



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN  
ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



GELİŞMİŞ ADYABATİK SIKIŞTIRILMIŞ  
HAVA İLE ENERJİ DEPOLAYAN YENİ BİR  
GÜÇ SİSTEMİNİN TERMODİNAMİK  
ANALİZİ VE ÇOK AMAÇLI  
OPTİMİZASYONU

Esra HANÇER GÜLERYÜZ

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2023  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır

# ÖZET

## DOKTORA TEZİ

### GELİŞMİŞ ADYABATİK SIKIŞTIRILMIŞ HAVA İLE ENERJİ DEPOLAYAN YENİ BİR GÜÇ SİSTEMİNİN TERMODİNAMİK ANALİZİ VE ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYONU

Esra HANÇER GÜLERYÜZ

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Dilek Nur ÖZEN  
Yardımcı Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Merve ACILAR

2023, 95 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Dilek Nur ÖZEN  
Prof. Dr. Halil Kürşad ERSOY  
Prof. Dr. Ali KAHRAMAN  
Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ulaş ATMACA  
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Numan KAYA

Enerjiye olan ihtiyacın artmasıyla enerji depolama sistemlerine ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının dezavantajı olan süreksizlik hususu enerji depolama sistemleri ile bertaraf edilmek istenmektedir. Bu doğrultuda yüksek miktarda enerjinin mekanik olarak depolanmasına imkân tanıyan sıkıştırılmış hava ile enerji depolama sistemleri sahip olduğu avantajlarla son yıllarda enerji depolama sistemleri arasında oldukça dikkat çekmektedir. Ancak bu sistemlerin uygulanabilir ve sürdürülebilir olmaları için geliştirilmeleri gerekmektedir. Bu sistemlerin çalışma performansını artırmak için sistem bileşenlerinin ekserji yıkımının kaynağını, birbirleriyle olan ilişkilerini belirlemek ve optimize etmek önemlidir.

Bu çalışmada 10 MW güç çıkışına sahip gelişmiş bir adyabatik sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemi önerilmiştir. Önerilen bu sistemin geleneksel/ileri ekserji ve ekserji-ekonomik analizleri yapılarak bileşenlerin birbirleriyle olan ilişkileri incelenmiştir. Buna ek olarak önerilen sistemin parametrik analizi ve çok amaçlı optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çok amaçlı optimizasyon çalışmasında Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması-II yöntemi kullanılmıştır. Optimizasyon çalışmasında amaç fonksiyonları geleneksel ve ileri ekserji/eksergo-ekonomik analiz konseptinde belirlenmiştir. İleri ekserji-ekonomik analiz konseptindeki optimizasyon çalışmasında literatürde olmayan yeni bir performans kriteri belirlenmiş ve sonuçlar geleneksel ekserji-ekonomik analizler ile doğrulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Çok amaçlı optimizasyon, Ekserji analizi, Eksergo-ekonomik analiz, Gelişmiş adyabatik sıkıştırılmış hava ile enerji depolama.

## ABSTRACT

### Ph.D THESIS

# THERMODYNAMIC ANALYSIS AND MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF A NOVEL POWER SYSTEM WITH ADVANCED ADIABATIC COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE

Esra HANÇER GÜLERYÜZ

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY  
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Dilek Nur ÖZEN  
Asst. Advisor: Asst. Prof. Dr. Ayşe Merve ACILAR  
2023, 95 Pages

#### Jury

Assoc. Prof. Dr. Dilek Nur ÖZEN  
Prof. Dr. Halil Kürşad ERSOY  
Prof. Dr. Ali KAHRAMAN  
Asst. Prof. Dr. Şükrü Ulaş ATMACA  
Asst. Prof. Dr. Mehmet Numan KAYA

The increasing need for energy increases the interest in energy storage systems and renewable energy sources. The fluctuations, which are the disadvantage of renewable energy sources, are desired to be eliminated with energy storage systems. In this regard, compressed air energy storage system which allow the mechanical storage of large amounts of energy have attracted a lot of attention among energy storage systems in recent years with their advantages. However, these systems need to be developed in order to be feasible and sustainable. In order to improve the operating performance of these systems, it is important to identify and optimize the source of exergy destruction of the system components and their interrelationships.

In this study, an advanced adiabatic compressed air energy storage system with a power output of 10 MW is proposed. Conventional/advanced exergy and exergy-economic analyses of the proposed system are performed and the interrelationships among the components are investigated. In addition, parametric analysis and multi-objective optimization of the proposed system are carried out. In the multi-objective optimization study, the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II method is used and the objective functions are determined in conventional and advanced exergy/exergy-economic analysis concepts. A new performance criterion for advanced exergy-economic analysis that is not available in the literature is determined and the results are validated with conventional exergy-economic analysis.

**Keywords:** Advanced adiabatic compressed air energy storage, Exergy analysis, Exergo-economic analysis, Multi-objective optimization.

## ÖNSÖZ

Öncelikle doktora öğrenimim boyunca kıymetli tecrübesini ve desteğini esirgemeyerek bu süreci keyifli ve anlamlı kılan değerli danışman hocam Doç. Dr. Dilek Nur ÖZEN'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez konumun belirlenmesinde ve yürütülmesinde sağladıkları tüm katkılar için saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Ali KAHRAMAN ve Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ulaş ATMACA'ya teşekkürlerimi arz ederim. Ayrıca tez çalışmam sırasında optimizasyon konusunda paylaştığı değerli tecrübeleri için ikinci danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Merve ACILAR'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tanıştığımızdan bu yana yoluma ışık olan, beni her daim destekleyen değerli eşim Ali Sami GÜLERYÜZ'e yaptığı her türlü fedakârlıklar için teşekkür ederim. Doğumuyla hayatımızı güzelleştiren, doktora sürecimle beraber büyüttüğüm dünya tatlısı oğlum Mustafa Talha'ya sevgilerimi sunarım. İyi ki varsınız.

Her zaman desteklerini yanımda hissettiğim, beni daima cesaretlendiren kıymetli annem İlknur HANÇER'e, babam Mustafa HANÇER'e, akademik olarak yoldaş olup motive eden kardeşim Şeyma GEBEL'e, kardeşlerim Ahmet Furkan ve Ayşe Gül'e sevgi ve şükranlarımı sunarım.

Maddi ve manevi desteklerini esirgemeyerek verdikleri gayretle sürecimi kolaylaştıran değerli annem Elife GÜLERYÜZ'e ve babam Mustafa GÜLERYÜZ'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı "2211-C Yurtiçi Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı" kapsamında destekleyen "TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı'na" teşekkürlerimi sunarım.

Esra HANÇER GÜLERYÜZ  
KONYA-2023

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ .....</b>	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR .....</b>	<b>ix</b>
<b>ÇİZELGELER LİSTESİ .....</b>	<b>xiii</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ .....</b>	<b>xiv</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.2. Enerji Depolama Sistemleri .....	1
1.3. Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama .....	2
1.4. Bölüm Sonu Değerlendirmesi .....	4
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>6</b>
2.1. Enerji ve Ekserji Analizi Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	6
2.2. Geleneksel Ekserji ve Eksergo-ekonomik Analiz Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	6
2.3. İleri Ekserji ve Eksergo-ekonomik Analiz Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	8
2.4. Çok Amaçlı Optimizasyon Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	10
2.5. Bölüm Sonu Değerlendirmesi .....	17
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>	<b>18</b>
3.1. Sistem Şeması .....	18
3.2. Sistemin Matematik Modeli ve Kabuller .....	19
3.3. Sistemin Termodinamik Analizi .....	21
3.3.1. Enerji Analizi .....	21
3.3.1.1. Enerji Analizi için Performans Kriterleri .....	23
3.3.2. Geleneksel Ekserji ve Eksergo-ekonomik Analizi .....	23
3.3.3. İleri Ekserji ve Eksergo-ekonomik Analiz .....	33
3.4. Sistemin Duyarlılık Analizi .....	39
3.4.1. Duyarlılık Analizi için Performans Kriterleri .....	39
3.5. Sistemin Çok Amaçlı Optimizasyonu .....	39
3.5.1. Çok Amaçlı Optimizasyon Çalışması için Performans Kriterleri .....	43
3.6. Model Doğrulaması .....	44
3.7. Bölüm Sonu Değerlendirmesi .....	45
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....</b>	<b>46</b>
4.1. Enerji Analizi .....	46
4.2. Geleneksel ve İleri Ekserji Analizi .....	51

4.3.	Geleneksel ve İleri Eksergo-ekonomik Analizi.....	56
4.4.	Duyarlılık Analizi ve Çok Amaçlı Optimizasyon .....	62
4.4.1.	Kararlı değişkenlerin değişiminin <b>ExD, toplam</b> 'nın bölümleri üzerindeki etkileri.....	62
4.4.2.	Kararlı değişkenlerin değişiminin <b>CD, toplam</b> 'ın bölümleri üzerindeki etkileri.....	68
4.4.3.	Kararlı değişkenlerin değişiminin <b>Ztoplam</b> 'ın bölümleri üzerindeki etkileri	74
4.4.4.	Çok Amaçlı Optimizasyon .....	81
<b>5.</b>	<b>SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>86</b>
<b>6.</b>	<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>89</b>



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Kısaltmalar

<i>ANN</i>	Yapay sinir ağı
<i>A-SHED</i>	Adyabatik sıkıştırılmış hava ile enerji depolama
<i>BSIG</i>	Birleşik soğutma ısıtma güç
<i>ÇEBS</i>	Çoklu-etkili buhar sıkıştırma
<i>BT-SHED</i>	Birleşik termal basınçlı hava ile enerji depolama
<i>DORÇ</i>	Dual-basınç organik Rankine çevrimi
<i>D-SHED</i>	Diyabatik sıkıştırılmış hava ile enerji depolama
<i>EES</i>	Engineering equation solver
<i>EDS</i>	Enerji depolama sistemleri
<i>ERTE</i>	Ekserjetik çevrim döngü verimi (exergetic round trip efficiency)
<i>ESS</i>	Ejektörlü soğutma sistemi
<i>ESD</i>	Enerji depolama yoğunluğu
<i>GA</i>	Genetik algoritma
<i>GA-SHED</i>	Gelişmiş adyabatik sıkıştırılmış hava ile enerji depolama
<i>GT-KOYH</i>	Gaz türbinlü katı oksit yakıt hücresi
<i>HD</i>	Hava deposu
<i>ID</i>	Isı değiştiricisi
<i>I-SHED</i>	İzotermal sıkıştırılmış hava ile enerji depolama
<i>J</i>	Jeneratör
<i>K</i>	Kompresör
<i>M</i>	Motor
<i>M1</i>	Birinci mikser
<i>M2</i>	İkinci mikser
<i>MOPSO</i>	Çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu
<i>MOWOA</i>	Çok amaçlı balina optimizasyonu
<i>NSGA-II</i>	Baskın olmayan sıralama genetik algoritma
<i>OFRC</i>	Organik Flash Rankine çevrimi
<i>ORÇ</i>	Organik Rankine çevrimi
<i>P</i>	Pompa
<i>PDHES</i>	Pompaj depolamalı hidroelektrik santral
<i>PDME</i>	Proton değişim membran elektrolizörü
<i>REG</i>	Regülatör
<i>RT</i>	Rüzgar türbini
<i>RTE</i>	Çevrim döngü verimi (round trip efficiency)
<i>S1</i>	Birinci seperatör
<i>S2</i>	İkinci seperatör
<i>SBX</i>	Simüle edilmiş ikili çaprazlama
<i>SCO<sub>2</sub></i>	Süperkritik karbondioksit ara sıkıştırımlı brayton çevrimi
<i>SHED</i>	Sıkıştırılmış hava ile enerji depolama
<i>SHED-TD</i>	Termal depolu sıkıştırılmış hava ile enerji depolama
<i>SI-TED</i>	Sıcak termal enerji deposu
<i>SO-TED</i>	Soğuk termal enerji deposu
<i>SPECO</i>	Özgül Ekserji Maliyeti
<i>SKED</i>	Sıkıştırılmış karbondioksit ile enerji depolama
<i>S-SKED</i>	Süperkritik sıkıştırılmış karbondioksit enerji depolama
<i>T</i>	Türbin
<i>TED</i>	Termal enerji deposu

**Semboller**

$A$	Alan ( $m^2$ )
$A_{rt}$	Rüzgâr türbinin kanat alanı ( $m^2$ )
$c$	Birim ekserji maliyeti ( $\$/GJ$ )
$\dot{C}$	Ekserji maliyeti ( $\$/h$ )
$c_p$	Özgül ısı ( $J/kgK$ )
$C_{p,RT}$	Rüzgâr türbininin güç katsayısı (%)
$c_{yb}$	Yükleme-boşaltma süresi oranı
$CRF$	Anapara gerikazanım faktörü
$d$	Çap ( $m$ )
$\dot{E}x$	Ekserji ( $kW$ )
$f_k$	“k” bileşenin eksergo-ekonomik faktörü (%)
$h$	Entalpi ( $kJ/kg$ )
$iter_{maks}$	Maksimum iterasyon sayısı
$\dot{m}$	Kütleli debi ( $kg/s$ )
$\dot{m}_k$	Yükleme sırasında kompresörlerden geçen sıkıştırılmış havanın kütleli debisi ( $kg/s$ )
$\dot{m}_t$	Boşaltma sırasında türbinlerden geçen sıkıştırılmış havanın kütleli debisi ( $kg/s$ )
$N$	Sistem ömrü ( $h$ )
$N_{pop}$	Birey sayısı
$\dot{Q}$	Isı transfer hızı ( $kW$ )
$P$	Basınç ( $Pa$ )
$p_c$	Çaprazlama olasılığı
$p_m$	Mutasyon olasılığı
$Pr$	Prandtl sayısı
$P_t$	Ebeveyn popülasyonu
$Re$	Reynolds sayısı
$R_f$	Kirlenme katsayısı
$r_k$	“k” bileşenin göreceli maliyet farkı (%)
$RTE$	Çevrim döngü verimi (%)
$s$	Entropi ( $kJ/kg.K$ )
$T$	Sıcaklık ( $K$ )
$t$	Zaman ( $s$ )
$\dot{W}$	Bileşenler tarafından tüketilen ve üretilen güç ( $kW$ )
$V_{hd}$	Hava deposu hacmi ( $m^3$ )
$V$	Hız ( $m/s$ )
$Y_{D,k}$	Ekserji yıkım oranı (%)
$Y_{D,k}^*$	Bağıl ekserji yıkım oranı (%)
$\dot{Z}$	Yatırım maliyeti ( $\$/s, \$/gün$ )

**Yunan harfleri**

$\varepsilon$	Isı değiştiricisi etkinliği
$\varepsilon_k$	Ekserji verimi (%)

$\eta$	İzentropik verimi (%)
$\eta_{sistem}$	Sistemin ekserji verimi (%)
$\mu_{tw}$	Gövde tarafının duvar sıcaklığındaki viskozitesi ( $kg/m.s$ )
$\mu_{tc}$	Gövde tarafının akış sıcaklığındaki viskozitesi ( $kg/m.s$ )
$\mu_{sw}$	Boru tarafının duvar sıcaklığındaki viskozitesi ( $kg/m.s$ )
$\mu_{sc}$	Boru tarafının akış sıcaklığındaki viskozitesi ( $kg/m.s$ )
$v$	Akış hızı ( $m/s$ )
$\lambda$	Yıllık faiz oranı (%)
$\rho$	Yoğunluk ( $kg/m^3$ )
$\varphi$	Bakım faktörü
$\Delta T_m$	Logaritmik ortalama sıcaklık farkı

### Alt indisler

0	Referans noktası
1-27	Durum
AV	Kaçınılabilir
b	Boşaltma
çıkış	Çıkış
D	Yıkım
f	Besleme
p	Ürün
GERÇEK	Gerçek şartlar
giriş	Giriş
HD	Hava deposu
ID – 1	Birinci ısı değiştiricisi
ID – 2	İkinci ısı değiştiricisi
ID – 3	Üçüncü ısı değiştiricisi
ID – 4	Dördüncü ısı değiştiricisi
i	İç kısım
k	Bileşen
K – 1	Birinci kompresör
K – 2	İkinci kompresör
KE	Kinetik enerji
maks	Maksimum
min	Minimum
o	Dış kısım
P – 1	Birinci pompa
P – 2	İkinci pompa
REG	Regülatör
RT	Rüzgâr türbini
s	Gövde tarafı
SI – TED	Sıcak termal enerji deposu
sistem	Tüm sistem
SO – TED	Soğuk termal enerji deposu
t	Boru tarafı
TED	Termal enerji deposu
toplam	Toplam
T – 1	Birinci türbin

$T - 2$  İkinci türbin  
 $y$  Yükleme

### Üst indisler

*adv* İleri analize göre  
*AV* Kaçınılabilir  
*EN* İçsel  
*EN, AV* İçsel kaçınılabilir  
*EN, UN* İçsel kaçınılamaz  
*EX* Dışsal  
*EX, AV* Dışsal kaçınılabilir  
*EX, UN* Dışsal kaçınılamaz  
*UN* Kaçınılamaz  
\* Modifiye edilmiş



## ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 1.1. Enerji Depolama Sistemlerinin detaylı kıyaslaması (Panda ve ark., 2020) .	2
Çizelge 2.1. Literatürdeki SHED temelli sistemlerin geleneksel/ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analizleri üzerine çalışmalar. ....	9
Çizelge 3.1. Simülasyon koşulları. ....	20
Çizelge 3.2. Sistem bileşenleri için enerji denklemleri. ....	21
Çizelge 3.3. Enerji analizi için anahtar parametrelerin aralık değerleri .....	23
Çizelge 3.4. Sistem bileşenlerine ait besleme-ürün ekserji ve ekserji yıkım denklemleri. ....	25
Çizelge 3.5. Maliyet denge denklemleri ve yardımcı denklemler. ....	26
Çizelge 3.6. Sistem Bileşenlerine ait Maliyet Denklemleri.....	28
Çizelge 3.7. $K1$ ve $n1$ katsayılarına ait değerler (Asadi ve ark., 2014). ....	30
Çizelge 3.8. İleri Ekserji Analizi için Girdi Değerleri (Z. Liu ve ark., 2019; Montazerinejad ve ark., 2019; Wang ve ark., 2016; Y. Zhang ve ark., 2021).....	34
Çizelge 3.9. Duyarlılık analizi için anahtar parametrelerin değer aralıkları.....	39
Çizelge 3.10. Optimizasyon için belirlenen kararlı değişkenlerin aralığı. ....	40
Çizelge 3.11. Liu ve Wang, (2016)'nın çalışması ile önerilen sistemin kıyaslanması... ..	45
Çizelge 4.1. Gerçek koşullar altında her bir noktanın termodinamik özellikleri, ekserji yıkım oranları ve eksergo-ekonomik analiz sonuçları.....	51
Çizelge 4.2. Sistem bileşenlerinin geleneksel ekserji ve ileri ekserji analiz sonuçları... ..	52
Çizelge 4.3. Sistem bileşenlerinin ileri ekserji analiz sonuçları. ....	55
Çizelge 4.4. Sistem bileşenlerinin geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analiz sonuçları. ....	58
Çizelge 4.5. Sistem bileşenleri için ekserji yıkım maliyet oranları. ....	59
Çizelge 4.6. Sistem bileşenlerine ait ileri eksergo-ekonomik analiz sonuçları. ....	60
Çizelge 4.7. Kararlı değişkenlerin ve amaç fonksiyonlarının temel durum ve optimum değerleri. ....	84

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	SHED sisteminin temel çalışma mantığı.....	3
Şekil 3.1.	GA-SHED temelli bir güç sisteminin şematik görüntüsü. ....	19
Şekil 3.2.	“k” sistem bileşeni için ekserji yıkımının içsel, dışsal, kaçınılabılır ve kaçınılamaz bölümlerine ayrılmasının denklemler ile şematik gösterimi (Özen ve Koçak, 2022). ....	35
Şekil 3.3.	“k” sistem bileşeni için yatırım maliyetinin içsel, dışsal, kaçınılabılır ve kaçınılamaz bölümlerine ayrılmasının denklemler ile şematik gösterimi(Özen ve Koçak, 2022) .....	36
Şekil 3.4.	Geleneksel/ ileri ekserji ve eksergo-ekonomik hesaplarının çözüm akış algoritması.....	37
Şekil 3.5.	Önerilen sisteme uygulanan optimizasyon prosedürünün akış şeması. ....	42
Şekil 4.1.	$P_{min}$ artışının $RTE$ ve $ESD$ üzerindeki etkisi.....	47
Şekil 4.2.	$P_{maks}$ artışının $RTE$ ve $ESD$ üzerindeki etkisi. ....	48
Şekil 4.3.	Kompresörlerin izentropik veriminin artışının $RTE$ ve $ESD$ üzerindeki etkisi. ....	49
Şekil 4.4.	Türbinin izentropik veriminin artışının $RTE$ ve $ESD$ üzerindeki etkisi. ....	50
Şekil 4.5.	Geleneksel ve ileri ekserji analiz sonuçlarının sistem bileşenlerinde (a) ekserji yıkımı (b) ekserji verimi.....	53
Şekil 4.6.	Tüm sistem ve sistem bileşenleri için ekserji yıkım oranları yüzdelik değerleri. ....	56
Şekil 4.7.	Sistem bileşenleri için ekserji yıkım maliyetleri oranının yüzdelik değerleri. ....	58
Şekil 4.8.	Sistem bileşenleri için yatırım maliyeti oranlarının yüzdelik değerleri. ....	61
Şekil 4.9.	Rüzgâr türbininin izentropik veriminin (a) $ExD/ExD, toplam$ 'ın çeşitli bölümleri (b) $ExD, toplam$ 'ın çeşitli bölümleri üzerine etkisi. ....	64
Şekil 4.10.	Kompresörlerin izentropik veriminin (a) $ExD/ExD, toplam$ 'ın çeşitli bölümleri (b) $ExD, toplam$ 'ın çeşitli bölümleri üzerine etkisi. ....	66
Şekil 4.11.	Türbinlerin izentropik veriminin (a) $ExD/ExD, toplam$ 'ın çeşitli bölümleri (b) $ExD, toplam$ 'ın çeşitli bölümleri üzerine etkisi.....	68
Şekil 4.12.	Rüzgâr türbininin izentropik veriminin (a) $CD/CD, toplam$ 'ın çeşitli bölümleri b) $CD, toplam$ 'ın çeşitli bölümleri üzerine etkisi.....	70

<b>Şekil 4.13.</b> Kompresörün izentropik veriminin (a) $CD/CD, toplam$ 'ın çeşitli bölümleri (b) $CD, toplam$ 'ın çeşitli bölümleri üzerine etkisi. ....	72
<b>Şekil 4.14.</b> Türbinlerin izentropik veriminin (a) $CD/CD, toplam$ 'ın çeşitli bölümleri (b) $CD, toplam$ 'ın çeşitli bölümleri üzerine etkisi. ....	74
<b>Şekil 4.15.</b> Rüzgâr türbininin izentropik veriminin (a) $Z/Ztoplamlam$ 'ın çeşitli bölümleri (b) $Ztoplamlam$ 'ın çeşitli bölümleri üzerine etkisi. ....	76
<b>Şekil 4.16.</b> Kompresörlerin izentropik veriminin (a) $Z/Ztoplamlam$ 'ın çeşitli bölümleri (b) $Ztoplamlam$ 'ın çeşitli bölümleri üzerine etkisi. ....	78
<b>Şekil 4.17.</b> Türbinlerin izentropik veriminin (a) $Z/Ztoplamlam$ 'ın çeşitli bölümleri (b) $Ztoplamlam$ 'ın çeşitli bölümleri üzerine etkisi. ....	81
<b>Şekil 4.18.</b> Önerilen GA-SHED sisteminin geleneksel analiz için Pareto yüzeyindeki çözümlerin dağılımı. ....	82
<b>Şekil 4.19.</b> Önerilen GA-SHED sisteminin ileri analiz için Pareto yüzeyindeki çözümlerin dağılımı. ....	83

## 1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte artan enerji ihtiyacı, çeşitli alternatif enerji kaynaklarının araştırılmasına sebep olmaktadır. Enerji kaynakları arasında en büyük paya sahip olan fosil yakıt rezervinin azalması ve çevreye verdiği zarar göz önünde bulundurulduğunda yenilenebilir enerji kaynakları gün geçtikçe dikkat çekmektedir. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarındaki süreksizlik, bu kaynaklardan elde edilen elektrik enerjisinin kullanımını kısıtlamaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarında süreksizlikten kaynaklanan dalgalanmalar, Enerji Depolama Sistemleri (EDS) ile yönetilebilmektedir. Son yıllarda, çeşitli EDS arasında Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama (SHED) yöntemi hem yüksek enerji depolama kapasitesi hem de deşarj sürelerinin uzunluğu sebebiyle araştırmacılar arasında ilgi çekmektedir (Luo ve ark., 2015). Bu teknolojinin bu avantajlarına rağmen, ara ısıtma sırasındaki ısı ihtiyacı, jeolojik zorluklar vb. açılardan SHED sistemleri geliştirilmesi gerekmektedir (Olabi ve ark., 2020). Böylece mekanik olarak enerji depolama imkanı sunan SHED sistemlerinde yapılacak iyileştirmeler, bu sistemleri daha verimli ve uygulanabilir hale getirecektir (Drury ve ark., 2011). Gelecekte enerji ile ilgili sorunları en aza indirmek için hem temiz enerji kullanımını destekleyebilecek hem de uzun süreli depolamadan yararlanabilecek sistemlere ihtiyaç vardır (Cavallo, 2007). Son zamanlarda literatürde rüzgâr enerjisi ile SHED sisteminin uyumluluğuna yönelik çalışmalar artmaktadır.

### 1.2. Enerji Depolama Sistemleri

Enerji depolama sistemleri, en basit şekliyle bir formdaki enerjiyi başka bir forma dönüştürerek enerji depolayabilen sistemler olarak tanımlanabilir. Bu sistemler enerjiyi çeşitli kaynaklardan toplar, dönüştürür ve ihtiyaç olduğunda kullanılmasına olanak sağlar. Böylelikle arz ve talep arasındaki farkın azalmasını sağlayarak enerji tasarrufu sağlar.

Yaygın olarak, Enerji depolama sistemleri enerjinin depolanma şekline göre 5 ana gruba ayrılır;

1. Termal: Isıl enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür.  
Örnek: Termal enerji deposu
2. Mekanik: Kinetik ve potansiyel enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür.

Örnek: Pompaj depolamalı hidroelektrik santral (PDHES), Sıkıştırılmış hava ile enerji depolama (SHED)

3. Kimyasal: Kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür.

Örnek: Hidrojen, biyoyakıtlar

4. Elektrokimyasal: elektrokimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür.

Örnek: Yakıt hücreleri, bataryalar.

5. Hibrit: iki farklı formdaki enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür.

Elektrik enerjisini mekanik olarak depolamaya imkân sağlayan ve büyük ölçekli uygulamalar için uygun olan iki çeşit enerji depolama teknolojisi mevcuttur. Bunlardan birisi Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santral (PDHES), diğeri ise Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama (SHED) sistemidir.

EDS çeşitlerine ait detaylı bilgilerin verildiği Çizelge 1.1’de görüldüğü üzere PDHES ve SHED birkaç güne kadar uzayan deşarj süreleri ve yüksek güç kapasiteleri ile dikkat çekmektedir. Ancak PDHES’in oldukça yüksek su deposu, rezervuar gibi elemanların yapımı için geniş alanlara ihtiyaç duyması, SHED’in kurulum maliyetini PDHES’e kıyasla düşürmektedir (Panda ve ark., 2020). Ayrıca yapılan yeni çalışmalarla SHED’in küçük çaptaki şebekeler için yapay depolarla uygulanabilirliği araştırılmakta ve araştırmacılar bu konuda çalışmalara yönelmektedir (Jin ve ark., 2019; Li ve ark., 2012; Mucci ve ark., 2021)

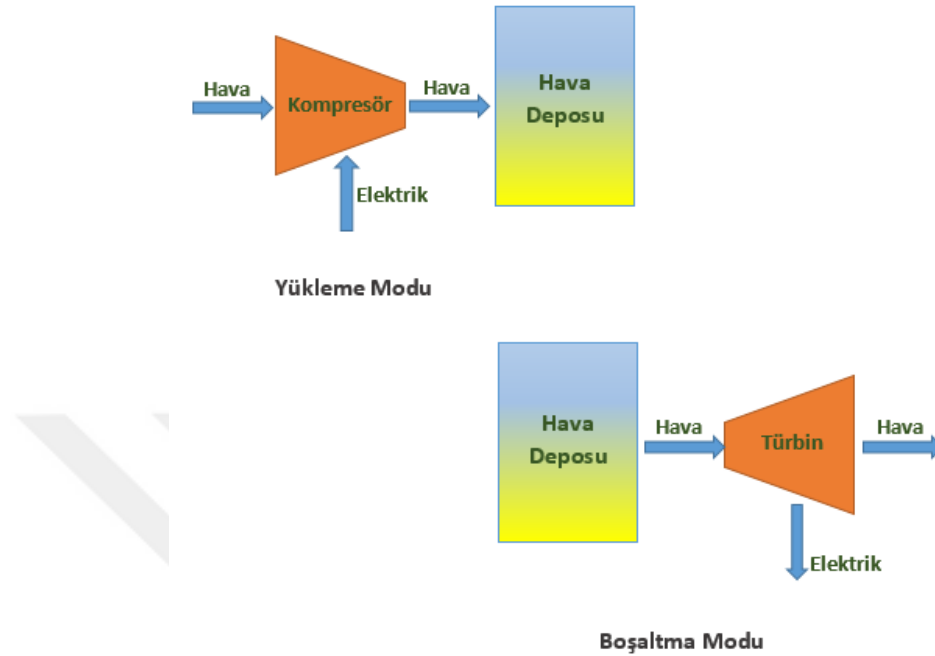
**Çizelge 1.1.** Enerji Depolama Sistemlerinin detaylı kıyaslaması (Panda ve ark., 2020)

Depolama Teknolojisi	Depolama Kapasitesi	Deşarj Süresi	Verim[%]
Süper Kapasitör	<150 kW	1sn-1dk	85-95
Süper İletkenlikli Magnetler	10 kW-1MW	5sn-5dk	95
Hidrojen Yakıt Hücreleri	1kW-10GW	0.001sn-0.1sn	20-40
Volan	5kW-20MW	4sn-15dk	90-95
Batarya	1kW-1MW	1dk-2saat	65-75
PDHES	5MW-2GW	4saat-4gün	55-85
SHED	2MW-2.5GW	2saat-2gün	40-70

### 1.3. Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama

Temeli gaz türbini teknolojisine dayanan SHED sistemleri, sıkıştırılmış havanın bir yerde depolanarak ihtiyaç halinde kullanılması mantığına dayanır. Basit bir SHED sistemi kompresör, türbin, motor, jeneratör ve hava deposu olmak üzere beş ana bileşenden oluşur. Temel olarak şu şekilde çalışır; hava bir depoda (tuz madeni, yapay depo/mağara vs.) sıkıştırılarak enerji mekanik olarak depolanır. Talebin yüksek olduğu

pik saatlerinde elektrik üretmek için belirli basınç altında depolanan hava bir gaz türbininde genişletilerek elektrik elde edilir. Bir SHED sisteminin yükleme ve boşaltma proseslerinin çalışma şekli basit bir şekilde Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. SHED sisteminin temel çalışma mantığı.

Sıkıştırma ısısının işlenme şekline göre dörde ayrılmaktadır: diyabatik (D-SHED), adyabatik-SHED (A-SHED), izotermal (I-SHED) ve sıvılaştırılmış hava ile enerji depolama (Mitali ve ark., 2022).

D-SHED’de sıkıştırma sırasında açığa çıkan ısı çevre ortama verilir. Dolayısıyla boşaltma prosesinde yoğuşmadan ve donmadan korumak için türbine giren sıkıştırılmış havanın ön ısıtılması için gerekli enerji dışarıdan (yanma odası) sağlanır. I-SHED’lerde sıkıştırma sırasında açığa çıkan ısı ya minimize edilir veya korunur. Sıvılaştırılmış hava ile enerji depolama sisteminde geleneksel SHED sistemlerinden farklı olarak özel kriyojenik konteynerlerde hava sıvılaştırılmış halde depolanır. A-SHED sistemi, sıkıştırma esnasında açığa çıkan ısıyı ayrı bir termal enerji deposunda depolayarak kullanır. Depolanan ısı enerjisi, türbine girmeden önce sıkıştırılmış havanın sıcaklığını yükseltmek için kullanılır ve sistem verimliliğini önemli ölçüde artırır (Zunft ve ark., 2006). Dolayısıyla D-SHED’den farklı olarak A-SHED sistemlerinde yanma odası bulunmaz.

Dünyada kurulan ilk SHED tesisi 290 MW çıkış gücü ile Almanya’daki Huntorf tesisidir ve 1978’de faaliyete geçmiştir. İkincisi ise 110 MW çıkış gücü ile 1991’de

ABD’de faaliyete geçen McIntosh tesisidir. İkisi de D-SHED çalışma prensibine göre tasarlanmıştır ve depolama alanı olarak tuz madeni kullanılmaktadır. Yapılan birkaç iyileştirmeyle birlikte hala günümüzde çalışmaya devam etmektedirler ve dünya çapında bazı deneme tesisleri kurulmuş olsa da hala en bilinen ve büyük kapasiteli örnekler bu ikisidir (Budt ve ark., 2016). Ancak son yıllarda daha küçük ölçekli uygulamaları da görmek mümkündür. Örneğin; 2MW çıkış gücü ile Teksas’ta, 1.5 MW’lık gücü ile New Hampshire’da I-SHED mantığında çalışan sistemler bulunurken ilk ticari A-SHED sistemi 2019’da Ontario’da kurulmuştur. Amerika, İngiltere, Kanada ve İsviçre ve Çin’de 1MW’ın altında tesisler bulunmaktadır.

Özellikle sıfır emisyon sağlama ve daha yüksek verim ile enerji depolamaya imkan tanıyan A-SHED, son yıllarda gelecek vadeden bir yöntem olarak görülmektedir (Jubeh ve Najjar, 2012; Zunft ve ark., 2006). Temelini A-SHED’in oluşturduğu gelişmiş adyabatik sıkıştırılmış hava ile enerji depolama (GA-SHED) ise sistemde yapılan iyileştirmeler ile verimi daha yüksek sistemler tasarlanmasına olanak sağlar.

Yüksek kapasite, uzun ömür, güvenilir çalışma şartları ve uzun deşarj süresi gibi avantajlara sahip olmasına rağmen yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklı sistem elemanlarının geliştirilmesi GA-SHED’in uygulanabilirliği için aşılması gereken bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yönde yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Bununla birlikte küçük ölçekli şebekelerle beraber çalışabilecek sistem tasarımları ve optimizasyonları üzerine yoğunlaşmaktadır. Ayrıca tasarlanan sistemlerde kullanılacak malzemelerin dayanım kriterlerine bağlı olarak ekonomik açıdan incelenmeleri de önem kazanmaktadır.

Özet olarak; Enerji Depolama Sistemleri (EDS) içerisinde yüksek depolama kapasitesi ve yüksek verime sahip olmaları, çevre dostu ve güvenli şartlarından dolayı SHED sistemi umut vadeden bir yöntem olarak düşünülmektedir. Ancak A-SHED sistemlerinin dezavantajlarını minimize ederek daha verimli sistemlerin tasarlanması için GA-SHED sistemlerinin üzerinde durulması gerekmektedir.

#### **1.4. Bölüm Sonu Değerlendirmesi**

Bu bölümde tez çalışmasının temelini oluşturan sıkıştırılmış hava ile enerji depolama (SHED) sistemleri hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

Çalışmanın bu bölümden sonraki kısmı şu şekilde düzenlenmiştir: ikinci bölümde konunun temelini oluşturan başlıklar hakkında detaylı kaynak araştırması sunulmuş olup,

üçüncü bölümde sistemin çalışma prensibi ve matematik model hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde, sistemin analizi neticesinde elde edilen veriler sunulurken, sonuçlar detaylı olarak değerlendirilmiştir. Son bölüm olan beşinci bölümde çalışmadan elde edilen sonuçlar ve öneriler yer almaktadır.



## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, literatürde SHED sistemleri ile alakalı yapılmış olan çalışmalar tez çalışmasının yenilikçi yönü ekseninde kapsamlı bir şekilde taranmış ve hazırlanan karşılaştırmalı çizelgeler ile sunulmuştur.

### 2.1. Enerji ve Ekserji Analizi Üzerine Yapılan Çalışmalar

Literatürde SHED sistemlerinin termodinamik analizini konu alan birçok çalışma mevcuttur. Szablowski ve ark. (2017), bir A-SHED için enerji ve ekserji analizini yaparak sistem bileşenlerinin ekserji yıkımlarını belirlemişlerdir. Yapmış oldukları çalışma; sıkıştırılmış havanın enerjisinin geri kazanılmasının sistem verimini artırdığını ancak güç çıkışını azalttığını göstermiştir. Bu duruma çözüm olarak kompresör ve türbinin kademe sayısının ile ısı eşanjörlerinin verimlerinin artırılması sonucunda çıkış gücünün artırılacağı sonucuna ulaşmışlardır. SHED çalışmalarında sistem verimini etkileyen önemli hususlardan bir tanesi kompresör ve türbin kademe sayısıdır. Grazzini ve Milazzo (2012) ile Liu ve ark. (2014) çok kademeli bir A-SHED'in termodinamik analizini yapmışlardır. Yapılan analiz sonuçlarına göre çevrim verimini etkileyen parametreler ortaya koyulmuştur. Hartmann ve ark. (2012) farklı A-SHED kombinasyonlarının analizini yapmışlar bunun sonucunda iki kademeli sistemin en iyi sonucu verdiğini göstermişlerdir.

### 2.2. Geleneksel Ekserji ve Eksergo-ekonomik Analiz Üzerine Yapılan Çalışmalar

Bir sistem tasarımı yapılırken en temel yöntem şüphesiz termodinamik analizdir. Ancak tasarlanan sistemin hayata geçirilmesi için ekonomik boyut da önem arz etmektedir. Bir sistemin yatırım maliyeti, geri ödeme süresi, bakım maliyetleri gibi hususlar sistemin hayata geçirilmesinde ve sürekliliğinde önemli rol oynamaktadır. Sistemin ekserji analizi ile ekonomik kriterlerini beraber incelememize olanak sağlayan eksergo-ekonomik analiz, bu iki husus arasındaki ilişkiyi gözlemleyebilmemize olanak sağlamaktadır. Nispeten yeni bir alan olan SHED sistemlerinin geliştirmeye açık yönlerini belirlemek ve ekserji yıkımına bağlı olarak maliyet analizini detaylandırabilmek için eksergo-ekonomik analize ihtiyaç vardır.

Buffa ve ark. (2013) çok kademeli olarak tasarladıkları bir A-SHED sisteminin ekserji ve eksergo-ekonomik analizi sonucunda böyle bir tesisin kullanılması halinde

azami yük maliyetindeki değerlerin umut verici olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Bagdavičius ve Jenkins (2014), ekserji ve eksergo-ekonomik analiz kullanarak Termal Enerji Deposuna (TED) sahip olan ve TED'e sahip olmayan iki sistem tasarlayarak sıkıştırma prosesinde açığa çıkan ısının kullanım potansiyelini araştırmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda TED bulunan SHED sisteminin enerji arz ve talebinin dengelenmesinde elektrik maliyetinin daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Yao ve ark. (2017), birleşik soğutma ısıtma güç (BSIG) sistemine entegre bir SHED sisteminin eksergo-ekonomik metot kullanarak analizini yapmışlardır. Eksergo-ekonomik analiz sonucunda sistemde yatırım maliyetinin büyük bir kısmını kompresör, birinci ve ikinci ısı eşanjörleri ile hava deposunun olduğunu ve yapılacak iyileştirmelerin önemli katkı sağlayacağına ulaşmışlardır.

Mazloum ve ark. (2017) , izobarik bir A-SHED sistemi için eksergo-ekonomik değerlendirmeye ek olarak optimizasyon yapmışlardır. Bu çalışmayla optimum sonuca, eksergo-ekonomik açıdan en önemli bileşenler olan hava türbinlerinde hava giriş sıcaklığını iyileştirmek ve ekserji yıkımını azaltmak için kompresörlerin izentropik veriminin düşürülmesi ve ısı eşanjörlerinin adım sayısının iyileştirilmesi ile ulaşılmıştır. Razmi ve Janbaz (2020), Organik Rankine Çevrimi (ORÇ), buhar sıkıştırımlı absorpsiyonlu soğutma sistemi ile SHED sisteminin entegre edilmesi ile oluşturulan yeni bir güç sistemi tasarlayarak bu sistemin eksergo-ekonomik analizine ek olarak güvenilirlik ve kullanılabilirlik analizini yaparak daha gerçekçi sonuçlar elde etmişlerdir. Lashgari ve ark. (2022) SHED ile entegre, sıfır emisyon üreten bir kombine ısı ve elektrik santralini hedeflemişlerdir. Sistemi enerji, ekserji, ekonomik, eksergo-ekonomik ve çevresel açılardan incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre; önerilen sistemin; bağımsız biyokütle sisteminden daha verimli olduğunu ve geri ödeme süresinin iki yıl olduğunu gözlemlemişlerdir. Alirahmi ve ark. (2021) herhangi bir emisyon olmadan yeni bir entegre SHED sistemi geliştirmişlerdir. Çalışmanın sonucu geleneksel eksergo-ekonomik analiz bakış açısıyla değerlendirilmiş ve daha sonra çok amaçlı optimizasyon uygulanmıştır. Sistemin yaklaşık %48.7 verimliliğe ve optimum noktada 3056 \$/saat toplam maliyet oranına sahip olduğunu hesaplamışlardır. Wu ve ark. (2022) sıvılaştırılmış doğal gaz soğuk enerjisine dayalı birleşik ısı güç sistemi önermiştir. Önerilen sistem için termodinamik, ekonomik ve eksergo-ekonomik analitik yöntemler uygulanmıştır. Cao ve ark. (2022), SHED'e dayalı güç/hidrojen üretimini amaçlayan yeni bir hibrit sistem geliştirmişlerdir. Bu sisteme uygulanan eksergo-ekonomik analiz ve çok amaçlı

optimizasyon çalışması, böyle bir sistemin uygulanabilir ve sürdürülebilir olduğunu göstermiştir.

### 2.3. İleri Ekserji ve Eksergo-ekonomik Analiz Üzerine Yapılan Çalışmalar

Ekserji ve eksergo-ekonomik analiz, sistem bileşenlerinde meydana gelen tersinmezlikleri belirlemeye yardımcı olmakta ancak bu tersinmezliklerin nelerden kaynaklandığını gösterememektedir. Tersinmezliklerin sebebinin sistem bileşenlerinin kendisinden mi yoksa diğer bileşenlerin birbirleri ile olan ilişkilerinden mi kaynaklandığını anlayabilmek için ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analizlerine ihtiyaç duyulur. H. Liu ve ark. (2016), enerji ve ekserji analizine ek olarak bir SHED üzerinde ileri ekserji analizi uygulamıştır. Geleneksel ekserji analizi, en fazla ekserji yıkımının yanma odasında ve sonrasında hava deposu çıkışında regülatörde olduğunu göstermiştir. Öte yandan, ileri ekserji analizi, ikinci yanma odası ve ara/son soğutucunun sistemi iyileştirme potansiyeli en yüksek bileşenler olduğunu ortaya koymuştur. Böylece, bu çalışma SHED sistemlerinde ileri ekserji analizinin önemini göstermektedir. Literatürde SHED ile entegre çeşitli sistemler incelenmektedir. Ebrahimi ve ark. (2019), dünyanın bilinen ilk sualtı-hava ile enerji depolama tesisini, geleneksel ve ileri ekserji analizi açısından incelenmiştir. He ve ark. (2018), önerdikleri SHED ile entegre süperkritik sıkıştırılmış  $CO_2$  enerji depolama (S-SKED) sistemi için geleneksel ve ileri ekserji analiz yöntemlerini uygulamışlardır. Su (2021) güneş enerjisi temelli ORÇ sistemi ve A-SHED ünitesinden oluşan yeni bir enerji üretim sistemi önermiştir. Önerilen sistem, ileri ekserji ve eksergo-ekonomik bakış açısıyla incelenmiştir. Düşük sıcaklık koşulları altında A-SHED ile entegre edilmiş sıkıştırılmış  $CO_2$  ile enerji depolama (SKED), Y. Zhang ve ark., (2021) tarafından geleneksel ve ileri ekserji analizleri açısından incelenmiştir. Sonuçlara göre; soğuk enerji depolama tankı iyileştirme için birinci önceliğe sahip olup, bu sıralamayı ikinci türbin ve birinci kompresör izlemektedir. Yang ve ark. (2022) ejektör destekli Kalina çevrimi ile birleştirilmiş yeni bir birleşik termal sıkıştırılmış hava ile enerji depolama (BT-SHED) önermiştir. İleri ekserji analizine ek olarak önerilen sistemin termodinamik performansını iyileştirme ve yatırım maliyetini en aza indirmek için çok amaçlı optimizasyon yapılmıştır.

Yukarıdaki literatür taramasında görüldüğü gibi çeşitli sistemlerle entegre SHED ile ilgili çalışmalar incelenmiştir. Bu tez çalışmasının yenilikçi yönlerinden biri A-SHED sistemi için literatürde bir ilk olarak ileri eksergo-ekonomik analiz yapılmış olmasıdır. Çalışmanın özgünlüğünü vurgulayacak kapsamda literatürde SHED sistemi üzerinde

yapılan geleneksel ve ileri ekserji/eksergo-ekonomik analizler karşılaştırmalı olarak Çizelge 2.1.'de kısaca özetlenmiştir.

**Çizelge 2.1.** Literatürdeki SHED temelli sistemlerin geleneksel/ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analizleri üzerine çalışmalar.

Çalışma	Sistem	Geleneksel Ekserji Analizi	İleri Ekserji Analizi	Geleneksel Eksergo-ekonomik Analiz	İleri Eksergo-ekonomik Analiz
Buffa ve ark. (2013)	A-SHED	✓		✓	
Bagdanavicius ve Jenkins (2014)	SHED / SHED-TD	✓		✓	
H. Liu ve ark. (2016)	SHED	✓	✓		
Mazloum ve ark. (2017)	Sabit basınç SHED	✓		✓	
Yao ve ark. (2017)	SHED / BSIG	✓		✓	
He ve ark. (2018)	S-SKED / SHED	✓	✓		
Ebrahimi ve ark. (2019)	Sualtı SHED	✓	✓		
Razmi ve Janbaz (2020)	SHED temelli kojenerasyon	✓		✓	
Y. Zhang ve ark.,(2021)	Düşük sıcaklık A-SHED ve SKED	✓	✓	✓	
Su (2021)	SHED / Solar temelli ORÇ	✓	✓		
Alirahmi ve ark.(2021)	SHED/ ÇEBS	✓		✓	
Yang ve ark. (2022)	BT-SHED / Kalina	✓	✓		
Lashgari ve ark. (2022)	Biokütle- BIG / SHED	✓		✓	
Cao ve ark. (2022)	Solar/Brayton/ORÇ /PDME/SHED	✓		✓	
Wu ve ark. (2022)	GT-KOYH /OFRÇ/SCO <sub>2</sub> /SHED/LNG	✓		✓	
Bai ve ark. (2022)	Solar temelli A-SHED	✓		✓	
Xu ve ark. (2022)	A-SHED /ESS	✓		✓	
Shi ve Asgari (2022)	A-SHED /DORÇ/ESS	✓		✓	
Yan ve Gao (2022)	A-SHED/ESS	✓		✓	
Bu çalışma	Rüzgâr Türbini ile entegre GA-SHED	✓	✓	✓	✓

A-SHED: Adyabatik Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama  
GA-SHED: Gelişmiş-Adyabatik Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama  
SHED: Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama  
SHED-TD: Termal Depolu Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama  
SKED: Sıkıştırılmış Karbondioksit ile Enerji Depolama  
BSIG: Birleşik Soğutma Isıtma ve Güç Sistemleri  
BT-SHED: Birleşik Termal Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama  
DORÇ: Dual-Basinç Organik Rankine Çevrimi

ESS: Ejektörlü Soğutma Sistemi  
ÇEBS: Çoklu-Etkili Buhar Sıkıştırma  
OFRÇ: Organik Flash Rankine Çevrimi  
ORÇ: Organik Rankine Çevrimi  
PDME: Proton Değişim Membran Elektrolizörü  
S-SKED: Süperkritik Sıkıştırılmış CO<sub>2</sub> Enerji Depolama  
SCO<sub>2</sub>: Süperkritik CO<sub>2</sub> Ara Sıkıştırılmalı Brayton Çevrimi  
GT-KOYH: Gaz Türbinli Katı Oksit Yakıt Hücre

## 2.4. Çok Amaçlı Optimizasyon Üzerine Yapılan Çalışmalar

Yapılabilecek sistemler arasından en uygun olanını belirlemek için tasarımları tek tek incelemek ve doğru kararı verebilmek karmaşıktır ve zaman alan bir süreçtir. Dolayısıyla bu işlemleri hızlandırmak ve belirlenen şartlarda en iyiyi bulmak için optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır.

Klasik optimizasyon yöntemleri yapılan kabullerle çok yönlü bir problemi tek yönlü bir probleme dönüştürerek uygulanmaktadır. Ancak gerçek hayatta problemleri bu şekilde ele almak gerçekçi olmamaktadır. Nitekim enerji sistemlerinde yüksek verimli, uygulanabilir ve düşük maliyetli olarak üretilmesi istenmektedir. Sistem tasarımını etkileyen bu parametrelerin ise bir arada incelenebilmesi çok amaçlı optimizasyon yöntemleri ile olmaktadır.

SHED sistemlerinin tasarlanmasında verim ve maliyet dengesinin sağlanması, bu sistemleri daha uygulanabilir hale getirecektir. Bu durum, bir taraftan donanımsal (yüksek basınç ve sıcaklığa dayanım gibi) iyileştirmelerle sağlanabilirken (Budt ve ark., 2016) diğer taraftan sistemin kapasitesine oranla daha ekonomik sistemler tasarlanabilmesi ile mümkün olacaktır (Lund ve Salgi, 2009).

Bu tez çalışmasının yenilikçi yönlerinden biri GA-SHED sistemi için literatürde bir ilk olarak ileri eksergo-ekonomik analiz konseptinde çok amaçlı optimizasyon yapılmış olmasıdır. Çalışmanın özgünlüğünü vurgulayacak kapsamda literatürde SHED sistemi üzerinde yapılan optimizasyon çalışmaları karşılaştırmalı olarak Çizelge 2.2'de sunulmuştur.

**Çizelge 2.2.** Geleneksel/ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analizler kapsamında SHED sistemleri için optimizasyon çalışmaları.

Çalışma	Sistem	Optimizasyon Metodu	Geleneksel Ekserji Analizine göre Optimizasyon Performans Kriteri	İleri Ekserji Analizine göre Optimizasyon Performans Kriteri	Amaç Fonksiyonları	
					Geleneksel Ekserji/Eksergo-ekonomik Analizler	İleri Ekserji/Eksergo-ekonomik Analizler
Yao ve ark., (2016b)	BSIG temelli küçük ölçekli SHED	NSGA-II	✓		- Ekserji verimi - Toplam güç çıkışı başına toplam yatırım maliyeti	
Han ve ark. (2018)	GA-SHED	NSGA-II	✓		- Ekserji verimi - Ekserji yoğunluğu	
Han ve ark. (2020)	BSIG temelli GA-SHED	MOGWO	✓		- Ekserji yoğunluğu - Yıllık kâr marjı	
Jiang ve ark. (2021)	GA-SHED temelli trijenerasyon sistemi	NSGA-II	✓		- Ekserji verimi - RTE (Çevrim Döngü Verimi) - Yıllık toplam maliyet tasarruf oranı	
Li ve ark. (2022)	Trijenaratif sistem ile entegre GA-SHED	NSGA-II	✓		- Ekserji verimi - Ekserji yoğunluğu	
Ali rahmi ve ark. (2021)	Solar ve desalinasyon ünitesi ile hibridize edilmiş SHED	YSA ve GA	✓		- RTE - Toplam maliyet oranı	
Yang ve ark. (2022)	BT-SHED / Kalina	NSGA-II	✓		- RTE - Toplam güç çıkışı başına toplam yatırım maliyeti	
Cao ve ark. (2022)	Solar/Brayton/ORÇ /PDME/SHED	NSGA-II	✓		- ERTE (Ekserjetik Çevrim Döngü Verimi) - Sistemin birim maliyeti	
Wu ve ark. (2022)	GT-KOYH/OFRÇ/SCO <sub>2</sub> /CAES/LNG	NSGA-II ve MOWOA	✓		- RTE - Levelized cost of electricity (LCOE)	
Bai ve ark. (2022)	Solar entegreli A-SHED	MOPSO	✓		- Geri ödeme süresi - RTE - ERTE	

Xu ve ark. (2022)	A-SHED /ESS	MOPSO	✓		- ERTE - Geri ödeme süresi	
Shi ve Asgari (2022)	A-SHED/DORÇ/ESS	MOPSO	✓		- ERTE - Ürünlerin ortalama birim maliyeti	
Yan ve Gao (2022)	A-SHED/ESS	MOPSO	✓		- ERTE - Geri ödeme süresi	
Zhao ve ark. (2023)	BSIG ve SHED temelli hibrit sistem	MOPSO	✓		- LCOE - Levelized Cost of Heat (LCOH) - Ratio of Abandoned Wind (ROAW)	
Bu çalışma	Rüzgâr türbini ile entegre GA-SHED	NSGA-II	✓	✓	- Toplam birim ürün maliyeti - Ekserji verimi	- Modifiye edilmiş toplam birim ürün maliyeti - Modifiye edilmiş ekserji verimi

A-SHED : Adyabatik Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama

BSIG : Birleşik Soğutma, Isıtma ve Güç Sistemi

BT-SHED : Birleşik Termal Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama

DORÇ : Dual-basınçlı Organik Rankine Çevrimi

ESS : Ejektörlü Soğutma Sistemi

SHED : Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama

GA : Genetik Algoritma

GA-SHED : Gelişmiş Adyabatik Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama

GT-KOYH : Gaz Türbinli Katı Oksit Yakıt Hücresi

MOPSO : Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu

MOWOA : Çok Amaçlı Balina Optimizasyonu

NSGA : Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritma

OFRÇ : Organic Flash Rankine Cycle

ORÇ : Organic Rankine Cycle

PDME : Proton Değişim Membran Elektrolizörü

SCO<sub>2</sub> : Süperkritik CO<sub>2</sub> Ara Sıkıştırılmış Brayton Çevrimi

YSA : Yapay Sinir Ağı

## 2.5. Bölüm Sonu Değerlendirmesi

Bu bölümde çalışmasının yenilikçi yönlerini vurgulamak için kapsamlı bir literatür taraması verilmiş ve bu kapsamda karşılaştırmalı çizelgeler sunulmuştur.

Tez çalışmasının yenilikçi yönleri ve literatüre ana katkıları aşağıda verilmiştir:

- Literatürde ilk kez bir GA-SHED sistemine ileri eksergo-ekonomik analiz uygulanmaktadır.
- Hem geleneksel ekserji/eksergo-ekonomik hem de ileri ekserji/eksergo-ekonomik analiz yöntemleri uygulanarak sistem bileşenlerinin ekserji yıkımı ve ekserji yıkımı maliyet değerleri bulunmuş ve karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda GA-SHED sistemi için belirlenen simülasyon koşullarında bu konu üzerinde çalışacak araştırmacılar için belirlenen kararlı değişkenler, performans kriterleri ve matematik model örnek teşkil edecektir.
- Literatürde ilk kez bir GA-SHED sistemine ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analizler konseptinde çok amaçlı optimizasyon uygulanmıştır.
- İleri eksergo-ekonomik analiz için literatürde olmayan yeni bir performans kriteri tanımlanmış ve çok amaçlı optimizasyon çalışmasında amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde önerilen sistemin termodinamik analizi için oluşturulan matematik modelin kurulumu ile ilgili kabuller ve yönetici denklemler verilmektedir. Ayrıca sistemin duyarlılık analizi ve çok amaçlı optimizasyonu için belirlenen kararlı değişkenler ve amaç fonksiyonlarını ifade eden performans kriterleri ile izlenecek metod açıklanmaktadır.

#### 3.1. Sistem Şeması

Şekil 3.1’de üzerinde çalışılan sistemin şematik bir görüntüsü verilmiştir. Sistem, iki kademeli kompresör ve türbinden oluşan bir GA-SHED’den oluşmaktadır. Sistemin çalışması için gerekli olan enerji, rüzgâr türbinleri (RT) vasıtasıyla sağlanmaktadır. Sistemin çalışması yükleme ve boşaltma prosesleri olarak iki aşamaya dayanmaktadır. Yükleme prosesi sırasında kompresör bölümü çalışmakta ve kompresör yardımıyla sıkıştırılan hava belli bir basınçta sıkıştırılmış hava deposunda depolanmaktadır. Enerji ihtiyacının arttığı zaman boşaltma prosesi devreye girmekte ve sıkıştırılmış hava deposunda bulunan hava türbinden geçirilerek elektrik enerjisi elde edilmektedir.

Sistemin çalışması yükleme ve boşaltma proseslerine göre aşağıdaki gibi açıklanmıştır:

- Yükleme prosesi şu şekilde gerçekleşmektedir: Çevreden alınan hava (Akış 1), kompresör-1 (K-1) vasıtasıyla sıkıştırılır. K-1 çıkışında basıncı ve sıcaklığı yükseltilmiş olan hava (Akış 2) ısı değiştiricisi (ID-1) vasıtasıyla ısınımsı soğuk ısıl enerji deposundan (SO-TED) gelen çalışma akışkanına aktarır (Akış 16). Böylelikle soğuyan hava (Akış 3) kompresör- 2’ye (K-2) girer. Tekrar sıkıştırılan hava (Akış 4) ısınımsı çalışma akışkanına (Akış 14) aktardıktan sonra soğuyarak hava yükleme deposuna (HD) geçer (Akış 5). Sıkıştırılmış havanın ısınımsı alan çalışma akışkanı (Akış 15,17 ve 18) sıcak ısıl enerji deposuna (SI-TED) girer. Böylelikle yükleme prosesi tamamlanmış olur.
- Boşaltma prosesi ise şu şekilde çalışmaktadır: Hava deposundan alınan sıkıştırılmış havanın basıncı (Akış 6) bir regülatör (REG) vasıtasıyla düzenlenir (Akış 7). Sonra ısı değiştiricisi-3’den (ID-3) geçen havanın sıcaklığı, SI-TED’den gelen çalışma akışkanı (Akış 21) yardımıyla



- Duyarlılık analizi
- Çok amaçlı optimizasyon analizi

Sistem bileşenleri kontrol hacimleri olarak değerlendirilmekte ve bu temelde sistem bileşenleri için kütle, enerji, ekserji ve maliyet dengeleri matematik model için yönetici denklemleri oluşturmaktadır. Matematik modelin simülasyon koşulları Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

**Çizelge 3.1.** Simülasyon koşulları.

Parametre	Sembol	Değer
Kompresör ve türbin kademe sayısı	$n$	2 [-]
Çevre Sıcaklığı	$T_0$	20°C
Çevre Basıncı	$P_0$	101.3 [kPa]
Kompresörlerin toplam gücü	$\dot{W}_{Ktoplam}$	8000 [kW]
Türbinlerin toplam gücü	$\dot{W}_{Ttoplam}$	10000 [kW]
Rüzgâr türbini kanat çapı (H. Ishaq ve ark., 2018)	$d_{RT}$	34 [m]
Rüzgâr türbini güç katsayısı(Patel, 1999)	$C_{p,RT}$	59 [%]
Rüzgâr giriş hızı	$V_{RT,giris}$	8 [m/s]
TED akışkanının kütleli debisi	$\dot{m}_{TED}$	10 [kg/s]
Hava deposu maksimum basıncı	$P_{maks}$	80 [x10 <sup>5</sup> Pa]
Hava deposu minimum basıncı	$P_{min}$	40 [x10 <sup>5</sup> Pa]
Yükleme süresi	$t_y$	4 [h]

Sistemin matematik modelinin çözümü için yapılan kabuller aşağıda verilmiştir:

- Sistem kararlı hal şartlarında çalışmaktadır.
- Potansiyel ve kinetik enerji değişimleri (RT hariç) ihmal edilmiştir.
- Çalışma akışkanları, yükleme ve boşaltma prosesleri için yükleme ve boşaltma süreleri kapsamında aynı kütle ile çalışmaktadır.
- Borulardaki, hava deposundaki ve ısı değiştiricilerindeki basınç kaybı ihmal edilmiştir.
- Kompresörler, türbinler, borular ve ısı değiştiricilerindeki ısı kaybı ihmal edilmiştir.
- Motor ve jeneratör verimleri %100 olarak kabul edilmiştir.
- SI-TED yalıtılmıştır.

### 3.3. Sistemin Termodinamik Analizi

#### 3.3.1. Enerji Analizi

Enerji analizi, bir sistemin termodinamik açıdan anlaşılabilmesi için yaygın olarak kullanılan en temel analizdir. Enerji analizi sistemdeki temel parametreleri ve parametrelerin birbirleri ile olan etkileşimlerini belirlememizde yardımcı olmaktadır. Önerilen sistemin enerji analizi için enerji ve kütle korunum denklemleri aşağıda genel haliyle verilmiştir:

$$\sum \dot{m}_{giren} - \sum \dot{m}_{çıkan} = 0 \quad (3.1)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum (\dot{m}h)_{çıkan} - \sum (\dot{m}h)_{giren} \quad (3.2)$$

Sistem bileşenleri için enerji denklemleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Sistem bileşenleri için enerji denklemleri.

Bileşen	Enerji Denklemleri	
K-1	$\dot{W}_{K-1} = \dot{m}_k \cdot (h_2 - h_1)$	$\eta_{K-1} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$
ID-1	$\dot{Q}_{ID-1} = \dot{m}_k \cdot (h_2 - h_3)$	$\varepsilon_{ID-1} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_{3(T_{16})}}$
K-2	$\dot{W}_{K-2} = \dot{m}_k \cdot (h_4 - h_3)$	$\eta_{K-2} = \frac{h_{4s} - h_3}{h_4 - h_3}$
ID-2	$\dot{Q}_{ID-2} = \dot{m}_k \cdot (h_4 - h_5)$	$\varepsilon_{ID-2} = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{5(T_{14})}}$
ID-3	$\dot{Q}_{ID-3} = \dot{m}_t \cdot (h_8 - h_7)$	$\varepsilon_{ID-3} = \frac{h_8 - h_7}{h_{8(T_{21})} - h_7}$
T-1	$\dot{W}_{T-1} = \dot{m}_t \cdot (h_9 - h_8)$	$\eta_{T-1} = \frac{h_8 - h_9}{h_8 - h_{9s}}$
ID-4	$\dot{Q}_{ID-4} = \dot{m}_t \cdot (h_{10} - h_9)$	$\varepsilon_{ID-4} = \frac{h_{10} - h_9}{h_{10(T_{23})} - h_9}$
T-2	$\dot{W}_{T-2} = \dot{m}_t \cdot (h_{11} - h_{10})$	$\eta_{T-2} = \frac{h_{10} - h_{11}}{h_{10} - h_{11s}}$
P-1	$\dot{W}_{P-1} = \dot{m}_{TED,yükleme} \cdot (h_{13} - h_{12})$	$\eta_{P-1} = \frac{h_{13s} - h_{12}}{h_{13} - h_{12}}$
P-2	$\dot{W}_{P-2} = \dot{m}_{TED,boşaltma} \cdot (h_{20} - h_{19})$	$\eta_{P-2} = \frac{h_{20s} - h_{19}}{h_{20} - h_{19}}$
RT	$\dot{W}_{RT} = \frac{1}{2} \eta_m \cdot \rho \cdot A_{rt} \cdot C_{p,RT} \cdot V_{RT}^3 \cdot n_{RT}$	

Önerilen sistemin enerji kaynağı rüzgâr enerjisi olarak düşünülmüştür ve rüzgâr türbininden üretilen güç aşağıdaki denklemden bulunmuştur (Haris Ishaq ve ark., 2018).

$$\dot{W}_{RT} = \frac{1}{2} \eta_m \cdot \rho \cdot A_{rt} \cdot C_{p,RT} \cdot V_{RT,giriş}^3 \cdot n_{RT} \quad (3.3)$$

Burada  $C_{p,rt}$ , rüzgâr türbinin güç katsayısı olup, bir rüzgâr türbininin rüzgâr çıkış hızı ile giriş hızı arasındaki bağıntıyı vermektedir ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Patel, 1999).

$$C_{p,RT} = \frac{\left(1 + \frac{V_{RT,çıkış}}{V_{RT,giriş}}\right) \left(1 - \left(\frac{V_{RT,çıkış}}{V_{RT,giriş}}\right)^2\right)}{2} \quad (3.4)$$

Rüzgâr türbinleri yüzde yüz verimle çalışmamakta ve rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjisinin hepsini elektrik enerjisine çevirememektedir. Rüzgâr, türbin kanatlarından geçtikten sonra da kinetik enerjiye sahip olmaktadır. Betz teoremi de denilen bu kurala göre; bir rüzgâr türbininden elde edilebilecek maksimum enerji, rüzgâr enerjisinin sadece %59'una karşılık gelmektedir (Patel, 1999). Dolayısıyla ideal durum için  $C_{p,rt}$  değeri 0.59 olacaktır ve bizim sistemimiz için de bu değer kabul edilmiştir.

Literatürde hava deposu modellenirken yapılan iki farklı kabul vardır. Biri sabit hacim (Liu ve Wang, 2016), diğeri ise sabit basınç (Kim ve Favrat, 2010) kabulüdür. Bu modellemede sabit basınç yaklaşımı benimsenmiştir.

Havanın farklı zaman aralıklarında gerçekleşen sıkıştırma ve genişleme işlemleri göz önünde bulundurulduğunda, hava deposuna giren ve çıkan hava akışının kütle dengesi dikkate alınmalıdır. Yükleme ve boşaltma süreleri arasındaki ilişkiyi veren yükleme-boşaltma süresi oranı ( $c_{yb}$ ), aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Luo ve ark., 2016).

$$m_{HD,giren} = m_{HD,çıkan} \quad (3.5)$$

$$\dot{m}_k \cdot t_y = \dot{m}_t \cdot t_b \quad (3.6)$$

$$\dot{m}_t = \frac{t_y}{t_b} \cdot \dot{m}_k \quad (3.7)$$

$$\dot{m}_t = \dot{m}_k \cdot c_{yb} \quad (3.8)$$

$$c_{yb} = \frac{t_y}{t_b} \quad (3.9)$$

### 3.3.1.1. Enerji Analizi için Performans Kriterleri

Enerji analizinde performans kriterleri olarak Çevrim Döngüsü Verimi (Round Trip Efficiency, *RTE*) ve Enerji Depolama Yoğunluğu (Energy Storage Density, *ESD*) kullanılmıştır.

- **Çevrim Döngüsü Verimi (RTE):** *RTE*, Enerji depolama sistemlerinde sistem performansının önemli bir göstergesidir. Enerjinin transferi sırasında meydana gelen kayıp hakkında bilgi vermektedir. Bir çevrim döngüsü için sistemin boşaltma enerjisi ile yükleme enerjisinin birbirine oranı olarak tanımlanmaktadır. *RTE*'nin artması, bir çevrim döngüsü için daha az depolama enerjisi ile daha yüksek türbin gücü elde edilebileceği anlamına gelmektedir. *RTE* aşağıdaki denklem ile bulunmuştur (Liu ve Wang, 2016).

$$RTE = \frac{\dot{W}_{T_{toplama}} \cdot t_b}{\dot{W}_{K_{toplama}} \cdot t_y} \cdot 100 \quad (3.10)$$

- **Enerji Depolama Yoğunluğu (ESD):** *ESD*, türbinler tarafından üretilen gücün hava deposunun hacmine oranı olarak tanımlanabilir. Bu değer, hacme oranla daha yüksek enerji depolayabilen sistemlerin tasarlanmasına yardımcı olmaktadır. *ESD* aşağıdaki denklem ile bulunmuştur (X. Zhang ve ark., 2019).

$$ESD = \frac{\dot{W}_{T_{toplama}} \cdot t_b}{V_{HD}} \cdot 100 \quad (3.11)$$

Enerji analizinde Çizelge 3.3'te verilen anahtar parametrelerin değişiminin, *RTE* ve *ESD* performans kriterleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

**Çizelge 3.3.** Enerji analizi için anahtar parametrelerin aralık değerleri

Anahtar parametreler	Aralık
Minimum HD basıncı $P_{min}$	20 – $60 \times 10^5$ Pa
Maksimum HD basıncı $P_{maks}$	70 – $105 \times 10^5$ Pa
Kompresörlerin izentropik verimi $\eta_K$	%80 – 92
Türbinlerin izentropik verimi $\eta_T$	%70 – 92

### 3.3.2. Geleneksel Ekserji ve Eksergo-ekonomik Analizi

Bu bölümde geleneksel ekserji ve eksergo-ekonomik analizlerde sistem bileşenleri için kullanılan ekserji ve maliyet denklemleri verilmiştir.

### 3.3.2.1. Geleneksel ekserji analizi

Bir sistemin termodinamik analizinde en temel yöntem enerji analizidir. Ancak tek başına enerji analizi sistemin performansı hakkında bilgi verse de performansı olumsuz etkileyen düzensizliklerin kaynağı hakkında detaylı görüş sağlamaz. Termodinamiğin ikinci yasasına dayanan ekserji analizi sistemin performansını etkileyen tersinmezliklerin belirlenmesine yarayan önemli bir araçtır.

Sistemin geleneksel ekserji analizi için kullanılan genel yönetici denklemler aşağıda verilmiştir.

Sistemde kimyasal reaksiyon olmadığı için kimyasal ekserji dikkate alınmamış ve ekserji analizinde fiziksel ekserji düşünülmüştür. Fiziksel ekserji aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır (Y. Zhang ve ark., 2021).

$$ex = h_i - h_0 - T_0(s_i - s_0) \quad (3.12)$$

Rüzgâr türbini ile ilgili ekserji aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\dot{E}x_{KE} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (3.13)$$

Geleneksel ekserji analizinde Yakıt-Ürün kuralı yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yakıt-Ürün terimi ekserji terminolojisinde genel bir kullanıma sahip olmakla birlikte, karışıklığı önlemek için bu çalışmada "yakıt" terimi yerine "besleme" terimi kullanılmıştır. Besleme-Ürün (Feed-Product) kuralı, sistem bileşenlerinin besleme ve ürün tanımına dayanmaktadır ve bu tanıma göre ekserji yıkımı  $E\dot{x}_{D,k}$  aşağıdaki denklem ile bulunmuştur.

$$\dot{E}x_{D,k} = \dot{E}x_{f,k} - \dot{E}x_{p,k} \quad (3.14)$$

Sistemi oluşturan her bileşene ait besleme ve ürün ekserjileri ile ekserji yıkım denklemleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Sistem bileşenlerine ait besleme-ürün ekserji ve ekserji yıkım denklemleri.

Bileşen	Besleme Ekserjisi	Ürün Ekserjisi	Ekserji Yıkımı
<b>K-1</b>	$W_{K-1}'$	$E\dot{x}_2 - E\dot{x}_1$	$\dot{E}x_{DK-1} = W_{K-1}' - (E\dot{x}_2 - E\dot{x}_1)$
<b>ID-1</b>	$E\dot{x}_2 - E\dot{x}_3$	$E\dot{x}_{17} - E\dot{x}_{16}$	$\dot{E}x_{DID-1} = (E\dot{x}_2 - E\dot{x}_3) - (E\dot{x}_{17} - E\dot{x}_{16})$
<b>K2</b>	$W_{K-2}'$	$E\dot{x}_4 - E\dot{x}_3$	$\dot{E}x_{DK-2} = W_{K-2}' - (E\dot{x}_4 - E\dot{x}_3)$
<b>ID-2</b>	$E\dot{x}_4 - E\dot{x}_5$	$E\dot{x}_{15} - E\dot{x}_{14}$	$\dot{E}x_{DID-2} = (E\dot{x}_4 - E\dot{x}_5) - (E\dot{x}_{15} - E\dot{x}_{14})$
<b>P-1</b>	$W_{P-1}'$	$E\dot{x}_{12} - E\dot{x}_{11}$	$\dot{E}x_{DP-1} = W_{P-1}' - (E\dot{x}_{12} - E\dot{x}_{11})$
<b>SO-TED</b>	$E\dot{x}_{25}$	$E\dot{x}_{12}$	$\dot{E}x_{DSO-TED} = E\dot{x}_{25} - E\dot{x}_{12}$
<b>HD</b>	$E\dot{x}_5$	$E\dot{x}_6$	$\dot{E}x_{DHD} = E\dot{x}_5 - E\dot{x}_6$
<b>REG</b>	$E\dot{x}_6$	$E\dot{x}_7$	$\dot{E}x_{DREG} = E\dot{x}_6 - E\dot{x}_7$
<b>P-2</b>	$W_{P-2}'$	$E\dot{x}_{19} - E\dot{x}_{18}$	$\dot{E}x_{DP-2} = W_{P-2}' - (E\dot{x}_{19} - E\dot{x}_{18})$
<b>SI-TED</b>	$E\dot{x}_{18}$	$E\dot{x}_{19}$	$\dot{E}x_{DSI-TED} = E\dot{x}_{18} - E\dot{x}_{19}$
<b>T-1</b>	$E\dot{x}_8 - E\dot{x}_9$	$W_{T-1}'$	$\dot{E}x_{DT-1} = (E\dot{x}_8 - E\dot{x}_9) - W_{T-1}'$
<b>ID-3</b>	$E\dot{x}_{21} - E\dot{x}_{22}$	$E\dot{x}_8 - E\dot{x}_7$	$\dot{E}x_{DID-3} = (E\dot{x}_{21} - E\dot{x}_{22}) - (E\dot{x}_8 - E\dot{x}_7)$
<b>T-2</b>	$E\dot{x}_{10} - E\dot{x}_{11}$	$W_{T-2}'$	$\dot{E}x_{DT-2} = (E\dot{x}_{10} - E\dot{x}_{11}) - W_{T-2}'$
<b>ID-4</b>	$E\dot{x}_{23} - E\dot{x}_{24}$	$E\dot{x}_{10} - E\dot{x}_9$	$\dot{E}x_{DID-3} = (E\dot{x}_{23} - E\dot{x}_{24}) - (E\dot{x}_{10} - E\dot{x}_9)$
<b>RT</b>	$E\dot{x}_{26} - E\dot{x}_{27}$	$W_{RT}'$	$\dot{E}x_{DRT} = (E\dot{x}_{26} - E\dot{x}_{27}) - W_{RT}'$

### 3.3.2.2. Geleneksel eksergo-ekonomik analiz

Eksergo-ekonomik analiz sistemin ekserji analizi ile ekonomik analizini birleştiren bir yaklaşımdır. Bu çalışmada eksergo-ekonomik analiz için literatürde yaygın olan Özgül Ekserji Maliyeti (SPECO) metodu tercih edilmiştir. SPECO metodu her bir sistem bileşenin yakıt ve ürün maliyetleri arasında kurulan dengeye dayanmaktadır. Bu kapsamda SPECO yönteminin uygulama adımları, her sistem bileşeninin ekserji akım değerlerinin belirlenmesi, her bileşen için yakıt ve ürün ekserjileri ve bu ekserji akımlarının maliyetlerinin belirlenmesi ve her sistem bileşeni için maliyet denge denklemlerinin yazılmasından oluşmaktadır.

Sistem bileşenlerinin maliyet dengesi aşağıdaki gibi bulunmuştur. SPECO metodunda çözüme ulaşılabilmesi için maliyet denklemlerinin sayısının bilinmeyen

sayısına eşit olması gerekmektedir. Bu eşitliği sağlamak için yardımcı denklemler gerekmektedir ve SPECO metodunda yardımcı denklemler Besleme-Ürün (Feed-Product) Kuralına göre yazılır.

Şekil 3.1'deki sistem için uygulanan SPECO metoduna ait maliyet denge denklemleri ve yardımcı denklemler Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Sistem bileşenlerinin besleme-maliyet denge denklemi genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Kwak ve ark., 2020).

$$\sum_k \dot{C}_{f,k} + \dot{Z}_k = \sum_k \dot{C}_{p,k} \quad (3.15)$$

$$\sum \dot{C}_{çıkan,k} + \dot{C}_{w,k} = \sum \dot{C}_{giren,k} + \dot{C}_{q,k} + \dot{Z}_k \quad (3.16)$$

Ekserji akışının maliyeti ( $\dot{C}$ ), bileşene ait ekserji değeri ile birim ekserji maliyeti ( $c$ ) çarpılarak bulunmaktadır. Yukarıda yapılan açıklamaya göre "k" sistem bileşenine ait ekserji yıkım maliyetinin ( $\dot{C}_{D,k}$ ) ve ortalama birim besleme ekserji maliyetinin denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\dot{C} = c \cdot \dot{E}x \quad (3.17)$$

$$\dot{C}_{D,k} = c_{f,k} \dot{E}x_{D,k} \quad (3.18)$$

$$c_{f,k} = \frac{\dot{C}_{f,k}}{\dot{E}x_{f,k}} \quad (3.19)$$

$\dot{Z}_k$ , "k" bileşenine ait ilk yatırım, işletme ve bakım masrafları ile ilgili zamana bağlı maliyet değeridir ve aşağıdaki denklemle bulunmaktadır (Mazloum ve ark., 2017).

$$\dot{Z}_k = \frac{Z_k \cdot CRF \cdot \varphi}{3600 \cdot N} \quad (3.20)$$

Denklemden belirtilen  $\varphi$ , bakım faktörünü; CRF anapara geri kazanım faktörünü; N, yıllık çalışma saatini ifade etmektedir. Bu çalışmada  $\varphi=1.06$  alınmış olup sistemin yılda 17 saat/gün çalıştığı kabul edilmiştir (Mazloum ve ark., 2017). Sistemi oluşturan her bileşen için maliyeti veren denklemler ( $Z_k$ ), Çizelge 3.6'da verilmiştir.

CRF değeri aşağıdaki denklem ile bulunmaktadır. Denklemden  $\lambda$  değeri yıllık faiz oranını ve n sistemin ekonomik ömrünü göstermektedir (Mazloum ve ark., 2017).

$$CRF = \frac{\lambda(1 + \lambda)^n}{((1 + \lambda)^n - 1)} \quad (3.21)$$

Bu çalışmada  $\lambda$  yıllık faiz oranı %10,  $n$  sistem ömrü 20 yıl kabul edilmiştir (Mazloun ve ark., 2017).

**Çizelge 3.5.** Maliyet denge denklemleri ve yardımcı denklemler.

Bileşen	Maliyet Denge Denklemi	Yardımcı Denklemler
<b>K-1</b>	$\dot{C}_1 + \dot{C}_{wK-1} + \dot{Z}_{K-1} = \dot{C}_2$	$c_1 = 0, c_{wK-1} = c_{wRT}$ (kabul)
<b>ID-1</b>	$\dot{C}_2 + \dot{C}_{16} + \dot{Z}_{ID-1} = \dot{C}_3 + \dot{C}_{17}$	$c_2 = c_3$ (F-kuralı)
<b>K-2</b>	$\dot{C}_3 + \dot{C}_{wK-2} + \dot{Z}_{K-2} = \dot{C}_4$	$c_{wK-2} = c_{wRT}$ (kabul)
<b>ID-2</b>	$\dot{C}_4 + \dot{C}_{14} + \dot{Z}_{ID-2} = \dot{C}_5 + \dot{C}_{15}$	$c_4 = c_5$ (F-kuralı)
<b>P-1</b>	$\dot{C}_{12} + \dot{C}_{wP-1} + \dot{Z}_{P-1} = \dot{C}_{13}$	$c_{wP-1} = c_{wRT}$ (kabul)
<b>SO-TED</b>	$\dot{C}_{25} + \dot{Z}_{SO-TED} = \dot{C}_{12}$	
<b>HD</b>	$\dot{C}_5 + \dot{Z}_{HD} = \dot{C}_6$	
<b>REG</b>	$\dot{C}_6 + \dot{Z}_{REG} = \dot{C}_7$	
<b>P-2</b>	$\dot{C}_{19} + \dot{C}_{wP-2} + \dot{Z}_{P-2} = \dot{C}_{20}$	$c_{wP-2} = c_{wRT}$ (kabul)
<b>SI-TED</b>	$\dot{C}_{18} + \dot{Z}_{SO-TED} = \dot{C}_{19}$	
<b>ID-3</b>	$\dot{C}_7 + \dot{C}_{21} + \dot{Z}_{ID-3} = \dot{C}_8 + \dot{C}_{22}$	$c_{21} = c_{22}$ (F-kuralı)
<b>T-1</b>	$\dot{C}_8 + \dot{Z}_{T-1} = \dot{C}_9 + \dot{C}_{wT-1}$	$c_8 = c_9$ (F-kuralı)
<b>ID-4</b>	$\dot{C}_9 + \dot{C}_{23} + \dot{Z}_{ID-4} = \dot{C}_{10} + \dot{C}_{24}$	$c_{23} = c_{24}$ (F-kuralı)
<b>T-2</b>	$\dot{C}_{10} + \dot{Z}_{T-2} = \dot{C}_{11} + \dot{C}_{wT-2}$	$c_{10} = c_{11}$ (F-kuralı)
<b>RT</b>	$\dot{C}_{26} + \dot{Z}_{RT} = \dot{C}_{27} + \dot{C}_{wRT}$	$c_{26} = 0, c_{27} = c_{26}$ (F-kuralı)
<b>S1</b>	$\dot{C}_{13} = \dot{C}_{14} + \dot{C}_{16}$	$c_{14} = c_{16}$
<b>S2</b>	$\dot{C}_{20} = \dot{C}_{21} + \dot{C}_{23}$	$c_{21} = c_{23}$
<b>M1</b>	$\dot{C}_{15} + \dot{C}_{17} = \dot{C}_{18}$	
<b>M2</b>	$\dot{C}_{22} + \dot{C}_{24} = \dot{C}_{25}$	

Çizelge 3.6. Sistem Bileşenlerine ait Maliyet Denklemleri

Bileşen	Sermaye Yatırım Maliyeti ( $Z_k$ )	
<b>Kompresör</b> (Wu ve ark., 2020)	$Z_K = 7900. \dot{W}_K^{0.62}$	
<b>Türbin</b> (Jiang ve ark., 2019)	$Z_T = 1100. \dot{W}_T^{0.81}$	
<b>Isı Değiştiricisi</b> (Ghaebi ve ark., 2017)	$Z_{ID} = Z_R \cdot \left(\frac{A_{ID}}{A_R}\right)^{0.6}$	$Z_R = 12000$ $A_R = 100 \text{ m}^2$
<b>Hava Deposu</b> (Alirahmi ve ark., 2021)	$Z_{HD} = 1.218 * f_m e^{2.631+1.3673 \cdot \ln(V_{hd}) - 0.06309 \cdot \ln^2(V_{hd})}$	$f_m = 1$ (karbon çelik)
<b>Pompa</b> (Mousavi ve ark., 2021)	$Z_P = 1120. \dot{W}_P^{0.8}$	
<b>SO-TED</b> (Alirahmi ve ark., 2021)	$Z_{SO-TED} = 5941.7 (V_{TED})^{-0.389}$	
<b>SI-TED</b> (Alirahmi ve ark., 2021)	$Z_{SI-TED} = 5941.7 (V_{TED})^{-0.272}$	
<b>Rüzgâr Türbini</b> (Keshtkar ve Khani, 2018)	$Z_{RT} = 5000. \dot{W}_{RT}$	
<b>Regülatör</b> (Ebadollahi ve ark., 2019)	$Z_{REG} = 114.5 \dot{m}_t$	

Isı değiştiricilerinin  $Z_k$  değerlerinin hesaplanmasında Çizelge 3.6’da görüldüğü üzere ısı değiştiricilerinin alanlarının bilinmesi gerekmektedir. Sistemde 4 adet bulunan ısı değiştiricileri boru-gövde tipi ısı değiştiricisi olup birim zamanda transfer edilen ısı miktarını veren genel denklem aşağıdaki gibidir.

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (3.22)$$

Denklem 3.22’de  $\dot{Q}$  ısı akısı,  $A$  ısı transfer alanı ve  $\Delta T_m$  ortalama logaritmik sıcaklık farkı olup aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta T_m = \frac{(T_{sıcak,giren} - T_{soğuk,çıkan}) - (T_{sıcak,çıkan} - T_{soğuk,giren})}{\ln\left(\frac{T_{sıcak,giren} - T_{soğuk,çıkan}}{T_{sıcak,çıkan} - T_{soğuk,giren}}\right)} \quad (3.23)$$

Toplam ısı transfer katsayısı  $U$  aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_s} + \frac{d_o}{d_i} \left( \frac{1}{h_t} + R_{ft} \right) + R_{fs} \quad (3.24)$$

$h_s$  ve  $h_t$  ısı değiştiricisinin sırasıyla gövde ve boru kısmına ait ısı transfer katsayısı olup;  $d_o$  ve  $d_i$  borunun iç ve dış çaplarıdır.  $R_{fs}$  ve  $R_{ft}$  gövde ve boru kısmına ait kirlenme katsayısını ifade etmektedir (Yao ve ark., 2016)

Boru tarafına ait ısı transfer katsayısı ( $h_s$ ), Reynolds sayısına göre aşağıdaki ifadeden hesaplanmaktadır.

$$h_t = \begin{cases} \frac{k_t}{d_i} \left[ 3.657 + \frac{0.0677 \left( Re_t Pr_t \left( \frac{d_i}{L} \right) \right)^{1.33}}{1 + 0.1 Pr_t \left( \frac{d_i}{L} \right)^{0.3}} \right] & ; Re_t < 2300 \\ \frac{k_t}{d_i} \left[ \frac{\left( \frac{f_t}{8} \right) (Re_t - 1000) Pr_t}{1 + 12.7 \left( \frac{f_t}{8} \right)^{\frac{1}{2}} \left( Pr_t^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \left( 1 + \frac{d_i}{L} \right)^{0.67} \right] & ; 2300 < Re_t < 10000 \\ 0.027 \frac{k}{d_i} Re_t^{0.8} Pr_t^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu_t}{\mu_{wt}} \right)^{0.14} & ; Re_t > 10000 \end{cases} \quad (3.25)$$

$Re_t$  ve  $Pr_t$  sırasıyla boru tarafının Reynolds sayısını ve Prandtl sayısını ifade etmektedir ve sırasıyla Denklem 3.26, Denklem 3.27 ile hesaplanmaktadır (Yao ve ark., 2016)

$$Re_t = \frac{\rho_t v_t d_i}{\mu_t} \quad (3.26)$$

$$Pr_t = \frac{\mu_t C_{pt}}{k_t} \quad (3.27)$$

Reynolds sayısını hesabı için gerekli olan akış hızı Denklem 3.28 ile hesaplanmaktadır (Caputo ve ark., 2008).

$$v_t = \frac{m_t}{\frac{\pi d_i^2}{4} \cdot \rho_t} \cdot \left( \frac{n}{N_t} \right) \quad (3.28)$$

Denklem 3.28'de  $n$  ve  $N_t$  sırasıyla boru geçiş sayısını ve boru sayısını ve Denklem 3.29 ile hesaplanır (Caputo ve ark., 2008).

$$N_t = K_1 \left( \frac{d_i}{d_o} \right)^{n_1} \quad (3.29)$$

Burada  $d_i$  boru iç çapıdır ve Denklem 3.30 ile bulunabilir.

$$d_i = 0.8d_o \quad (3.30)$$

$K_1$  ve  $n_1$  boru sayısı ve boru geçiş sayısı dikkate alınarak hesaplanan katsayılarıdır. Çizelde 3.7’de üçgen ve kare boru dizilim sayılarına denk gelen katsayıları göstermektedir.

**Çizelge 3.7.**  $K_1$  ve  $n_1$  katsayılarına ait değerler (Asadi ve ark., 2014).

Geçiş sayısı	Üçgen boru dizilimi		Kare boru dizilimi	
	$S_t = 1.25d_o$		$S_t = 1.25d_o$	
	$K_1$	$n_1$	$K_1$	$n_1$
1	0.319	2.142	0.215	2.207
2	0.249	2.207	0.156	2.291
4	0.175	2.285	0.158	2.263
6	0.0743	2.499	0.0402	2.617
8	0.0365	2.675	0.0331	2.643

Gövde tarafının ısı transfer katsayısı ( $h_s$ ), Asadi ve ark. (2014) tarafından Denklem 3.31’deki gibi tanımlanmıştır:

$$h_s = 0.36 \frac{k_t}{d_s} Re_s^{0.55} Pr_s^{1/3} \left( \frac{\mu_s}{\mu_{wts}} \right)^{0.14} \quad (3.31)$$

Burada  $d_s$  gövde tarafındaki çaptır ve Denklem 3.32 ile bulunmaktadır.

$$d_s = \frac{1.1}{d_o} (p_t^2 - 0.917d_o^2) \quad (3.32)$$

Burada  $p_t$ , boru demetleri için boru eksenleri arasındaki mesafedir ve Denklem 3.33 ile bulunmaktadır. Bu çalışmada boru demetlerinin dizilimi, üçgen dizilimi olarak kabul edilmiştir. (Küçük ve ark., 2019):

$$p_t = 1.5d_o \quad (3.33)$$

Gövde tarafı için Reynolds ( $Re_s$ ) sayısı ve Prandtl sayısı ( $Pr_s$ ) aşağıdaki denklemler ile bulunmaktadır (Küçük ve ark., 2019; Asadi ve ark., 2014).

$$Re_s = \frac{U_s d_i \rho}{\mu} \quad (3.34)$$

$$Pr_s = \frac{\mu_s C_{ps}}{k_s} \quad (3.35)$$

### 3.3.2.3. Geleneksel ekserji ve eksergo-ekonomik analizler için performans kriterleri

Geleneksel ekserji analizinde; ekserji yıkımı ( $E\dot{x}_{D,k}$ ), ekserji yıkım oranı ( $Y_{D,k}$ ), bağıl ekserji yıkım oranı ( $Y_{D,k}^*$ ) ve ekserji verimi ( $\varepsilon_k$ ) analiz sonuçlarını değerlendirmek için bir performans göstergesi olarak değerlendirilmiş ve sırasıyla her bir “k” bileşeni için aşağıdaki denklemler ile bulunmuştur (Zhang ve ark., 2020).

$$E\dot{x}_{D,k} = E\dot{x}_{f,k} - E\dot{x}_{p,k} \quad (3.36)$$

$Y_{D,k}$  besleme ekserjisine göre yıkılan ekserjiyi değerlendiren bir parametredir ve aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$Y_{D,k} = \frac{E\dot{x}_{D,k}}{E\dot{x}_{f,k}} \times 100 \quad (3.37)$$

$Y_{D,k}^*$ , “k” bileşenin ekserji yıkımının sistemin toplam ekserji yıkımının yüzdelik olarak ne kadar kısmını oluşturduğu konusunda bilgi vermektedir ve aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$Y_{D,k}^* = \frac{E\dot{x}_{D,k}}{E\dot{x}_{D,toplam}} \times 100 \quad (3.38)$$

$\varepsilon_k$ , besleme ekserjisine göre ürün ekserjisinin değerlendirilmesini sağlayan bir parametredir ve aslında besleme ekserjisinden faydalanma oranını gösteren bir ölçüttür.

$$\varepsilon_k = \frac{E\dot{x}_{p,k}}{E\dot{x}_{f,k}} \times 100 \quad (3.39)$$

Yukarıda bahsedilen performans kriterleri sistem bileşenleri temel alınarak düşünülmüştür. Sistemin genel performansı ise sistemin ekserji verimi ile değerlendirilmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelediğinde geleneksel ekserji analizinde sistemin ekserji veriminin farklı şekillerde ifade edildiği görülmüştür. Correa ve Gundersen (2012), yapmış oldukları çalışmada ekserji verimini iki sınıfa ayırarak tanımlamışlardır. Birinci ekserji verimi tanımını sisteme giren-çıkan ekserji akışı olarak ve ikinci ekserji verimi tanımını sistem için tüketilen-üretilen ekserji akışı olarak yapmışlardır. RTE performans kriteri ayrıca ikinci ekserji verim tanımına benzediği için bu çalışmada sistemin geleneksel ekserji analizine göre ekserji verimi birinci tanıma göre verilmiştir (Correa ve Gundersen, 2012).

$$\eta_{sistem} = \frac{\sum \text{Çıkan ekserji}}{\sum \text{Giren ekserji}} = 1 - \frac{\sum \dot{E}x_{D,k}}{\dot{E}x_{giren}} \quad (3.40)$$

Geleneksel çalışmada, eksergo-ekonomik analiz için sistem bileşenlerinin performansını gösteren bir ölçüt olarak performans kriterleri; her bir bileşende birim ortalama besleme ( $c_{f,k}$ ) ve ürün ( $c_{p,k}$ ) ekserji maliyeti, eksergo-ekonomik faktör ( $f_k$ ) ve göreceli maliyet farkı ( $r_k$ ) olarak değerlendirilmiştir.

Birim ortalama besleme ( $c_{f,k}$ ) ve ürün ( $c_{p,k}$ ) ekserji maliyetleri aşağıdaki denklemler ile bulunmuştur (Mohammadkhani ve ark., 2014).

$$c_{f,k} = \frac{\dot{C}_{f,k}}{\dot{E}x_{f,k}} \quad (3.41)$$

$$c_{p,k} = \frac{\dot{C}_{p,k}}{\dot{E}x_{p,k}} \quad (3.42)$$

“k” bileşenine ait eksergo-ekonomik faktör aşağıdaki denklem ile bulunmaktadır (Mohammadkhani ve ark., 2014). Bu değer ile sistem bileşeninin yatırım maliyeti göreceli olarak ekserji yıkım maliyeti ile kıyaslanmaktadır ve böylece hangisinin daha etkili olduğu ortaya konmaktadır.

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k}} \quad (3.43)$$

Burada  $\dot{C}_{D,k}$ , k elamanına ait ekserji yıkım maliyetini göstermektedir ve aşağıdaki denklem ile bulunmuştur (Mohammadkhani ve ark., 2014).

$$\dot{C}_{D,k} = c_{f,k} \cdot \dot{E}x_{D,k} \quad (3.44)$$

“k” bileşenine ait göreceli maliyet farkı aşağıdaki denklem ile bulunmaktadır (Mohammadkhani ve ark., 2014).

$$r_k = \frac{(c_{p,k} - c_{f,k})}{c_{f,k}} \quad (3.45)$$

### 3.3.3. İleri Ekserji ve Eksergo-ekonomik Analiz

Bu bölümde ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analizlerde sistem bileşenleri için kullanılan ekserji ve maliyet denklemleri verilmiştir.

#### 3.3.3.1. İleri Ekserji Analizi

İleri ekserji analizi, entropi üretiminin (tersinmezlik) sistem bileşeninin kendisinden mi yoksa diğer sistem bileşenleri ile olan ilişkisinden mi kaynaklandığını araştırmakta ve iyileştirme çalışması yapılabilecek sistem bileşenlerinin önceliği hakkında net bilgi vermektedir. Kısacası ileri ekserji analizi sistemdeki ekserji yıkımının yerini göstermekte ve aynı zamanda sebebini de ortaya koymaktadır. Bu yönüyle geleneksel ekserji analizine üstünlük sağlamaktadır.

İleri ekserji analizinde, ekserji yıkımı dört kısma ayrılır:

- İçsel ekserji yıkımı ( $\dot{E}x_{D,k}^{EN}$ ): Sistem bileşeninin kendi aktivitesinden kaynaklanan ekserji yıkımıdır.
- Dışsal Ekserji yıkımı ( $\dot{E}x_{D,k}^{EX}$ ): Sistem bileşeninin çalışması sırasında diğer bileşenlerle olan ilişkisinden kaynaklanan ekserji yıkımıdır.
- Kaçınılabılır ekserji yıkımı ( $\dot{E}x_{D,k}^{AV}$ ): Bu bölüm imkanlar doğrultusunda yapılabilecek iyileştirme potansiyelini gösterir. Ekserji yıkımının kaçınılabılır kısmı; maliyet, çevresel etkiler, tasarım ve teknik fırsatların durumu tarafından belirlenir.
- Kaçınılmaz ekserji yıkımı ( $\dot{E}x_{D,k}^{UN}$ ): Bu, ekserji yıkımının günümüzün teknolojik sınırlamaları nedeniyle azaltılamayan kısmıdır.

$\dot{E}x_{D,k}^{EN}$  ve  $\dot{E}x_{D,k}^{EX}$  değerleri tasarımcıyı sistemin çalışma performansını iyileştirmek için bir optimizasyon çalışmasına yönlendirirken,  $\dot{E}x_{D,k}^{AV}$  ve  $\dot{E}x_{D,k}^{UN}$  değerleri sistem bileşenlerinin iyileştirme potansiyeli hakkında bilgi vermektedir.

Bir “k” sistem bileşeni için  $\dot{E}x_{D,k}^{EN}$  değeri, bu bileşen gerçek koşulları ile çalışırken diğer sistem bileşenlerinin ideal koşullarda çalıştığı düşünülerek hesaplanmaktadır.

“k” bileşeni için  $\dot{E}x_{D,k}^{UN}$  değerinin hesaplanmasında mümkün olan en iyi çalışma koşulları dikkate alınmaktadır. Bu çalışma koşulları, “k” bileşenin performansı etkileyebilecek en önemli parametrelere göre belirlenir. Her bileşendeki içsel/dışsal ve kaçınılmaz/kaçınılamaz ekserji yıkımı değerlerini hesaplamak için belirlenen gerçek, ideal ve kaçınılmaz şartlar Çizelge 3.8’de verilmektedir.

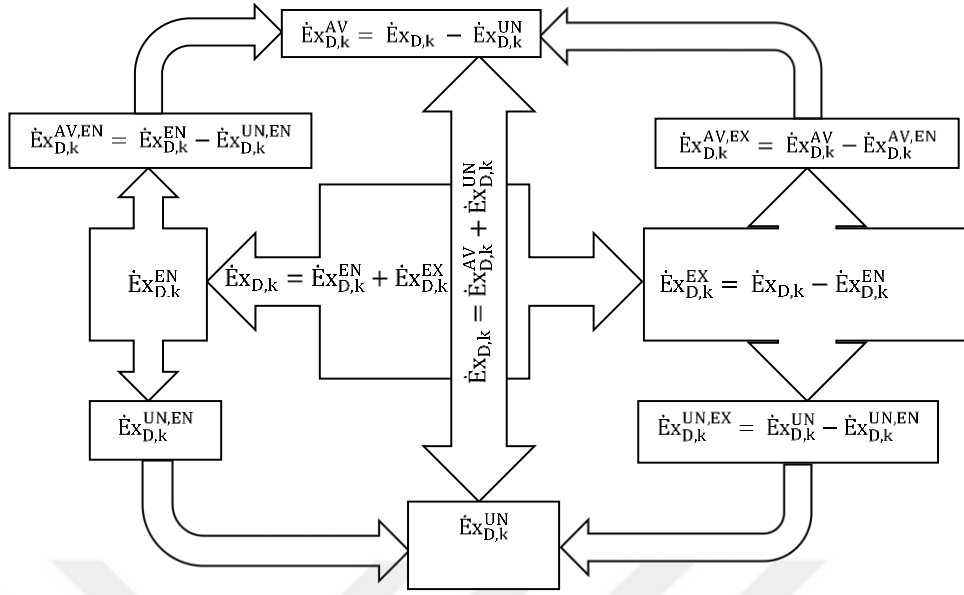
Çizelge 3.8’de verilen gerçek, ideal ve kaçınılmaz koşullar aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

- Gerçek koşullar: Sistem bileşenleri, sonlu sıcaklık farkında ısı transferi, basınç düşüşü ve ortalama veya düşük verimlilik gibi tersinmezlik içeren uygulama koşulları altında çalışır.
- İdeal koşullar: Bileşenler sıfır basınç kaybı, yüksek verim, düşük sıcaklık farkı vb. ile çalışır.
- Kaçınılmaz koşullar: Her bileşen, teknolojik sınırlamaların izin verdiği mümkün olan en iyi çalışma koşullarına sahiptir.

İleri ekserji analizinde ekserji yıkımının içsel, dışsal, kaçınılabılır ve kaçınılamaz bölümlerinin hesaplanmasında kullanılan denklemler Şekil 3.2’de verilmektedir.

**Çizelge 3.8.** İleri Ekserji Analizi için Girdi Değerleri (Z. Liu ve ark., 2019; Montazerinejad ve ark., 2019; Wang ve ark., 2016; Y. Zhang ve ark., 2021)

Bileşen	Durum		Kaçınılamaz Durum	
	Gerçek	İdeal	Ekserji Yıkımı	Yatırım maliyeti $\dot{Z}_k^{UN}$ (çalışma koşulları veya $\% \dot{Z}_k$ )
RT	$\eta = \%85$	$\eta = \%100$	$\eta = \%95$	$\%90$
K-1	$\eta = \%85$	$\eta = \%100$	$\eta = \%92$	$\%90$
ID-1	$\varepsilon = \%90$	$\varepsilon = \%100$	$\varepsilon = \%98$	$\varepsilon = \%60$
K-2	$\eta = \%85$	$\eta = \%100$	$\eta = \%92$	$\%90$
ID-2	$\varepsilon = \%90$	$\varepsilon = \%100$	$\varepsilon = \%98$	$\varepsilon = \%60$
REG	izentalpik	izentropik	izentalpik	$\%90$
ID-3	$\varepsilon = \%90$	$\varepsilon = \%100$	$\varepsilon = \%98$	$\varepsilon = \%60$
T-1	$\eta = \%85$	$\eta = \%100$	$\eta = \%92$	$\%90$
ID-4	$\varepsilon = \%90$	$\varepsilon = \%100$	$\varepsilon = \%98$	$\varepsilon = \%60$
T-2	$\eta = \%85$	$\eta = \%100$	$\eta = \%92$	$\%90$



**Şekil 3.2.** “k” sistem bileşeni için ekserji yıkımının içsel, dışsal, kaçınılabılır ve kaçınılamaz bölümlerine ayrılmasının denklemler ile şematik gösterimi (Özen ve Koçak, 2022).

### 3.3.3.2. İleri Eksergo-ekonomik Analiz

İleri ekserji analizindeki yaklaşım ekonomik analize de uygulanabilir. Yatırım maliyetleri ve ekserji yıkım maliyetleri içsel/dışsal ve kaçınılabılır/kaçınılamaz kısım olarak ayrılabilir.

İçsel/dışsal ve kaçınılabılır/kaçınılamaz durumlara göre hesaplanan ekserji yıkım maliyeti değerleri aşağıdaki denklemler ile bulunmaktadır (Petrapoulou ve ark., 2013).

$$\dot{C}_{D,k}^{EN} = c_{f,k} \dot{E}x_{D,k}^{EN} \quad (3.46)$$

$$\dot{C}_{D,k}^{EX} = \dot{C}_{D,k} - \dot{C}_{D,k}^{EN} \quad (3.47)$$

$$\dot{C}_{D,k}^{UN} = c_{f,k} \dot{E}x_{D,k}^{UN} \quad (3.48)$$

$$\dot{C}_{D,k}^{AV} = \dot{C}_{D,k} - \dot{C}_{D,k}^{UN} \quad (3.49)$$

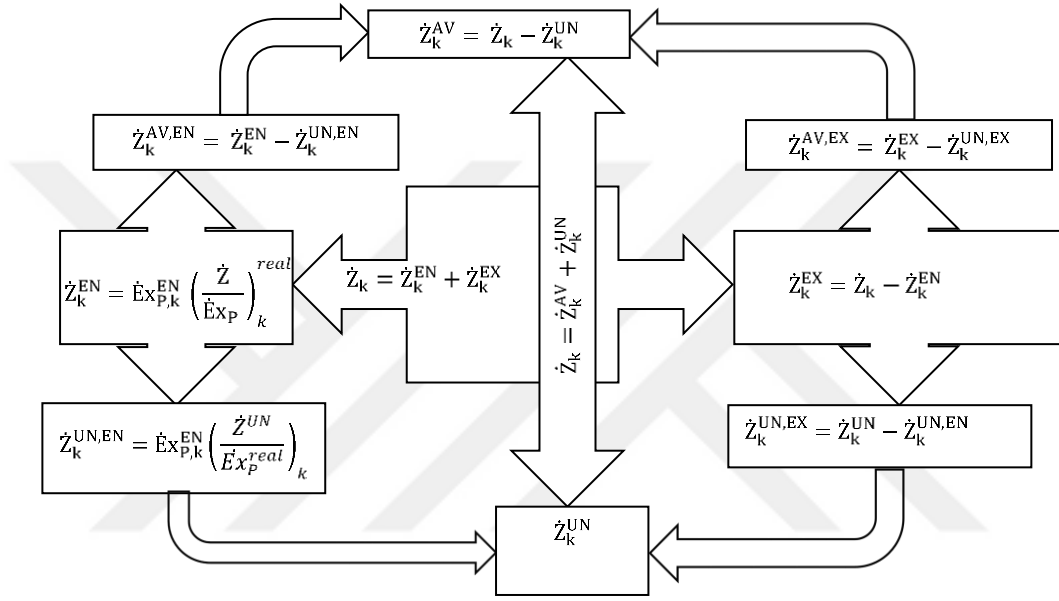
$$\dot{C}_{D,k}^{UN,EN} = c_{f,k} \dot{E}x_{D,k}^{UN,EN} \quad (3.50)$$

$$\dot{C}_{D,k}^{UN,EX} = \dot{C}_{D,k}^{UN} - \dot{C}_{D,k}^{UN,EN} \quad (3.51)$$

$$\dot{C}_{D,k}^{AV,EN} = \dot{C}_{D,k}^{EN} - \dot{C}_{D,k}^{UN,EN} \quad (3.52)$$

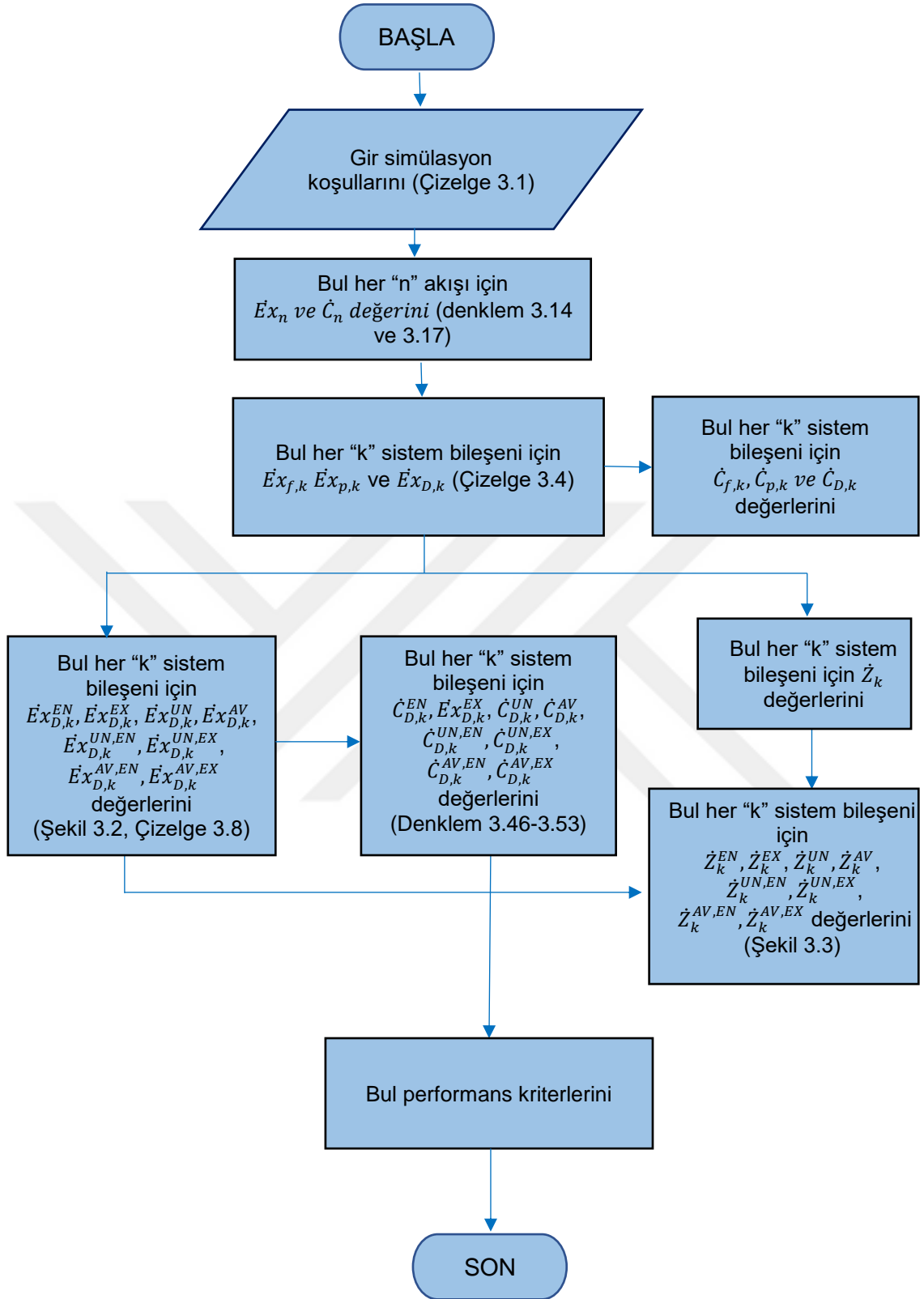
$$\dot{C}_{D,k}^{AV,EX} = \dot{C}_{D,k}^{EX} - \dot{C}_{D,k}^{UN,EX} \quad (3.53)$$

“k” bileşeni için kaçınılmaz yatırım maliyeti ( $\dot{Z}_k^{UN}$ ) Çizelge 3.6’da verilen değerlere göre hesaplanmış ve Şekil 3.3’de gösterilen denklemlere göre içsel, dışsal, kaçınılabilir ve kaçınılmaz bölümleri bulunmuştur (Petrakopoulou ve ark., 2013).



**Şekil 3.3.** “k” sistem bileşeni için yatırım maliyetinin içsel, dışsal, kaçınılabilir ve kaçınılmaz bölümlerine ayrılmasının denklemler ile şematik gösterimi (Özen ve Koçak, 2022)

Geleneksel/ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analiz hesaplamalarının çözüm adımları Şekil 3.4’te verilen akış algoritması ile gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Geleneksel/ ileri ekserji ve eksergo-ekonomik hesaplarının çözüm akış algoritması.

### 3.3.3.1. İleri Ekserji ve Eksergo-ekonomik Analizler için Performans Kriterleri

İleri ekserji analizi için sistem bileşeninin performansı, modifiye edilmiş ekserji verimi ( $\varepsilon_k^{adv}$ ), modifiye edilmiş ekserji yıkım oranı ( $Y_{D,k}^{adv}$ ) ve modifiye edilmiş bağıl ekserji yıkım oranı ( $Y_{D,k}^{*adv}$ ) ile değerlendirilmiştir. Bu ifadeler aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır (Anvari ve ark., 2015; Mehrpooya ve ark., 2018).

$$\varepsilon_k^{adv} = \frac{\dot{E}x_{p,k}}{\dot{E}x_{f,k} - \dot{E}x_{D,k}^{UN} - \dot{E}x_{D,k}^{AV,EX}} \quad (3.54)$$

$$Y_{D,k}^{adv} = \frac{E\dot{x}_{D,k}^{AV,EN}}{\dot{E}x_{f,k} - \dot{E}x_{D,k}^{AV,EN}} \quad (3.55)$$

$$Y_{D,k}^{*adv} = \frac{E\dot{x}_{D,k}^{AV,EN}}{\dot{E}x_{D,toplam}} \quad (3.56)$$

Yukarıda bahsedilen performans kriterleri sistem bileşenleri temel alınarak düşünülmüştür. Sistemin genel performansı ise modifiye edilmiş sistemin ekserji verimi ile değerlendirilmiştir.

İleri ekserji analizinde ekserji verimi bu çalışmaya özgü olarak kaçınılamaz ve kaçınılabılır ekserji yıkımları dikkate alınarak tanımlanmıştır.

$$\eta_{sistem}^{adv} = 1 - \frac{\sum E\dot{x}_{D,k}^{AV}}{\dot{E}x_{giren} - \sum E\dot{x}_{D,k}^{UN}} \quad (3.57)$$

Bu çalışmada, ileri eksergo-ekonomik analizi için kaçınılabılır içsel eksergo-ekonomik faktör ( $f_k^{AV,EN}$ ) ve kaçınılabılır içsel toplam işletme maliyeti ( $\dot{C}_{toplaml,k}^{AV,EN}$ ) bir performans ölçütü olarak değerlendirilmiştir. Bu ifadeler aşağıdaki denklemler ile bulunmuştur (Mehrpooya ve ark., 2018).

$$f_k^{AV,EN} = \frac{\dot{Z}_k^{AV,EN}}{\dot{C}_{D,k}^{AV,EN} + \dot{Z}_k^{AV,EN}} \quad (3.58)$$

$$\dot{C}_{toplaml,k}^{AV,EN} = \dot{C}_{D,k}^{AV,EN} + \dot{Z}_k^{AV,EN} \quad (3.59)$$

### 3.4. Sistemin Duyarlılık Analizi

Önerilen sistemin performansını etkileyen kararlı değişkenler vardır. Rüzgâr türbininin veriminin, kompresörlerin ve türbinlerin izentropik verimlerinin sistemin ekserji yıkımını ve maliyet değerlerini diğer parametrelere göre daha fazla etkilediği görülmüştür. Bu nedenle sistemin duyarlılık analizinde anahtar parametreler rüzgâr türbini verimi, kompresörlerin ve türbinlerin izentropik verimi dikkate alınarak yapılmıştır. Anahtar parametrelerin aralık değerleri Çizelge 3.9'da verilmiştir. Sistemin performansının bir göstergesi olan performans kriterleri bu bölümün alt başlıklarında geleneksel ve ileri ekserji/eksergo-ekonomik analizlere göre verilmiştir.

**Çizelge 3.9.** Duyarlılık analizi için anahtar parametrelerin değer aralıkları.

<b>Kararlı değişkenler</b>	<b>Sembol</b>	<b>Aralık</b>
Rüzgâr türbini verimi [%]	$\eta_{RT}$	70-95
K-1 ve K-2'nin izentropik verimi [%]	$\eta_K$	80-92
T-1 ve T-2'nin izentropik verimi [%]	$\eta_T$	70-92

#### 3.4.1. Duyarlılık Analizi için Performans Kriterleri

Duyarlılık analizi için performans kriterleri; ekserji yıkım ve bölümleri (Şekil 4.2), ekserji yıkım maliyeti ve bölümleri (Denklem 3.46-3.53), yatırım maliyeti ve bölümleri (Şekil 3.3) olarak düşünülmüştür. Çizelge 3.9.'da verilen anahtar parametrelerin değişiminin bu performans kriterleri üzerindeki etkisi bu analizin genel amacını oluşturmaktadır.

### 3.5. Sistemin Çok Amaçlı Optimizasyonu

Önerilen sistemin performansını en iyi duruma taşıyan anahtar parametrelerin değerlerini belirlemek için çok amaçlı bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Çok amaçlı optimizasyon çalışması için sistemin performansını etkileyen kararlı değişkenler ve performans kriterlerini gösteren amaç fonksiyonları, geleneksel/ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analizler konseptinde ayrı ayrı belirlenmiştir. Optimizasyon çalışması için belirlenen performans kriterlerini etkileyen kararlı değişkenler ve değişim aralıkları Çizelge 3.10'da gösterilmiştir. Kararlı değişkenlerinin çalışma aralıkları, sistem bileşenlerinin etkileşimi dikkate alınarak belirlenmiştir.

Çok amaçlı optimizasyon yöntemleri, çeşitli alanlardaki karmaşık yapıdaki problemlerin çözümünde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemler bir problemi birden fazla boyutuyla ele alabilmemize olanak sağlamakta ve bulunan sonuçlar içerisinde en

iyiyi aramamıza yardımcı olmaktadır. Genetik algoritma temelli çok amaçlı optimizasyon yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

**Çizelge 3.10.** Optimizasyon için belirlenen kararlı değişkenlerin aralığı.

Kararlı Değişkenler	Sembol	Aralık
Rüzgâr türbini verimi [%]	$\eta_{RT}$	79-95
Kompresörlerin izentropik verimleri [%]	$\eta_K$	79-92
Türbinlerin izentropik verimleri [%]	$\eta_T$	79-92
Isı değiştiricilerinin etkinliği [%]	$\varepsilon$	79-98

Bu çalışmada, popüler ve etkili olan NSGA-II (non-dominated sorting genetic algorithm-II) çok amaçlı optimizasyon yöntemi olarak kullanılmıştır. NSGA-II, NSGA algoritmasına hızlı ve etkili baskılanamayan sıralama (non-dominated sorting) yaklaşımının ve kalabalıklık mesafe (crowding distance) operatörünün eklenmesi ile oluşturulmuştur. Kalabalıklık mesafe operatörü, popülasyondaki bireylerin çeşitliliğini korumaya ve erken yakınsamayı önlemeye yardımcı olmaktadır. Bu operatör, algoritmanın daha büyük popülasyonları ve daha yüksek boyutlu optimizasyon problemlerini ele almasını sağlayan hızlı ve verimli bir baskın olmayan sıralama yaklaşımı getirerek orijinal NSGA algoritmasını geliştirmektedir (Deb ve ark., 2002).

NSGA-II algoritması şu temel adımlardan oluşmaktadır:

- Başlangıç popülasyonunun oluşturulması
- Amaç fonksiyonlarının hesaplanması
- Baskılanamayan sıralama
- Kalabalıklık mesafesi
- Seçim
- Çaprazlama ve mutasyon

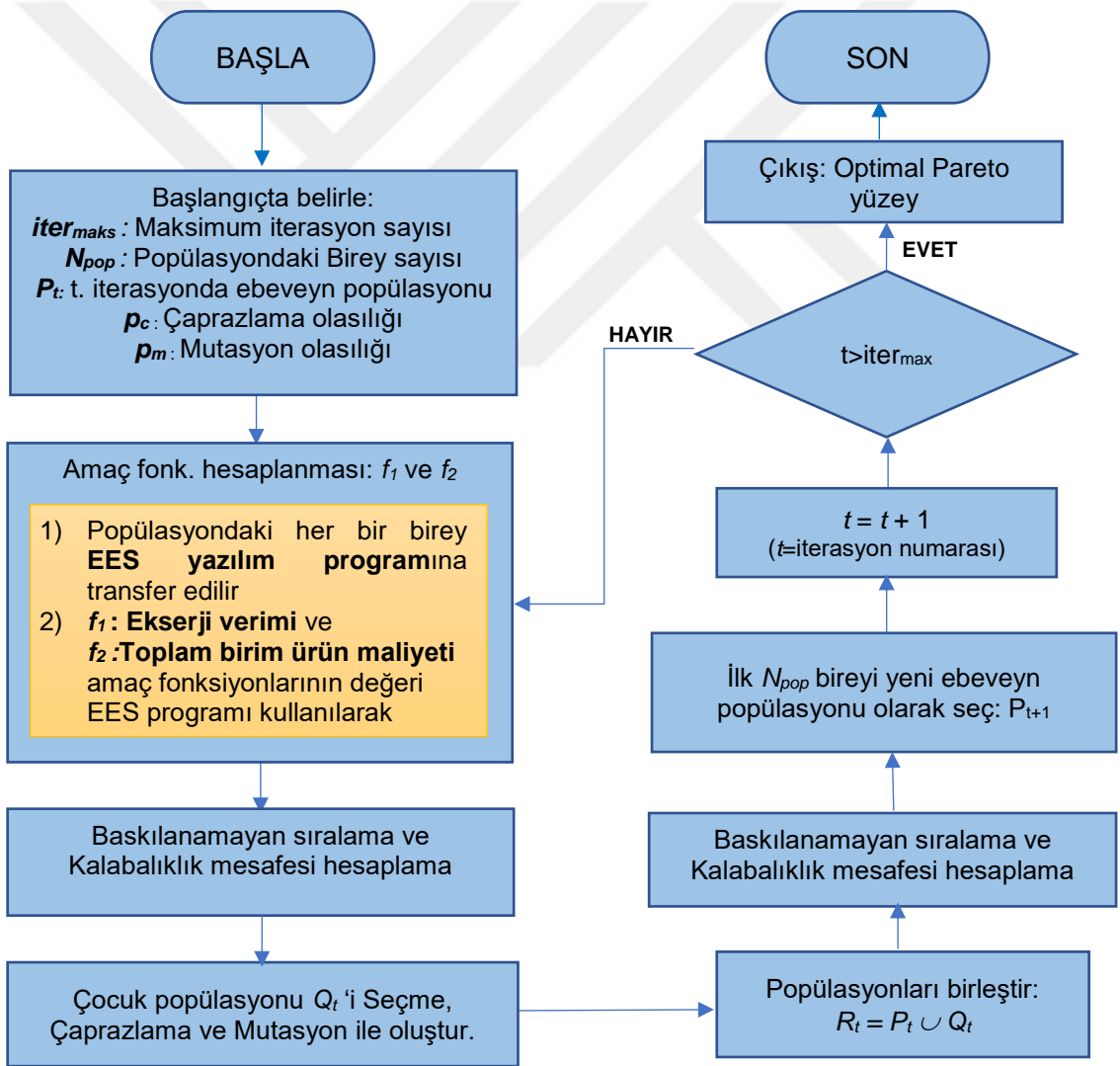
Bu çalışmada NSGA-II'nin adımlarının nasıl uygulandığı aşağıda açıklanmıştır:

- **Başlangıç:** Belirlenen aralıkta rastgele olacak şekilde başlangıç ebeveyn popülasyonu oluşturularak algoritma başlatılmaktadır. Her bir birey, bir aday çözüm olarak düşünülebilmekte ve problem uzayını tanımlayan bir dizi karar değişkeninden oluşmaktadır. Bireyler oluşturulurken gerçek sayı kodlaması (real-coded) kullanılmıştır. Gerçek sayı kodlamasında, bireyde yer alan her bir karar değişkeni kendi aralığındaki rastgele üretilen bir gerçek sayı ile kodlanmaktadır. Kararlı

değişkenlerin listesi ve aralıkları Çizelge 3.10'da verilmiştir. Bu çalışmada, popülasyon büyüklüğü geleneksel ekserji/eksergo-ekonomik analizi için 100, ileri ekserji/eksergo-ekonomik analizi için 50 olarak alınmıştır.

- **Amaç Fonksiyonlarının Hesaplanması:** GA-SHED sisteminin matematiksel modeli EES yazılım programında simüle edilmiştir. EES'ye aktarılan popülasyonun her bir bireyi için toplam birim ürün maliyeti ve ekserji verimliliği değerleri hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, NSGA-II için amaç uygunluk fonksiyonları olarak kullanılmıştır.
- **Baskılanamayan Sıralama:** Bireyler uygunluk değerlerine göre sıralanarak baskın olmayan yüzeylere atanmaktadır. Baskılanamayan yüzey, popülasyondaki başka hiçbir çözüm tarafından baskılanmayan çözümlerin bir kümesidir. Popülasyondaki hiçbir çözüm tarafından baskılanmayan çözümler baskılanmayan ilk yüzeyi oluşturur. İkinci yüzeyi bulmak için ilk yüzeyin elemanları gözardı edilerek geri kalan çözümler arasından baskılanmayan çözümler tespit edilir. Periyodik şekilde devam edilerek çözümlerin tamamı baskılanmama derecesine göre bir yüzeye yerleştirilir. Numarası en düşük olan yüzeyde yer alan çözümler, en iyi çözüm olarak nitelendirilir.
- **Kalabalıklaşma Mesafesi:** Kalabalıklaşma mesafesi, popülasyondaki çeşitliliği korumak için her baskılanmayan yüzeydeki her bir birey için hesaplanmaktadır. Kalabalıklık mesafesi ile her bireyin kendi baskılanamayan yüzeyindeki komşu bireyler arasındaki mesafe hesaplanmaktadır.
- **Seçim:** Yeni nesil çözümler, baskın olmayan yüzey ve kalabalık mesafesine dayalı seçim yoluyla oluşturulmaktadır. Daha yüksek uygunluğa ve daha fazla çeşitliliğe sahip çözümlerin bir sonraki nesil için seçilme olasılığı daha yüksektir.
- **Çaprazlama ve Mutasyon:** Seçilen çözümler, yeni aday çözümler oluşturmak için çaprazlama ve mutasyona tabi tutulmaktadır. Çaprazlama, iki ebeveyn birey birleştirilerek yeni çocuk birey oluşturulurken, mutasyonda ilgili bireyin yapısında küçük değişiklikleri yapılmaktadır. Bu çalışmada, simüle edilmiş ikili çaprazlama (simulated binary crossover-SBX) operatörü ve polinom mutasyonu kullanılmıştır (Deb ve Agrawal, 1994). Bu çalışmada çaprazlama olasılığı 0.35 ve mutasyon olasılığı 0.02 olarak alınmıştır.
- **Tekrar:** Uygunluk değerlendirmesi, baskın olmayan sıralama, kalabalık mesafesi, seçim, çaprazlama ve mutasyon, maksimum nesil sayısı veya çözümlerin yakınsaması gibi bir durdurma kriteri karşılanana kadar tekrarlanmaktadır. Bu çalışmada her ikisi de kullanılmıştır. Maksimum jenerasyon sayısı 100 olarak belirlenmiştir.

NSGA-II algoritmasının çıkışında elde edilen pareto yüzeyden en uygun çözümleri seçmek için TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Sıralama Tercihi Tekniği-Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) tekniği kullanılmıştır. TOPSIS tekniğinde, en düşük Pareto yüzeyinde yer alan her bir aday çözümü, hem ideal hem de ideal-olmayan çözümlere olan mesafesine göre değerlendirilmektedir. TOPSIS'in uygulanması için, öncelikle amaç fonksiyonu değerleri normalize edilmektedir. Daha sonra her bir aday çözüm için hesaplanan mesafe değerleri kullanılarak bir puan hesaplanmaktadır. En yüksek puana sahip çözümler seçilmektedir. Yapılan optimizasyon çalışmasına ait genel prosedürün akış şeması Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Önerilen sisteme uygulanan optimizasyon prosedürünün akış şeması.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde bir GA-SHED sistemi için ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analizlerin performans kriterlerine göre optimizasyon çalışmasının bulunmadığı görülmektedir. Ayrıca literatürde yapılan kapsamlı bir araştırma sonucunda başka sistemler için yapılan optimizasyon çalışmalarının genelinde performans göstergesi olarak sistemin kaçınılabilir ekserji yıkımının, kaçınılabilir ekserji yıkım maliyetinin ve kaçınılabilir yatırım maliyetinin maksimize edilmesinin amaçlandığı görülmüştür. Optimizasyon çalışmasının amacı, sistemin amaç fonksiyonlarını dikkate alarak kararlı değişkenler için en verimli çalışma noktalarını belirlemektir. Ancak ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analizlerde, kaçınılabilir koşullarda performans kriterlerinin maksimize edilmesinin hedeflenmesi, sistem için iyileştirme potansiyelini artırmakta ve sistemi kaçınılamaz koşullardan uzaklaştırmaktadır. Sistemin kaçınılamaz koşullardan uzaklaşması, performansının olumsuz etkilenmesi anlamına gelmektedir. Bu durumda sistem için optimum çalışma koşulları değil, sadece sistemin en çok iyileştirmeye ihtiyaç duyduğu çalışma noktaları önerilmektedir. Dolayısıyla böyle bir seçim ile optimizasyon çalışması yapılmamakta aslında iyileştirme potansiyelinin en yüksek olduğu koşulların hedeflenmesi ile sistemin en kötü çalışma koşullarına yaklaşılmaktadır.

Bu nedenle bu çalışmada ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analizlerde optimizasyon çalışması için kaçınılmaz koşullar temel alınarak modifiye edilmiş toplam birim ürün maliyet oranının minimize edilmesi ve modifiye edilmiş ekserji verimliliğinin maksimize edilmesi amaçlanmaktadır. Sistemin pratikte en verimli çalıştığı koşullar kaçınılamaz koşullardır. Bu nedenle tanımlanan performans kriterlerinin optimizasyonu, tasarımcıya sistem bileşenlerinin bu koşullara ne kadar yakın olduğunu göstermektedir.

### 3.5.1. Çok Amaçlı Optimizasyon Çalışması için Performans Kriterleri

Optimizasyon çalışmasında, geleneksel ekserji ve eksergo-ekonomik analizler için sistemin toplam birim ürün maliyeti ( $c_{p,toplam}$ ) ve ekserji verimi ( $\eta_{sistem}$ ) amaç fonksiyonu olarak değerlendirilirken ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analizler için modifiye edilmiş sistemin toplam birim ürün maliyeti ( $c_{pAV,toplam}$ ) ve modifiye edilmiş ekserji verimi ( $\eta_{sistem}^{adv}$ ) amaç fonksiyonu olarak değerlendirilmiştir. Optimizasyon çalışmasının özünde; sistemin toplam birim ürün maliyeti minimize edilirken, sistemin ekserji verimi maksimize edilerek bu performans kriterleri arasında denge sağlanması amaçlanmıştır.

Geleneksel ve ileri ekserji analizi için performans kriterleri sırasıyla  $\eta_{sistem}$  ve  $\eta_{sistem}^{adv}$  olarak daha önce tanımlanmıştır (Denklem 3.40 ve Denklem 3.57).

Geleneksel eksergo-ekonomik analizde, tüm sistemin toplam ürün birim maliyeti ( $c_{p,toplam}$ ) bir performans göstergesi olarak değerlendirilmiştir. Bu değer aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır (Zare ve ark., 2013).

$$c_{p,toplam} = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} \dot{Z}_k + \sum_{i=1}^{n_k} \dot{C}_{f,k}}{\sum_{i=1}^{n_k} \dot{E}x_{p,k}} \quad (3.59)$$

Bu çalışmada ileri eksergo-ekonomik analiz için performans kriteri literatürde olmayan ve ilk defa bu çalışmada tanımlanan modifiye edilmiş sistemin toplam ürün birim maliyetidir ( $c_{p,AV,toplam}$ ). Bu performans kriteri kaçınılabilir ve kaçınılamaz koşullar dikkate alınarak aşağıdaki denklem ile bulunmuştur.

$$c_{p,AV,toplam} = \frac{(\sum_{i=1}^{n_k} \dot{Z}_k)_{AV} + (\sum_{i=1}^{n_k} \dot{C}_{f,k})_{AV}}{(\sum_{i=1}^{n_k} \dot{E}x_{f,k})_{GERÇEK} - (\sum_{i=1}^{n_k} \dot{E}x_{D,k})_{UN}} \quad (3.60)$$

### 3.6. Model Doğrulaması

Bu bölümde önerilen sistemin doğrulama çalışması verilmiştir. Benzer sisteme sahip Liu ve Wang (2016)'ın çalışmasının tasarım girdi değerleri sunulan çalışmaya uygulanmıştır. Liu ve Wang (2016)'ın çalışmasının ana simülasyon çıktı parametreleri bu çalışma ile doğrulama amaçlı kıyaslanmıştır. Çizelge 3.11'de görüldüğü üzere literatürdeki çalışma ile sunulan çalışma arasındaki sonuçlar oldukça yakındır. Aradaki küçük farklar matematik modelin oluşturulma yönteminden kaynaklanmaktadır. Örneğin bu çalışmada hava gerçek gaz olarak kabul edilmiş ve havanın termodinamik özellikleri bu varsayıma göre EES yazılım programında bulunmuştur. Bu doğrulama çalışması bu çalışmada sunulan simülasyonun termodinamik analizler açısından kabul edilebilir olduğunu göstermektedir.

**Çizelge 3.11.** Liu ve Wang, (2016)'nın çalışması ile önerilen sistemin kıyaslanması.

<b>Parametre</b>	<b>Ref (Liu ve Wang, 2016)</b>	<b>Önerilen Sistem</b>	<b> Fark  (%)</b>
Düşük Basınç- Kompresör Gücü	485.57 kW	485.23 kW	0.1
Yüksek Basınç-Kompresör Gücü	514.43 kW	514.77 kW	0.1
Düşük Basınç- Kompresör Gücü	490.63 kW	489.72 kW	0.2
Yüksek Basınç-Kompresör Gücü	509.37 kW	510.28 kW	0.2
Yükleme Süresi	6.06 h	6.11 h	0.8
Boşaltma Süresi	4.06 h	4.04 h	0.5
Kompresördeki Havanın Kütleli Debisi	1.581 kg/s	1.613 kg/s	2.0
Türbindeki Havanın Kütleli Debisi	2.36 kg/s	2.392 kg/s	1.4
RTE	66.98 %	66.10 %	1.3

### 3.7. Bölüm Sonu Değerlendirmesi

Bu bölümde, önerilen sistemin çalışma prensibi ve matematik modeli detaylı bir şekilde anlatılmış, termodinamik analizler hakkında bilgi verilmiş ve performans kriterleri ile kararlı değişkenler tanımlanmıştır. Ayrıca önerilen sistemin model doğrulaması sunularak kabul edilebilir sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Bir sonraki bölümde, bu bölümde detaylı bir şekilde açıklanan matematik modelin çözümünden elde edilen veriler tartışılacaktır.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde önerilen sistem için enerji, geleneksel ve ileri ekserji/eksergo-ekonomik analizler ile duyarlılık analizi ve çok amaçlı optimizasyon çalışmasının sonuçları detaylı olarak değerlendirilmiştir. Önerilen sistemin verimsizliklerinin belirlenmesi ve sistem bileşenlerindeki iyileştirme potansiyelinin ortaya konulabilmesi için 3. bölümde bahsedilen performans kriterleri, ilgili analizler için değerlendirilerek sunulmuştur.

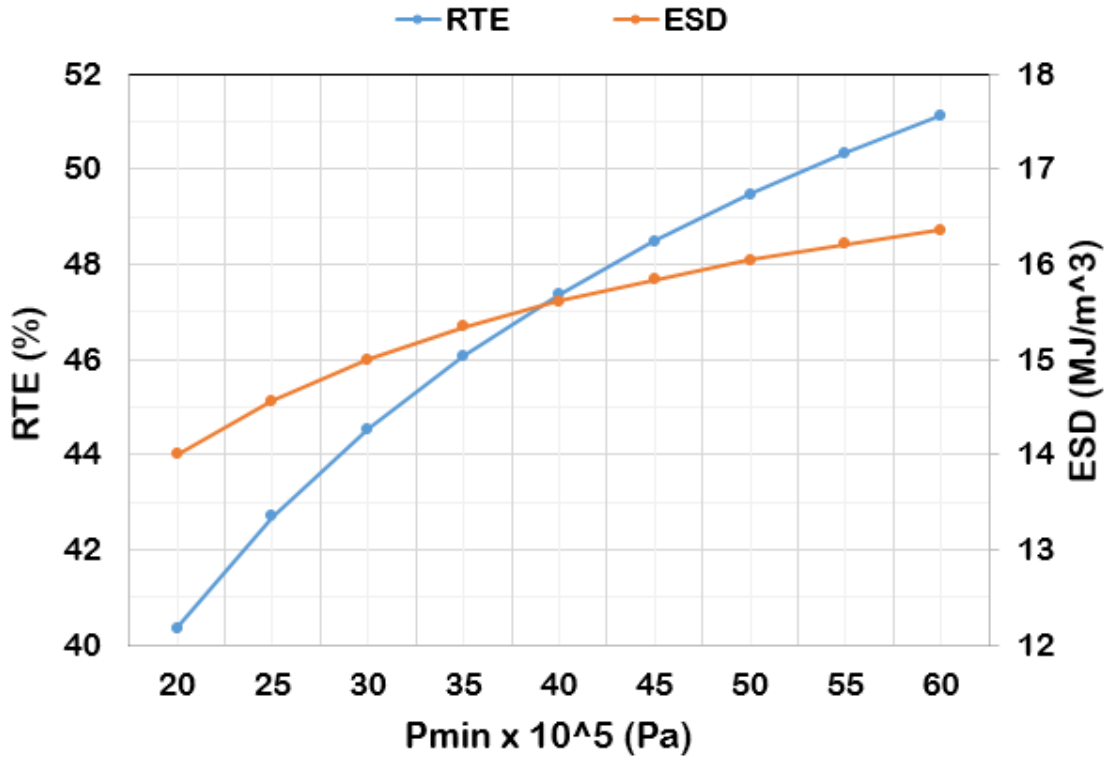
Sistemin matematik modeli Engineering Equation Solver (EES) programı ile çözülmüştür. Matematik model oluşturulurken önerilen sistemin toplam türbin ve kompresör güçleri sabit kabul edilmiştir.

##### 4.1. Enerji Analizi

Çizelge 4.9’da verilen kararlı değişkenlerin değişiminin *RTE* ve *ESD*’yi nasıl etkilediği üzerinde bir çalışma yapılmış ve sonuçlar aşağıda paylaşılmıştır.

Şekil 4.1’de,  $P_{min}$  değerindeki artışın *RTE* ve *ESD* üzerindeki etkisini göstermektedir.  $P_{min}$ ,  $20 - 60(x10^5 Pa)$  aralığında arttıkça;

- Türbinlerden geçen havanın basıncının artmasına ve türbinlerden geçen havanın kütleli ( $\dot{m}_t$ ) debisinin azalmasına sebep olmuştur. Buna bağlı olarak yükleme boşaltma zaman oranı ( $c_{yb}$ ) azalmakta ve boşaltma süresi ( $t_b$ ) artmaktadır. Denklem 3.10’dan anlaşılacağı üzere boşaltma süresinin artması *RTE* değerinde %26.7 artışa sebep olmaktadır.
- Kompresörden geçen havanın kütleli debisinde ( $\dot{m}_k$ ) artış olmaktadır. Yükleme esnasında kütleli debideki artış hava deposunda depolanan havanın hacminde ( $V_{HD}$ ) artış sağlamaktadır. Ancak  $t_b$ ’deki artış  $V_{HD}$  değerindeki artıştan daha baskın olduğu için bu durum *ESD* değerinin %16.9 artmasına sebep olmaktadır.
- En yüksek değerlere  $P_{min} = 60x10^5 Pa$  değerinde *RTE* %51.13 ve *ESD*  $16.36 MJ/m^3$  ile ulaşmaktadır.

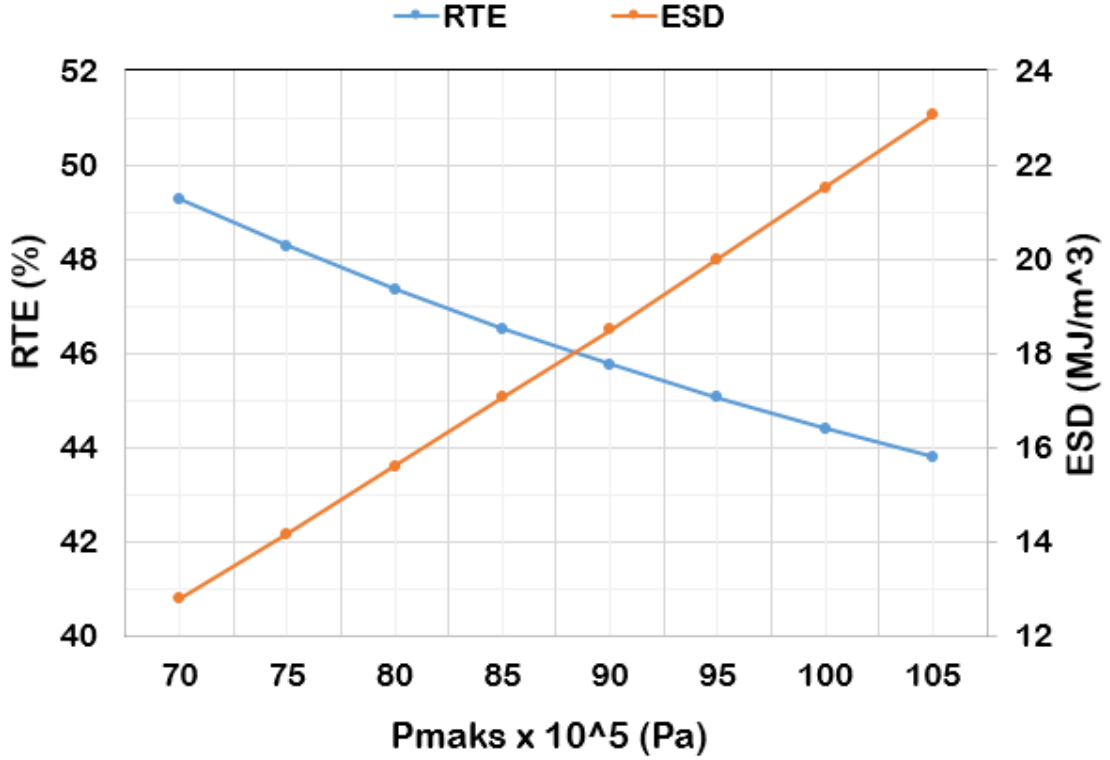


Şekil 4.1.  $P_{min}$  artışının RTE ve ESD üzerindeki etkisi.

Şekil 4.2’de  $P_{maks}$ ’ın değişiminin RTE ve ESD değeri üzerindeki etkisi gösterilmektedir.  $P_{maks}$ , 70 – 105( $\times 10^5$  kPa) aralığında arttıkça;

- Kompresörlerden geçen havanın basıncının artmasına ve kompresörlerden geçen havanın kütleli debisinin ( $\dot{m}_k$ ) azalmasına sebep olmaktadır. Daha yüksek sıcaklıklarda depolanan termal yağı sayesinde türbinlerden geçen havanın kütleli debisi azalmaktadır. Fakat yükleme esnasındaki havanın kütleli debisinin azalması boşaltma esnasındaki havanın kütleli debisindeki azalmaya baskın olduğu için  $c_{yb}$  değerinin artmasına sebep olmaktadır. Bu durum sistemin  $t_b$ ’de kışalmasına etki etmektedir. Denklem 3.10’da da görüldüğü üzere,  $t_b$ ’nin azalması sonucunda RTE değeri %11.08 azalma göstermektedir.
- Yükleme esnasında kütleli debideki azalma hava deposunda depolanan havanın hacminde ( $V_{HD}$ ) azalmaya neden olmaktadır.  $V_{HD}$  değerinde meydana gelen azalma,  $t_b$  değerindeki azalmaya baskın olduğu için ESD değerinde %80 artışa sebep olmaktadır.

- En yüksek değerlere;  $RTE$ ,  $P_{maks} = 70 \times 10^5$  Pa iken %49.28 ile ulaşırken  $ESD$  ise  $P_{maks} = 105 \times 10^5$  Pa iken  $23.04 \text{ MJ/m}^3$  ile ulaşmaktadır.

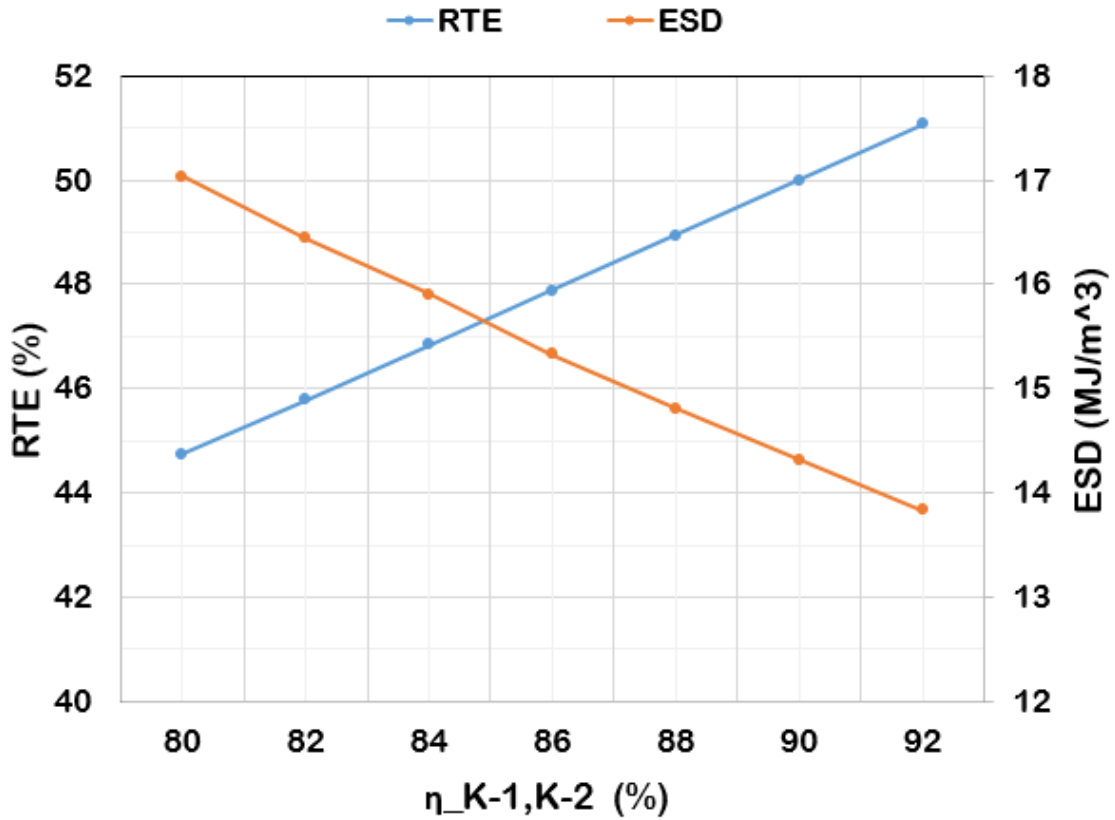


Şekil 4.2.  $P_{maks}$  artışının  $RTE$  ve  $ESD$  üzerindeki etkisi.

Şekil 4.3'te kompresörlerin izentropik veriminin değişiminin  $RTE$  ve  $ESD$  değeri üzerindeki etkisi gösterilmektedir.

Kompresörlerin izentropik verimleri % 80-92 aralığında arttıkça;

- Türbinlerden geçen havanın kütleli debisinde artış meydana gelmektedir. Bu durum,  $c_{yb}$  değerinde bir azalmaya dolayısıyla  $t_b$  değerinde artışa sebep olmaktadır. Denklem 3.10'da görüldüğü üzere,  $t_b$  artışı sonucunda  $RTE$  değeri %14.12'lik artış göstermektedir.
- Kompresörden geçen havanın kütleli debisi artmaktadır. Bu durum  $V_{HD}$ 'nin artışına sebep olmaktadır. Denklem 3.11'e bakıldığında boşaltma süresi ve depo hacminin ikisinin de arttığı görülmektedir. Ancak  $V_{HD}$ 'de meydana gelen artış,  $t_b$ 'de meydana gelen artıştan daha fazla olduğu için  $ESD$  değeri %18.79 azalmıştır.
- En yüksek değerlere;  $RTE$ ,  $\eta_K = \% 92$  iken % 51.07 ile ulaşırken,  $ESD$  ise  $\eta_K = \%80$  iken  $17.03 \text{ MJ/m}^3$  ile ulaşmaktadır.

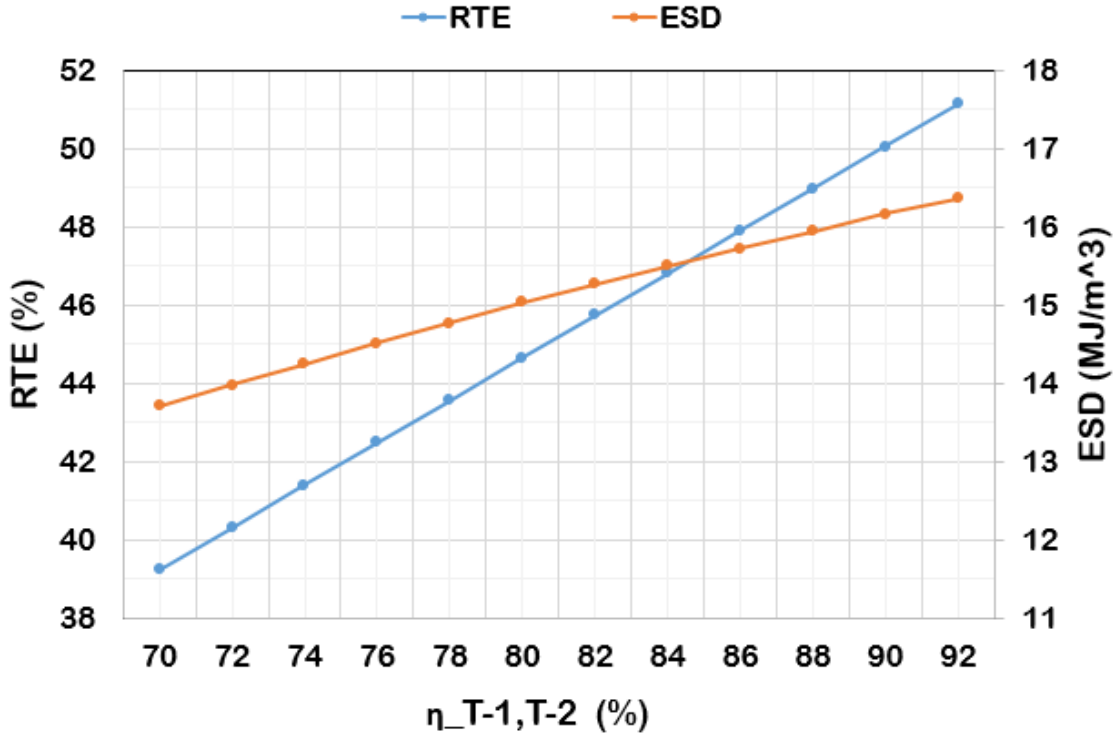


Şekil 4.3. Kompresörlerin izentropik veriminin artışının *RTE* ve *ESD* üzerindeki etkisi.

Şekil 4.4'te türbinlerin izentropik veriminin değişiminin *RTE* ve *ESD* değeri üzerindeki etkisi gösterilmektedir.

Türbinlerin izentropik verimleri 70-92% aralığında arttıkça;

- Türbinden geçen havanın kütleli debisi azaldığı için  $c_{yb}$  değerinde azalma meydana gelmektedir. Bu durum  $t_b$ 'de artışa sebep olmaktadır.  $t_b$ 'nin artması ise Denklem 3.10'da görüldüğü üzere *RTE* değerinde %30.37'lik artış oluşturmaktadır.
- Kompresörden geçen havanın kütleli debisinde ( $\dot{m}_k$ ) artış olmaktadır. Yükleme esnasında kütleli debideki artma, hava deposunda depolanan havanın hacminde ( $V_{HD}$ ) artmaya sebep olmaktadır. Ancak boşaltma süresindeki ( $t_b$ ) artış  $V_{HD}$  değerindeki artıştan daha fazla olduğu için bu durum *ESD* değerinde % 19.33 artış oluşturmaktadır.
- En yüksek değerlere; *RTE*,  $\eta_T = \%92$  iken %51.13 ile ulaşırken *ESD* ise  $\eta_T = \%92$  iken  $16.36 \text{ MJ/m}^3$  ile ulaşmaktadır.



Şekil 4.4. Türbinin izentropik veriminin artışının RTE ve ESD üzerindeki etkisi.

Enerji analizi sonucunda elde edilen önemli hususlar şu şekildedir.

- Hava deposunun minimum basıncının ( $P_{min}$ ) hem ESD hem de RTE değerinde artışa sebep olduğu gözlemlenmiştir.
- $P_{maks}$  değerinin artışı RTE değerini azaltırken, ESD değerinin artırdığı görülmüştür. Hava deposunun maksimum basıncının artışının, türbinlere giden havanın basıncını ve sıcaklığını artırarak depolama sıcaklığını yükselttiği görülmüştür.
- Kompresörlerin izentropik veriminin artışı ESD değerini azaltırken, RTE değerinde artışa sebep olduğu gözlemlenmiştir.
- Türbinlerin izentropik veriminin artışı sistemin hem RTE hem de ESD değerinde artış meydana getirmektedir.

Elde edilen bu verilere bakılarak sistem üzerinde türbinlerin izentropik veriminin etkisinin çok büyük olduğunu dolayısıyla GA-SHED sistemlerinde türbinlerin en büyük role sahip olduğu görülmektedir. Bununla beraber türbinlerin izentropik veriminden sonra hava deposunun minimum basıncının da hem RTE hem de ESD değerinde artışa sebep olmasından dolayı ikinci öneme sahip olduğu görülmektedir.

## 4.2. Geleneksel ve İleri Ekserji Analizi

Şekil 3.1'de önerilen sistemde gösterilen her bir noktaya ait termodinamik özellikleri Çizelge 4.1'de listelenmiştir. Bu tablo, önerilen sistemdeki her nokta için sıcaklık, basınç, kütleli debi, ekserji, birim ekserji yıkım maliyeti ve ekserji yıkım maliyeti değerlerini göstermektedir.

**Çizelge 4.1.** Gerçek koşullar altında her bir noktanın termodinamik özellikleri, ekserji yıkım oranları ve ekserji-ekonomik analiz sonuçları

Durum	Akışkan	$T$ [K]	$P$ [kPa]	$\dot{m}$ [kg/s]	$\dot{E}x$ [kW]	$c$ [\$/GJ]	$\dot{C}$ [\$/h]
1	Hava	293.2	101.3	10.3	0.0	0.0	0.0
2	Hava	586.8	900.2	10.3	2843.0	138.0	1412.0
3	Hava	467.4	900.2	10.3	2280.0	138.0	1133.0
4	Hava	909.5	8000.0	10.3	6951.0	134.3	3360.0
5	Hava	500.6	8000.0	10.3	4317.0	134.3	2087.0
6	Hava	293.2	8000.0	27.2	9920.0	154.4	5512.0
7	Hava	285.3	4000.0	27.2	8362.0	183.1	5513.0
8	Hava	522.5	4000.0	27.2	10060.0	217.4	7872.0
9	Hava	341.9	636.6	27.2	4289.0	217.4	3356.0
10	Hava	528.4	636.6	27.2	5927.0	244.1	5208.0
11	Hava	346.7	101.3	27.2	119.3.0	244.1	104.8
12	Dowtherm-G	454.0	101.3	30.0	1864.0	319.4	2143.0
13	Dowtherm-G	454.0	103.3	30.0	1864.0	319.4	2144.0
14	Dowtherm-G	454.0	103.3	15.0	932.10	319.4	1072.0
15	Dowtherm-G	599.2	103.3	15.0	3211.0	203.0	2346.0
16	Dowtherm-G	454.0	103.3	15.0	932.1	319.4	1072.0
17	Dowtherm-G	494.3	103.3	15.0	1434.0	262.1	1353.0
18	Dowtherm-G	548.8	103.3	30.0	4539.0	226.4	3699.0
19	Dowtherm-G	548.8	101.3	79.4	11979.0	227.5	9811.0
20	Dowtherm-G	548.8	103.3	79.4	11979.0	227.5	9811.0
21	Dowtherm-G	548.8	103.3	39.7	5989.0	227.5	4906.0
22	Dowtherm-G	474.9	101.3	39.7	3115.0	227.5	2551.0
23	Dowtherm-G	548.8	101.3	39.7	5989.0	227.5	4906.0
24	Dowtherm-G	492.9	101.3	39.7	3733.0	227.5	3058.0
25	Dowtherm-G	484.0	101.3	79.4	6837.0	227.9	5609.0

Çizelge 3.8'de gösterilen gerçek koşullara göre geleneksel ekserji analizi yapılmıştır. Hesaplamalara göre sistemin ekserji verimi % 55.23 ve sistemin toplam ekserji yıkımı 60.68 GJ/gün olarak bulunmuştur. Sistemin modifiye edilmiş ekserji verimi ise % 73.70 olarak bulunmuştur.

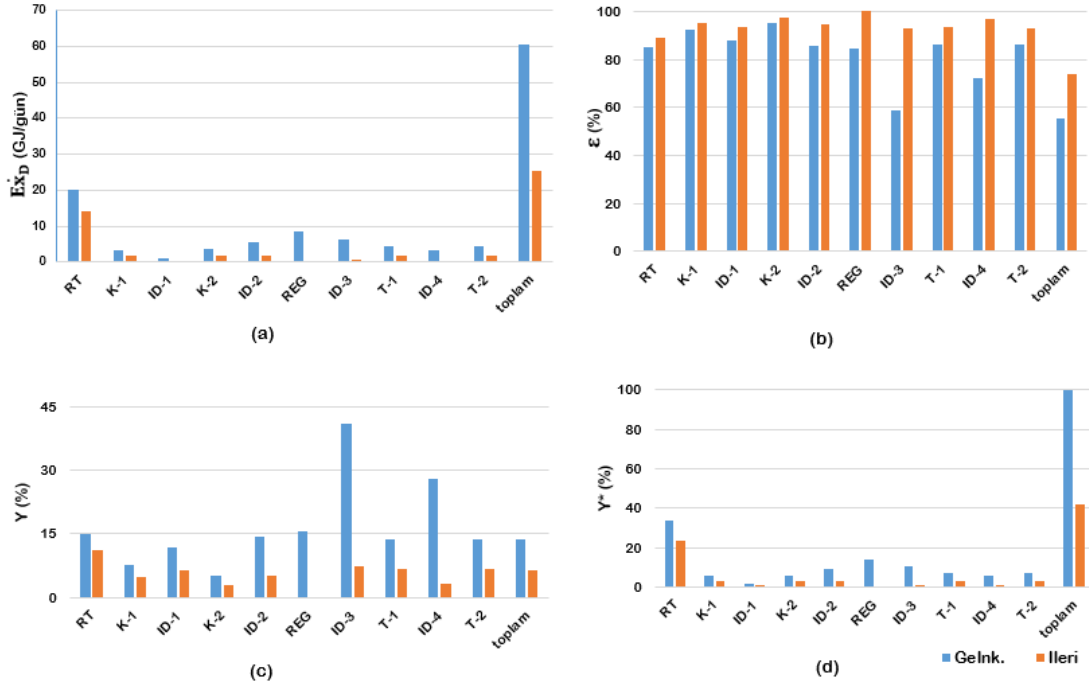
Çizelgede 4.2 ve Şekil 4.5'te ayrıntılı bir şekilde sistem bileşenlerinin geleneksel ve ileri ekserji analiz sonuçları sunulmaktadır. Geleneksel ekserji analizinde sistem bileşenlerindeki ekserji yıkımının tamamı değerlendirilmektedir. İleri ekserji analizinde ise kaçınılmaz içsel ekserji yıkımına ( $\dot{E}x_{D,k}^{AV,EN}$ ) yoğunlaşmaktadır. Bu yüzden iki analiz için karşımıza farklı sonuçlar çıkabilmektedir. Geleneksel ekserji analizinde sistem

bileşenlerinin bağıl ekserji yıkım oranları ( $Y_{D,k}^*$ ) düşünüldüğünde odaklanılması gereken sistem bileşenleri sırası ile RT, REG, ID-3, ID-2, T-1, T-2, K-2, K-1, ID-4 ve ID-1 olmaktadır. İleri ekserji analizinde modifiye edilmiş bağıl ekserji yıkım ( $Y_{D,k}^{adv}$ ) oranları düşünüldüğünde bu sıralama değişmektedir ve iyileştirme potansiyeli en yüksek sistem bileşenleri sırasıyla RT, K-1, T-2, T-1, K-2, ID-2, ID-3, ID-1, ID-4 ve REG olmaktadır (Şekil 4.5 (d)).

Sistem bileşenlerinin sistemden bağımsız çalışma performanslarını değerlendirmek için ekserji verim ve yıkım oranları bulunmuştur. Bu iki parametre, sistem bileşen temelinde besleme ekserjisinin ne kadarlık bir kısmını ürüne dönüştüğü ve ne kadarlık bir kısmının tersinmezliklerden ötürü ekserji yıkımına uğradığını göstermektedir. Şekil 4.5 (b) ve (c)'ye bakıldığında geleneksel ekserji analizine göre en yüksek ekserji verimi ve buna bağlı olarak düşük  $Y_{D,k}^*$ 'ya sahip bileşenler sırasıyla K-2, K-1, ID-1, T-2, T-1, ID-2, RT, REG, ID-4 ve ID-3 olmaktadır. İleri ekserji analizinde  $Y_{D,k}^{adv}$  ve ekserji yıkım oranları düşünüldüğünde bu sıralama REG, K-2, ID-4, K-1, ID-2, ID-1, T-1, T-2, ID-3 ve RT olmaktadır.

**Çizelge 4.2.** Sistem bileşenlerinin geleneksel ekserji ve ileri ekserji analiz sonuçları.

Bileşen	$E\dot{x}_{F,k}$ [GJ/gün]	$E\dot{x}_{P,k}$ [GJ/gün]	$E\dot{x}_{D,k}$ [GJ/gün]	$E\dot{x}_{D,k}^{AV,EN}$ [GJ/gün]	$\epsilon_k$ [%]	$\epsilon_k^{adv}$ [%]	$Y_{D,k}$ [%]	$Y_{D,k}^{adv}$ [%]	$Y_{D,k}^*$ [%]	$Y_{D,k}^{*adv}$ [%]
<b>RT</b>	135.53	115.20	20.33	14.27	85.00	88.98	15.00	11.02	33.51	23.51
<b>K-1</b>	44.51	41.05	3.46	2.01	92.24	95.33	7.76	4.67	5.70	3.32
<b>ID-1</b>	8.26	7.27	0.98	0.49	88.09	93.66	11.91	6.34	1.62	0.81
<b>K-2</b>	70.69	67.13	3.56	1.94	94.97	97.20	5.03	2.80	5.86	3.19
<b>ID-2</b>	37.76	32.31	5.44	1.81	85.58	94.71	14.42	5.29	8.97	2.98
<b>REG</b>	54.27	45.75	8.53	0.00	84.29	100.00	15.71	0.00	14.05	0.00
<b>ID-3</b>	15.49	9.13	6.36	0.72	58.97	92.65	41.03	7.35	10.47	1.19
<b>T-1</b>	31.45	27.12	4.32	1.95	86.25	93.29	13.75	6.71	7.13	3.21
<b>ID-4</b>	12.22	8.82	3.40	0.31	72.19	96.63	27.81	3.37	5.60	0.51
<b>T-2</b>	31.64	27.34	4.30	2.00	86.40	93.17	13.60	6.83	7.09	3.30
<b>Toplam</b>	135.53	74.85	60.68	25.50	55.23	73.70	13.73	6.27	100	42.02



Şekil 4.5. Geleneksel ve ileri ekserji analiz sonuçlarının sistem bileşenlerinde (a) ekserji yıkımı (b) ekserji verimi (c) ekserji yıkım oranı (d) bağıl ekserji yıkım oranı için karşılaştırılması

Sistem bileşenleri için ileri ekserji analizinin sonuçları Çizelge 4.3'te ve Şekil 4.6'da verilmiştir. Analiz sonuçlarına bakıldığında;

- En yüksek  $\dot{E}x_{D,k}^{AV}$  değerine sahip sistem bileşeni 14.27 GJ/gün değeri ile RT'dir. Şekil 4.6'da görüldüğü üzere ekserji yıkımının tamamı içseldir ve %70 kaçınılabılır, %30'u kaçınılamaz bölümü oluşturmaktadır. Bu yüzden iyileştirme önceliği bu sistem bileşeninde düşünülmelidir. RT ayrıca bütün sistemin ekserji yıkımının %33.1'ne sahiptir ve bu sistem bileşeninde yapılacak bir iyileştirme sistemin genel verimini önemli ölçüde etkileyecektir. RT'den sonra en yüksek  $\dot{E}x_{D,k}^{AV}$  değerine sahip sistem bileşenleri sırasıyla ID-2 (2.52 GJ/gün), T-1 (2.15 GJ/gün) ve T-2 (2.14 GJ/gün)'dir. Şekil 4.6'da görüldüğü üzere bu sistem bileşenlerinin kaçınılabılır ekserji yıkımları kaçınılamaz kısımlarına oldukça yakındır. Bu durum ID-2, T-1 ve T-2'nin iyileştirme potansiyelinin olduğunu göstermektedir. Fakat bu sistem bileşenlerinin ekserji yıkımları düşük olduğu için üzerlerinde yapılacak iyileştirmenin sistemin genel verimi üzerinde RT kadar etkisi olmayacaktır. Kalan diğer sistem bileşenlerinin kaçınılamaz ekserji yıkımları kaçınılabılır bölümlerinden daha fazladır. Bu durum bu sistem

bileşenlerinin üzerinde iyileştirme çalışması yapılacak kadar değerli olmadığını göstermektedir.

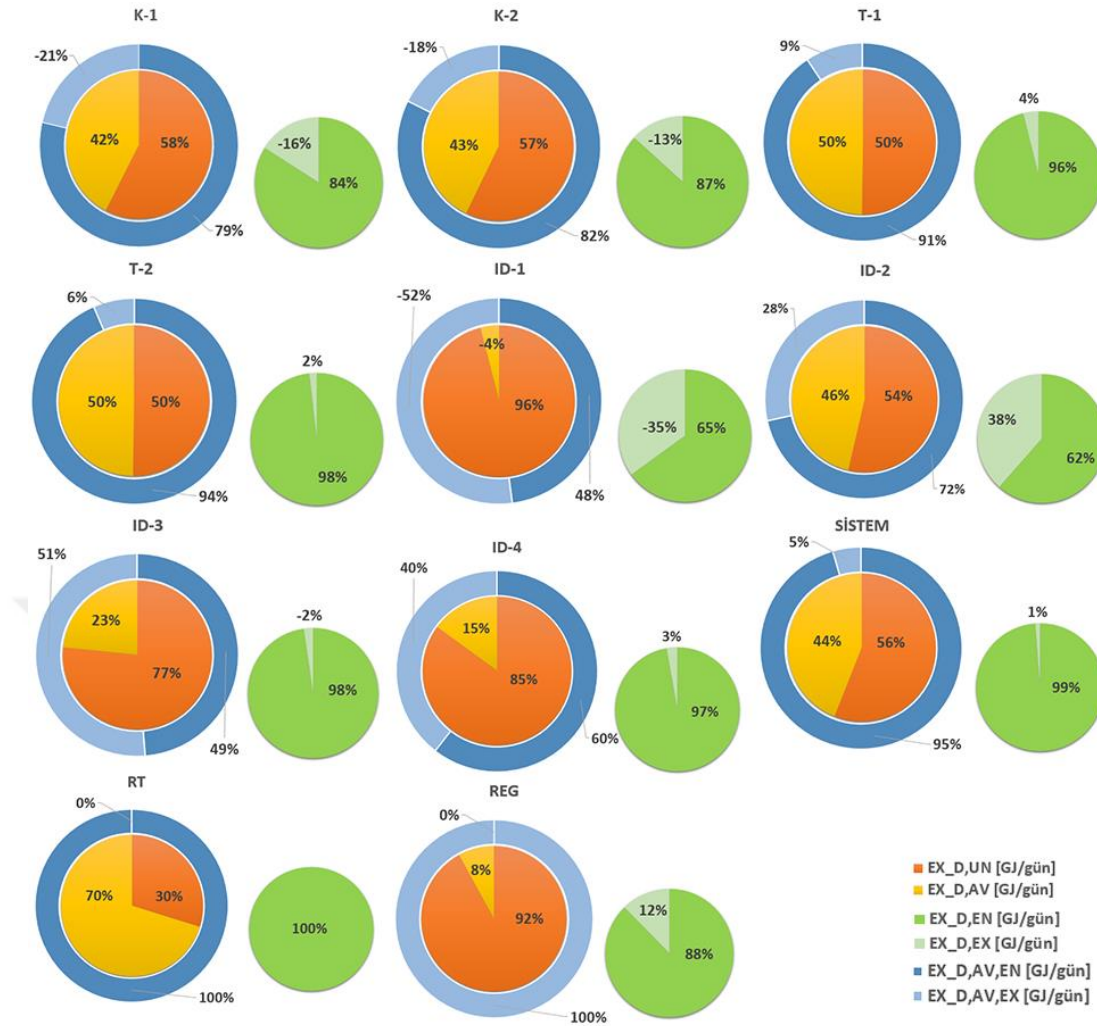
- Sistem bileşenlerinin içsel ekserji yıkımları dışsal ekserji yıkımlarına göre daha büyüktür. Bu durum her bir sistem bileşenindeki ekserji yıkımının başlıca sebebinin kendisinden kaynaklandığını ve sistem bileşenlerinin birbiri ile olan ilişkisinin zayıf olduğunu göstermektedir. Bu durumda her bir sistem bileşeninin kendisinde yapılacak bir iyileştirme sistemin de genel verimini arttıracaktır. K-1 (-0.82 GJ/gün), K-2 (-0.64 GJ/gün), ID-1 (-1.14 GJ/gün) ve ID-3 (-0.15 GJ/gün)'ün dışsal ekserji yıkım değerleri negatiftir. Bir sistem bileşenindeki negatif dışsal ekserji yıkım değeri, diğer sistem bileşenleri ideal koşullarda çalışırken, ilgili sistem bileşeninin ekserji yıkımının gerçek koşullardakinden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum şu şekilde açıklanabilir. Negatif ekserji yıkımına sahip sistem bileşenleri üzerinde yapılacak bir optimizasyon çalışması, ilişki içinde olduğu diğer sistem bileşenlerinin ekserji yıkımını artıracak ve verimini düşürecektir. Bu sistem bileşenlerinin kaçınılmaz dışsal ekserji yıkım değerlerinde de benzer bir durum söz konusudur. Bir sistem bileşenindeki negatif kaçınılmaz dışsal ekserji yıkım değeri, diğer sistem bileşenleri ideal koşullarda çalışırken, ilgili sistem bileşeninin ekserji yıkımının kaçınılmaz koşullardan daha yüksek olduğunu gösterir. Bu durum bu sistem bileşenlerinin ideal şartlardaki ekserji yıkımlarının gerçek koşullardakinden daha fazla olduğunu göstermektedir. K-1, K-2, ID-1 ve ID-3'deki bir iyileştirme bu sistem bileşenleri ile ilişkili diğer sistem bileşenlerinin ekserji yıkımlarını arttırabilir. Fakat bu sistem bileşenlerinin dışsal ekserji yıkımının mutlak değerleri oldukça küçüktür ve diğer sistem bileşenlerini önemli ölçüde etkileyecek değerde değildir. Ayrıca ID-3 diğer sistem bileşenleri düşünüldüğünde yüksek bağıl ekserji yıkım oranına sahiptir ve bu durum ID-3'de yapılacak bir iyileştirme çalışmasının diğer sistem bileşenleri ile ilişkisinden daha önemli olduğunu göstermektedir.
- Sistem bileşenlerinin kaçınılabilir içsel ekserji yıkım değerleri, mutlak değerler düşünüldüğünde, kaçınılabilir dışsal ekserji yıkım değerlerine göre ID-1, REG ve ID-3 bileşenleri haricinde daha büyüktür. Bu durum kaçınılabilir ekserji yıkımının başlıca nedeninin sistem bileşenlerinin (ID-1, REG ve ID-3 haricinde) kendisinden kaynaklandığını ve bu bileşenlerin kendi içlerindeki bir

optimizasyonunun bileşen ilişkisini iyileştirmekten daha önemli olduğunu göstermektedir. En yüksek  $\dot{E}x_{D,k}^{AVEN}$  değerine sahip sistem bileşeni 14.27 GJ/gün değeri ile RT'dir ve bu sistem bileşenini sırasıyla K-1 (2.01 GJ/gün), T-2 (2.00 GJ/gün), T-1 (1.95 GJ/gün) ve K-2 (1.94 GJ/gün) takip etmektedir.

- Önerilen sistemin  $\dot{E}x_{D,k}^{AV}$  değeri % 44'tür ve bu bölümün %95'i içseldir. Bu durum sistemin ekserji yıkımı açısından % 44 oranında bir iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu ve bu iyileştirme potansiyelini elde etmek için sistem bileşenlerinin kendi ekserji verimlerinin artırılmasının daha etkili olduğunu göstermektedir.

**Çizelge 4.3.** Sistem bileşenlerinin ileri ekserji analiz sonuçları.

Bileşen	$\dot{E}x_{D,k}$ [GJ/gün]	$\dot{E}x_{D,k}^{EN}$ [GJ/gün]	$\dot{E}x_{D,k}^{EX}$ [GJ/gün]	$\dot{E}x_{D,k}^{UN}$ [GJ/gün]	$\dot{E}x_{D,k}^{AV}$ [GJ/gün]	$\dot{E}x_{D,k}^{UNEN}$ [GJ/gün]	$\dot{E}x_{D,k}^{UNEX}$ [GJ/gün]	$\dot{E}x_{D,k}^{AVEN}$ [GJ/gün]	$\dot{E}x_{D,k}^{AVEX}$ [GJ/gün]
<b>RT</b>	20.33	20.33	0.00	6.06	14.27	6.06	0.00	14.27	0.00
<b>K1</b>	3.46	4.28	-0.82	1.99	1.47	2.26	-0.27	2.01	-0.55
<b>ID-1</b>	0.98	2.13	-1.14	1.03	-0.04	1.64	-0.61	0.49	-0.54
<b>K2</b>	3.56	4.20	-0.64	2.03	1.52	2.26	-0.23	1.94	-0.41
<b>ID-2</b>	5.44	3.35	2.10	2.92	2.52	1.54	1.38	1.81	0.72
<b>REG</b>	8.53	7.47	1.06	7.85	0.68	7.47	0.38	0.00	0.68
<b>ID-3</b>	6.36	6.51	-0.15	4.87	1.49	5.78	-0.91	0.72	0.76
<b>T1</b>	4.32	4.16	0.17	2.17	2.15	2.21	-0.03	1.95	0.20
<b>ID-4</b>	3.40	3.30	0.09	2.89	0.51	3.00	-0.11	0.31	0.20
<b>T2</b>	4.30	4.22	0.08	2.16	2.14	2.22	-0.06	2.00	0.14
<b>Toplam</b>	60.68	59.95	0.73	33.97	26.71	34.45	-0.47	25.50	1.21



Şekil 4.6. Tüm sistem ve sistem bileşenleri için ekserji yıkım oranları yüzdeler değeri.

### 4.3. Geleneksel ve İleri Eksergo-ekonomik Analizi

Bu çalışmada geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analiz için kaçınılmaz içsel toplam işletme maliyeti, eksergo-ekonomik faktör ve göreceli maliyet farkı değerleri bir performans göstergesi olarak düşünülmüştür. Çizelge 4.4'e bu değerler önerilen sistem için verilmiştir.

Sistem bileşenlerinin işletme maliyetleri ekserji yıkım ve yatırım-bakım-onarım maliyetlerinden oluşmaktadır. Bu yüzden bu maliyetin büyüklüğü ekonomik tasarruf açısından önemlidir. Çizelge 4.4'e bakıldığında en yüksek işletme maliyetleri geleneksel eksergo-ekonomik analiz için 13644 \$/gün değeri ile RT ve sonra sırasıyla ID-3 (1466.77 \$/gün), T-2 (1427.71 \$/gün), REG (1314.44 \$/gün) ve T-1 (1309.98 \$/gün)'e aittir. İleri eksergo-ekonomik analizde teknolojik sınırlamalar dikkate alınarak değerlendirme yapıldığı için daha gerçekçi bir yaklaşım ile analiz sonuçları tartışılabilmektedir. Bu bakış açısı ile sistem bileşeninin kendisi değerlendirildiğinde işletim maliyetleri olarak

$(\dot{Z}_k^{AV,EN} + C_{D,k}^{AV,EN})$  değerleri dikkate alınmıştır. Bu durumda en yüksek işletim maliyetine veren sistem bileşenlerinin sıralaması değişmiştir. İleri eksergo-ekonomik analizde bu sıralama 11476.65 \$/gün değeri ile RT ve sonra sırasıyla T-2 (780.34 \$/gün) , T-1 (715.01 \$/gün), K-2 (714.51 \$/gün) ve K-1 (686.29 \$/gün)'e aittir. Eksergo-ekonomik açıdan bu sistem bileşenlerine yoğunlaşılması önemlidir.

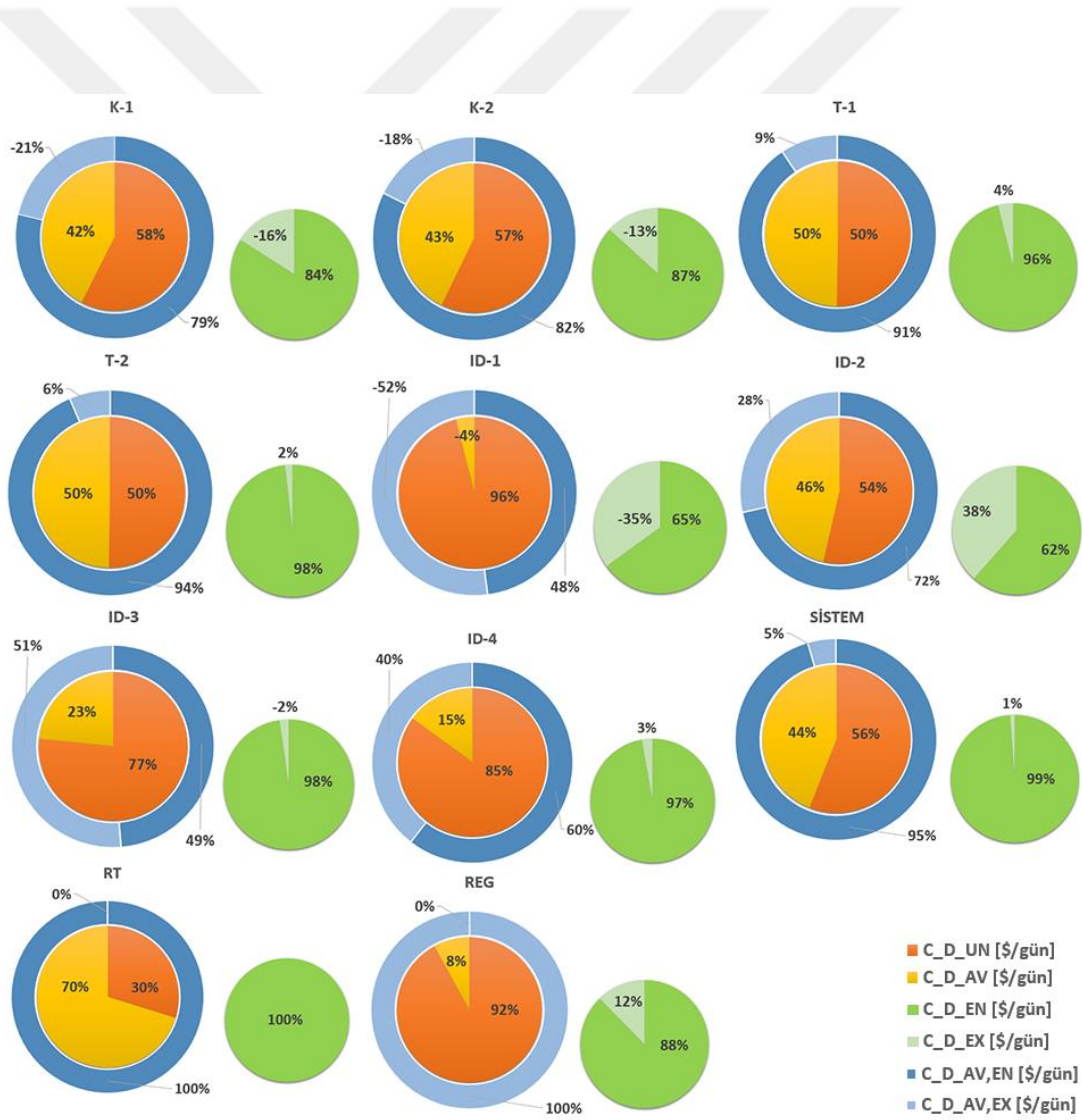
Eksergo-ekonomik faktör sistem bileşeninin ekserji yıkım maliyetinin mi yoksa yatırım maliyetinin mi baskın olduğu konusunda eksergo-ekonomik bir bakış açısı sunmaktadır. Çizelge 4.4'e bakıldığında en yüksek  $f_k$  değeri geleneksel eksergo-ekonomik analize göre %100 değeri ile RT ve %55.42 değeri ile K-2'dir. İleri eksergo-ekonomik analize göre ise en yüksek  $f_k$  değeri %100 değeri ile RT ve sırasıyla REG (%100), K-2 (%67.93) ve K-1 (%65.29)'dir. İleri eksergo-ekonomik analiz bize daha gerçekçi bir yaklaşım sunmaktadır ve bu sistem bileşenlerinin termodinamik performansını arttırmak için yatırım maliyetlerine odaklanılmaması gerektiğini göstermektedir. Eksergo-ekonomik faktör değeri %50'nin altında kalan diğer sistem bileşenlerinin performansını arttırmak için ise ekserji verimlerini arttırmaya odaklanılmalıdır.

Göreceli maliyet farkı sistem bileşeninin ürün ekserji maliyetini besleme ekserji maliyetine göre değerlendirilmesini sağlar ve bu değer yüksek olmaması istenir. Buna göre Çizelge 4.4'e bakıldığında en yüksek  $r_k$  değeri % 69.84 ile ID-3 ve en düşük  $r_k$  değeri % 11.91 ile K-2 sistem bileşenlerine aittir. ID-3'ün ekserji yıkım maliyetinin büyük bir bölümü kaçınılmazdır ve bu ekserji yıkımı azaltılamaz.

Ekserji yıkım maliyetleri Çizelge 4.5'te verilmiştir. Sistem bileşenlerinin kaçınılabilir, kaçınılamaz, içsel ve dışsal ekserji yıkım maliyetlerinin yüzdelik değerleri Şekil 4.7'de verilmiştir. Ekserji yıkım maliyetleri ekserji yıkımı ile orantılı olarak hesaplandığı için Şekil 4.6 ve 4.7 birbirine benzer olmaktadır. Bu nedenle Şekil 4.6 ve 4.7'de de görüldüğü üzere daha önceki bölümde bahsedilen ekserji yıkımı oranlarında yapılacak her türlü iyileştirme ekserji yıkım maliyet oranlarını da aynı şekilde etkileyecektir.

Çizelge 4.4. Sistem bileşenlerinin geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analiz sonuçları.

Bileşen	$(\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k})$ [\$/gün]	$(\dot{Z}_k^{AV,EN} + C_{D,k}^{AV,EN})$ [\$/gün]	$f_k$ [%]	$f_k^{AV,EN}$ [%]	$r_k$ [%]
RT	13644	11476.65	100.00	100.00	sonsuz
K-1	802.19	686.29	48.99	65.29	16.55
ID-1	140.49	73.56	3.39	7.61	13.99
K-2	944.73	714.51	55.42	67.93	11.91
ID-2	735.55	244.91	0.62	0.98	16.98
REG	1314.44	0.78	0.08	100.00	18.64
ID-3	1466.77	166.90	0.43	0.27	69.84
T-1	1309.98	715.01	28.30	40.76	22.28
ID-4	787.00	73.36	0.77	3.61	38.82
T-2	1427.71	780.34	26.14	37.07	21.30
<b>Toplam</b>	<b>22572.85</b>	<b>14932.31</b>	<b>67.90</b>	<b>87.08</b>	-



Şekil 4.7. Sistem bileşenleri için ekserji yıkım maliyetleri oranının yüzdeler değeri.

Çizelge 4.5. Sistem bileşenleri için ekserji yıkım maliyet oranları.

Bileşen	$\dot{C}_{D,k}$ [\$/gün]	$\dot{C}_{D,k}^{EN}$ [\$/gün]	$\dot{C}_{D,k}^{EX}$ [\$/gün]	$\dot{C}_{D,k}^{UN}$ [\$/gün]	$\dot{C}_{D,k}^{AV}$ [\$/gün]	$\dot{C}_{D,k}^{UN,EN}$ [\$/gün]	$\dot{C}_{D,k}^{UN,EX}$ [\$/gün]	$\dot{C}_{D,k}^{AV,EN}$ [\$/gün]	$\dot{C}_{D,k}^{AV,EX}$ [\$/gün]
RT	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K1	409.19	506.20	-97.01	235.63	173.56	268.02	-32.39	238.18	-64.62
ID-1	135.73	293.71	-157.98	141.65	-5.92	225.75	-84.10	67.96	-73.88
K2	421.13	497.17	-76.04	240.91	180.21	268.02	-27.11	229.15	-48.93
ID-2	731.02	449.64	281.39	392.01	339.02	207.12	184.88	242.51	96.50
REG	1313.38	1150.67	162.70	1208.54	104.84	1150.67	57.87	0.00	104.84
ID-3	1460.49	1495.53	-35.04	1118.83	341.66	1329.08	-210.25	166.45	175.21
T1	939.20	902.77	36.43	471.85	467.35	479.18	-7.33	423.59	43.77
ID-4	780.93	759.15	21.78	664.04	116.89	688.45	-24.40	70.71	46.18
T2	1054.50	1035.28	19.22	529.52	524.98	544.20	-14.68	491.08	33.90
<b>Toplam</b>	<b>7245.57</b>	<b>7090.12</b>	<b>155.44</b>	<b>5002.98</b>	<b>2242.59</b>	<b>5160.50</b>	<b>-157.52</b>	<b>1929.63</b>	<b>312.96</b>

Sistem bileşenlerine ait yatırım maliyetleri, bölümlerine ayrılarak Çizelge 4.6’da verilmiştir. Sistem bileşen yatırım maliyetlerinin kaçınılabilir, kaçınılamaz, içsel ve dışsal yüzdeler oranları ise Şekil 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.6 ve Şekil 4.8 beraber incelendiğinde:

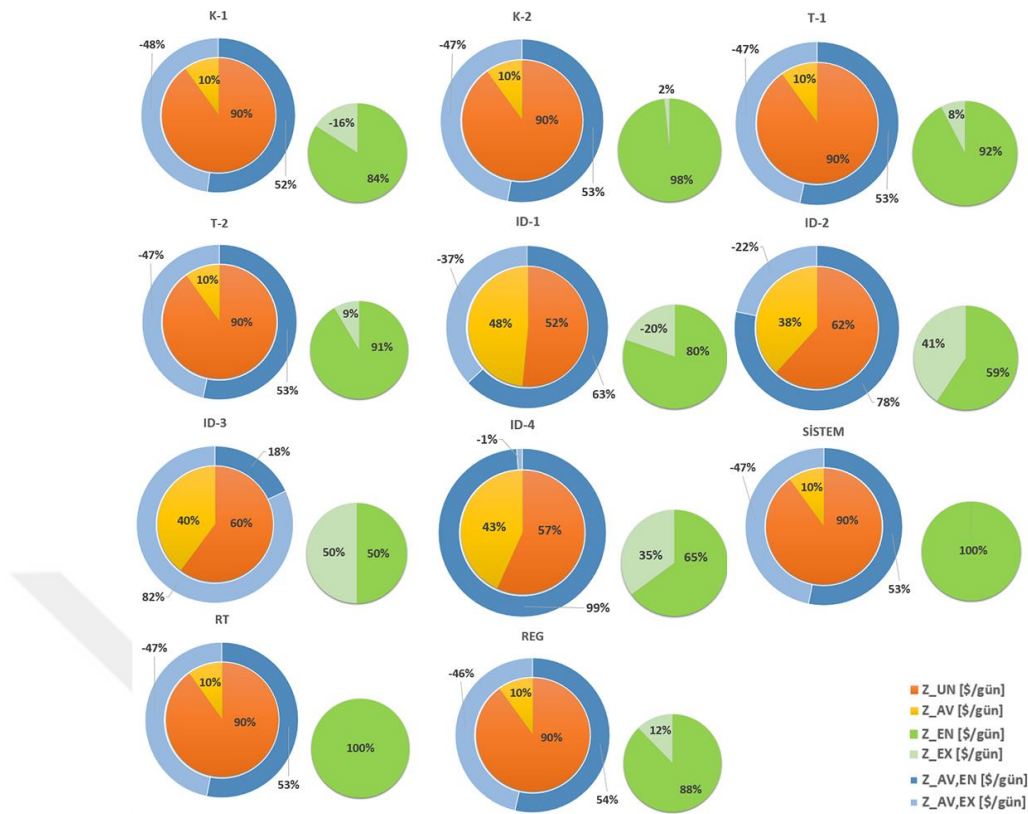
- RT en düşük kaçınılabilir yatırım maliyeti yüzdeler oranına sahip olan sistem bileşenlerinden biri olmasına rağmen aynı zamanda 1364.40 \$/gün değeri ile en yüksek kaçınılabilir yatırım maliyetine sahip olan sistem bileşeni de olmaktadır. Ayrıca bu sistem bileşenin ekserji yıkımının %100’ü içseldir Bu yüzden RT’nin kendi yatırım maliyetinde yapılacak bir iyileştirme bütün sistem üzerinde iyileştirme etkisine sahiptir.
- RT’den sonra en yüksek kaçınılabilir yatırım maliyetine sahip sistem bileşenleri sırasıyla K-2 (52.36 \$/gün, %10), K-1 ( 39.30 \$/gün, %10), T-2 (37.32 \$/gün, %10) ve T-1 (37.08 \$/gün, %10)’dir. Bu sistem bileşenlerinin kaçınılamaz yatırım maliyetleri ( $\dot{Z}_k^{UN}$ ) daha yüksek olmasına rağmen yüksek yatırım maliyetlerinden ötürü %10’luk bir iyileştirme potansiyeli, sistemin tamamı üzerinde etkili olacaktır.
- K-1’in dışsal yatırım maliyeti ( $\dot{Z}_k^{EX}$ ) negatiftir (-91.94 \$/gün, -%16 ). K-2 (8.76 \$/gün, %2 ), T-2 (32.04 \$/gün, %9 ) ve T-1 (28.22 \$/gün, %8 )’in dışsal yatırım maliyetleri negatif olmasa bile kaçınılabilir dışsal yatırım maliyet ( $\dot{Z}_k^{AV,EX}$ ) değerleri negatiftir. Bir sistem bileşenin  $\dot{Z}_k^{EX}$  ‘değerinin

negatif olması şunu gösterir: İlgili sistem bileşeninin ürün ekserjisi, diğer sistem bileşenleri ideal koşullarda çalışırken gerçek koşullardan daha yüksektir. Bu durum Şekil 3.3'te görülmektedir. İçsel ürün ekserji değerindeki artış, sistem bileşeninin içsel yatırım maliyetini artıracaktır. Bu durum K-1, K-2, T-2 ve T-1'in yatırım maliyetindeki yapılabilecek bir azalmanın diğer sistem bileşenlerinin yatırım maliyetini arttıracakını göstermektedir. Fakat bu sistem bileşenleri üzerinde yapılacak bir iyileştirme, yüksek yatırım maliyet değerleri nedeniyle diğer sistem bileşenlerine nazaran genel sistem üzerinde daha etkili olacaktır.

- RT dışındaki diğer sistem bileşenlerinde kaçınılmaz yatırım maliyetinin kaçınılabilir bölümünden daha etkili olduğu görülmektedir. Önerilen sistemin yatırım maliyeti açısından % 10'lük bir iyileştirme potansiyeli vardır. Sistemin genelinin kaçınılabilir içsel yatırım maliyeti %53'tür. Bu durumda %10'luk bir iyileştirme elde edebilmek için sistem bileşenlerinin kendi içlerinde yapılacak bir iyileştirme daha etkili olacaktır.

**Çizelge 4.6.** Sistem bileşenlerine ait ileri eksergo-ekonomik analiz sonuçları.

Bileşen	$\dot{Z}_k$ [\$/gün]	$\dot{Z}_k^{EN}$ [\$/gün]	$\dot{Z}_k^{EX}$ [\$/gün]	$\dot{Z}_k^{UN}$ [\$/gün]	$\dot{Z}_k^{AV}$ [\$/gün]	$\dot{Z}_k^{UN,EN}$ [\$/gün]	$\dot{Z}_k^{UN,EX}$ [\$/gün]	$\dot{Z}_k^{AV,EN}$ [\$/gün]	$\dot{Z}_k^{AV,EX}$ [\$/gün]
<b>RT</b>	13644.00	13644.00	0.00	12279.60	1364.40	2167.35	10112.25	11476.65	-10112.25
<b>K1</b>	393.00	484.94	-91.94	353.70	39.30	36.83	316.87	448.11	-408.81
<b>ID-1</b>	4.76	6.31	-1.55	2.45	2.31	0.72	1.74	5.60	-3.29
<b>K2</b>	523.60	514.84	8.76	471.24	52.36	29.48	441.76	485.36	-433.00
<b>ID-2</b>	4.53	2.69	1.84	2.80	1.73	0.29	2.51	2.40	-0.67
<b>REG</b>	1.06	0.93	0.13	0.96	0.11	0.16	0.80	0.78	-0.67
<b>ID-3</b>	6.28	3.14	3.14	3.78	2.50	2.69	1.09	0.45	2.05
<b>T1</b>	370.78	342.56	28.22	333.70	37.08	51.14	282.56	291.42	-254.34
<b>ID-4</b>	6.07	3.94	2.13	3.45	2.62	1.29	2.16	2.65	-0.03
<b>T2</b>	373.20	341.16	32.04	335.88	37.32	51.89	283.99	289.27	-251.95
<b>Toplam</b>	15327.28	15344.52	-17.24	13787.56	1539.72	2341.84	11445.72	13002.68	-11462.96



Şekil 4.8. Sistem bileşenleri için yatırım maliyeti oranlarının yüzdelik değerleri.

Önerilen sistem geleneksel-ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analizi açısından incelendiğinde elde edilen sonuçlar önerilen sistemin iyileştirme potansiyelini ve sistemin performansını etkileyen bileşenlerinin belirlenmesini sağlamıştır. Analizlerin sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

- Önerilen sistemin  $\eta_{RTE}$  değeri % 47.27,  $\eta_{sistem}$  değeri %55.23 ve  $\dot{E}x_{D,toplam}$  60.68 GJ/gün olarak bulunmuştur.
- Önerilen sistemin  $\dot{E}x_{D,toplam}$  değerinin %44'ü ve  $\dot{C}_{D,toplam}$  değerinin %31'i kaçınılabılır bölümünü oluşturmaktadır. Yatırım maliyetinin  $\dot{Z}_{toplam}$  değerinin % 10'u kaçınılabılırdır.
- Geleneksel ekserji analizine göre en yüksek ekserji yıkımını veren sistem bileşenleri sırasıyla RT, REG, ID-3, ID-2, T-1, T-2, K-2, K-1, ID-4 ve ID-1 olmaktadır. İleri ekserji analizinde ise bu sırama RT, K-1, T-2, T-1, K-2, ID-2, ID-3, ID-1, ID-4 ve REG olarak değişmektedir. Bu sıralama sistemin optimizasyonu için sistem bileşenlerinin öncelik sıralamasını göstermektedir.

- Sistem bileşenlerinin işletme maliyetleri geleneksel eksergo-ekonomik analiz için 13644 \$/gün değeri ile RT ve sonra sırasıyla ID-3 (1466.77 \$/gün) , T-2 (1427.71 \$/gün), REG (1314.44 \$/gün) ve T-1 (1309.98 \$/gün)'e aittir. İleri eksergo-ekonomik analizde bu sıralama 11476.65 \$/gün değeri ile RT ve sonra sırasıyla T-2 (780.34 \$/gün) , T-1 (715.01 \$/gün), K-2 (714.51 \$/gün) ve K-1 (686.29 \$/gün)'e aittir.

#### 4.4. Duyarlılık Analizi ve Çok Amaçlı Optimizasyon

Sistemin kararlı değişkenlerinin  $\dot{E}x_{D,toplam}$ ,  $\dot{C}_{D,toplam}$  ve  $\dot{Z}_{toplam}$  değerleri üzerindeki etkisini görebilmek için optimizasyon çalışması yapılmıştır.

##### 4.4.1. Kararlı değişkenlerin değişiminin $\dot{E}x_{D,toplam}$ 'ın bölümleri üzerindeki etkileri

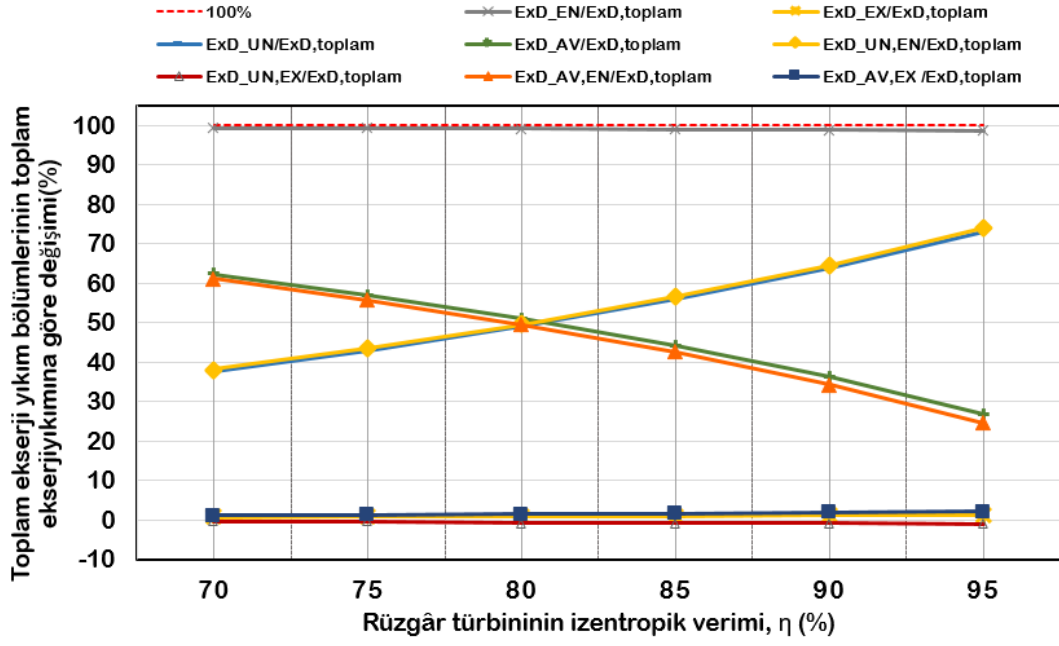
Şekil 4.9'da rüzgâr türbininin izentropik veriminin toplam ekserji yıkımının ( $\dot{E}x_{D,toplam}$ ) çeşitli bölümleri üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Ekserji yıkım bölümlerinin her aralıkta toplam ekserji yıkımına göre değerlendirilmesi daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Bu yüzden ekserji bölümleri ekserji yıkımına bağlı olarak bir oran şeklinde belirtilmiştir.

Rüzgâr türbinin izentropik verimi %70-95 aralığında arttıkça:

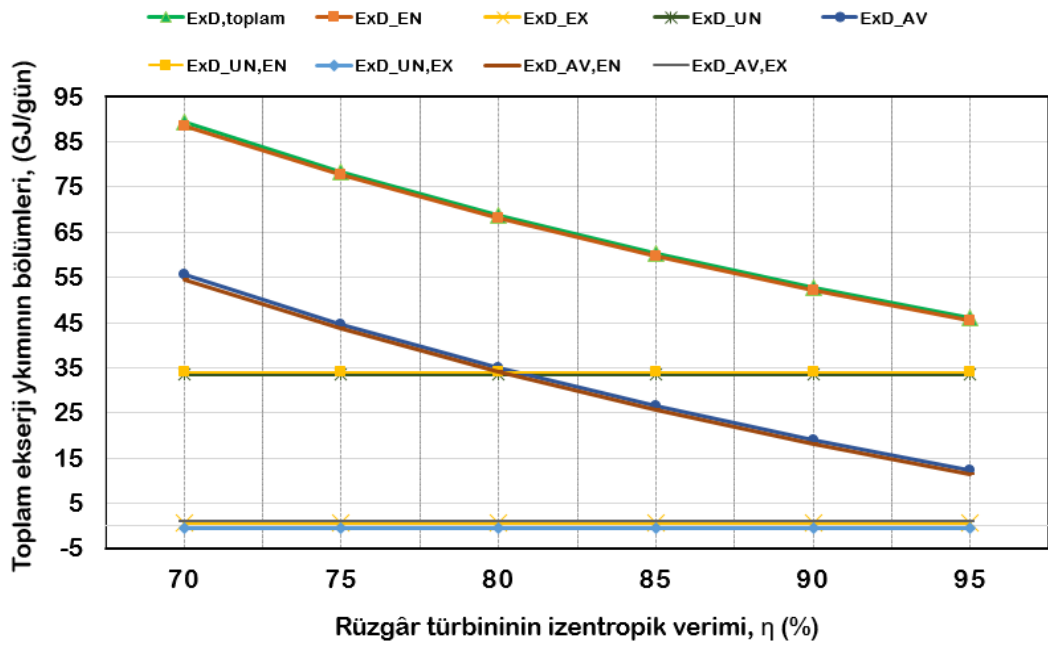
- $\dot{E}x_{D,toplam}$  değeri %48.51 azalmıştır.
- $\dot{E}x_{D,toplam}$  değerinin büyük bir bölümünü içsel ekserji yıkımı ( $\dot{E}x_{D,toplam}^{EN}$ ) oluşturmaktadır. İzentropik verim artışı esnasında  $\dot{E}x_{D,toplam}^{EN}/\dot{E}x_{D,toplam}$  değeri %0.67 azalma ile neredeyse sabit kaldığı görülmüştür. Bunun nedeni  $\dot{E}x_{D,toplam}^{EN}$  değerinin  $\dot{E}x_{D,toplam}$  değerine çok yakın olarak değişmesidir.
- Rüzgâr türbininin izentropik veriminin artması ile  $\dot{E}x_{D,toplam}^{EN}$  değeri % 48.85 azalmıştır.  $\dot{E}x_{D,toplam}^{EN}$  değerindeki bu azalış, rüzgâr türbinin izentropik veriminin artması ile sistem bileşeninin kendisinde dolayısıyla sistemde genel olarak bir iyileştirmeye sebep olduğu ancak dışsal ekserji yıkımında ( $\dot{E}x_{D,toplam}^{EX}$ ) % 0.22'lik bir azalma ile sistem bileşenlerinin arasındaki etkileşime katkısı çok düşük olduğu anlamına gelmektedir.
- Şekil 3.2'deki denklemden de ( $\dot{E}x_{D,k}^{AV} = \dot{E}x_{D,k} - \dot{E}x_{D,k}^{UN}$ ) anlaşıldığı üzere kaçınılmaz ekserji yıkımında ( $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV}$ ), kaçınılmaz ekserji yıkımındaki

( $\dot{E}x_{D,toplam}^{UN}$ ) artış ile tam tersi olarak azalma olmuştur. Rüzgâr türbinin izentropik veriminin artışı ile  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV}$  değeri %77.82 azalmıştır.  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV}$  değerinin büyük bir bölümünü içsel bölüm oluşturmaktadır ve neredeyse  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV}$  değeri ile aynı şekilde azalmıştır.  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV,EN}/\dot{E}x_{D,toplam}$  değerinde %59.82'lik bir azalış görülmektedir. Bunun sebebi kaçınılmaz içsel ekserji yıkımındaki azalmanın toplam ekserji yıkımındaki azalmadan daha fazla olmasıdır. Rüzgâr türbinin izentropik verimi arttıkça kaçınılmaz içsel ekserji ( $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV,EN}$ ) yıkımında meydana gelen bu azalma ile sistemin iyileştirme potansiyelinin artacağı anlamına gelmektedir.

- Rüzgâr türbinin izentropik verimi arttıkça  $\dot{E}x_{D,toplam}^{UN}$  değerinde değişiklik olmamıştır. Bu durum rüzgâr türbininin izentropik verimindeki artışın sistemde meydana gelen  $\dot{E}x_{D,toplam}^{UN}$  değerine etkisinin olmayacağı anlamına gelmektedir. Düşük oranlardaki kaçınılmaz dışsal ekserji yıkımı ( $\dot{E}x_{D,toplam}^{UN,EX}$ ) değeri kompresörlerin izentropik verimlerinin artışı ile değişim göstermemiştir. Buna rağmen  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV}/\dot{E}x_{D,toplam}$  değeri %93.94 ve  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV}/\dot{E}x_{D,toplam}$  değerinde %94.21'lik bir artış meydana geldiği görülmektedir. Ancak bu iki artışın sebebi de kaçınılmaz içsel ekserji yıkımı ( $\dot{E}x_{D,toplam}^{UN,EN}$ ) ve  $\dot{E}x_{D,toplam}^{UN,EX}$  değerlerinde değişiklik olmamasına rağmen  $\dot{E}x_{D,toplam}$  değerinde meydana gelen %48.51'lik azalmadır.



(a)



(b)

Şekil 4.9. Rüzgâr türbininin izentropik veriminin (a)  $\dot{E}x_D/\dot{E}x_{D,toplam}$ 'ın çeşitli bölümleri (b)  $\dot{E}x_{D,toplam}$ 'ın çeşitli bölümleri üzerine etkisi.

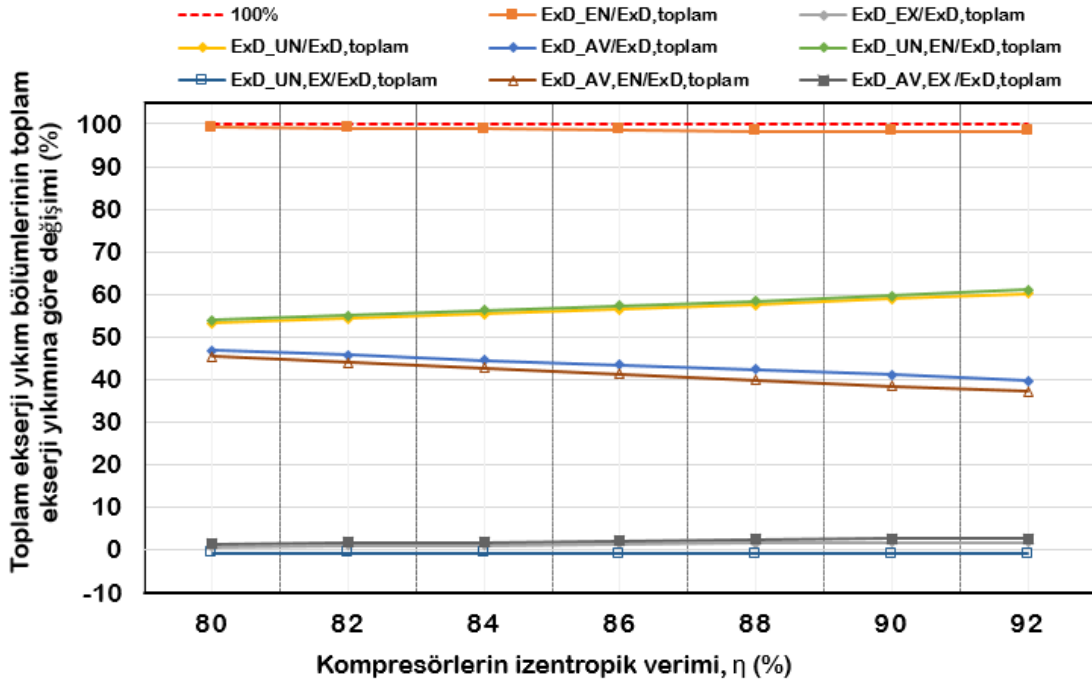
Şekil 4.9'da kompresörlerin izentropik verimlerinin toplam ekserji yıkımının çeşitli bölümleri üzerindeki etkisi gösterilmektedir.

Kompresörlerin izentropik verimleri %80-92 aralığında arttıkça:

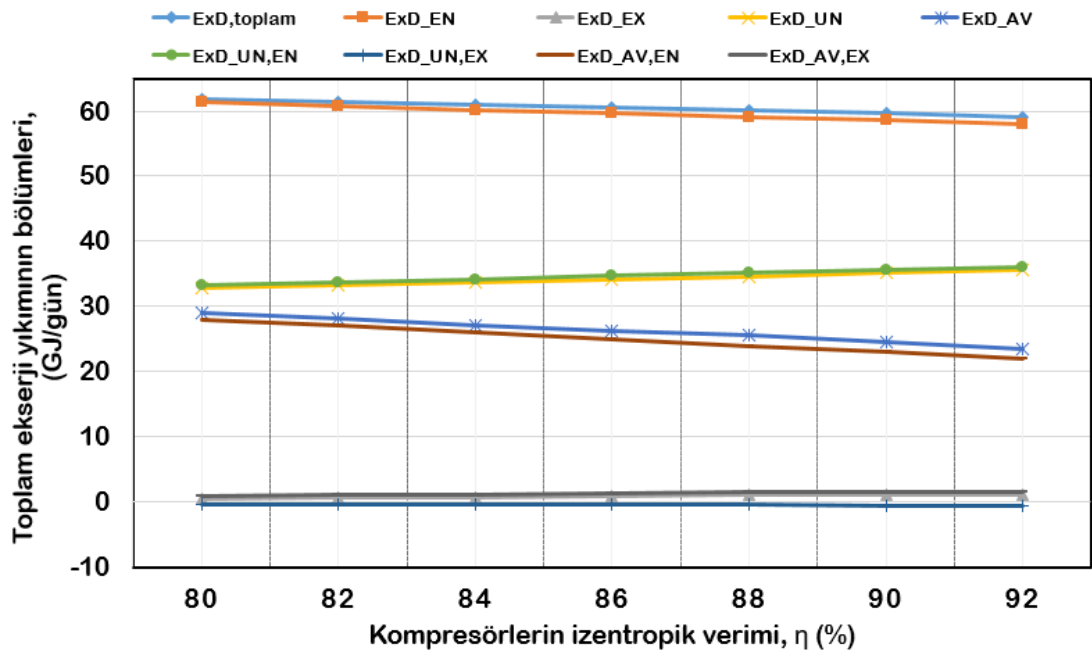
- $\dot{E}x_{D,toplam}$  değeri % 4.42 azalmıştır.

- $\dot{E}x_{D,toplam}$  değerinin büyük bir bölümünü  $\dot{E}x_{D,toplam}^{EN}$  oluşturmaktadır ve bu bölüm kompresörlerin izentropik verimlerinin artışı ile hafifçe % 0.96 azalmıştır. İzentropik verim artışı esnasında  $\dot{E}x_{D,toplam}^{EN}/\dot{E}x_{D,toplam}$  değerinin neredeyse sabit kaldığı görülmüştür. Bunun nedeni  $\dot{E}x_{D,toplam}^{EN}$  değerinin  $\dot{E}x_{D,toplam}$  değerine çok yakın olarak değişmesidir. Kompresörlerin izentropik verimlerinin artması ile  $\dot{E}x_{D,toplam}^{EX}$  değeri,  $\dot{E}x_{D,toplam}^{EN}$  değerine göre daha fazla artmasından ötürü %116.82 artış göstermiştir. Bu durum Şekil 3.2'deki denklem ( $\dot{E}x_{D,k}^{EX} = \dot{E}x_{D,k} - \dot{E}x_{D,k}^{EN}$ ) ile de açıklanmaktadır. Düşük dışsal ekserji yıkımı düşünüldüğünde kompresörlerin izentropik verimlerinin artışının sistem bileşenleri arasındaki ilişkide etkili olmadığı görülmüştür.
- $\dot{E}x_{D,toplam}^{UN}$  değeri, kompresörlerin izentropik verimlerinin artışı ile %8.15 artmıştır. Fakat gerçek koşullardaki ekserji yıkımına bağlı artışı %13.16'dır. Bu durum izentropik verim arttıkça  $\dot{E}x_{D,toplam}^{UN}/\dot{E}x_{D,toplam}$  değerinin arttığını göstermektedir.  $\dot{E}x_{D,toplam}^{UN}$  değerinde baskın olan bölüm  $\dot{E}x_{D,toplam}^{UN,EN}$  değeridir ve neredeyse  $\dot{E}x_{D,toplam}^{UN}$  değeri ile aynı miktarda izentropik verimlerin artışı ile artmıştır. Bu durum kompresörlerin izentropik verimlerinin artışının, toplam sistemin iyileştirme potansiyelini azalttığını göstermektedir.  $\dot{E}x_{D,toplam}^{UN,EX}$  değerinin negatif olmasının nedeni  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV}$  değerinin  $\dot{E}x_{D,toplam}^{UN}$  değerinden daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum kaçınılmaz koşullarda diğer sistem bileşenlerinin ideal koşullarda çalışmasının sistemdeki entropi üretimini arttırdığı anlamına gelmektedir. Düşük oranlardaki  $\dot{E}x_{D,toplam}^{UN}$  değeri kompresörlerin izentropik verimlerinin artışı ile belli belirsiz azalmıştır. Şekil 3.2'deki denklemden ( $\dot{E}x_{D,k}^{AV} = \dot{E}x_{D,k} - \dot{E}x_{D,k}^{UN}$ ) de anlaşılacağı üzere  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV}$  değeri,  $\dot{E}x_{D,toplam}^{UN}$  değerine göre tam tersi bir davranış sergilemiş ve kompresörlerin izentropik verimleri arttıkça %18.73 azalmıştır. Çünkü  $\dot{E}x_{D,toplam}^{UN}$  değerindeki artış gerçek koşullardaki ekserji yıkımından daha fazladır.  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV}/\dot{E}x_{D,toplam}$  değerinde %14.97 azalma görülmüştür.
- Kompresörlerin izentropik verimi arttıkça  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV}$  değerinde %18.73 azalma görülmüştür.  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV}$  değerinde baskın olan  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV,EN}$  değeridir.

Kompresörlerin izentropik verimlerinin artışı ile  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV,EN}/\dot{E}x_{D,toplam}$  ve  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV}/\dot{E}x_{D,toplam}$  hemen hemen aynı miktarda (%18) azalış göstermektedir.



(a)



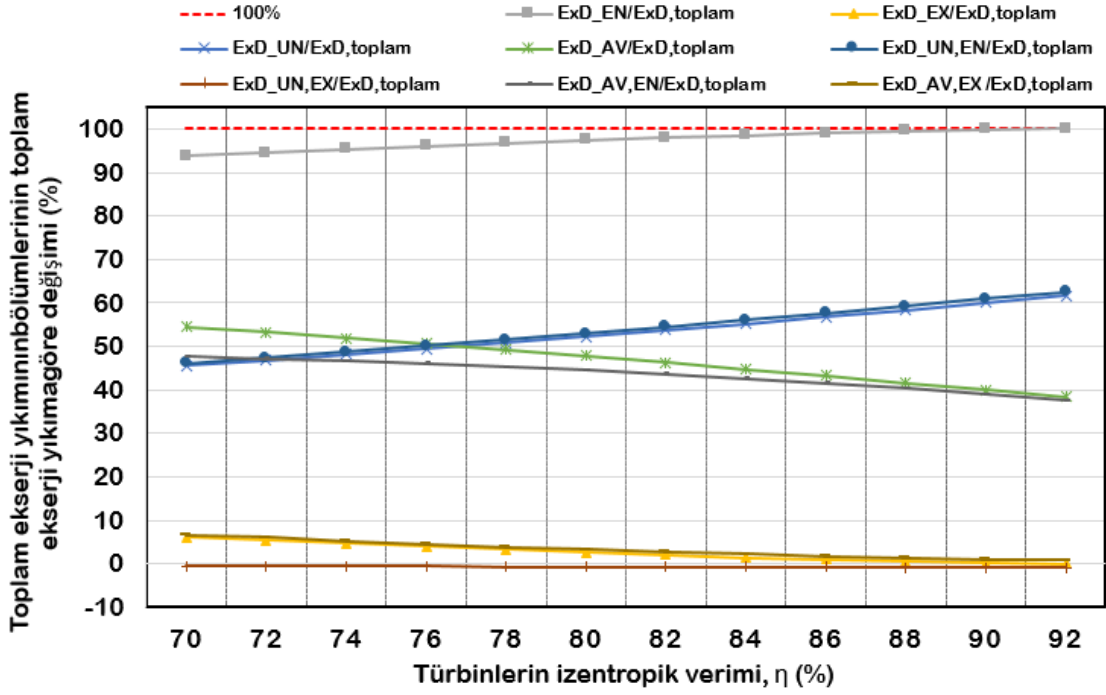
(b)

Şekil 4.10. Kompresörlerin izentropik veriminin (a)  $\dot{E}x_D/\dot{E}x_{D,toplam}$ 'ın çeşitli bölümleri (b)  $\dot{E}x_{D,toplam}$ 'ın çeşitli bölümleri üzerine etkisi.

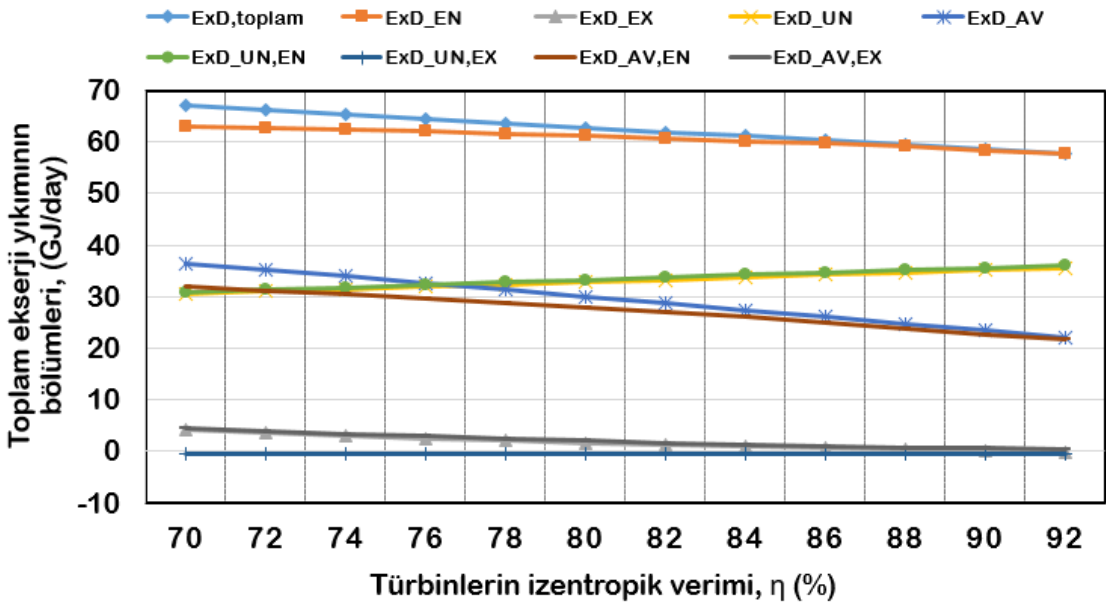
Şekil 4.11’de türbinlerin izentropik verimlerinin toplam ekserji yıkımının çeşitli bölümleri üzerindeki etkisi gösterilmektedir.

Türbinlerin izentropik verimleri %70-92 aralığında arttıkça:

- $\dot{E}x_{D,toplam}$  değerinin %13.91 azaldığı görülmüştür.
- $\dot{E}x_{D,toplam}$  değerinin büyük bir kısmını  $\dot{E}x_{D,k}^{EN}$  değeri oluşturmaktadır ve türbinlerin izentropik veriminin artması ile %8.18 azalmıştır. Türbinlerin izentropik veriminin artışı ile  $\dot{E}x_{D,toplam}$  değerindeki azalma  $\dot{E}x_{D,k}^{EN}$  değerinden daha fazla olduğu için Şekil 3.2’deki denkleme göre ( $\dot{E}x_{D,k}^{EX} = \dot{E}x_{D,k} - \dot{E}x_{D,k}^{EN}$ ),  $\dot{E}x_{D,k}^{EX}$  değeri % 101.10 azalmıştır.
- Türbinlerin izentropik verimlerinin artışı ile  $\dot{E}x_{D,toplam}^{UN}$  değeri %16.42 olarak artmıştır.  $\dot{E}x_{D,toplam}^{UN}/\dot{E}x_{D,toplam}$  değeri %35.23 artmıştır. Türbinlerin izentropik verimi %70-76 aralığında artarken  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV}$  değeri  $\dot{E}x_{D,toplam}^{UN}$  değerine baskın olmuştur. Türbinlerin izentropik veriminin %76-92 aralığındaki artışında  $\dot{E}x_{D,toplam}^{UN}$  değeri  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV}$  değerine baskın olmuştur. Türbinlerin izentropik verimlerinin artışı ile  $\dot{E}x_{D,toplam}^{UN}/\dot{E}x_{D,toplam}$  değeri daha fazla artış gösterdiği için Şekil 3.2’deki denkleme ( $\dot{E}x_{D,k}^{AV} = \dot{E}x_{D,k} - \dot{E}x_{D,k}^{UN}$ ) göre  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV}$  değeri tam tersi bir davranış göstermiş ve %39.33 azalmıştır. Bu durum türbinlerin izentropik verimlerinin artışının sistemi kaçınılmaz koşullara yaklaştırdığını ve sistemin iyileştirme potansiyelini azalttığını göstermektedir. Türbinlerin izentropik verimlerinin artışı kompresörlerin izentropik verimlerinin artışından daha çok sistemi etkilemektedir ve ekserji yıkımını daha fazla düşürmüştür.
- $\dot{E}x_{D,toplam}^{UN}$  değerinin büyük bir bölümünü  $\dot{E}x_{D,toplam}^{UN,EN}$  değeri oluşturmaktadır ve türbinlerin izentropik verimlerinin artışı ile %16.84 artmıştır.  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV}/\dot{E}x_{D,toplam}$  değeri %35.72’dir ve bu değer  $\dot{E}x_{D,toplam}^{UN}$  değerinden (%35.23) daha fazla artış gösterdiği için Şekil 3.2 deki denklem ( $\dot{E}x_{D,k}^{UN,EX} = \dot{E}x_{D,k}^{UN} - \dot{E}x_{D,k}^{UN,EN}$ ) ile de açıklanacağı üzere hafifçe azalmıştır.



(a)



(b)

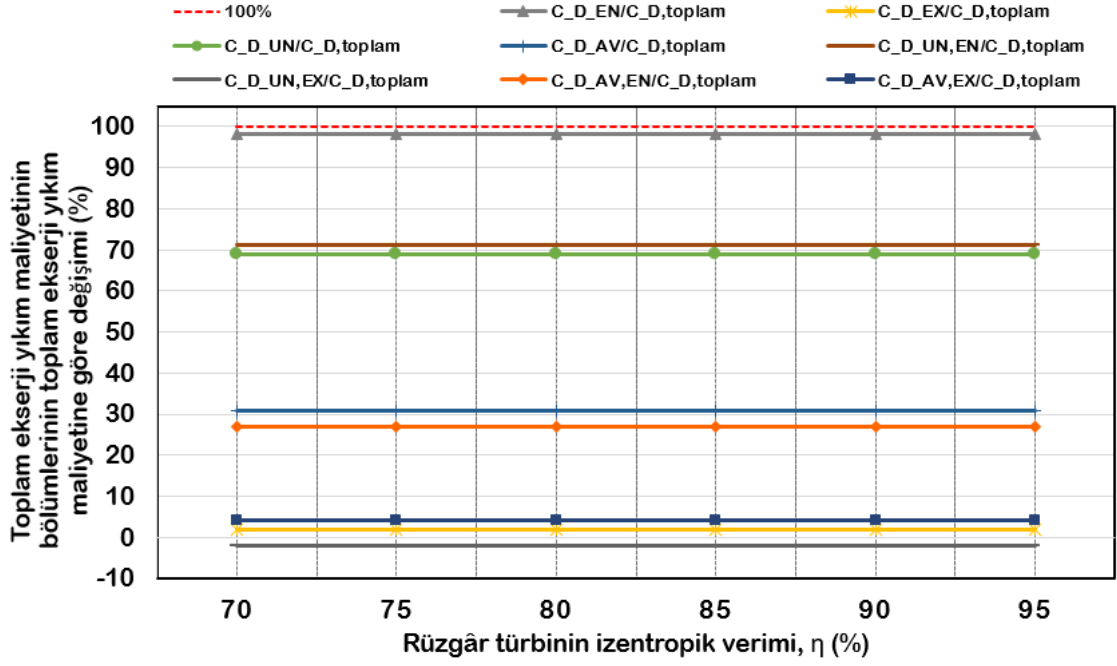
Şekil 4.11. Türbinlerin izentropik veriminin (a)  $\dot{E}x_D/\dot{E}x_{D,toplam}$ 'ın çeşitli bölümleri (b)  $\dot{E}x_{D,toplam}$ 'ın çeşitli bölümleri üzerine etkisi.

#### 4.4.2. Kararlı değişkenlerin değişiminin $\dot{C}_{D,toplam}$ 'ın bölümleri üzerindeki etkileri

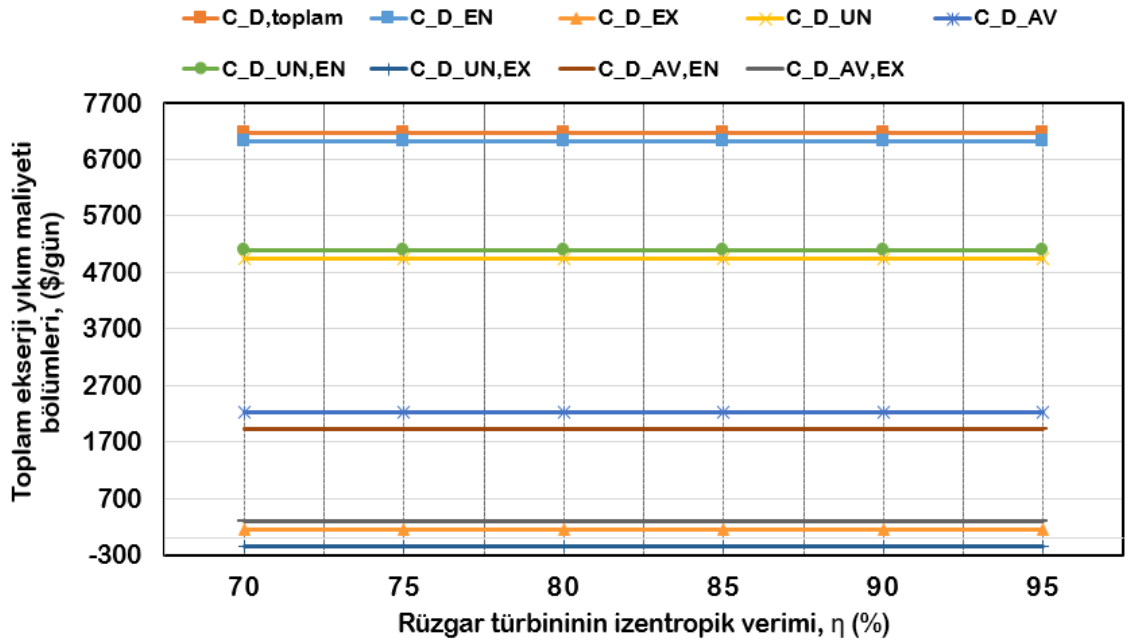
Şekil 4.12'de rüzgâr türbinin izentropik veriminin toplam ekserji yıkım maliyetlerinin çeşitli bölümleri üzerindeki etkisi gösterilmektedir.

Rüzgâr türbininin izentropik verimi %70-95 aralığında arttıkça;

- $\dot{C}_{D,toplam}$  değeri neredeyse sabit kalmıştır. Rüzgâr türbinlerinin izentropik verimi arttıkça  $\dot{E}x_{D,toplam}$  değerinde büyük bir azalma (neredeyse yarı yarıya) olmasına rağmen  $\dot{C}_{D,toplam}$  değerinde önemli bir değişikliğe sebep olmadığı görülmüştür.
- $\dot{C}_{D,toplam}$  değerinin neredeyse tamamını  $\dot{C}_{D,toplam}^{EN}$  değeri oluşturmaktadır. Rüzgâr türbininin izentropik veriminin artışı ile  $\dot{C}_{D,toplam}^{EN}$  neredeyse sabit kaldığı görülmüştür.
- Sistemde iyileştirme yapılacak noktaları belirlememize imkân tanıyan  $\dot{C}_{D,toplam}^{AV,EN}$  değerinin yaklaşık %27'sini oluşturmasına rağmen rüzgâr türbininin izentropik verimin artışı bu değerde değişikliğe sebep olmamıştır.
- Denklem 3.18'deki genel ifadeye ( $\dot{C}_{D,k} = c_f \cdot \dot{E}x$ ) bakıldığında  $\dot{E}x_{D,k}$  değeri ile  $\dot{C}_{D,k}$  orantılıdır. Şekil 4.9'da görüldüğü üzere ekserji yıkımında %48.5 azalma meydana gelmiştir. Şekil 4.12'de rüzgâr türbinin izentropik veriminin artmasına bağlı olarak ekserji yıkım maliyetinin bütün kısımlarına bakıldığında, ekserji yıkımındaki bu azalmaya rağmen toplam ekserji yıkım maliyetinin sabit kaldığı görülmektedir. Bunun sebebinin ise rüzgâr türbinini besleyen  $c_f$  değerinin besleme-ürün (Feed-Product) kuralına göre sıfır kabul edilmesidir.



(a)



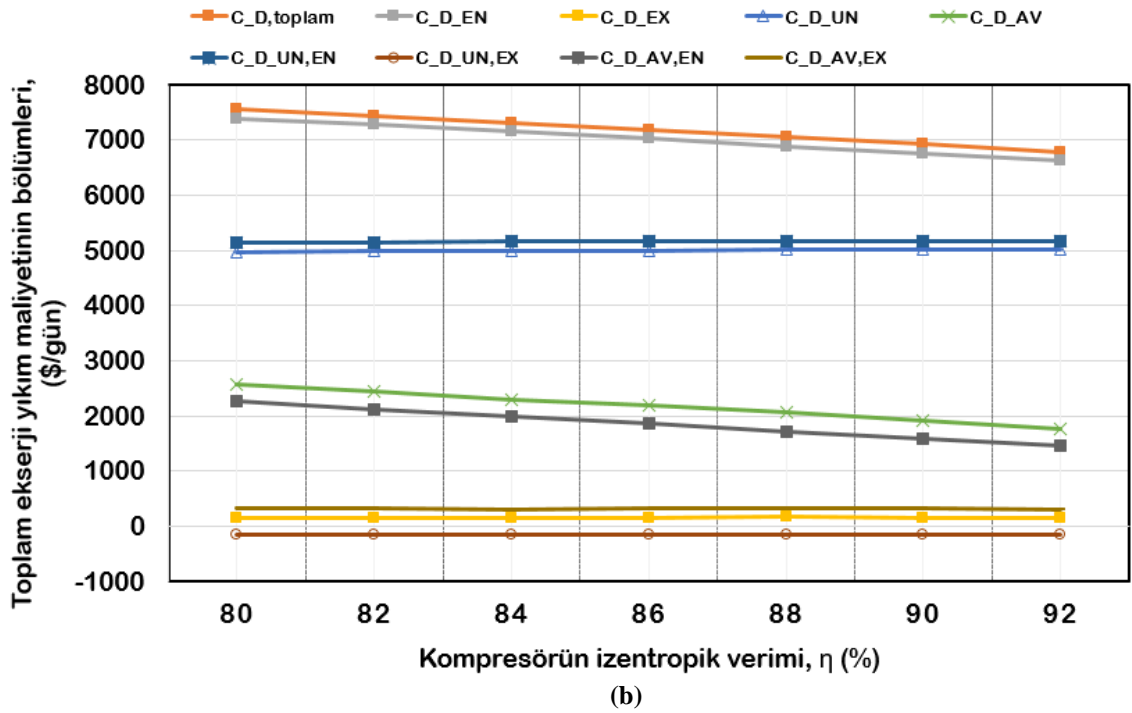
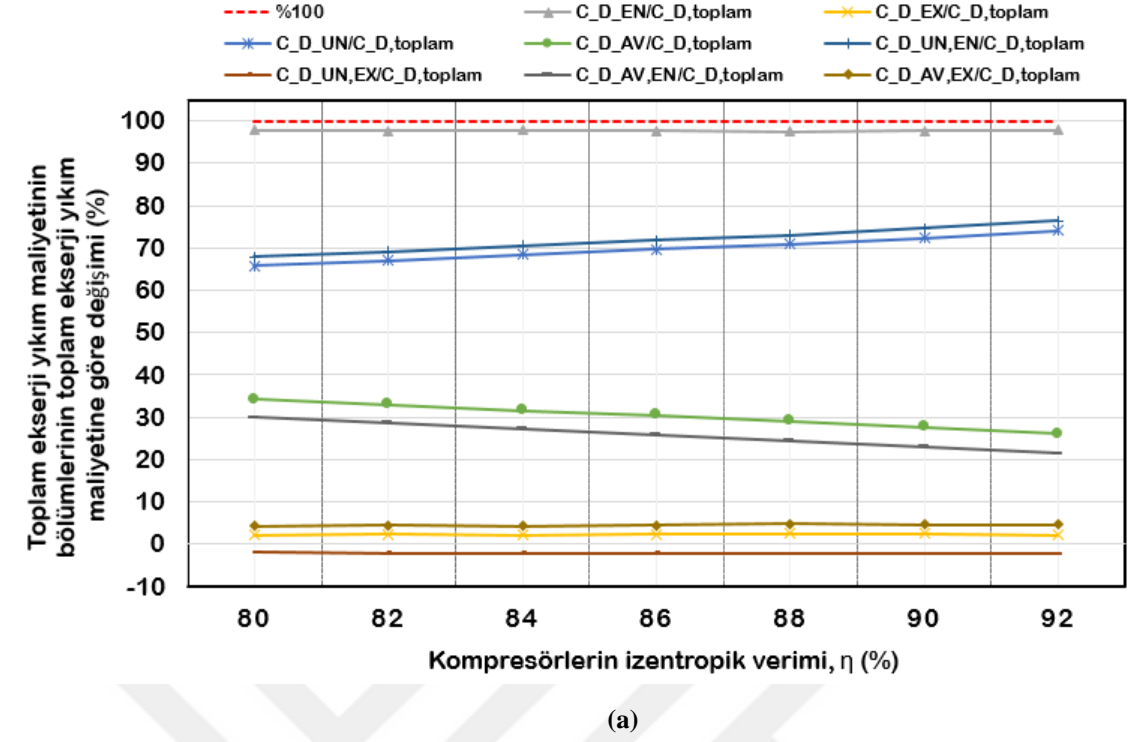
(b)

Şekil 4.12. Rüzgâr türbininin izentropik veriminin (a)  $\dot{C}_D/\dot{C}_{D,toplam}$  'ın çeşitli bölümleri b)  $\dot{C}_{D,toplam}$  'ın çeşitli bölümleri üzerine etkisi.

Şekil 4.13'te kompresörlerin izentropik verimlerinin toplam ekserji yıkım maliyetlerinin çeşitli bölümleri üzerindeki etkisi gösterilmektedir.

Kompresörlerin izentropik verimleri %80-92 aralığında arttıkça:

- $\dot{C}_{D,toplam}$  değeri %10.36 azalmıştır.  $\dot{E}x_{D,toplam}$  değerinin azalması  $\dot{C}_{D,toplam}$  değerini de azaltmıştır.
- $\dot{C}_{D,toplam}$  değerinin büyük bir kısmını  $\dot{C}_{D,toplam}^{EN}$  değeri oluşturmaktadır. Kompresörlerin izentropik verimlerinin artışı ile  $\dot{C}_{D,toplam}^{EN}$  değeri %10.35 azalmıştır.  $\dot{C}_D^{EN}/\dot{C}_{D,toplam}$  değeri,  $\dot{C}_{D,toplam}$  ve  $\dot{C}_{D,toplam}^{EN}$  değerleri yaklaşık olarak aynı oranda değiştiği için neredeyse sabit kalmıştır.
- $\dot{C}_{D,toplam}$  değerinin büyük bir kısmını  $\dot{C}_{D,toplam}^{UN}$  oluşturmaktadır ve bu değer kompresörlerin izentropik verimi arttıkça %0.78 artmaktadır. Kompresörlerin verimi arttıkça  $\dot{C}_{D,toplam}^{UN}/\dot{C}_{D,toplam}$  değeri % 12.42 artmıştır ve bu durum toplam  $\dot{C}_{D,toplam}$  değerinin  $\dot{C}_{D,toplam}^{UN}$  değerine göre daha baskın bir şekilde değiştiğini göstermektedir.
- $\dot{C}_{D,toplam}^{UN}$  değerinin büyük bir kısmını  $\dot{C}_{D,k}^{UN,EN}$  oluşturmaktadır. Kompresörler verim artışı ile  $\dot{C}_{D,k}^{UN,EN}$  değeri %0.84 artmıştır.  $\dot{C}_{D,toplam}^{EN}/\dot{C}_{D,toplam}$  değerindeki artış %12.49'dur.  $\dot{C}_D^{UN} < \dot{C}_D^{UN,EN}$  olduğu için  $\dot{C}_D^{UN,EX}$  değeri negatif çıkmıştır ve kompresörlerin verimlerinin artması bu değer mutlak değerini %2.85 arttırmıştır. Bu durum kompresörlerin izentropik veriminin artması ile diğer sistem bileşenlerinin teorik koşullarda çalışmasının bütün sistemdeki entropi üretimini arttıracakını göstermektedir. Kompresörlerin izentropik verimi arttıkça  $\dot{C}_{D,k}^{AV}$  değeri %31.83 azalmıştır ve  $\dot{C}_{D,toplam}^{AV}/\dot{C}_{D,toplam}$  değeri %23.95 azalmıştır.  $\dot{C}_{D,toplam}^{AV}$  değerindeki azalmanın sebebi yine  $\dot{C}_{D,toplam}$  değerinin  $\dot{C}_{D,toplam}^{UN}$  değerine göre daha baskın bir şekilde değişmesidir.
- $\dot{C}_{D,toplam}^{AV}$  değerinin büyük bir kısmını  $\dot{C}_{D,toplam}^{AV,EN}$  değeri oluşturmaktadır ve kompresörlerin izentropik verimi arttıkça  $\dot{C}_{D,toplam}^{AV,EN}$  değeri %35.74 azalmıştır.  $\dot{C}_{D,toplam}^{AV,EN}/\dot{C}_{D,toplam}$  değeri %28.32 azalmıştır. Bu değerler kompresör veriminin artması ile sistem bileşenlerindeki iyileşme potansiyelinin azalmasının göstergesidir. Çünkü sistem kaçınılmaz koşullara yaklaşmıştır.

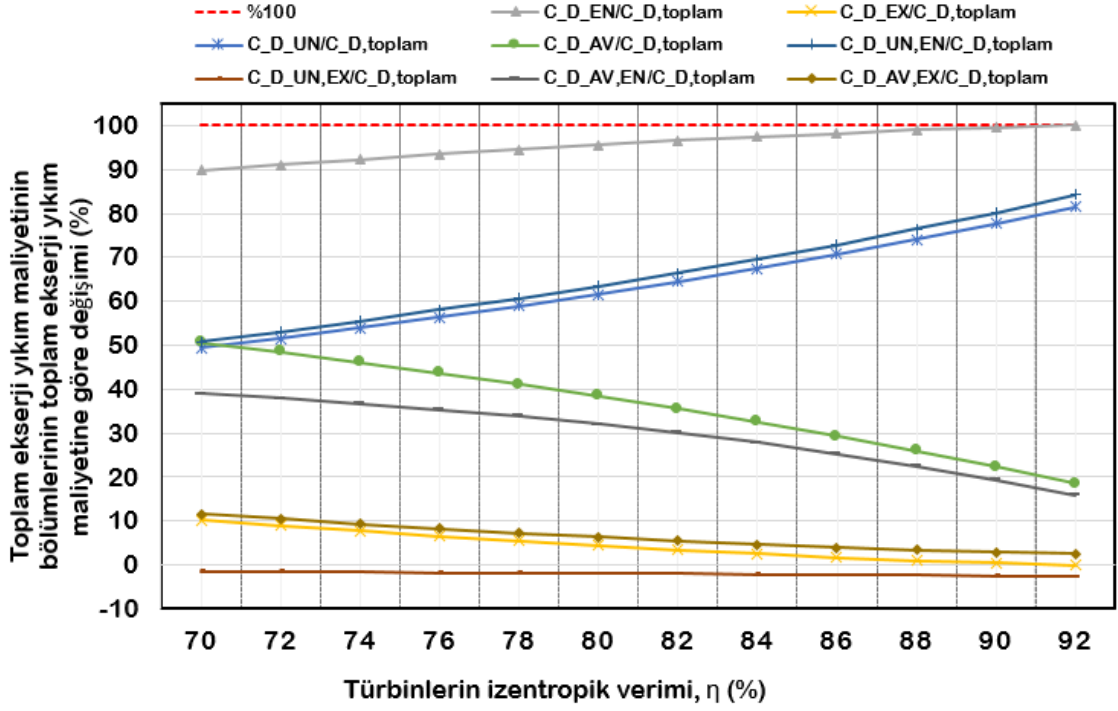


Şekil 4.13. Kompresörün izentropik veriminin (a)  $\dot{C}_D/\dot{C}_{D,toplam}$ 'ın çeşitli bölümleri (b)  $\dot{C}_{D,toplam}$ 'ın çeşitli bölümleri üzerine etkisi.

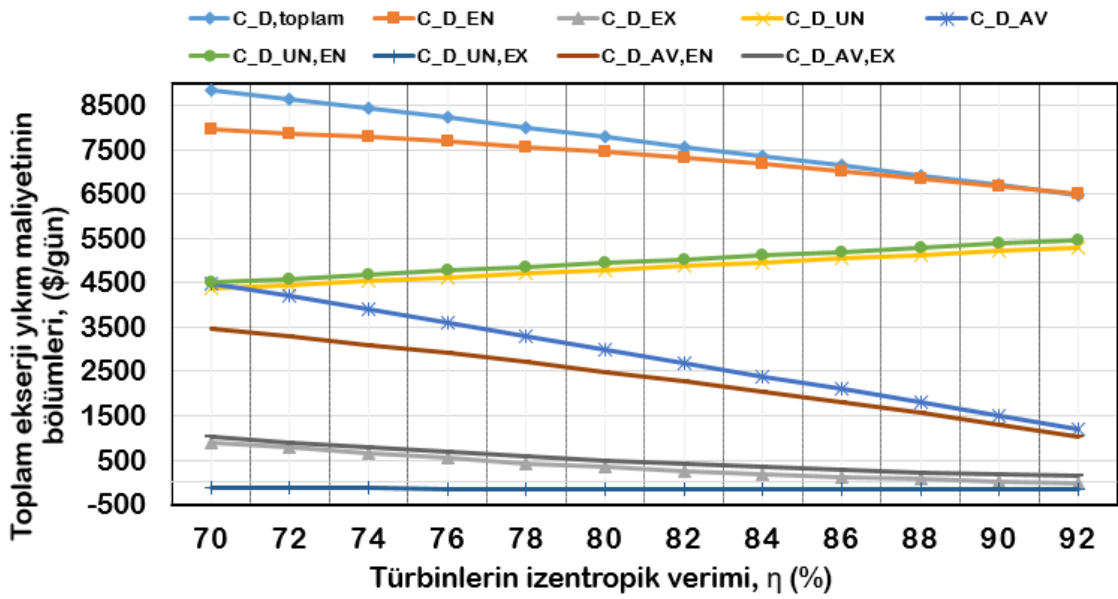
Şekil 4.14'te türbinlerin izentropik verimlerinin toplam ekserji yıkım maliyetlerinin çeşitli bölümleri üzerindeki etkisi gösterilmektedir.

Türbinlerin izentropik verimleri %70-92 aralığında arttıkça;

- $\dot{C}_{D,toplam}$  değeri % 26.71 azalmıştır.
- $\dot{C}_{D,toplam}$  değerinin büyük bir bölümünü  $\dot{C}_{D,toplam}^{EN}$  oluşturmaktadır. Türbinlerin izentropik verimleri arttıkça  $\dot{C}_{D,toplam}^{EN}$  değeri %18.38 azalırken,  $\dot{C}_{D,toplam}^{EN}/\dot{C}_{D,toplam}$  değeri %11.38 artmıştır. Bunu nedeni türbinlerin izentropik verimlerinin artması ile  $\dot{C}_{D,toplam}$  değerindeki azalmanın  $\dot{C}_{D,toplam}^{EN}$  değerlerindeki azalmaya baskın olmasındandır.
- $\dot{C}_{D,toplam}^{UN}$  değeri,  $\dot{C}_{D,toplam}^{AV}$  değerine göre  $\dot{C}_{D,toplam}$  değerinin daha büyük bir bölümü oluşturmaktadır. Türbinlerin izentropik verimleri arttıkça  $\dot{C}_{D,toplam}^{UN}$  değeri %20.06 artarken,  $\dot{C}_{D,toplam}^{UN}/\dot{C}_{D,toplam}$  değeri %65.06 artmıştır. Bunu nedeni türbinlerin izentropik verimlerinin artması ile  $\dot{C}_{D,toplam}$  değerlerindeki azalmanın  $\dot{C}_{D,toplam}^{UN}$  değerlerindeki artmaya baskın olmasındandır.  $\dot{C}_{D,toplam}^{AV}$  değerinin büyük bir bölümünü  $\dot{C}_{D,toplam}^{AV,EN}$  değeri oluşturmaktadır.
- Türbinlerin izentropik verimleri arttıkça,  $\dot{C}_{D,toplam}^{UN,EN}$  değerleri %21.35 artarken,  $\dot{C}_{D,toplam}^{UN,EN}/\dot{C}_{D,toplam}$  değeri %65.85 artmıştır. Türbinlerin izentropik verimleri arttıkça Denklem 3.49 gereği ( $\dot{C}_{D,toplam}^{AV} = \dot{C}_{D,toplam} - \dot{C}_{D,toplam}^{UN}$ )  $\dot{C}_{D,toplam}^{AV}$  %73.30 azalmıştır.  $\dot{C}_{D,toplam}^{AV,EN}$  değeri,  $\dot{C}_{D,toplam}^{AV,EX}$  değerine göre  $\dot{C}_{D,toplam}^{AV}$  değerinin daha büyük bir bölümü oluşturmaktadır. Türbinlerin izentropik verimleri arttıkça  $\dot{C}_{D,toplam}^{AV,EN}$  değeri %70.13 azalırken,  $\dot{C}_{D,toplam}^{AV,EN}/\dot{C}_{D,toplam}$  değeri %23.13 azalmıştır. Bunu nedeni türbinlerin izentropik verimlerinin artması ile  $\dot{C}_{D,toplam}$  ve  $\dot{C}_{D,toplam}^{AV,EN}$  değerlerindeki azalmanın dengeli olmasıdır. Bu durum sistemin ideal noktaya yaklaştığını bu yüzden iyileşme potansiyelinin azaldığını göstermektedir.



(a)



(b)

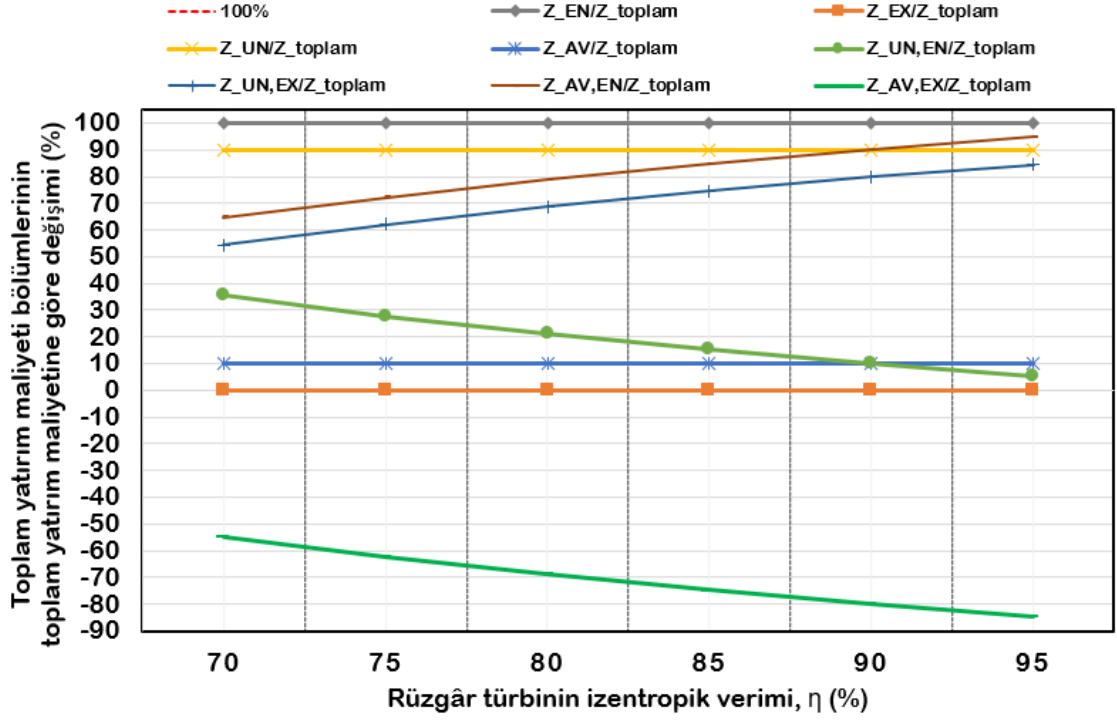
Şekil 4.14. Türbinlerin izentropik veriminin (a)  $\hat{C}_D/\hat{C}_{D,toplam}$  'ın çeşitli bölümleri (b)  $\hat{C}_{D,toplam}$  'ın çeşitli bölümleri üzerine etkisi.

#### 4.4.3. Kararlı değişkenlerin değişiminin $\hat{Z}_{toplam}$ 'ın bölümleri üzerindeki etkileri

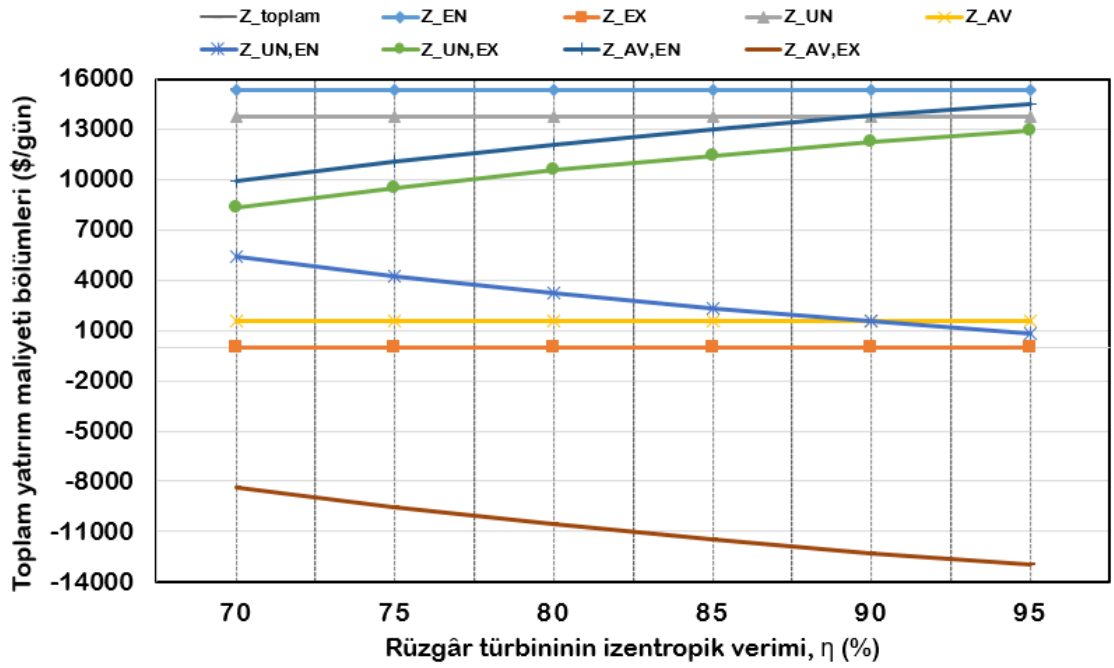
Şekil 4.15'te rüzgâr türbinin izentropik veriminin bütün sistemin yatırım maliyetlerinin bölümleri üzerindeki etkisi gösterilmektedir.

Rüzgâr türbininin izentropik verimi %70-95 arasında arttıkça;

- Bütün sistemin toplam yatırım maliyeti ( $\dot{Z}_{topl\text{am}}$ ) değeri değişmemiştir. Toplam yatırım maliyetinde değişimin olmamasının sebebi  $\dot{Z}_{RT} = 5000 * \dot{W}_{RT}$  denkleminde rüzgâr türbininden elde edilen elektrik enerjisinin sabit kabul edilmesinden kaynaklanmaktadır.
- Rüzgâr türbininin izentropik verimi arttıkça içsel yatırım maliyeti ( $\dot{Z}_{topl\text{am}}^{EN}$ ) değeri değişmemektedir.  $\dot{Z}_{topl\text{am}}^{EN}$  değeri  $\dot{Z}_{topl\text{am}}$  değerinden daha fazladır. Şekil 3.3'ten anlaşılacağı üzere,  $\dot{Z}_{topl\text{am}} = \dot{Z}_{topl\text{am}}^{EN} + \dot{Z}_{topl\text{am}}^{EX}$  denklemine göre dışsal yatırım maliyeti ( $\dot{Z}_{topl\text{am}}^{EX}$ ) değeri ise negatif değerdedir ve birbirlerini dengelemektedir. Ancak  $\dot{Z}_{k,topl\text{am}}^{EX}$  değerinin negatif olması, sistemin teorik koşullarda çalışmasının sistemin ekserji yıkımını artıracaklarını göstermektedir.
- Kaçınılabılır yatırım maliyeti ( $\dot{Z}_{topl\text{am}}^{AV}$ ) değeri %0.808 artarken kaçınılamaz yatırım maliyeti ( $\dot{Z}_{topl\text{am}}^{UN}$ ) değeri %0.0902 azalmıştır.  $\dot{Z}_{topl\text{am}}^{UN}$  değeri  $\dot{Z}_{k,topl\text{am}}$  değerinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Kaçınılamaz içsel yatırım maliyeti ( $\dot{Z}_{topl\text{am}}^{UN,EN}$ ) %85.01 azalırken, kaçınılamaz dışsal yatırım maliyeti ( $\dot{Z}_{topl\text{am}}^{UN,EX}$ ) %55.21 artmıştır.
- $\dot{Z}_{topl\text{am}}^{AV}$  değerinin büyük bir kısmını ise içsel bölüm ( $\dot{Z}_{topl\text{am}}^{AV,EN}$ ) oluşturmaktadır. Rüzgâr türbininin izentropik verimi arttıkça,  $\dot{Z}_{topl\text{am}}^{AV,EN} / \dot{Z}_{topl\text{am}}$  değeri %46.65 artmaktadır. Kaçınılabılır dışsal yatırım maliyeti ( $\dot{Z}_{topl\text{am}}^{AV,EX}$ ) %55.09 azalmaktadır. Bu durum Şekil 3.3'deki  $\dot{Z}_{topl\text{am}}^{AV} = \dot{Z}_{topl\text{am}}^{AV,EN} + \dot{Z}_{topl\text{am}}^{AV,EX}$  denklemiyle açıklanabilir.



(a)



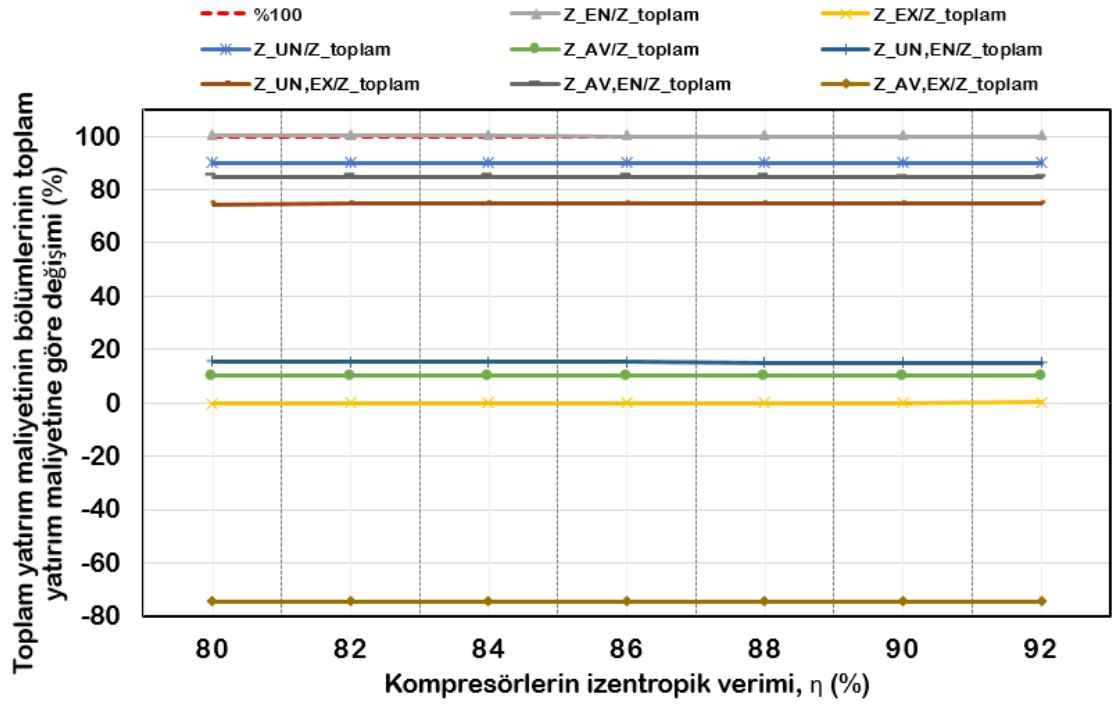
(b)

Şekil 4.15. Rüzgâr türbininin izentropik veriminin (a)  $\dot{Z}/\dot{Z}_{toplam}$ 'ın çeşitli bölümleri (b)  $\dot{Z}_{toplam}$ 'ın çeşitli bölümleri üzerine etkisi.

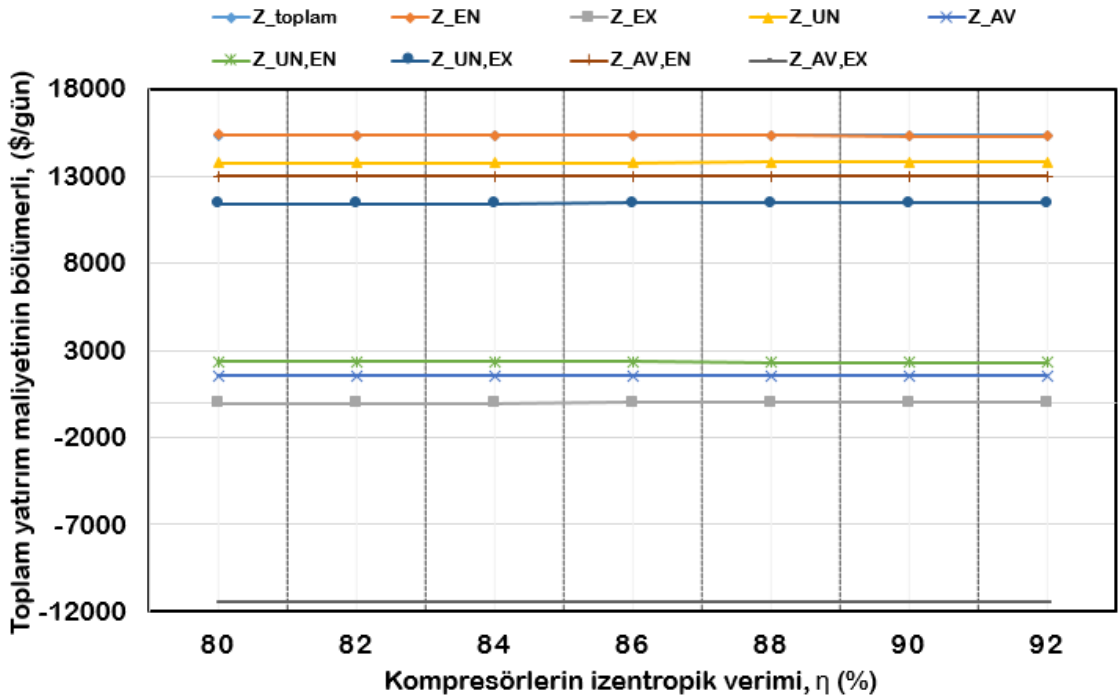
Şekil 4.16'da kompresörlerin izentropik verimlerinin bütün sistemin yatırım maliyetlerinin bölümleri üzerindeki etkisi gösterilmektedir.

Kompresörlerin izentropik verimleri %80-92 aralığında arttıkça;

- $\dot{Z}_{toplaml}$  değeri %0.04 artmıştır. Bu artışın sebebi kompresörlerin izentropik verimlerinin kaçınılmaz koşullara yaklaşmasından kaynaklanmaktadır.
- $\dot{Z}_{toplaml}^{EN}$  değeri %0.04 azalmıştır ve  $\dot{Z}_{toplaml}$  değerinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır.  $\dot{Z}_{toplaml}^{EN}/\dot{Z}_{toplaml}$  değeri % 0.44 azalmıştır.  $\dot{Z}_{toplaml}^{EX}$  değeri %144.53 artmıştır.  $\dot{Z}_{toplaml}^{EN}/\dot{Z}_{toplaml}$  değeri %144.51 artmıştır. Bu durum  $\dot{Z}_{toplaml}^{EN}$  değerinin önemli ölçüde etkilenmediğini ama zaten düşük değerlerde olan  $\dot{Z}_{toplaml}^{EX}$  değerinin keskin bir şekilde arttığını göstermektedir. Özellikle kompresörlerin veriminin %90 olduğu noktada  $\dot{Z}_{toplaml}^{EX}$  değeri pozitif değer almaya başlamıştır. Bu durum %90 izentropik verimin altındaki değerlerde sistemin teorik koşullarda çalışmasının sistemin ekserji yıkımını arttıracaklarını, bu değer üstündeki değerlerde ise azaltacağını göstermektedir.
- $\dot{Z}_{toplaml}^{AV}$  değeri %0.12 artarken  $\dot{Z}_{toplaml}^{UN}$  değeri %0.03 artmıştır.  $\dot{Z}_{toplaml}^{UN}/\dot{Z}_{toplaml}$  değeri %0.01 azalırken  $\dot{Z}_{toplaml}^{AV}$  değeri %0.08 artmıştır.  $\dot{Z}_{toplaml}^{UN}$  değeri  $\dot{Z}_{toplaml}$  değerinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır.  $\dot{Z}_{toplaml}^{UN}/\dot{Z}_{toplaml}$  değerindeki azalışın sebebi  $\dot{Z}_{toplaml}$  değerindeki artışın  $\dot{Z}_{toplaml}^{UN}$  değerine göre daha baskın olmasıdır.
- $\dot{Z}_{toplaml}^{UN,EX}$  değeri  $\dot{Z}_{toplaml}$  değerinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır ve  $\dot{Z}_{toplaml}^{UN}$  değeri %0.52 artmıştır.  $\dot{Z}_{toplaml}^{UN,EN}$  değeri %2.32 azalmıştır.  $\dot{Z}_{toplaml}^{UN,EX}/\dot{Z}_{toplaml}$  değeri %0.48 artarken  $\dot{Z}_{toplaml}^{UN,EN}$  değeri %2.36 azalmıştır. Bu durum toplam yatırım maliyetindeki değişimi kaçınılmaz içsel ve dışsal yatırım maliyetlerindeki değişime paralel olduğunu göstermektedir.
- $\dot{Z}_{toplaml}^{AV,EN}$  ve  $|\dot{Z}_{toplaml}^{AV,EX}|$  değerleri sırasıyla % 0.05% ve %0.08 azalmıştır.  $\dot{Z}_{toplaml}^{EN}/\dot{Z}_{toplaml}$  ve  $\dot{Z}_{toplaml}^{EX}/\dot{Z}_{toplaml}$  değerlerindeki azalma % 0.09'dur.  $\dot{Z}_{toplaml}^{AV,EN}$  değerindeki azalışın sebebi Şekil 3.3'teki denklemden ( $\dot{Z}_{toplaml}^{AV,EN} = \dot{Z}_{toplaml}^{EN} - \dot{Z}_{toplaml}^{UN,EN}$ ) görüleceği üzere daha baskın olan  $\dot{Z}_{toplaml}^{EN}$  değerindeki azalıştan kaynaklanmaktadır.  $|\dot{Z}_{toplaml}^{AV,EX}|$  değerindeki azalışın sebebi ise Şekil 3.3'teki denklemde ( $\dot{Z}_k^{AV,EX} = \dot{Z}_k^{EX} - \dot{Z}_k^{UN,EX}$ ) görüleceği üzere daha baskın olan  $\dot{Z}_{toplaml}^{UN,EX}$  değerindeki artıştan kaynaklanmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 4.16. Kompresörlerin izentropik veriminin (a)  $\dot{Z}/\dot{Z}_{toplam}$ 'ın çeşitli bölümleri (b)  $\dot{Z}_{toplam}$ 'ın çeşitli bölümleri üzerine etkisi.

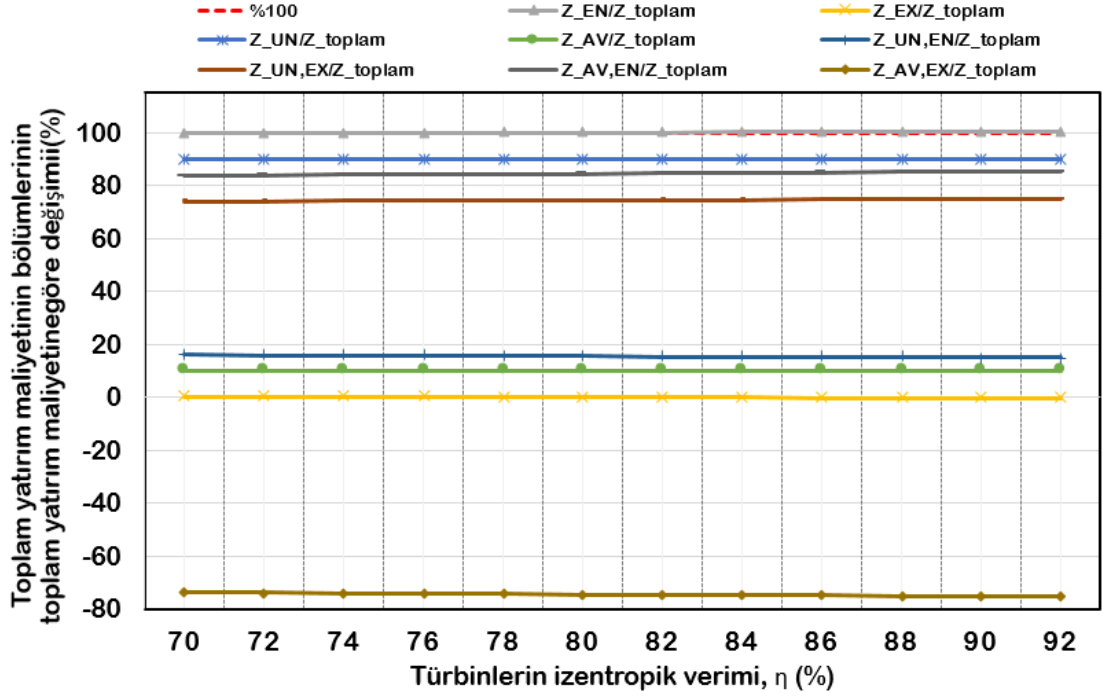
Şekil 4.17'de türbinlerin izentropik verimlerinin bütün sistemin yatırım maliyetlerinin bölümleri üzerindeki etkisi gösterilmektedir.

Türbinlerin izentropik verimleri %70-92 aralığında arttıkça;

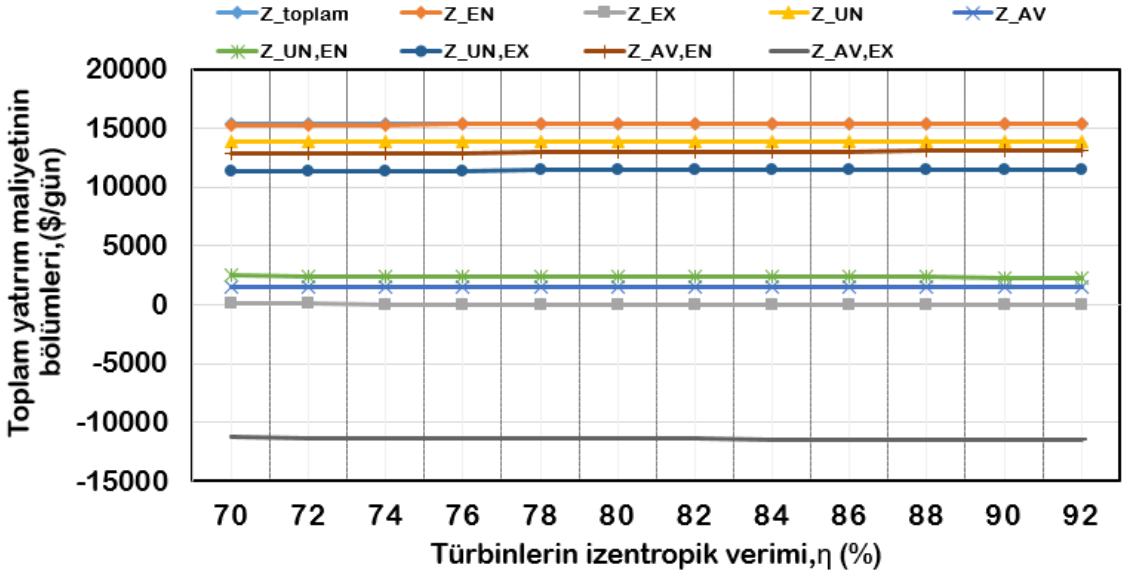
- $\dot{Z}_{toplama}$  değeri % 0.006 artmıştır ve önemli ölçüde artış olmadığı görülmüştür.
- $\dot{Z}_{toplama}^{EN}$  değeri % 0.66 artmıştır ve  $\dot{Z}_{toplama}$  değerinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır.  $\dot{Z}_{toplama}^{EN}/\dot{Z}_{toplama}$  değeri % 0.66'dır. Bu durum içsel bölümün baskın olmasından kaynaklanmaktadır. Türbinlerin izentropik veriminin %80'e kadar olan artışında  $\dot{Z}_{toplama}^{EX}$  değeri %90.80 azalmış, %80 izentropik veriminin üstünde  $\dot{Z}_{toplama}^{EX}$  % 1036.32 artmıştır. Bu durum %80 türbin izentropik verimine kadar zayıf sistem bileşenleri ilişkisindeki iyileştirmenin olumlu etkisini göstermektedir. %80 türbin izentropik veriminin üzerinde sistem bileşenlerinin birbiri ile olan ilişkisinin iyileştirilmesi, sistemin ekserji yıkımını arttıracaktır.
- $\dot{Z}_{toplama}^{AV}$  ve  $\dot{Z}_{toplama}^{UN}$  değerleri sırasıyla % 0.005 ve %0.006 artmıştır.  $\dot{Z}_{toplama}^{UN}/\dot{Z}_{toplama}$  değeri % 0.000092 artarken  $\dot{Z}_{toplama}^{AV}/\dot{Z}_{toplama}$  ise %0.000826 azalmıştır.  $\dot{Z}_{toplama}^{UN}$  değeri,  $\dot{Z}_{toplama}$  değerinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır.  $\dot{Z}_{toplama}^{AV}/\dot{Z}_{toplama}$  değerinin azalmasının sebebi  $\dot{Z}_{toplama}$  değerindeki artışın  $\dot{Z}_{toplama}^{AV}$  değerine göre daha baskın olmasıdır.
- $\dot{Z}_{toplama}^{UN,EX}$  değeri,  $\dot{Z}_{toplama}^{UN}$  değerinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır ve %1.39 artmıştır.  $\dot{Z}_{toplama}^{UN,EN}$  ise %6.38 azalmıştır.  $\dot{Z}_{toplama}^{UN,EX}/\dot{Z}_{toplama}$  değeri %1.38 artarken  $\dot{Z}_{toplama}^{UN,EN}/\dot{Z}_{toplama}$  değeri %6.39 azalmıştır. Bu durum  $\dot{Z}_{toplama}$  değerindeki değişimin  $\dot{Z}_{toplama}^{UN,EN}$  ve  $\dot{Z}_{toplama}^{UN,EX}$  değerindeki değişime paralel olduğunu göstermektedir.
- $\dot{Z}_{toplama}^{AV,EN}$  ve  $|\dot{Z}_{toplama}^{AV,EX}|$  değerleri sırasıyla %2.01 ve %2.28 artmıştır.  $\dot{Z}_{toplama}^{AV,EN}/\dot{Z}_{toplama}$  ve  $\dot{Z}_{toplama}^{AV,EX}/\dot{Z}_{toplama}$  değerleri sırasıyla %2 ve %2.28'dir. Bu durum  $\dot{Z}_{toplama}$  değeri ile  $\dot{Z}_{toplama}^{AV,EN}$  ve  $\dot{Z}_{toplama}^{AV,EX}$  değerlerinin artışının dengeli olduğunu göstermektedir.
- $\dot{Z}_{toplama}^{AV,EN}$  değerindeki artışın sebebi Şekil 3.3'teki denklemden ( $\dot{Z}_k^{AV,EN} = \dot{Z}_k^{EN} - \dot{Z}_k^{UN,EN}$ ) görüleceği üzere daha baskın olan  $\dot{Z}_{toplama}^{EN}$  değerindeki artış ve ayrıca  $\dot{Z}_{toplama}^{UN,EN}$  değerindeki azalıştan kaynaklanmaktadır.  $|\dot{Z}_{toplama}^{AV,EX}|$

değerindeki artışın sebebi ise Şekil 3.3'teki denklemden ( $\dot{Z}_k^{AV,EX} = \dot{Z}_k^{EX} - \dot{Z}_k^{UN,EX}$ ) görüleceği üzere daha baskın olan  $\dot{Z}_{toplam}^{UN,EX}$  değerindeki artıştan kaynaklanmaktadır.





(a)



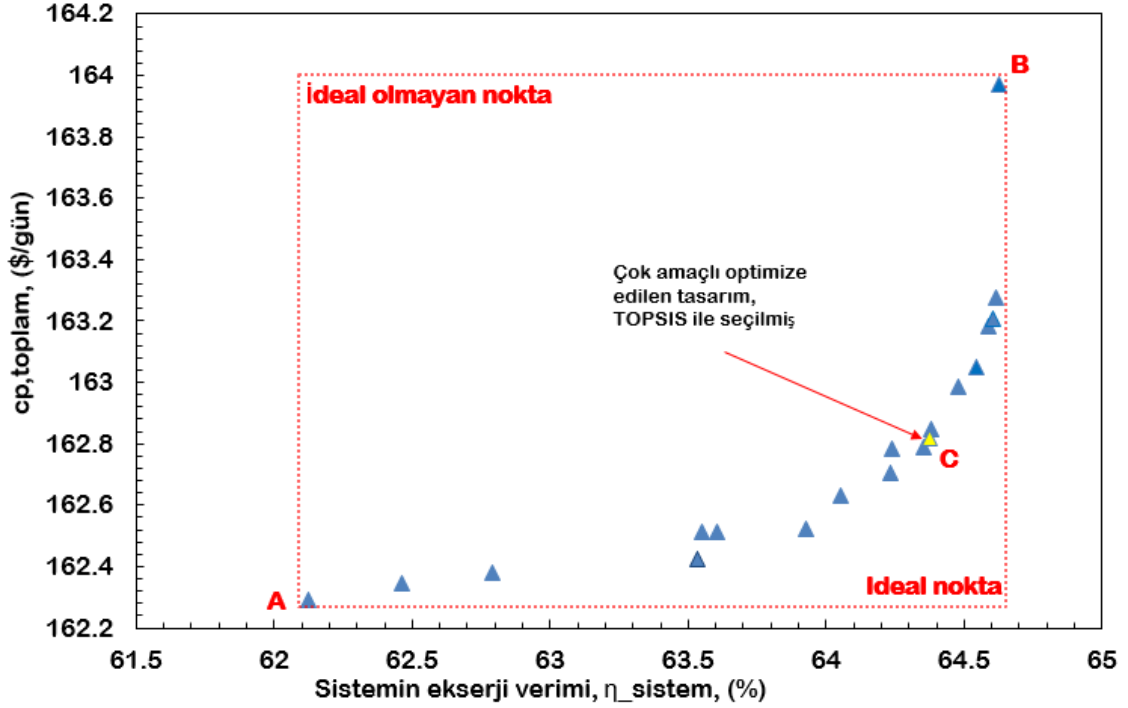
(b)

Şekil 4.17. Türbinlerin izentropik veriminin (a)  $\dot{Z}/\dot{Z}_{toplam}$ 'ın çeşitli bölümleri (b)  $\dot{Z}_{toplam}$ 'ın çeşitli bölümleri üzerine etkisi.

#### 4.4.4. Çok Amaçlı Optimizasyon

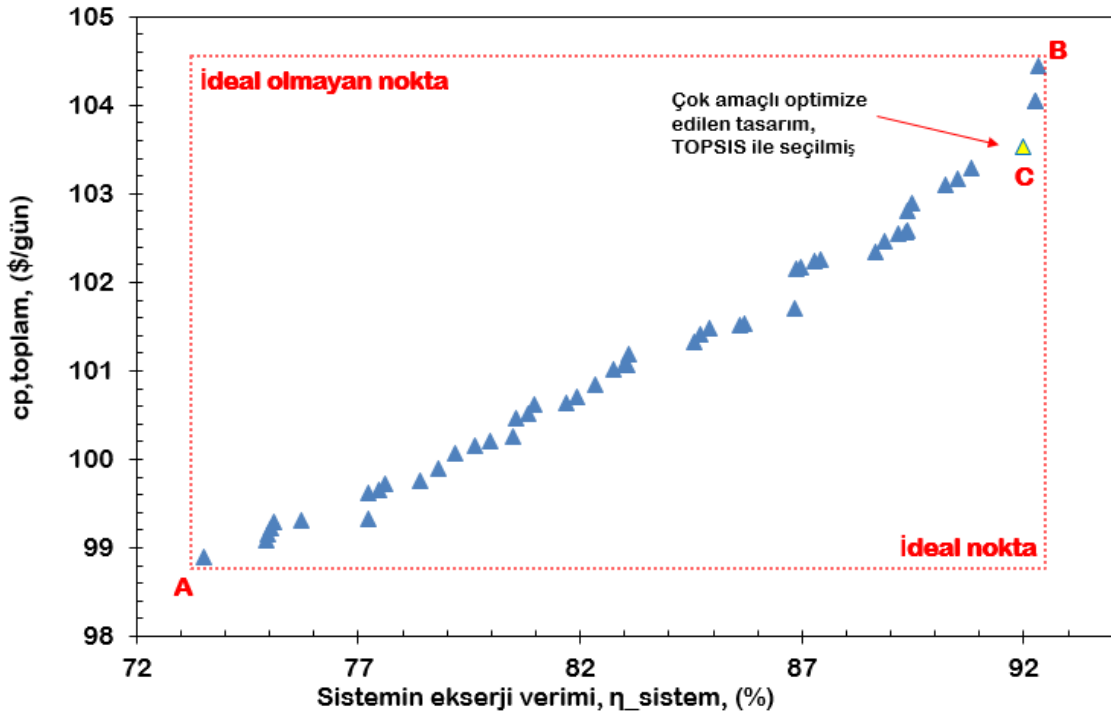
Çok amaçlı optimizasyon için Pareto optimal çözüm yüzeyi geleneksel ekserji ve eksergo-ekonomik analiz için Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Önerilen sistemin ekserji verimliliği ( $\eta_{sistem}$ ) arttıkça, toplam birim ürün maliyeti  $c_{p,toplam}$  de artmaktadır. Sistem en yüksek  $c_{p,toplam}$  değerine (163.9 \$/gün) ve en yüksek  $\eta_{sistem}$  değerine (%64.6) B

noktasında sahiptir. Buna karşılık, sistemin en düşük  $c_{p,toplam}$  değeri (162.2 \$/gün) ve en düşük  $\eta_{sistem}$  değeri (%62.1) A noktasında görülmektedir. TOPSIS yöntemine göre nihai optimum sonuç (C noktası)  $c_{p,toplam}$  ve  $\eta_{sistem}$  için sırasıyla 162.9 \$/gün ve % 64.3 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.18. Önerilen GA-SHED sisteminin geleneksel analiz için Pareto yüzeyindeki çözümlerin dağılımı.

Çok amaçlı optimizasyon için Pareto optimal çözüm yüzeyi ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analiz için Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Modifiye edilmiş ekserji verimliliği ( $\eta_{sistem}^{adv}$ ) arttıkça modifiye edilmiş toplam birim ürün maliyetinin ( $c_{p,AV,toplam}$ ) arttığı görülmektedir. Sistem en yüksek  $c_{p,AV,toplam}$  değerine (104,4 \$/gün) ve en yüksek  $\eta_{sistem}^{adv}$  değerine (%92.3) B noktasında sahiptir. Buna karşılık, sistemin en düşük  $c_{p,AV,tot}$  değeri (98.8 \$/gün) ve en düşük  $\eta_{sistem}^{adv}$  değeri (%73.5) A noktasında görülmektedir. TOPSIS yöntemine göre nihai optimum sonuç (C noktası)  $c_{p,AV,toplam}$  ve  $\eta_{sistem}^{adv}$  için sırasıyla 103.5 \$/gün ve %91.9 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.19. Önerilen GA-SHED sisteminin ileri analiz için Pareto yüzeyindeki çözümlerin dağılımı.

Tablo 4.7'de geleneksel/ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analizlere göre belirlenen performans kriterleri için bulunan nihai optimizasyon sonuçlarına karşılık gelen kararlı değişkenler verilmiştir. Ayrıca önerilen sistemin temel durumu da optimizasyon sonuçları ile birlikte Tablo 4.7'de verilmiştir. Tablo 4.7'de görüldüğü üzere, ileri analiz için optimum sonucu veren karar değişkenlerine göre bulunan  $c_{p,AV,toplam}$  ve  $\eta_{sistem}^{adv}$  değerleri, geleneksel ekserji ve eksergo-ekonomik analizlere göre bulunan  $c_{p,toplam}$  ve  $\eta_{sistem}$  değerlerine çok yakındır. Bu durum, optimizasyon çalışmasında amaç fonksiyonu olarak ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analiz için modifiye edilmiş performans kriterlerinin kullanılmasını doğrulamaktadır. Geleneksel/ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analizler konseptinde elde edilen optimizasyon sonuçlarının yakınlığı özellikle bu çalışmada literatürde ilk defa tanımlanan  $c_{p,AV,toplam}$  değerinin optimizasyon çalışmasında ileri eksergo-ekonomik analiz performans kriteri olarak kullanılabilmesinin uygunluğunu göstermektedir. Optimizasyon sonucunda, geleneksel ekserji-eksergo-ekonomik analizler için belirlenen  $c_{p,toplam}$  ve  $\eta_{sistem}$  performans kriterleri temel duruma göre sırasıyla %3.37 ve %17.03 oranında iyileştirilmiştir.

**Çizelge 4.7.** Kararlı değişkenlerin ve amaç fonksiyonlarının temel durum ve optimum değerleri.

		<b>Temel Durum</b>	<b>Geleneksel analiz performans kriterlerine göre</b>	<b>İleri analiz performans kriterlerine göre</b>
<b>Kararlı değişkenler</b>	Rüzgâr türbini verimi [%]	85	93.9	92.9
	K-1'in izentropik verimi [%]	85	89.4	88.9
	K-2'nin izentropik verimi [%]	85	89.6	88.5
	ID-1'in etkinliği [%]	90	87.1	92.9
	ID-2'nin etkinliği [%]	90	94.7	94.2
	ID-3'ün etkinliği [%]	90	89.7	94.3
	ID-4'ün etkinliği [%]	90	91.8	86.5
	T-1'in izentropik verimi [%]	85	87.0	88.2
T-2'nin izentropik verimi [%]	85	90.5	87.2	
<b>Performans Kriterleri</b>	Ekserji verimi [%]	55.2	64.6	91.9
	Modifiye edilmiş ekserji verimi [%]	-	-	63.3
	Toplam birim ürün maliyeti [\$/gün]	168.9	163.2	103.5
	Modifiye edilmiş toplam birim ürün maliyeti [\$/gün]	-	-	163.8

Önerilen sistem için yapılan duyarlılık analizi ve çok amaçlı optimizasyon çalışması sonucunda elde edilen önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Rüzgâr türbininin verimindeki artış, sistemin ekserji yıkımının azaltılmasında diğer sistem bileşenlerine kıyasla daha olumlu bir etkiye sahiptir. Rüzgâr türbininin veriminin artışı  $\dot{E}x_{D,toplam}$  değerini %48.51 azaltırken, türbinlerin ve kompresörlerin izentropik veriminin artışı  $\dot{E}x_{D,toplam}$  değerini sırasıyla %13.91 ve %4.42 azaltmıştır.
- Rüzgâr türbini, diğer sistem bileşenlerine kıyasla genel sistemin iyileştirme potansiyeli üzerinde daha etkilidir. Rüzgâr türbininin verimindeki artış  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV}$  değerini %77.82 oranında azaltırken, türbinlerin ve kompresörlerin izentropik veriminin artışı  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV}$  değerini sırasıyla %39.33 ve %18.73 oranında azaltmıştır. Bu da sistemin iyileştirme potansiyelinde en etkili ikinci bileşenin türbinler olduğunu göstermektedir.
- Türbinlerin izentropik verimindeki artışla birlikte,  $\dot{C}_{D,toplam}$  değeri %26.71 ve  $\dot{C}_{D,toplam}^{AV}$  %73.30 azalmıştır. Kompresörlerin izentropik verimindeki artış,  $\dot{C}_{D,toplam}$  ve  $\dot{C}_{D,toplam}^{AV}$  değerlerini sırasıyla %10.36 ve %31.83 azaltmıştır. Rüzgâr türbininin verimindeki artış  $\dot{C}_{D,toplam}$  değerini etkilememiştir. Bu

durumda türbin,  $\dot{C}_{D,toplam}$  değeri üzerinde diğer sistem bileşenlerine göre daha büyük bir etkiye sahiptir.

- Kompresörlerin izentropik verimindeki artışla birlikte  $\dot{Z}_{toplam}$  değeri %0.04 ve  $\dot{Z}_{toplam}^{AV}$  değeri %0.12 artmıştır. Türbinlerin izentropik veriminin artmasıyla  $\dot{Z}_{toplam}$  %0.006 ve  $\dot{Z}_{toplam}^{AV}$  değeri %0.005 artmıştır. Rüzgâr türbininin veriminin artmasıyla  $\dot{Z}_{toplam}$  değeri değişmezken,  $\dot{Z}_{toplam}^{AV}$  değeri %0.808 oranında artmıştır. Bu durumda sistemin maliyet oranını en çok etkileyen sistem bileşeni kompresörlerdir.
- Optimizasyon çalışması sonucunda TOPSIS yöntemi ile  $\eta_{RT}=\%93.9$ ,  $\eta_{K-1}=\%89.4$ ,  $\eta_{K-2}=\%89$  karar değişkenleri için nihai optimum sonuçlar elde edilmiştir.  $\eta_{RT}=\%93.3$ ,  $\eta_{K-1}=\%89.2$ ,  $\eta_{K-2}=\%89.9$ ,  $\varepsilon_{ID-1}=\%86.8$ ,  $\varepsilon_{ID-2}=\%95.3$ ,  $\varepsilon_{ID-3}=\%88.1$ ,  $\varepsilon_{ID-4}=\%94.1$ ,  $\eta_{T-1}=\%87.9$ ,  $\eta_{T-2}=\%90.7$  performans kriterleri ile elde edilmiştir. Sistemin temel durumuna göre,  $\eta_{sistem}$  ve  $c_{p,toplam}$  değerlerinde sırasıyla %17.03 ve %3.37'lik bir iyileşme olmuştur.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada güç üreten, rüzgâr türbini ile entegre edilmiş gelişmiş adyabatik sıkıştırılmış hava ile enerji depolama sistemi tasarlanmıştır. Önerilen sistemin geleneksel/ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen sistemin iyileştirme potansiyelini ve sistemin performansını etkileyen bileşenleri belirleme fırsatı sunmaktadır. Ayrıca sisteme ait anahtar parametrelerin sistem performansına etkisi parametrik bir çalışma ile incelenmiştir. Geleneksel/ileri ekserji ve eksergo ekonomik analizleri kapsamında NSGA-II yöntemi ile sistemin optimum çalışma noktaları bulunmuştur. Optimizasyon çalışması için sistemin türbin ve kompresörlerinin izentropik verimleri ile ısı değiştiricilerinin verimleri kararlı değişkenler olarak kabul edilirken, performans kriterlerini gösteren amaç fonksiyonları ise ekserji verimi ve sistemin toplam birim ürün maliyeti olarak ele alınmıştır

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen veriler şu şekilde özetlenebilir.

- Önerilen sistemin  $RTE$  değeri %47.27,  $\eta_{sistem}=\%55.23$  ve  $\dot{E}x_{D,toplam}=60.68$  GJ/gün olarak bulunmuştur.
- Önerilen sistemin  $\dot{E}x_{D,toplam}$  değerinin %44'ü ve  $\dot{C}_{D,toplam}$  değerinin %31'i kaçınılmaz kısım.  $\dot{Z}_{toplam}$  değerinin %10'u kaçınılmazdır. Bu değerler, genel sistem için iyileştirme potansiyelini göstermektedir.
- Geleneksel ekserji analizine göre en yüksek  $\dot{E}x_{D,k}$  değerini veren sistem bileşenleri sırasıyla RT, REG, ID-3, ID-2, T-1, T-2, K-2, K-1, ID-4 ve ID-1'dir. İleri ekserji analizinde bu sıralama RT, K-1, T-2, T-1, K-2, ID-2, ID-3, ID-1, ID-4 ve REG olarak değişmektedir. Bu sıralama, sistemin optimizasyonu için sistem bileşenlerinin öncelik sırasını gösterir.
- Sistemin en yüksek işletme maliyetlerine ( $\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k}$ ) sahip bileşenleri geleneksel eksergo-ekonomik analiz için 13644 \$/gün değeri ile RT ve ardından ID-3 (1466,77 \$/gün), T-2 (1427,71 \$/gün), REG (1314,44 \$/gün) ve T-1 (1309,98 \$/gün) olmaktadır. Gelişmiş eksergo-ekonomik analizde ( $\dot{C}_{D,k}^{AV,EN} + \dot{Z}_k^{AV,EN}$ ) değerine göre ise bu sıralama 11.476,65 \$/gün ile RT, T-2 (780,34 \$/gün), T-1 (715,01 \$/gün), K-2 (714,51 \$/gün) ve K-1 (686.29 \$/gün) olmaktadır.

- Rüzgâr türbininin verimindeki artış, sistemin ekserji yıkımının düşürülmesinde, diğer sistem bileşenlerine göre daha olumlu bir etkiye sahiptir. Rüzgâr türbininin verimindeki artış,  $\dot{E}x_{D,toplam}$  değerini % 48.51 oranında azaltırken, türbinlerin ve kompresörlerin izentropik verimlerinin artışı ise  $\dot{E}x_{D,toplam}$  değerini sırasıyla %13.91 ve %4.42 oranında azaltmaktadır.
- Rüzgâr türbini, diğer sistem bileşenlerine kıyasla genel sistemin iyileştirme potansiyeli üzerinde daha etkilidir. Rüzgâr türbininin verimindeki artış  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV}$  değerini % 77.82 oranında azaltırken, türbinlerin ve kompresörlerin izentropik verimindeki artış  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV}$  değerini % 39.33 ve % 18.73 oranında azaltmıştır. Bu da sistemin iyileştirme potansiyelinde en etkili ikinci bileşenin türbinler olduğunu göstermektedir.
- Türbinlerin izentropik verimindeki artışla birlikte  $\dot{C}_{D,toplam}$  ve  $\dot{C}_{D,toplam}^{AV}$  değerleri sırasıyla % 26.71 ve % 73.30 azalmıştır. Kompresörlerin izentropik verimindeki artış,  $\dot{C}_{D,toplam}$  değerini % 10.36 ve  $\dot{C}_{D,toplam}^{AV}$  değerini %31.83 oranında azaltmıştır. Rüzgâr türbininin verimindeki artış,  $\dot{C}_{D,toplam}$  değerini etkilememiştir. Bu durumda türbin, sistemin ekserji yıkım maliyeti üzerinde diğer sistem bileşenlerine göre daha fazla etkiye sahip olmaktadır.
- Kompresörlerin izentropik verimindeki artışla birlikte  $\dot{Z}_{toplam}$  ve  $\dot{Z}_{toplam}^{AV}$  değerleri sırasıyla %0.04 ve % 0.12 artmıştır. Türbinin izentropik veriminin artmasıyla  $\dot{Z}_{toplam}$  değeri % 0.006 ve  $\dot{Z}_{toplam}^{AV}$  değeri % 0.005 artmıştır. Rüzgâr türbininin verimindeki artış ile  $\dot{Z}_{toplam}$  değeri değişmezken,  $\dot{Z}_{toplam}^{AV}$  % 0.808 artmıştır. Bu durumda sistemin maliyetini en çok etkileyen sistem bileşeni kompresörlerdir.
- Optimizasyon çalışması sonucunda, kararlı değişkenler için TOPSIS yöntemi ile nihai optimum sonuçlar:  $\eta_{RT}=\%93.3$ ,  $\eta_{K-1}=\%89.2$ ,  $\eta_{K-2}=\%89.9$ ,  $\varepsilon_{ID-1}=\%86.8$ ,  $\varepsilon_{ID-2}=\%95.3$ ,  $\varepsilon_{ID-3}=\%88.1$ ,  $\varepsilon_{ID-4}=\%94.1$ ,  $\eta_{T-1}=\%87.9$ ,  $\eta_{T-2}=\%90.7$  elde edilmiştir. Optimum kararlı değişkenlere göre elde edilen performans kriterleri  $c_{p,toplam} = 162.9$  \$/gün ve  $\eta_{sistem} =\%64.3$  olarak bulunmuştur. Sistemin temel durumuna göre,

$\eta_{sistem}$  değerinde %16.48 ve  $c_{p,toplam}$  değerinde %3.55'lik bir iyileşme olmaktadır.

- İleri ekserji ve eksergo-ekonomik analizler için optimizasyon amaç fonksiyonları olan  $c_{p,AV,toplam}$  ve  $\eta_{sistem}^{adv}$  değerlerinin, geleneksel ekserji ve eksergo-ekonomik analiz için optimizasyon amaç fonksiyonlarının sonuçlarına çok yakın olduğu görülmüştür. Bu durum, literatürde yer almayan ve bu çalışmada yeni tanımlanan  $c_{p,AV,toplam}$  performans kriterinin ileri ekserji-ekonomik analiz kapsamında yapılacak bir optimizasyon çalışmasında amaç fonksiyonu olabileceğini doğrulamaktadır.

Tüm bu sonuçlarla, bu çalışma bir GA-SHED tesisi için uygulanabilir rehberlik sağlayabilir. Bu çalışmanın geliştirilmesindeki bir sonraki adım için, ileri ekserji/eksergo-ekonomik analizler konseptinde NSGA-II yöntemi ile elde edilen optimizasyon sonuçları farklı optimizasyon yöntemleri ile karşılaştırılabilir.

## 6. KAYNAKLAR

- Alirahmi, S. M., Bashiri Mousavi, S., Razmi, A. R., & Ahmadi, P. (2021). A comprehensive techno-economic analysis and multi-criteria optimization of a compressed air energy storage (CAES) hybridized with solar and desalination units. *Energy Conversion and Management*, 236(Mart), 114053.
- Anvari, S., Khoshbakhti Saray, R., & Bahlouli, K. (2015). Conventional and advanced exergetic and exergoeconomic analyses applied to a tri-generation cycle for heat, cold and power production. *Energy*, 91, 925–939.
- Asadi, M., Song, Y., Sunden, B., & Xie, G. (2014). Economic optimization design of shell-and-tube heat exchangers by a cuckoo-search-algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 73(1), 1032–1040.
- Bagdanavicius, A., & Jenkins, N. (2014). Exergy and exergoeconomic analysis of a Compressed Air Energy Storage combined with a district energy system. *Energy Conversion and Management*, 77, 432–440.
- Bai, H., Luo, S. H., Zhao, X., Zhao, G., & Gao, Y. (2022). Comprehensive assessment of a green cogeneration system based on compressed air energy storage (CAES) and zeotropic mixtures. *Energy*, 254, 124190.
- Budt, M., Wolf, D., Span, R., & Yan, J. (2016). A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments. *Applied Energy*, 170, 250–268.
- Buffa, F., Kemble, S., Manfrida, G., & Milazzo, A. (2013). Exergy and exergoeconomic model of a ground-based CAES plant for peak-load energy production. *Energies*, 6(2), 1050–1067.
- Cao, Y., Bashiri Mousavi, S., & Ahmadi, P. (2022). Techno-economic assessment of a biomass-driven liquid air energy storage (LAES) system for optimal operation with wind turbines. *Fuel*, 324, 124495.
- Cao, Y., Mansir, I. B., Mouldi, A., Alsharif, S., Aly, A. A., Jarad, F., Batcha, M. F. M., & Bouallegue, B. (2022). Sustainability and financial assessments and double-criteria optimization of a novel power/hydrogen coproduction scheme using solar power and compressed air energy storage cycle. *Journal of Energy Storage*, 52, 105053.
- Caputo, A. C., Pelagagge, P. M., & Salini, P. (2008). Heat exchanger design based on economic optimisation. *Applied Thermal Engineering*, 28(10), 1151–1159.
- Cavallo, A. (2007). Controllable and affordable utility-scale electricity from intermittent wind resources and compressed air energy storage (CAES). *Energy*, 32(2), 120–127.

- Deb, K., & Agrawal, R. B. (1994). Simulated Binary Crossover for Continuous Search Space The crossover operator is believed to be the main search operator in the working of a genetic. *Complex Systems*, 9(2), 115–148.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197.
- Drury, E., Denholm, P., & Sioshansi, R. (2011). The value of compressed air energy storage in energy and reserve markets. *Energy*, 36(8), 4959–4973.
- Ebadollahi, M., Rostamzadeh, H., Pedram, M. Z., Ghaebi, H., & Amidpour, M. (2019). Proposal and assessment of a new geothermal-based multigeneration system for cooling, heating, power, and hydrogen production, using LNG cold energy recovery. *Renewable Energy*, 135, 66–87.
- Ebrahimi, M., Carriveau, R., Ting, D. S. K., & McGillis, A. (2019). Conventional and advanced exergy analysis of a grid connected underwater compressed air energy storage facility. *Applied Energy*, 242, 1198–1208.
- Ghaebi, H., Parikhani, T., & Rostamzadeh, H. (2017). Energy, exergy and thermoeconomic analysis of a novel combined cooling and power system using low-temperature heat source and LNG cold energy recovery. *Energy Conversion and Management*, 150, 678–692.
- Grazzini, G., & Milazzo, A. (2012). A thermodynamic analysis of multistage adiabatic CAES. *Proceedings of the IEEE*, 100(2), 461–472.
- Han, Z., Guo, S., Wang, S., & Li, W. (2018). Thermodynamic analyses and multi-objective optimization of operation mode of advanced adiabatic compressed air energy storage system. *Energy Conversion and Management*, 174(Agustos), 45–53.
- Han, Z., Sun, Y., & Li, P. (2020). Thermo-economic analysis and optimization of a combined cooling, heating and power system based on advanced adiabatic compressed air energy storage. *Energy Conversion and Management*, 212(Ocak), 112811.
- Hartmann, N., Vöhringer, O., Kruck, C., & Eltrop, L. (2012). Simulation and analysis of different adiabatic Compressed Air Energy Storage plant configurations. *Applied Energy*, 93, 541–548.
- He, Q., Liu, H., Hao, Y., Liu, Y., & Liu, W. (2018). Thermodynamic analysis of a novel supercritical compressed carbon dioxide energy storage system through advanced exergy analysis. *Renewable Energy*, 127, 835–849.
- Ishaq, H., Dincer, I., & Naterer, G. F. (2018). Development and assessment of a solar, wind and hydrogen hybrid trigeneration system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(52), 23148–23160.

- Ishaq, Haris, Dincer, I., & Naterer, G. F. (2018). Performance investigation of an integrated wind energy system for co-generation of power and hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(19), 9153–9164.
- Jiang, R., Cai, Z., Peng, K., & Yang, M. (2021). Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of polygeneration system based on advanced adiabatic compressed air energy storage system. *Energy Conversion and Management*, 229(Eylül 2020), 113724.
- Jiang, R., Yin, H., Peng, K., & Xu, Y. (2019). Multi-objective optimization, design and performance analysis of an advanced trigenerative micro compressed air energy storage system. *Energy Conversion and Management*, 186(Aralık 2018), 323–333.
- Jin, H., Liu, P., & Li, Z. (2019). Dynamic modeling and design of a hybrid compressed air energy storage and wind turbine system for wind power fluctuation reduction. *Computers & Chemical Engineering*, 122, 59–65.
- Jubeh, N. M., & Najjar, Y. S. H. (2012). Green solution for power generation by adoption of adiabatic CAES system. *Applied Thermal Engineering*, 44, 85–89.
- Keshtkar, M. M., & Khani, A. G. (2018). Exergoeconomic analysis and optimization of a hybrid system based on multi-objective generation system in Iran: a case study. *Renewable Energy Focus*, 27(Aralık), 1–13.
- Kim, Y. M., & Favrat, D. (2010). Energy and exergy analysis of a micro-compressed air energy storage and air cycle heating and cooling system. *Energy*, 35(1), 213–220.
- Küçük, H., Ünverdi, M., & Senan Yılmaz, M. (2019). Experimental investigation of shell side heat transfer and pressure drop in a mini-channel shell and tube heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 143, 118493.
- Kwak, H. Y., Uysal, C., Ozen, D. N., & Kurt, H. (2020). A comparative assessment of SPECO and MOPSA on costing of exergy destruction. *International Journal of Exergy*, 32(1), 62.
- Lashgari, F., Babaei, S. M., Pedram, M. Z., & Arabkoohsar, A. (2022). Comprehensive analysis of a novel integration of a biomass-driven combined heat and power plant with a compressed air energy storage (CAES). *Energy Conversion and Management*, 255, 115333.
- Li, P., Hu, Q., Han, Z., Wang, C., Wang, R., Han, X., & Wang, Y. (2022). Thermodynamic analysis and multi-objective optimization of a trigenerative system based on compressed air energy storage under different working media and heating storage media. *Energy*, 239, 122252.
- Li, Y., Wang, X., Li, D., & Ding, Y. (2012). A trigeneration system based on compressed air and thermal energy storage. *Applied Energy*, 99, 316–323.

- Liu, B., Chen, L., Mei, S., Liu, F., Wang, J., & Wang, S. (2014). The impact of key parameters on the cycle efficiency of multi-stage RCAES system. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2(4), 422–430.
- Liu, H., He, Q., & Saeed, S. Bin. (2016). Thermodynamic analysis of a compressed air energy storage system through advanced exergetic analysis. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 8(3).
- Liu, J. L., & Wang, J. H. (2016). A comparative research of two adiabatic compressed air energy storage systems. *Energy Conversion and Management*, 108, 566–578.
- Liu, Z., Liu, B., Guo, J., Xin, X., & Yang, X. (2019). Conventional and advanced exergy analysis of a novel transcritical compressed carbon dioxide energy storage system. *Energy Conversion and Management*, 198(Temmuz), 111807.
- Lund, H., & Salgi, G. (2009). The role of compressed air energy storage (CAES) in future sustainable energy systems. *Energy Conversion and Management*, 50(5),
- Luo, X., Wang, J., Dooner, M., & Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 137, 511–536.
- Luo, X., Wang, J., Krupke, C., Wang, Y., Sheng, Y., Li, J., Xu, Y., Wang, D., Miao, S., & Chen, H. (2016). Modelling study, efficiency analysis and optimisation of large-scale Adiabatic Compressed Air Energy Storage systems with low-temperature thermal storage. *Applied Energy*, 162, 589–600.
- Marmolejo-Correa, D., & Gundersen, T. (2012). A comparison of exergy efficiency definitions with focus on low temperature processes. *Energy*, 44(1), 477–489.
- Mazloum, Y., Sayah, H., & Nemer, M. (2017). Exergy analysis and exergoeconomic optimization of a constant-pressure adiabatic compressed air energy storage system. *Journal of Energy Storage*, 14, 192–202.
- Mehrpooya, M., Ansarinasab, H., Sharifzadeh, M. M. M., & Rosen, M. A. (2018). Conventional and advanced exergoeconomic assessments of a new air separation unit integrated with a carbon dioxide electrical power cycle and a liquefied natural gas regasification unit. *Energy Conversion and Management*, 163, 151–168.
- Mitali, J., Dhinakaran, S., & Mohamad, A. A. (2022). Energy storage systems: a review. *Energy Storage and Saving*, 1(3), 166–216.
- Mohammadkhani, F., Shokati, N., Mahmoudi, S. M. S., Yari, M., & Rosen, M. A. (2014). Exergoeconomic assessment and parametric study of a Gas Turbine-Modular Helium Reactor combined with two Organic Rankine Cycles. *Energy*, 65, 533–543.
- Montazerinejad, H., Ahmadi, P., & Montazerinejad, Z. (2019). Advanced exergy, exergoeconomic and exergo-environmental analyses of a solar based trigeneration energy system. *Applied Thermal Engineering*, 152, 666–685.

- Mousavi, S. B., Ahmadi, P., Pourahmadiyan, A., & Hanafizadeh, P. (2021). A comprehensive techno-economic assessment of a novel compressed air energy storage (CAES) integrated with geothermal and solar energy. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47(Mayıs), 101418.
- Mucci, S., Bischi, A., Briola, S., & Baccioli, A. (2021). Small-scale adiabatic compressed air energy storage: Control strategy analysis via dynamic modelling. *Energy Conversion and Management*, 243, 114358.
- Olabi, A. G., Wilberforce, T., Ramadan, M., Abdelkareem, M. A., & Alami, A. H. (2020). Compressed air energy storage systems: Components and operating parameters – A review. In *Journal of Energy Storage* (Vol. 34, p. 102000). Elsevier Ltd.
- Özen, D. N., & Koçak, B. (2022). Advanced exergy and exergo-economic analyses of a novel combined power system using the cold energy of liquefied natural gas. *Energy*, 248, 123531.
- Panda, A., Mishra, U., & Aviso, K. B. (2020). Optimizing hybrid power systems with compressed air energy storage. *Energy*, 205, 117962.
- Patel, M. R. (1999). *Wind and Solar Power Systems*.
- Petrakopoulou, F., Tsatsaronis, G., & Morosuk, T. (2013). Evaluation of a power plant with chemical looping combustion using an advanced exergoeconomic analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 3, 9–16.
- Razmi, A. R., & Janbaz, M. (2020). Exergoeconomic assessment with reliability consideration of a green cogeneration system based on compressed air energy storage (CAES). *Energy Conversion and Management*, 204(Aralık 2019), 112320.
- She, X., Zhang, T., Cong, L., Peng, X., Li, C., Luo, Y., & Ding, Y. (2019). Flexible integration of liquid air energy storage with liquefied natural gas regasification for power generation enhancement. *Applied Energy*, 251, 113355.
- Shi, K., & Asgari, A. (2022). Energy, exergy, and exergoeconomic analyses and optimization of a novel thermal and compressed air energy storage integrated with a dual-pressure organic Rankine cycle and ejector refrigeration cycle. *Journal of Energy Storage*, 47, 103610.
- Su, D. (2021). Comprehensive thermodynamic and exergoeconomic analyses and multi-objective optimization of a compressed air energy storage hybridized with a parabolic trough solar collectors. *Energy*, 122568.
- Szablowski, L., Krawczyk, P., Badyda, K., Karellas, S., Kakaras, E., & Bujalski, W. (2017). Energy and exergy analysis of adiabatic compressed air energy storage system. *Energy*, 138, 12–18.
- Wang, Z., Xiong, W., Ting, D. S. K., Carriveau, R., & Wang, Z. (2016). Conventional and advanced exergy analyses of an underwater compressed air energy storage system. *Applied Energy*, 180, 810–822.

- Wu, J., Pan, Z., Binama, M., Shang, L., & Zhou, L. (2022). Exergoeconomic analysis and multi-objective whale optimization of an integrated solid oxide fuel cell and energy storage system using liquefied natural gas cold energy. *International Journal of Energy Research*.
- Wu, S., Zhou, C., Doroodchi, E., & Moghtaderi, B. (2020). Techno-economic analysis of an integrated liquid air and thermochemical energy storage system. *Energy Conversion and Management*, 205(Aralık 2019), 112341.
- Xu, X., Ziwang, Y. E., & Qian, Q. (2022). Economic, exergoeconomic analyses of a novel compressed air energy storage-based cogeneration. *Journal of Energy Storage*, 51, 104333.
- Yan, L., & Gao, Y. (2022). Economic and exergoeconomic analyses of a cogeneration based on adiabatic compressed air energy storage and zeotropic mixtures. *Journal of Energy Storage*, 51, 104413.
- Yang, X., Yang, S., Wang, H., Yu, Z., Liu, Z., & Zhang, W. (2022). Parametric assessment, multi-objective optimization and advanced exergy analysis of a combined thermal-compressed air energy storage with an ejector-assisted Kalina cycle. *Energy*, 239, 122148.
- Yao, E., Wang, H., Wang, L., Xi, G., & Maréchal, F. (2016). Thermo-economic optimization of a combined cooling, heating and power system based on small-scale compressed air energy storage. *Energy Conversion and Management*, 118, 377–386.
- Yao, E., Wang, H., Wang, L., Xi, G., & Maréchal, F. (2017). Multi-objective optimization and exergoeconomic analysis of a combined cooling, heating and power based compressed air energy storage system. *Energy Conversion and Management*, 138, 199–209.
- Zare, V., Mahmoudi, S. M. S., & Yari, M. (2013). An exergoeconomic investigation of waste heat recovery from the Gas Turbine-Modular Helium Reactor (GT-MHR) employing an ammonia–water power/cooling cycle. *Energy*, 61, 397–409.
- Zhang, T., She, X., & Ding, Y. (2021). A power plant for integrated waste energy recovery from liquid air energy storage and liquefied natural gas. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 34, 242–257.
- Zhang, X., Zeng, R., Deng, Q., Gu, X., Liu, H., He, Y., Mu, K., Liu, X., Tian, H., & Li, H. (2019). Energy, exergy and economic analysis of biomass and geothermal energy based CCHP system integrated with compressed air energy storage (CAES). *Energy Conversion and Management*, 199(Ağustos), 111953.
- Zhang, Y., Liang, T., Yang, C., Zhang, X., & Yang, K. (2020). Advanced exergy analysis of an integrated energy storage system based on transcritical CO<sub>2</sub> energy storage and Organic Rankine Cycle. *Energy Conversion and Management*, 216(Mayıs).

- Zhang, Y., Yao, E., & Wang, T. (2021). Comparative analysis of compressed carbon dioxide energy storage system and compressed air energy storage system under low-temperature conditions based on conventional and advanced exergy methods. *Journal of Energy Storage*, 35(Ekim 2020), 102274.
- Zhao, P., Gou, F., Xu, W., Shi, H., & Wang, J. (2023). Multi-objective optimization of a hybrid system based on combined heat and compressed air energy storage and electrical boiler for wind power penetration and heat-power decoupling purposes. *Journal of Energy Storage*, 58, 106353.
- Zunft, S., Jakiel, C., Koller, M., & Bullough, C. (2006). Adiabatic Compressed Air Energy Storage for the Grid Integration of Wind Power. *Sixth International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Windfarms*, Ekim, 26–28.

