olan EE_C , EE_L parametrelerinin değişimlerinde verim ifadesi için önemli kriterleri göz önüne serecektir.



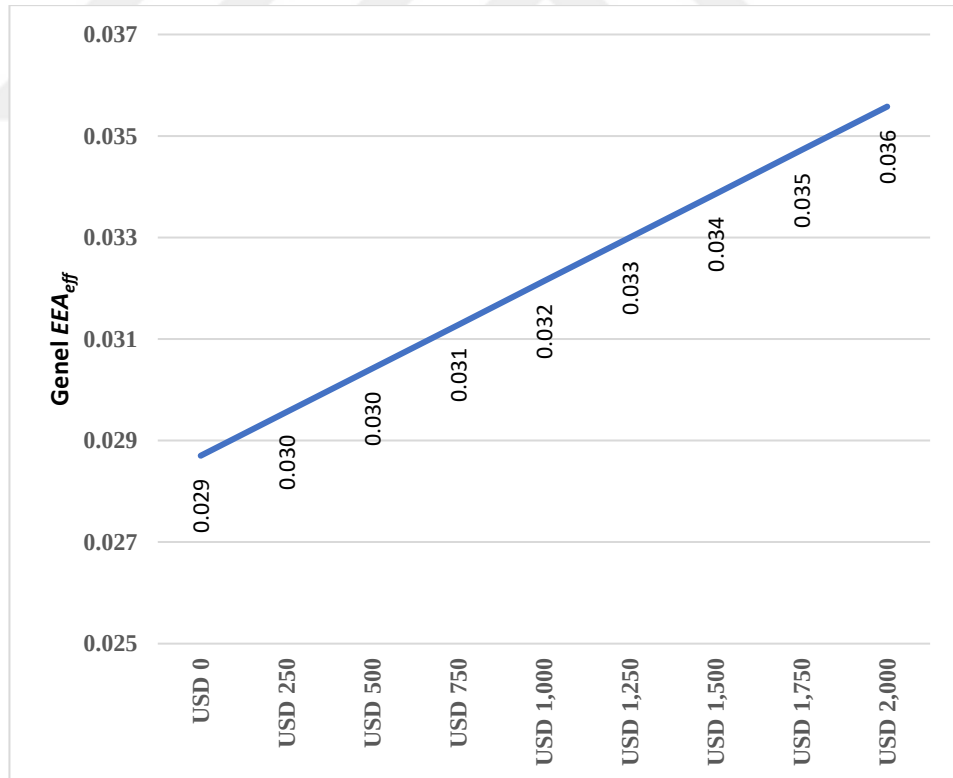
Şekil 2.38. GTM'nin yıllık çalışma faaliyeti sırasındaki uçuş evrelerine göre genel genişletilmiş ekserji veriminin değişimi

EE_C ve EE_L parametrelerinin değişimlerinde EEA_{eff} veriminin değişimi kullanıcının sahip olduğu sistemi kiralama ya da işgücü girdisi ile mali çıktıları kullanarak ticari faaliyet yürütmesi ile mümkündür.

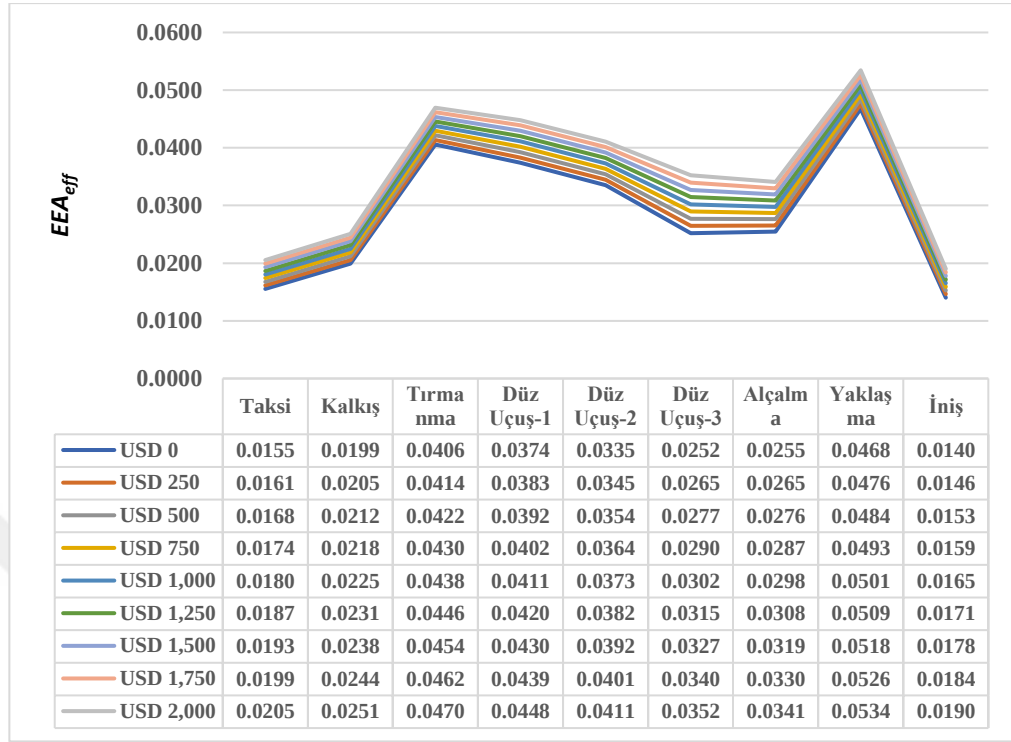
Kira yolu ile maddi getiri sağlanması durumu

Genel EEA_{eff} ifadesinde ele alınan GTM'nin 250 saat çalışma şartlarında her uçuş için Şekil 2.39'da görüldüğü üzere 250-2,000\$ arasında değişen kira cinsinden getirilerin

elde edildiği ve çalışma faaliyetlerindeki işgücü giderinin olmaması ve diğer parametrelerin sabit kalması şartıyla verim ifadesinde gerçekleşen değişimler gözlenebilmektedir. Döviz cinsinden getiri değerleri ise yıllık uçuş süresi 250 saat olan uçuş için sadece 1 işgücünün ABD için genel çalışma standartları karşılığındaki minimum çalışma saati ücretleri 10\$ olarak referans alınmasıyla artan değerlerde sunulmuştur. Görüldüğü üzere ekonomik getirinin sağlanması durumunda; havacılık hizmetlerindeki getiri ücretlerinin minimum standart çalışma ücretlerinden ortalama 5 kat olduğu kabulü dikkate alınırsa her uçuş için 1250\$ maddi getiri sağlanması durumunda genel EEA_{eff} değeri %3.3 değerine yükselmektedir. Verilen kabul ile gerçekleştirilen uçuşun her aşaması için EEA_{eff} değerinin değişimi Şekil 2.40 üzerinde detaylı bir şekilde gösterimine yer verilmiştir. Görüldüğü üzere EEA_{eff} açısından en yüksek verimin uçuş aşamalarının tırmanma ve yaklaşma evreleri olduğu görülmektedir. EEA_{eff} ifadesine ait minimum standartlardaki yıllık ekonomik getiri eğrisinin her 250\$ artış için hemen hemen doğrusal bir şekilde eğrilerde artış gerçekleştiği tespit edilmiştir.



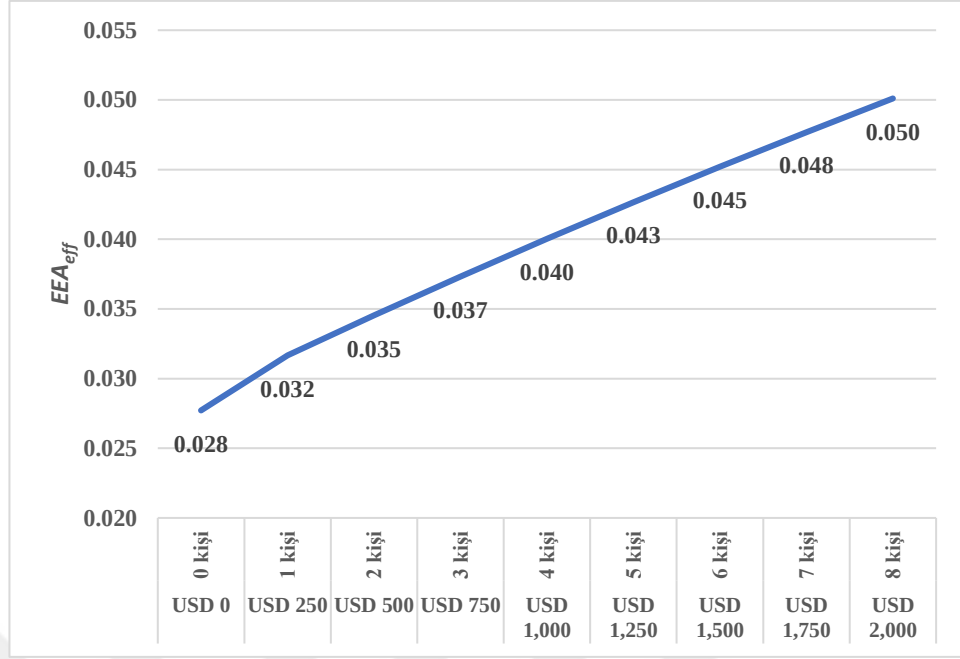
Şekil 2.39. GTM'nin kira yolu ile maddi getiri elde etmesi durumunda muhtemel yıllık çalışma faaliyetlerine göre genel olarak genişletilmiş ekserji veriminin değişimi



Şekil 2.40. GTM'nin uçuşunun her aşaması için EEA_{eff} değerinin değişimi

Ticari faaliyet yolu ile maddi getiri sağlanması durumu

GTM'nin yıllık 250 saatlik çalışma sürecinde ticari faaliyet gerçekleştirmesi varsayımı doğrultusunda kişi başı girdisine karşılık getiri oranının sabit ve standart minimum işgücü maliyetinin 4 katı olması durumunda genel EEA_{eff} değerinin değişimi Şekil 2.41'de gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere işgücü ve mali kazanç girdileri olmaması durumunda denge halindeki EEA_{eff} verim değerine sahip olan GTM işgücü girdisinin minimum miktarında; yani 1 pilot ve 1 teknisyen olması durumunda %3.5 gibi verim değerine haiz olup, 8 işgücü girdisine kadar verim değerinin yaklaşık olarak doğrusal artış gerçekleştirerek %5 değerine yaklaştığı tespit edilmiştir.



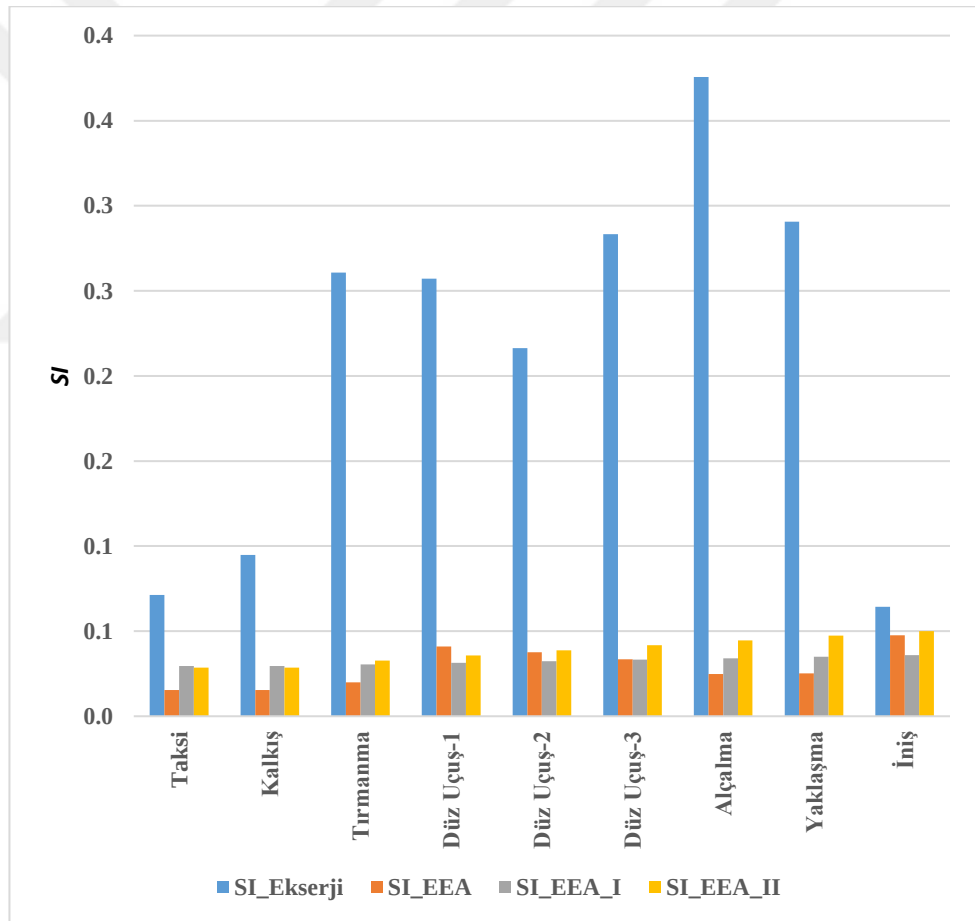
Şekil 2.41. GTM'nin ticari faaliyet gerçekleştirmesi durumunda muhtemel yıllık çalışma faaliyetlerine ait genişletilmiş ekserji veriminin değişimi

Verilen iki durum için genel EEA_{eff} değerinin denge halindeki değeri olan 0.028 değerinin kira getirisi durumunda, 0.03 gibi başlangıç verim potansiyelini 0.036 değerine kadar taşıyabilir iken ticari getiri elde etme durumunda ise, 0.032'den 0.050 değerine kadar yükseltebildiğini göstermektedir.

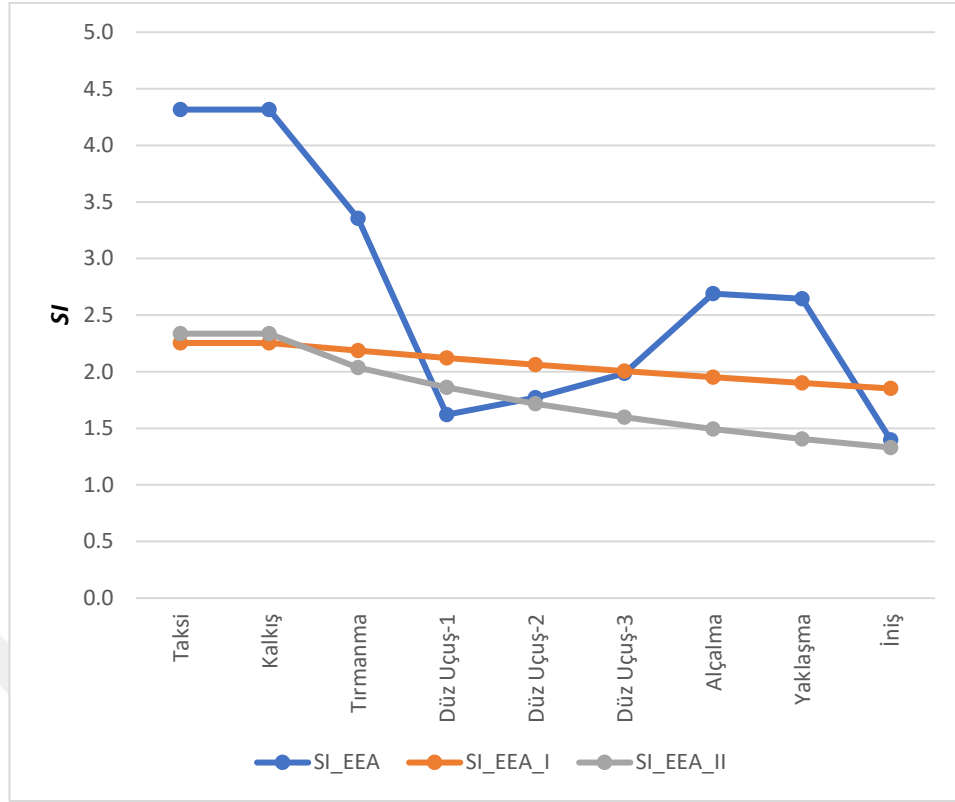
2.5.8.3. Genişletilmiş ekserji tabanlı sürdürülebilirlik endeksi

Bölüm 2.3.4.9'da ekserji tabanlı olarak elde edilen sürdürülebilirlik endeksinin GTM için ekserji yıkımlarının ya da zıt bir deyiş ile ekserji veriminin oranlarına bağlı olarak değişiminden elde edilen bir parametredir. Bu başlık altında kullanılmasının sebebi ise ekserjetik veya materyal akışları haricindeki dışsalıklar olan EE_L , EE_C ve EE_{ENV} parametrelerinin ne derece etki oluşturduğunu saptamaktır. GTM sisteminin ekserji verimine bağlı çevresel etkileri ile sürdürülebilirlik endeksi arasındaki ilişki olarak da ifade edilebilir. Ekserji verimi, EEA verimi, kira ve ticari yollar ile mali getiri elde edilen EEA verimi sırasıyla SI_Ekserji, SI_EEA, SI_EEA_I ve SI_EEA_II olarak Şekil 2.42 üzerinden anlaşıldığı üzere; uçuşun evreleri boyunca EEA tabanlı sürdürülebilirlik endekslerindeki değişim ekserji tabanlı değişimlere oranla daha da zayıf kaldığı gözlenmemektedir. Sebep olarak EE_{phy} parametresinin EEA_{eff} içerisindeki etki değerinin %14.45 olmasıdır. SI_Ekserji değerinin genişletilmiş ekserji tabanlı sürdürülebilirlik

değerlerine nazaran uçuş evreleri boyunca değişim boyutları ve yönü birbirlerine benzer olsa da büyüklükleri arasında; en azı iniş evresinde hem SI_EEA hem de SI_EEA_II değerine nazaran 1.33 katı iken en büyük farkın ise SI_EEA değerinin hem taksi hem de kalkış evresi için 4.31 katına kadar varan değişimler gerçekleştirdiği gözlenebilmektedir. Referans noktası olarak SI_Ekserji esas alındığı takdirde Şekil 2.42’de yer alan diğer sürdürülebilirlik verim ifadelerinin SI_Ekserji değerlerine uzaklığı ve değişimleri Şekil 2.43 üzerinde açıkça görülmektedir. Ayrıca SI_EEA_I ve SI_EEA_II değerlerinin SI_EEA ifadesinin aksine doğrusal bir şekilde iniş göstermeleri E_{phy} parametresinde de gösterildiği üzere mali getiri ve işgücü yüklerinin hem ekserjetik hem de genişletilmiş ekserjetik verim üzerindeki baskın yüklerini açıkça göstermektedirler.



Şekil 2.42. GTM’nin ekserji ve genişletilmiş ekserji tabanlı sürdürülebilirlik endeks değerlerinin uçuşa ait evrelere göre değişimi



Şekil 2.43. SI_{EEA} , SI_{EEA_I} ve $SI_{EEA_{II}}$ değerlerinin $SI_{Ekserji}$ değerine uzaklıkları ve değişimleri

2.5.9. Genişletilmiş ekserji analizi değerlendirmesi

İncelenen sistemin EEA analizini içeren sonuçlar Tablo 2.25'te gösterilmiştir. Bu sonuçlardan elde edilen çıkarım ve değerlendirmeler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

GTM gibi yüksek teknolojik gereksinimine ihtiyaç duyan ve yakıt kullanarak çevreye atık gaz salınımlarını gerçekleştiren sistemlerde kümülatif enerji ve materyal gereksinimlerinin tüm akışlar içerisindeki yaklaşık olarak %1 değerindedir. Materyal girdilerinin çevresel ve ekserjetik akışlar içerisindeki yerinin oldukça az olmasına sebep olarak havacılıkta üretilen materyallerin özel üretim tekniklerine ait kaynak girdilerinin EEA parametrelerinin içerisine dahil edilmemesi olarak gösterilebilir.

$EE_{Celektrik}$, $EE_{ENVmateryal}$, $EE_{ENVelektrik}$ ve CE_{XC} akışlarının toplam EEA ekserjetik akışların içerisindeki oranı %1.05 gibi oldukça küçük bir değerdedir. Halbuki $EE_{ENVmateryal}$ akışının elde edilebilmesi için oldukça geniş bir veri kitlesi ile derin bir literatür taramasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu neden ile GTM gibi güç üretim sistemleri için gerçekleştirilebilecek farklı alanlardaki çalışmalar için sisteme ait materyallere ilişkin ekserjetik akışların rahatlıkla ihmal edilebileceği ve hata oranının bu çalışma için %1.05 olduğu anlaşılmaktadır.

Yıllık çalışma süreci içerisinde EEA verimi %2.8 olan GTM için en fazla etki değerine sahip olan parametrenin %32.12 ile EE_{ENV} parametresidir. EE_{ENV} parametresi içerisinde yer alan yakıt, materyal ve elektrik işinden kaynaklı çevresel etkilerin oranları sırasıyla %97.5, %1 ve %1.5 olarak elde edilmiştir. Başka bir deyiş ile $EE_{ENV,yakıt}$ parametresinden kaynaklanan çevresel etkinin ekserjetik maliyeti GTM için harcanan işgücü, sermaye, enerji ve materyal üretimi maliyetlerinin toplamının yaklaşık olarak yarısı kadar olduğu tespit edilmiştir.

CE_{XC} veriminin büyüklüğü materyal girişi ekserjisinin de dahil edilmesiyle, ekserji verimine nazaran oldukça küçük değerlerde elde edilmesine rağmen, uçuş evrelerine göre değişimi aynı yönlerde ve yaklaşık olarak aynı olan oranlarda gerçekleşmektedir. Aynı zamanda ekserjo-ekonomi analizinde kullanılan ekonomik faktör değerlerinin büyüklüğü açısından oranca oldukça küçük değerde olmasının yanında değerlerin oransal değişimleri açısından hem yönü hem de büyüklüğü bakımından da aynı tabloyu yansıtmaktadır.

EEA_{eff} değerinin etkileyen en önemli değişken parametrelerin EE_L ve operasyonel faaliyet aşamasında kullanılabilir olan EE_C girdileri olduğu tespit edilmiştir.

EE_L ve EE_C parametrelerinin EEA_{eff} üzerindeki etkilerini göstermek üzere, GTM sisteminden iki farklı kazanç yollarının değerlendirilmesinden sunulmuştur. Birincisinde standart minimum ücretlenme karşılığı kira getirisinin sağlandığı ve ikincisinin ise aynı ücret yöntemine karşılık gelen işgücü girdilerinin dahil edilmesiyle sunulan ticari hizmet olmak üzere, genel EEA_{eff} değerinin denge halindeki değeri olan 0.028 değerinin kira getirisi durumunda, 0.03 gibi başlangıç verim potansiyelini 0.036 değerine kadar taşıyabilir iken, ticari getiri elde etme durumunda ise, 0.032'den 0.050 değerine kadar yükseltebildiği anlaşılmaktadır.

Fiziksel ekserjinin muhtemel en yüksek verim değerine ulaşması durumunda bile yüzdesel olarak EEA_{eff} değerinde önemli bir etki oluşturamayacağından, sürdürülebilirlik endeksinde de etkili değişimler gerçekleştiremeyeceği görülmüştür.

Ekserji verimine bağlı olarak çevresel etkilerin ne derecede sürdürülebilir olması konusunda; $SI_{Ekserji}$ değerinin genişletilmiş ekserji tabanlı sürdürülebilirlik değerlerine nazaran uçuş evreleri boyunca değişim boyutları ve yönü birbirlerine benzer olsa da büyüklükleri arasındaki en küçük fark iniş evresinde hem SI_{EEA} hem de SI_{EEA_II} değerine göre 1.33 kat iken, en büyük fark ise SI_{EEA} değerinin hem taksi hem de kalkış evrelerinde 4.31 katına kadar varan değişimler gerçekleştirdiği anlaşılmıştır.

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde bir uçağa ait gaz türbinli motorun uçuşu boyunca bileşenleri arasında gerçekleştirdiği enerji etkileşimlerinin performansa dayalı verimliliğinin ekserji ve ekserjo-ekonomi yöntemi ile incelenmiştir. Ek olarak gaz türbinli motorun üretim zinciri aşamalarındaki kaynak ve enerji tüketimine dayalı kümülatif ekserji tüketimi analizi sunulmuştur. Son olarak genişletilmiş ekserji analizi yöntemi ile enerji ve materyal girdilerinin yanında sermaye, işgücü ve çevresel etki parametrelerinin gaz türbinli motorun üretim hattından çalışma faaliyetine kadar olan sürecindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Çalışmada elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır:

GTM için ekserji ve ekserjo-ekonomi analizi sonuçları incelendiğinde;

- a. Uçuş evreleri boyunca GTM sisteminin her bir bileşeni için en yüksek ve en düşük ekserji verimi değerleri, kompresör için hem taksi hem de iniş aşamasında %89 ve alçalma aşamasında %87, yanma odası için yaklaşma aşamasında %82.5 ve alçalma aşamasında %44 ve türbin için ise hem düz uçuş-3 hem de alçalma evresinde ise %95.6 ve düz uçuş-1 aşamasında %90 olarak elde edilmiştir.
- b. Genel olarak GTM sisteminin ekserji verimi oranı iniş ve taksi aşamasında sırasıyla %3.3 ve %3.7 gibi en küçük değerlere haiz iken, yaklaşma aşamasında ise %13.6 olarak elde edilmiştir.
- c. GTM uçuşu boyunca ekserji yıkımı akımlarının en düşük seviyesi yaklaşma evresinde 0.27 MW iken en yüksek değeri ise 0.70 MW ile taksi evresinde gerçekleşmiştir. Uçuş boyunca GTM komponentleri arasında ekserji yıkımı oranları dikkate alındığında ise yanma odasının %82 ile %96.5 arasındaki ekserji yıkım oranına sahip olduğu görülmektedir. Diğer bir husus ise yaklaşma evresinde ekserji yıkım oranının yanma odasında keskin düşüşler gerçekleşirken, kompresör ve türbin bileşenlerinde ise tamamen zıt bir şekilde keskin artışlar gerçekleşmiştir.
- d. Yakıt ekserjisi tüketim oranı yanma odası için alçalma evresinde %64 ile en yüksek ve yaklaşma evresinde %21 ile en düşük seviyede olduğu görülmüştür. Yanma odasını, %2.7 ile kalkış evresindeki kompresör bileşeni takip etmektedir.
- e. Ürün ekserjisi kaybı oranı GTM'nin yanma odasında 1.5 ile 11.25 kat arası oranlarda sırasıyla yaklaşma ve iniş evrelerinde gerçekleşirken, kompresör ve türbin için ise sırasıyla %18 ile %68 arasında yaklaşma ve iniş evrelerinde ve %10 ile %56 oranında alçalma ve iniş evrelerinde gerçekleşmektedir.

- f. Ekserjetik iyileştirme potansiyeli en küçük ve en büyük değerleri düz uçuş-2 ve alçalma evreleri olmak üzere yanma odası için sırasıyla 0.02 MW ve 0.23 MW değerlerine sahip iken türbin için düz uçuş-3 ve iniş evresi olmak üzere 0.006 MW ve 0.032 MW değerleri arasındadır.
- g. GTM'nin uçuşu boyunca ekserjetik iyileştirme potansiyelinin alt ve üst limitleri 0.48 ile düz uçuş-3 evresinde ve 1.55 ile 1.57 değerleri ile taksi ve iniş evrelerinde bulunmaktadır.
- h. Atık ekserji oranının uçuş boyunca taksi ve düz uçuş-2 evreleri sürecinde %56 seviyelerinde nazaran yatay seyirde olmasına rağmen düz uçuş-3 ve alçalma aşamalarında sırasıyla %40 ve %26 oranlarındaki bir düşüş sonunda yaklaşma ve iniş aşamaları boyunca sırasıyla %60 ve %55 seviyelerine geldiği görülmektedir.
- i. GTM'nin taksi evresinden düz uçuş-2 evresi boyunca ekserji yıkım faktörünün 0.41'den en küçük değer olan 0.32 değerine kadar kademeli bir şekilde düşüş gösterdikten sonra düz uçuş-3 ve alçalma boyunca sırasıyla, 0.52 ve en yüksek değer olan 0.66 seviyelerini seyretmiştir. Ardından ise yaklaşma evresi ile beraber 0.26 oranı ve sonrasında tekrar iniş evresinde 0.42 oranına yükselmiştir.
- j. GTM sisteminin çevresel etki faktörü uçuşun taksi evresinden alçalma evresi boyunca 15 oranından en küçük değer olan 3.66 oranına kadar düşüş gösterdiği ve iniş evresinde ise yaklaşma evresi değerinin yaklaşık 4 katı gibi bir artışı ile en yüksek değer olan 16.44 oranına evirildiği tespit edilmiştir.
- k. Ekserjetik sürdürülebilirlik endeksinin en yüksek değeri %27 ile alçalma aşamasında kaydederken en düşük değeri ise %6 ile iniş aşamasında kaydedilmiştir.
- l. Yanma odasının ekserji yıkım maliyeti 33.168 \$/saat ile 106.46 \$/saat arasında değişirken, bu değer kompresör için 10 \$/saat ile 15.48 \$/saat ve türbin için ise 2.85 \$/saat ile 6.2 \$/saat arasında değişmektedir. Yanma odasının diğer bileşenlere nispeten oldukça yüksek bir oranda ekserji yıkım maliyeti vardır. Yanma odasında taksi (%76) ve iniş (%77) evrelerinden daha da yüksek olmak üzere alçalma evresinde gerçekleşen ekserji yıkımı maliyeti %106 oranındadır.
- m. Kompresör, yanma odası ve türbin için izafi maliyet farklarının en düşük ve en yüksek değerleri sırasıyla %27.56 ile %48.95, %36.20 ile %156.87 ve %79.78 ile %1129.07 arasında değişmektedir. GTM'nin uçuşu boyunca en yüksek izafi maliyet farkının yanma odasında alçalma aşamasında gerçekleştiği ve

kompresördeki duruma nazaran 5.69 kat daha yüksek bir değerde olup, türbine göre ise %61 oranında daha da büyükbir değere sahip olduğu tespit edilmiştir.

- n. Kompresör, yanma odası ve türbin açısından özgül akış maliyetlerinin hem ürün hem de yakıt tarafında büyük değişimlerinin uçuş evrelerine göre değişimleri birbirleri ile paralellik göstermektedir. Özgül maliyet akışlarının en düşük ve en yüksek değerleri kompresör, yanma odası ve türbin için sırasıyla, iniş evresinde 147.1 \$/GJ ile düz uçuş-3 evresinde 370.76 \$/GJ, iniş evresinde 54.69 \$/GJ ile alçalma evresinde 144.27 \$/GJ ve iniş evresinde 98.76 \$/GJ ile alçalma evresinde 281.63 \$/GJ değerleri arasında değişmektedir.
- o. Kompresör ve gaz türbini bileşenleri için ekserjo-ekonomik faktörü değerlerinin %50'den fazla artış göstermesine karşılık olarak yanma odasının zıt bir durumda olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, yanma odası bileşeninde ortaya çıkan yüksek ekserji yıkımı maliyetlerinin, yanma odası için ekserji yıkımı ve kayıpların azaltılmasına yönelik iyileştirme çalışmalarının gerekliliğini ifade etmektedir.
- p. Uçuş evreleri açısından türbinden sağlanan gücü kullanark faaliyet gösteren kompresör bileşeninin ekserjo-ekonomik faktör değerleri tüm uçuş evreleri boyunca %72'den daha yüksek olarak elde edilmiştir. Bu da ekserjetik olmayan satın alma, işletme ve bakım maliyetlerinin uçuş boyunca ekserji yıkım maliyetinden oldukça yüksek bir oranda olduğunu göstermektedir.
- q. Türbin biriminin ekserjo-ekonomik faktörü %86.7 ile %93.4 arasında değişmekte olup ekserjetik olmayan maliyetlerin önemli seviyede geliştirilmesine rağmen kayda değer iyileştirme potansiyeli barındırdığı görülmektedir.
- r. GTM için uçuş evrelerine göre ekserjo-ekonomik faktörü değerlerinin uçuş evreleri boyunca %13.21 ile %38.26 arasında değişim göstermektedir. Elde edilen sonuçlar ekserji yıkım maliyetine göre yüksek değerlerde olduğu durumlar haricinde ekserjetik olmayan maliyetlerden daha fazla paya sahip olduğunu göstermektedir. Taksi, kalkış ve iniş evrelerinde elde edilen değerler ortalama olarak %22'ye tekabül ederken, düz uçuş-1 ve düz uçuş-2 evrelerinde %29.12 ile %30.9 değerlerine, düz uçuş-3 ve alçalma evrelerinde ise %23 ve %13.2 seviyelerine keskin bir düşüş gerçekleştirdiği tespit edilmiştir.
- s. Ortalama özgül itki maliyeti 264.75 \$/saatKN olan GTM'nin uçuş aşamalarına göre özgül itki maliyetlerinin değişimi 160.014 \$/saatKN ile 455.86 \$/saatKN değerleri arasında yer almaktadır. GTM'nin özgül itki maliyeti ortam şartlarındaki

aerodinamik etkilerden önemli ölçüde etkilenir. İniş ve tırmanma evrelerinde, özgül itki maliyeti ortalama maliyete yaklaşır ve ortalama olarak 220 \$/saatKN değerine ulaşır. Düz uçuş-1 ve düz uçuş-2 ile düz uçuş-3 ve alçalma evreleri kıyaslandığında, GTM'nin kısmi güçte çalıştığı, akış maliyetleri ile elde edilen veriler doğrultusunda özgül itki maliyetini yükselttiği görülmektedir.

EEA analizi çerçevesinde elde edilen sonuçlar ise aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- a. Yüksek standartlardaki teknolojik altyapı ile inşa edilen ve yanma sonucundaki zararlı gazlar ile çevreye atık gaz salınımlarını gerçekleştiren GTM sistemi için elde edilen kümülatif enerji ve materyal ekserjisi eşdeğeri gereksinimlerinin tüm akışlar içerisindeki oranı %1 değerindedir.
- b. Yine materyal akışlarının yakıt ve ürün ekserji eşdeğerleri olarak $EE_{CElektrik}$, $EE_{ENVmateryal}$, $EE_{ENVelektrik}$ ve CE_{XC} akışlarının sistemdeki toplam EEA ekserjetik akışların içerisindeki oranı %1.05 değerindedir. Oysa ki materyallere ait ekserjetik akışların veri setlerine ulaşabilmek için oldukça geniş ve detaylı bir literatür taramasına ihtiyaç duyulmaktadır.
- c. a ve b maddelerindeki sonuçlara dayanarak, GTM gibi güç üreten sistemler için gerçekleştirilebilecek muhtemel çalışmalarda sisteme ait materyallere ilişkin ekserjetik akışların EEA analiz yönteminde ihmal edilebileceği ve ihmal edilmesi durumunda, hata oranının bu çalışma için %1.05 olduğu anlaşılmaktadır.
- d. Yıllık operasyonel çalışma sürecinde EEA verimi %2.8 olan GTM'nin elde edilen bu verim değerine en fazla etki oluşturan parametre %32.12 ile EE_{ENV} parametresidir. EE_{ENV} parametresini ise en yüksek oranda etkileyen değişkenin %97.5 oranında yakıt olduğu, materyal ve elektrik işinden kaynaklı çevresel etkilerin oranlarının da sırasıyla %1 ve %1.5 olarak elde edildiği anlaşılmıştır. Diğer bir deyiş ile $EE_{ENVyakıt}$ parametresinden kaynaklanan çevresel etkinin ekserjetik maliyeti, yıllık çalışma süreci boyunca GTM için harcanan işgücü, sermaye, enerji ve materyal üretiminin maliyetlerine karşılık gelen ekserjetik eşdeğerlerin toplamının yaklaşık olarak yarısı kadar olduğu tespit edilmiştir.
- e. GTM'nin uçuş evreleri boyunca elde edilen ekserji verimi değerleri CE_{XC} verimi değerlerine göre oldukça küçük değerlerde olmasına rağmen, uçuş evrelerine göre değişimleri aynı yönlerde ve yaklaşık olarak aynı olan oranlarda gerçekleşmektedir. Aynı ilişki CE_{XC} ile ekserjo-ekonomi yönteminde kullanılan ekonomik faktör endeksinde de görülmektedir.

- f. EEA_{eff} değerini etkileyen değişken parametreler olan EE_L ve operasyonel faaliyet aşamasında kullanılabilir olan EE_C girdilerinin EEA_{eff} değerlerinde, EE_L parametresi ile %24 oranında ve EE_C parametresi ile ise %78.5 oranında verim artışı potansiyeli gösterebileceği tespit edilmiştir. GTM kullanım amacına yönelik olarak kira beklentisi ile işgücü girdilerinin dahil edilmesiyle ticari faaliyet gerçekleştirilmesi durumları için, genel EEA_{eff} değerinin denge halindeki değeri olan 0.028 değerinin kira getirisi durumunda, 0.03 gibi başlangıç verim potansiyelini 0.036 değerine kadar taşıyabilir iken, ticari getiri elde etme durumunda ise, 0.032'den 0.050 değerine kadar yükseltebildiği anlaşılmaktadır.
- g. EEA_{eff} değerindeki etki oranı %14 olan EE_{phy} için olası en yüksek verim potansiyelinde olması durumunda bile EEA_{eff} değerinde önemli oranda bir etki gerçekleştiremeyeceğinden, sürdürülebilirlik endeksinde de önemli derecede etkiler oluşturmaması beklenen bir parametre değildir.
- h. Çevresel etkilerin sürdürülebilirliği açısından, ekserjetik tabanlı SI_Ekserji değerinin genişletilmiş ekserji tabanlı SI_EEA değerlerine nazaran, uçuş evreleri boyunca değişim oranları ve yönü yaklaşık olarak birbirlerine benzer olsa da büyüklükleri arasındaki en küçük farkın iniş evresinde hem SI_EEA hem de SI_EEA_II değerine göre 1.33 kat iken, en büyük farkın ise SI_EEA değerinin hem taksit hem de kalkış evrelerinde 4.31 katına kadar varan oranlardaki değişimler ile gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Gerçekleştirilen ekserji, ekserjo-ekonomik ve EEA analizi kapsamında yürütülen bu tezin enerjinin yanında işgücünün, sermayenin, kaynak kullanımının ve çevresel etki maliyetlerinin daha verimli şekilde organize edilerek bir planlama çerçevesinde kullanımı, güç üreten enerji sistemleri için daha da sürdürülebilir olması açısından kullanışlı bir analiz yöntemi olarak kullanımının kullanıcılar ve işletmeler için yararlı olacağı umulmaktadır.

Bu tez ile elde edilebilecek sonraki çalışmalar için öneriler aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- a. Materyal içerikleri, işgücü girdisi, sermaye akışları ve çalışma şartlarının gerçek ve planlı somut temellere dayalı veriler ile hava araçlarında yaygın olarak kullanılan gaz türbinli motor tiplerinin EEA analizlerinin gerçekleştirilmesi.

- b. Bir önceki tamamlayıcı önerinin akabinde, *EEA* analizinin en fazla yarar sağlaması ve uygulanması beklenen birim olan havayolu işletmeleri açısından termodinamik bir standart olarak ele alınması.
- c. Güç üreten sistemlerin ticari faaliyetlerinin en önemli merkezleri olmasının yanında materyal, işgücü, sermaye ve çevresel etki maliyetlerinin olası potansiyeli ile kullanılmakta olan havalimanları için *EEA* yönteminin uygulanmasıdır.



KAYNAKÇA

- Abam, Fidelis & Ekwe, Ekwe & Effiom, Samuel & Ndukwu, Macmanus. (2018). A comparative performance analysis and thermo-sustainability indicators of modified low-heat organic Rankine cycles (ORCs): An exergy-based procedure. *energy report*. 4. 110-118. 10.1016/j.egy.2017.08.003.
- Açıkkalp, E., Caliskan, H., Altuntas, O., & Hepbasli, A. (2021). Novel combined extended-advanced exergy analysis methodology as a new tool to assess thermodynamic systems. *Energy Conversion and Management*, 236. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114019>
- Agency for Natural Resources and Energy (ANRE), “Hatsuden Kosuto wo Meguru Genjo to Kadai ni Tsuite [Current situation and future issues regarding electricity generation costs], March 10, 2011; ANRE, “Kakushinteki Enerugii/Kankyo Senryaku” Sakutei ni Muketa Chukanteki na Seiri—Shiryo 2-1” [Interim Summary of Policies for a “Revolutionary Energy and Environmental Strategy—Supporting Materials 2-1], July 29, 2011.
- Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Hosseini, S. S., B. Dashti, B., & Mojarab Soufiyan, M. (2018). Performance assessment of a wind power plant using standard exergy and extended exergy accounting (EEA) approaches. *Journal of Cleaner Production*, 171, 127–136. HYPERLINK "<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.263>" <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.263>
- Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Rahnama, E., & Rosen, M. A. (2020). A new systematic decision support framework based on solar extended exergy accounting performance to prioritize photovoltaic sites. *Journal of Cleaner Production*, 256. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120356>
- Ahmadi, M. H., Banihashem, S. A., Ghazvini, M., & Sadeghzadeh, M. (2018). Thermo-economic and exergy assessment and optimization of performance of a hydrogen production system by using geothermal energy. *Energy and Environment*, 29(8), 1373–1392. <https://doi.org/10.1177/0958305X18779573>
- Almutairi, A., Alhajeri, H., Alenezi, A., Zedan, M., & Al-Asousi, M. (2018). Exergoeconomic analysis for a two-shaft industrial gas turbine engine. *Mechanics and Mechanical Engineering*, 22(2), 379–395. <https://doi.org/10.2478/mme-2018-0030>
- Altuntas, O., Hikmet K.T., & Hepbasli, A. (2012). exergetic, exergoeconomic and sustainability assessments of piston-prop aircraft engines. *J. of Thermal Science and Technology*, 32, 133–143.
- Altuntas, O., Karakoc, T. H., & Hepbasli, A. (2015). A parametric study of a piston-prop aircraft engine using exergy and exergoeconomic analysis methods. *International Journal of Green Energy*, 12(1), 2–14. <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.889003>
- Altuntas, O., Karakoc, T. H., & Hepbasli, A. (2015). Exergoeconomic environmental optimization of piston-prop aircraft engines. *International Journal of Green Energy*, 12(1), 41–50. <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.889009>

- Amiri, Z., Asgharipour, M. R., Campbell, D. E., & Armin, M. (2020). Extended exergy analysis (EAA) of two canola farming systems in Khorramabad, Iran. *Agricultural Systems*, 180. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102789>
- Athari, H., Soltani, S., Rosen, M. A., Mahmoudi, S. M. S., & Morosuk, T. (2017). A comparative exergoeconomic evaluation of biomass post-firing and co-firing combined power plants. *Biofuels*, 8(1), 1–15. <https://doi.org/10.1080/17597269.2016.1194609>
- Atilgan, R., & Onder Turan. (2020). Economy and exergy of aircraft turboprop engine at dynamic loads. *Energy*, 213. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118827>
- Aydin, E., Turan, O., & KÖSE, R., (2018). Exergy analysis of a target drone engine: an experimental study for TRS18. *INTERNATIONAL JOURNAL OF EXERGY* , vol.27, no.2, 206-230.
- Aydin, H. (2013). Exergetic sustainability analysis of LM6000 gas turbine power plant with steam cycle. *Energy*, 57, 766–774. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.05.018>
- Aydin, H., Turan, O., Karakoc, T.H., Midilli, A., 2015. Exergetic Sustainability Indicators as a Tool in Commercial Aircraft : A Case Study for a Turbofan Engine Exergetic Sustainability Indicators as a Tool in Commercial Aircraft : A Case Study for a Turbofan Engine. *Int. J. Green Energy* ISSN 5075, 28–40. <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.889004>
- Aygun, H., Cilgin, M. E., & Turan, O. (2020). Exergo-economic cost accounting for PW4000 turbofan engine and its components. *MATEC Web of Conferences*, 314, 02003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202031402003>
- Aygun, H., Cilgin, M. E., & Turan, O. (2021). Exergo-sustainability indicators of a target drone engine at dynamic loads. *Energy*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119803>
- Aygun, Hakan & Turan, Onder, 2021. "Exergo-economic analysis of off-design a target drone engine for reconnaissance mission flight," *Energy*, Elsevier, vol. 224(C).
- Balli O., Aras H. and Hepbasli A., 2010a, Thermodynamic and thermoeconomic analyses of a trigeneration (TRIGEN) system with a gas-diesel engine: Part I –Methodolgy, *Energy Conversation and Management*, 51, 2252-2259
- Balli O., Aras H. and Hepbasli A., 2010b, Thermodynamic and thermoeconomic analyses of a trigeneration (TRIGEN) system with a gas-diesel engine: Part II – an Application, *Energy Conversation and Management*, 51, 2260-2271.
- Balli O., Aras H., Aras N. and Hepbasli A., 2008b, exergetic and exergoeconomic anlysis of an Aircraft Jet Engine (AJE), *International Journal of Exergy*, 5, 567-581.
- Balli O., Aras H. and Hepbasli A., 2008a, exergoeconomic analysis of a combined heat and power (CHP) system in Turkey. *International Journal of Energy Research*. 32,273-289
- Balli, O., & Hepbasli, A. (2014). Exergoeconomic, sustainability and environmental damage cost analyses of T56 turboprop engine. *Energy*, 64, 582–600. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.066>

- Balli, O., Aras, H., Aras, N., & Hepbasli, A. (2008). Exergetic and exergoeconomic analysis of an aircraft jet engine (AJE). *International Journal of Exergy*, 5(5–6), 567–581. <https://doi.org/10.1504/IJEX.2008.020826>
- Balli, Ö. (2019). Thermodynamic, thermoeconomic and environmental performance analyses of a high bypass turbofan engine used on commercial aircrafts. *Sakarya University Journal of Science*, 1–1. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.416228>
- Bejan, A., 2002. Fundamentals of exergy analysis, entropy generation minimization, and the generation of flow architecture. *Int. J. Energy Res.* 26, 545–565. <https://doi.org/10.1002/er.804>
- Bejan, A., Siems, D.L., 2001. The need for exergy analysis and thermodynamic optimization in aircraft development. *Exergy, An Int. J.* 1, 14–24. [https://doi.org/10.1016/S1164-0235\(01\)00005-X](https://doi.org/10.1016/S1164-0235(01)00005-X)
- Bejan, A., Tsatsaronis, G. and Moran, M., 1996, Thermal design and optimization, Wiley, New York., 542 p
- Belli, M., & Sciubba, E. (2007). Extended Exergy Accounting as a general method for assessing the primary resource consumption of social and industrial systems. In *Int. J. Exergy* (Vol. 4, Issue 4).
- Beuna Bardant, T., Syafika Haq, M., Ameir Rahman Setiawan, A., Harianto, S., Waluyo, J., Irianto Mastur, A., Dieni Lestari, A., Sulaswatty, A., Rinaldi, N., & Iswanto Wiloso, E. (2018). “The Renewability Indicator and Cumulative Degree of Perfection for Gamboeng Tea”: Teuku Beuna Bardant The Renewability Indicator and Cumulative Degree of Perfection for Gamboeng Tea; Part.2, Exergy Calculation of Tea Factory. In *Terap.Indones* (Vol. 20, Issue 2). <http://inajac.lipi.go.id>
- Bligh, D. C., & Ismet Ugursal, V. (2012). Extended exergy analysis of the economy of Nova Scotia, Canada. *Energy*, 44(1), 878–890. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.04.061>
- Boukelia, T. E., Bouraoui, A., Laouafi, A., Djimli, S., & Kabar, Y. (2020). 3E (Energy-Exergy-Economic) comparative study of integrating wet and dry cooling systems in solar tower power plants. *Energy*, 200. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117567>
- Bösch, M. E. ;, Hellweg, S. ;, Huijbregts, M. A. J. ;, & Frischknecht, R. (2007). Applying cumulative exergy demand (CExD) indicators to the ecoinvent database ETH Library. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(3). <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000003949>
- Buonocore, E., Picone, F., Donnarumma, L., Russo, G. F., & Franzese, P. P. (2019). Modeling matter and energy flows in marine ecosystems using emergy and eco-exergy methods to account for natural capital value. *Ecological Modelling*, 392, 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.11.018>
- Cengel, Y.A., Boles, M.A., 2006. Thermodynamics: An Engineering Approach, 5th ed. McGraw-Hill, New-York.
- Chen, Bin & Dai, Jing & Enrico, Sciubba. (2014). Ecological accounting for China based on extended exergy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 37. 334–347. [10.1016/j.rser.2014.05.022](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.022).

- Chen, G. Q., & Chen, B. (2009). Extended-exergy analysis of the Chinese society. *Energy*, 34(9), 1127–1144. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.023>
- Chen, Y., Feng, L., Tang, S., Wang, J., Huang, C., & Höök, M. (2020). Extended-exergy based energy return on investment method and its application to shale gas extraction in China. *Journal of Cleaner Production*, 260. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120933>
- Chishty, Wajid & Chan, T. & Canteenwalla, Pervez & Davison, Craig & Chalmers, Jennifer. (2017). Benchmarking data from the experience gained in engine performance and emissions testing on alternative fuels for aviation. *Journal of the Global Power and Propulsion Society*. 1. S5WGLD. 10.22261/S5WGLD.
- Chishty, Wajid & Davison, Craig & Bird, Jeffrey & Chan, T. & Cuddihy, Kevin & McCurdy, Mark & Barton, Peter & Krasteva, Aneliia & Poitras, Pierre. (2011). Emissions Assessment of Alternative Aviation Fuel at Simulated Altitudes. 10.1115/GT2011-45133.
- Chowdhury, T., Chowdhury, H., Ahmed, A., Park, Y. K., Chowdhury, P., Hossain, N., & Sait, S. M. (2020). Energy, exergy, and sustainability analyses of the agricultural sector in Bangladesh. *Sustainability (Switzerland)*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/su12114447>
- Christopher, John. "The Race for Hitler's X-Planes"(The Mill, Gloucestershire: History Press, 2013), p.74.
- Coban, K., Şöhret, Y., Colpan, C. O., & Karakoç, T. H. (2017). Exergetic and exergoeconomic assessment of a small-scale turbojet fuelled with biodiesel. *Energy*, 140, 1358–1367. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.096>
- Colombo, E., Rocco, M. v., Toro, C., & Sciubba, E. (2015). An exergy-based approach to the joint economic and environmental impact assessment of possible photovoltaic scenarios: A case study at a regional level in Italy. *Ecological Modelling*, 318, 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.11.006>
- Corrado, A., Fiorini, P., & Sciubba, E. (2006). Environmental assessment and extended exergy analysis of a “zero CO₂ emission”, high-efficiency steam power plant. *Energy*, 31(15), 3186–3198. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.03.025>
- Çengel YA, Boles MA.1996. Mühendislik yaklaşımıyla Termodinamik. LiteratürYayıncılık. ISSN 9775-8431-91-9
- Dai, J., & Chen, B. (2010). Extended exergy-based fossil fuels resource accounting in spatial distribution in 2007, China. *Procedia Environmental Sciences*, 2, 1799–1807. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.191>
- Dai, J., & Fath, B. (n.d.). *Constructing a network of the Social-economic Consumption System of China using Extended Exergy Analysis*. www.iiasa.ac.at
- Dai, J., Chen, B., & Sciubba, E. (2014). Ecological accounting based on extended exergy: A sustainability perspective. In *Environmental Science and Technology* (Vol. 48, Issue 16, pp. 9826–9833). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/es404191v>

- Dai, J., Chen, B., & Sciubba, E. (2014). Extended exergy based ecological accounting for the transportation sector in China. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 32, pp. 229–237). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.001>
- Dai, J., Fath, B., & Chen, B. (2012). Constructing a network of the social-economic consumption system of China using extended exergy analysis. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 16, Issue 7, pp. 4796–4808). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.027>
- Davison, Craig & Chishty, Wajid. (2011). Altitude Performance of a Turbojet With Alternate Fuels. Proceedings of the ASME Turbo Expo. 1. 10.1115/GT2011-45132.
- de Almeida, S. T., & Borsato, M. (2020). Extending the RIPEX exergy-based method for selecting End of Life strategy. *Resources, Conservation and Recycling*, 152. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104536>
- Degerli, Bahar & Nazir, Serap & Sorgüven, Esra & Hitzmann, Bernd & Özilgen, Mustafa, 2015. "Assessment of the energy and exergy efficiencies of farm to fork grain cultivation and bread making processes in Turkey and Germany," *Energy*, Elsevier, vol. 93(P1), pages 421-434.
- Dewulf, J., De Meester, S., & Alvarenga, R. A. (Eds.). (2015). *Sustainability assessment of renewables-based products: methods and case studies*. John Wiley & Sons. Kerrebrock, J. L., Aircraft Engines and Gas Turbines, 2nd ed., MIT Press, Cambridge, 1992.
- Dewulf, J., Van Langenhove, H., Muys, B., Bruers, S., Bakshi, B.R., Grubb, G.F., Paulus, D.M., and Sciubba, E., 2008. Exergy: Its Potential and Limitations in Environmental Science and Technology. *Environmental Science & Technology* 42, 2221-2232.
- Dincer I, Cengel YA. 2001. Energy, Entropy and Exergy Concepts and Their Roles in Thermal Engineering. *Entropy*. 3:1 16-149
- Dincer, I., 2002. The Role Of Exergy In Energy Policy Making References : *Energy* 30, 137–149.
- Dincer, İ., 2007. Environmental and sustainability aspects of hydrogen and fuel cell systems. *Int. J. energy Res.* 31, 135–147. <https://doi.org/10.1002/er>
- Ehyaei, M. A., Ahmadi, A., & Rosen, M. A. (2019). Energy, exergy, economic and advanced and extended exergy analyses of a wind turbine. *Energy Conversion and Management*, 183, 369–381. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.008>
- Ekici, S. (2020). Thermodynamic mapping of A321-200 in terms of performance parameters, sustainability indicators and thermo-ecological performance at various flight phases. *Energy*, 202. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117692>
- Ekici, S., Şöhret, Y., & Karakoç, T. H. (2017). Performance evaluation parameters for turbojet engines. In *Yıl:1, Cilt:1* (Issue 1).
- Erlach, B., Tsatsaronis, G., & Czesla, F. (2016). A New Approach for Assigning Costs and Fuels to Cogeneration Products. In *Int.J. Applied Thermodynamics* (Vol. 4, Issue 3). <https://www.researchgate.net/publication/42539801>

- Ertesvåg, I. S. (2005). Energy, exergy, and extended-exergy analysis of the Norwegian society 2000. *Energy*, 30(5), 649–675. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.05.025>
- Erzen, S., Ünal, C., Açikkalp, E., & Hepbasli, A. (2021). Sustainability analysis of a solar driven hydrogen production system using exergy, extended exergy, and thermo-ecological methods: Proposing and comparing of new indices. *Energy Conversion and Management*, 236. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114085>
- Eurostat., 1998. Electricity generated by fuel type used: an EU comparison. Eurostat Dataset ST311121.
- Fan, Y., Qiao, Q., & Fang, L. (2017). An innovative application of extended exergy analysis into an industrial park. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(12), 11779–11788. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8797-8>
- Feng, X., Zhong, G., Zhu, P., & Gu, Z. (2004). Cumulative exergy analysis of heat exchanger production and heat exchange processes. *Energy and Fuels*, 18(4), 1194–1198. <https://doi.org/10.1021/ef034068m>
- Gaggioli, R., & Reini, M. (2014). Panel I: Connecting 2nd law analysis with economics, ecology and energy policy. *Entropy*, 16(7), 3903–3938. <https://doi.org/10.3390/e16073903>
- Giffard, H. (2013). Engines of Desperation: Jet Engines, Production and New Weapons in the Third Reich. *Journal of Contemporary History*, 48(4), 821–844. <http://www.jstor.org/stable/24671833>
- Gładysz, P., Saari, J., & Czarnowska, L. (2020). Thermo-ecological cost analysis of cogeneration and polygeneration energy systems - Case study for thermal conversion of biomass. *Renewable Energy*, 145, 1748–1760. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.088>
- Gulotta, T. M., Guarino, F., Mistretta, M., Cellura, M., & Lorenzini, G. (2018). Introducing exergy analysis in life cycle assessment: A case study. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 5(3), 139–145. <https://doi.org/10.18280/mmep.050302>
- Hepbasli, A. (2008). A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 12, Issue 3, pp. 593–661). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.001>
- Hoang, V. N., & Rao, D. S. P. (2010). Measuring and decomposing sustainable efficiency in agricultural production: A cumulative exergy balance approach. *Ecological Economics*, 69(9), 1765–1776. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.04.014>
- Hossain, S., Chowdhury, H., Chowdhury, T., Ahamed, J. U., Saidur, R., Sait, S. M., & Rosen, M. A. (2020). Energy, exergy and sustainability analyses of Bangladesh's power generation sector. *Energy Reports*, 6, 868–878. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.04.010>
- Hosseini-Fashami, Fatemeh & Motevali, Ali & Nabavi-Pelesaraei, Ashkan & Hashemi, Seyed. (2019). Life cycle assessment and cumulative exergy demand analysis of greenhouse tomato production.

Houghton, J.T., Miera Filho, J.G., Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg, A., Maskell, K., 1996. Climate Change 1995: The Science of Climate Change, Contribution of Working Group 1 to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.

¹http://allaero.com/index.php?option=com_content&view=article&id=46735:microturbo-trs-18-turbojet-&catid=464. 10.07.2023

²<https://minijets.org/en/100-150/microturbo-trs-18/>, 10.07.2023)

Ibrahim, A. A., & Adedeji, A. A. (2020). Internal microclimate: Cumulative exergy consumption in a sandcrete and a burnt brick-walled structure. *Nigerian Journal of Technological Development*, 17(1), 62–69. <https://doi.org/10.4314/njtd.v17i1.9>

Jahangir, S., Chen, B., & Wakeel, M. (2016). Extended exergy accounting for Karachi. *Energy Procedia*, 88, 52–57. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.016>

Jawad, H., Jaber, M. Y., & Bonney, M. (2015). The economic order quantity model revisited: An extended exergy accounting approach. *Journal of Cleaner Production*, 105, 64–73. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.079>

Jawad, H., Jaber, M.Y., Bonney, M., 2015. The economic order quantity model

Kim, S., Kwon, Y., & Kwak, H. (1998). *Exergoeconomic Analysis of Thermal Systems* (Vol. 23, Issue 5).

Kirova-Yordanova Bourgas, Z., & Zlatarov, A. (1998). *Cumulative Exergy Consumption in Fertilizers Production Processes*. <https://www.researchgate.net/publication/266938648>

Kostowski, W. J., Usón, S., Stanek, W., & Bargiel, P. (2014). Thermoecological cost of electricity production in the natural gas pressure reduction process. *Energy*, 76, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.045>

Kriechbaum, L., & Kienberger, T. (2020). Optimal municipal energy system design and operation using cumulative exergy consumption minimisation. *Energies*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/en13010182>

Kroyan, Y., Wojcieszek, M., Kaario, O., & Larmin, M. (2022). Modeling the impact of sustainable aviation fuel properties on end-use performance and emissions in aircraft jet engines. *Energy*, 255, Article 124470. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124470>

Kwak, H.Y., Kim, D.J. and Jeon, J.S. (2003) Exergetic and Thermo-economic Analysis of Power Plants. *Energy*, 28, 343-360.

Lara, Y., Petrakopoulou, F., Morosuk, T., Boyano, A., & Tsatsaronis, G. (2017). An exergy-based study on the relationship between costs and environmental impacts in power plants. *Energy*, 138, 920–928. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.087>

Lazzaretto A. ve Tsatsaronis G., SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems, *Energy*, 31 (8-9), 1257-1289, 2006.

Lei, Y., Feng, X., & Min, S. (2007). Parameters optimization of hydrogen production from glucose gasified in supercritical water by equivalent cumulative exergy

- analysis. *Applied Thermal Engineering*, 27(13), 2324–2331. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.01.029>
- Manso, R., Sousa, T., & Domingos, T. (2017). Do the different exergy accounting methodologies provide consistent or contradictory results? a case study with the Portuguese agricultural, forestry and fisheries sector. *Energies*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/en10081219>
- Manso, R., Sousa, T., & Domingos, T. (2018). The way forward in quantifying extended exergy efficiency. *Energies*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/en11102522>
- Mattingly, J. D., Elements of Propulsion Gas Turbines and Rockets, AIAA Education Series, Virginia, 2006.
- Meng, W., Hu, B., Sun, N., Mo, X., He, M., & Li, H. (2019). An integrated full cost model based on extended exergy accounting toward sustainability assessment of industrial production processes. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(10), 1993–2004. <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01767-0>
- Meyer, L., Castillo, R., Buchgeister, J., & Tsatsaronis, G. (2009). Application of Exergoeconomic and Exergoenvironmental Analysis to an SOFC System with an Allothermal Biomass Gasifier. *Int. J. of Thermodynamics*, 12(4), 177–186. www.icatweb.org/journal.htm
- Midilli, A., Dincer, I., 2009. Development of some exergetic parameters for PEM fuel cells for measuring environmental impact and sustainability. *Int. J. Hydrogen Energy* 34, 3858–3872. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2009.02.066>
- Miller, J., Foxon, T. J., & Sorrell, S. (2016). Exergy accounting: A quantitative comparison of methods and implications for energy-economy analysis. *Energies*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/en9110947>
- Morosuk T., & Koroneos, Christopher. (2011). The Effect of Eco-Indicator on The Results of Exergoenvironmental Analysis.
- Morosuk, T. (2013). Exergoenvironmental analysis is a new tool for evaluation of an energy conversion system. “*Енергетика і автоматика*”, №4, 2013 p.
- Morosuk, T., & Tsatsaronis, G. (2012). 3-D Exergy-based methods for improving energy-conversion systems. *International Journal of Thermodynamics*, 15(4), 201–213. <https://doi.org/10.5541/ijot.417>
- Morris, D. R. (1991). Exergy analysis and cumulative exergy consumption of complex chemical processes: the industrial chlor-alkali processes. *Chemical Engineering Science*, Volume 46, Issue 2, p. 459-465. DOI: [10.1016/0009-2509\(91\)80007-L](https://doi.org/10.1016/0009-2509(91)80007-L)
- Naserian, M. M., Farahat, S., & Sarhaddi, F. (2016). Exergoeconomic multi objective optimization and sensitivity analysis of a regenerative Brayton cycle. *Energy Conversion and Management*, 117, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.014>
- Nie, B., & Gao, Z. (2014). Cumulative exergy consumption (CExC) analysis of energy carriers in China. In *Int. J. Exergy* (Vol. 15, Issue 2).

- Nikkhah, A., Kosari-Moghaddam, A., Esmaeilpour Troujeni, M., Bacenetti, J., & van Haute, S. (2021). Exergy flow of rice production system in Italy: Comparison among nine different varieties. *Science of the Total Environment*, 781. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146718>
- Nogueira, A. R., Donke, A. C. G., Matsuura, M. I. S. F., Matai, P. H. L. S., & Kulay, L. (2014). Use of Environmental and Thermodynamic Indicators to Assess the Performance of an Integrated Process for Ethanol Production. *Environment and Natural Resources Research*, 4(4). <https://doi.org/10.5539/enrr.v4n4p59>
- Okura, T., 2015. Materials for aircraft engines. ASEN 5063, 1–14.
- Ordikhani, H., Parashkoohi, M. G., Zamani, D. M., & Ghahderijani, M. (2021). Energy-environmental life cycle assessment and cumulative exergy demand analysis for horticultural crops (Case study: Qazvin province). *Energy Reports*, 7, 2899–2915. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.05.022>
- Oyedepo, S. O., Fagbenle, R. O., Adefila, S. S., & Alam, M. M. (2015). Thermoeconomic and thermoenviromonic modeling and analysis of selected gas turbine power plants in Nigeria. *Energy Science and Engineering*, 3(5), 423–442. <https://doi.org/10.1002/ese3.79>
- Oyedepo, S. O., Fagbenle, R. O., Adefila, S. S., & Alam, M. M. (2015). Exergoeconomic analysis and performance assessment of selected gas turbine power plants. *World Journal of Engineering*, 12(3), 283–300. <https://doi.org/10.1260/1708-5284.12.3.283>
- Oyedepo, S. O., Fagbenle, R. O., Adefila, S. S., & Alam, M. M. (2015). Exergy costing analysis and performance evaluation of selected gas turbine power plants. *Cogent Engineering*, 2(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1101048>
- Prestipino, M., Salmeri, F., Cucinotta, F., & Galvagno, A. (2021). Thermodynamic and environmental sustainability analysis of electricity production from an integrated cogeneration system based on residual biomass: A life cycle approach. *Applied Energy*, 295. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117054>
- Ptasinski, K. J., Koymans, M. N., & Verspagen, H. H. G. (2006). Performance of the Dutch Energy Sector based on energy, exergy and Extended Exergy Accounting. *Energy*, 31(15), 3135–3144. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.03.010>
- Pu, J., Liu, G., & Feng, X. (2010). Application of the cumulative exergy approach to different air conditioning systems. *Energy and Buildings*, 42(11), 1999–2004. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.06.007>
- Pu, J., Liu, G., & Feng, X. (2012). Cumulative exergy analysis of ice thermal storage air conditioning system. *Applied Energy*, 93, 564–569. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.003> revisited: an extended exergy accounting approach. *J. Clean. Prod.* 105, 64e73.
- Rocco, M. v., Colombo, E., & Sciubba, E. (2014). Advances in exergy analysis: A novel assessment of the Extended Exergy Accounting method. *Applied Energy*, 113, 1405–1420. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.080>

- Rodríguez-Merchan, V., Ulloa-Tesser, C., & Casas-Ledón, Y. (2019). Evaluation of the Water-Energy-Land Nexus (WELN) using exergy-based indicators: The Chilean electricity system case. *Energies*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/en13010042>
- Rogoway T., 25.11.2023, <https://www.thedrive.com/the-war-zone/21367/it-takes-47000-hours-of-labor-to-build-a-single-f-35a>
- Ryerson MS, Hansen M, "The potential of turboprops for reducing aviation fuel consumption", *Transportation Research Part D*, 15, 305-314, 2010.
- Saravanamuttoo H.I.H., "Modern Turboprop Engines", *Progress in Aerospace Science*, vol. 24, pp. 225-248, 1987.
- Sciubba E., Exergo-economics: Thermodynamic foundation for a more rational resource Use, *International Journal of Energy Research*, 29, 613—636, 2005.
- Sciubba, E. (2001). Beyond thermoeconomics? The concept of Extended Exergy Accounting and its application to the analysis and design of thermal systems. In *Exergy Int. J* (Vol. 1, Issue 2). www.exergyonline.com
- Sciubba, E. (2003). Cost analysis of energy conversion systems via a novel resource-based quantifier. *Energy*, 28(5), 457–477. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(02\)00096-8](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(02)00096-8)
- Sciubba, E. (2003). Extended exergy accounting applied to energy recovery from waste: The concept of total recycling. *Energy*, 28(13), 1315–1334. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(03\)00111-7](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(03)00111-7)
- Sciubba, E. (2004). "From Engineering Economics to Extended Exergy Accounting: A Possible Path from Monetary to Resource-Based Costing," *Journal of Industrial Ecology*, Yale University, vol. 8(4), pages 19-40, October.
- Sciubba, E. (2009). *Exergy-based Ecological Indicators: a Necessary Tool for Resource Use Assessment Studies* *.
- Sciubba, E. (2011). A revised calculation of the econometric factors α - and β for the Extended Exergy Accounting method. *Ecological Modelling*, 222(4), 1060–1066. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.11.003>
- Sciubba, E., Bastianoni, S., & Tiezzi, E. (2008). Exergy and extended exergy accounting of very large complex systems with an application to the province of Siena, Italy. *Journal of Environmental Management*, 86(2), 372–382. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.04.016>
- SEAI (Sustainable Energy Authority of Ireland), SEAI Conversion and Emission Factors, <https://www.seai.ie/data-and-insights/seai-statistics/conversion-factors/>, 28.10.2023
- Seckin, C. (2016). Extended Exergy Accounting analysis of IGCC process - Determination of environmental remediation cost of refinery and coke processing waste. *Journal of Cleaner Production*, 119, 178–186. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.088>
- Seckin, C., & Bayulken, A. R. (2013). Extended Exergy Accounting (EEA) analysis of municipal wastewater treatment - Determination of environmental remediation cost

- for municipal wastewater. *Applied Energy*, 110, 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.042>
- Seckin, C., Sciubba, E., & Bayulken, A. R. (2012). An application of the extended exergy accounting method to the Turkish society, year 2006. *Energy*, 40(1), 151–163. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.018>
- Seckin, C., Sciubba, E., & Bayulken, A. R. (2013). Extended exergy analysis of Turkish transportation sector. *Journal of Cleaner Production*, 47, 422–436. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.008>
- SEÇKİN, C., (2016). Environmental Remediation Cost of Industrial Solid Waste in Terms of Extended Exergy. *Engineering Approaches on Sustainability* (pp.45-64), Londrina: IJOPEC.
- Silveira, J. L., & Tuna, C. E. (2004). Thermo-economic analysis method for optimization of combined heat and power systems - Part II. In *Progress in Energy and Combustion Science* (Vol. 30, Issue 6, pp. 673–678). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2003.06.001>
- Simla, T., & Stanek, W. (2020). Reducing the impact of wind farms on the electric power system by the use of energy storage. *Renewable Energy*, 145, 772–782. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.028>
- Song, D., & Chen, B. (2016). Extended exergy accounting for energy consumption and CO₂ emissions of cement industry-a basic framework. *Energy Procedia*, 88, 305–308. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.145>
- Song, D., Lin, L., & Wu, Y. (2019). Extended exergy accounting for a typical cement industry in China. *Energy*, 174, 678–686. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.006>
- Szargut J., Exergy method, technical and ecological applications, WIT Pres, 2005
- Szargut, J. (1987). Analysis of cumulative exergy consumption Second law analysis Exergy losses Chain of production processes. In *international journal of energy research* (Vol. 1, Issue 1).
- Szargut, J. (2007). Local and System Exergy Losses in Cogeneration Processes. In *Int. J. of Thermodynamics* (Vol. 10, Issue 4).
- Szargut, J., & Morris, D. R. (1987). Cumulative exergy consumption and cumulative degree of perfection of chemical processes. in *energy research* (Vol. 1, Issue 1).
- Szargut, J., & Stanek, W. (2007). Thermo-ecological optimization of a solar collector. *Energy*, 32(4), 584–590. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.06.010>
- Szargut, J., & Stanek, W. (2012). Fuel part and mineral part of the thermoecological cost. *International Journal of Thermodynamics*, 15(4), 187–190. <https://doi.org/10.5541/ijot.419>
- Szargut, Jan & Valero, Antonio & Stanek, Wojciech & Valero, Alicia. (2005). Towards an international legal reference environment. *Proceedings of ECOS 2005*. 1.

- Talens Peiró, L., Villalba Méndez, G., Sciubba, E., & Gabarrell i Durany, X. (2010). Extended exergy accounting applied to biodiesel production. *Energy*, 35(7), 2861–2869. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.015>
- Tsatsaronis, G. (1993). Thermoeconomic analysis and optimization of energy systems. In *Progress in Energy and Combustion Science* (Vol. 19, Issue 3, pp. 227–257). [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(93\)90016-8](https://doi.org/10.1016/0360-1285(93)90016-8)
- Tsatsaronis, G. (2016). *Combination of Exergetic and Economic Analysis in Energy Conversion Processes, Proceedings, European Congress on Economic and Management of Energy in Industry*. <https://www.researchgate.net/publication/285424528>
- Tsatsaronis, G., 2007. Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics. *Energy* 32, 249–253. "https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.07.002"
- Turan, Onder. (2016). Energy and entropy analyses of an experimental turbojet engine for target drone application. *anadolu university journal of science and technology A - Applied Sciences and Engineering*. 17. 936-936. 10.18038/aubtda.279861.
- Turan, Önder & Aydın, Hakan, 2016. "Numerical calculation of energy and exergy flows of a turboshaft engine for power generation and helicopter applications," *Energy*, Elsevier, vol. 115(P1), pages 914-923.
- Tzilivakis, D.J. Warner, M. May, K.A. Lewis, K. Jaggard, An assessment of the energy inputs and greenhouse gas emissions in sugar beet (*Beta vulgaris*) production in the UK, *Agricultural Systems*, Volume 85, Issue 2, 2005, Pages 101-119, ISSN 0308-521X, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2004.07.015>.
- Ukidwe, N. U., & Bakshi, B. R. (2007). Industrial and ecological cumulative exergy consumption of the United States via the 1997 input-output benchmark model. *Energy*, 32(9), 1560–1592. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.11.005>
- Ünal, C., Açikkalp, E., Borge-Diez, D., & Hepbasli, A. (2021). Extended exergy analysis of a solar driven water production plant via reverse osmosis. *Applied Thermal Engineering*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117064>
- Valero, A. (2006). Exergy accounting: Capabilities and drawbacks. *Energy*, 31(1 SPEC. ISS.), 164–180. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.04.054>
- Van Gool, W., 1997. *Energy Policy: Fairy Tales and Facts*, içinde: Springer. ss. 93–105.
- Wang, Q., Ma, Y., Li, S., Yue, C., & He, L. (2019). Expanding exergy analysis for the sustainability assessment of SJ-type oil shale retorting process. *Energy Conversion and Management*, 187, 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.077>
- Wang, S., Liu, C., Liu, L., Xu, X., & Zhang, C. (2019). Ecological cumulative exergy consumption analysis of organic Rankine cycle for waste heat power generation. *Journal of Cleaner Production*, 218, 543–554. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.003>

- Yang, J., & Chen, B. (2014). Extended exergy-based sustainability accounting of a household biogas project in rural China. *Energy Policy*, 68, 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.017>
- Yang, S., Yang, S., & Qian, Y. (2015). The inclusion of economic and environmental factors in the ecological cumulative exergy consumption analysis of industrial processes. *Journal of Cleaner Production*, 108, 1019–1027. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.039>
- Yildizhan, H., & Taki, M. (2018). Assessment of tomato production process by cumulative exergy consumption approach in greenhouse and open field conditions: Case study of Turkey. *Energy*, 156, 401–408. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.117>
- Yuksel, B., Gunerhan, U., & Hepbasli, A. (2020). Assessing Exergy-Based Economic and Sustainability Analyses of a Military Gas Turbine Engine Fueled with Various Fuels. *Energies*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/en13153823>
- Zhao-Hui, L., Wei-Min, Z., Zhong-Yue, X., Jia-Bin, S., & Dongdong, L. (2020). Research on Extended Carbon Emissions Accounting Method and Its Application in Sustainable Manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 43, 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.132>
- Zhu, P. (2008). An Improved Calculation of the Thermodynamically Based Allocation of Cumulative Exergy Consumption in the Petroleum Distillation Process. In *Chinese Journal of Chemical Engineering* (Vol. 16, Issue 1).
- Zhu, P. (2011a). Application of thermodynamics to the allocation of cumulative exergy consumption in the multiproduct separation processes. *Advanced Materials Research*, 236–238, 741–745. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.236-238.741>
- Zhu, P. (2011b). Application the cumulative exergy analysis to the optimal heat exchange process. *Advanced Materials Research*, 291–294, 3161–3164. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.291-294.3161>
- Zhu, P. (2016). *Application of the Exergy Method to the Environmental Impact Analysis: A Case Study*.
- Zhu, P., Feng, X., & Shen, R. J. (2005). An extension to the cumulative exergy consumption applied to environmental impact analysis of industrial processes. *Process Safety and Environmental Protection*, 83(3 B), 257–261. <https://doi.org/10.1205/psep.04290>
- Ziębik, A., & Gładysz, P. (2013). Analysis of the cumulative exergy consumption of an integrated oxy-fuel combustion power plant. *Archives of Thermodynamics*, 34(3), 105–122. <https://doi.org/10.2478/aoter-2013-0018>

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000-0001-7383-1700

Ad Soyad : **Muhammet YILANLI**

Yabancı Dil : **İNGİLİZCE**

Yayınları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- Yilanli, M., Sheikhi M.R., Altuntas Ö., ve Açikkalp E., (2023). Assessing the Global Warming Potential of Aircraft Gas Turbine Materials: Impacts and Implications. *Process Safety and Environmental Protection* (IF 7.8), DOI:10.1016/j.psep.2023.05.100