



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN  
ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**JEOTERMAL VE BİYOKÜTLE  
KAYNAKLARI İLE HİDROJEN ÜRETEN  
YENİ BİR GÜÇ SİSTEMİNİN İLERİ EKSERJİ  
VE EKSERGO-EKONOMİK ANALİZLERİ**  
Yağmur ÇAĞLI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Haziran-2025  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Yağmur Çağlı tarafından hazırlanan “Jeotermal ve Biyokütle Kaynakları ile Hidrojen Üreten Yeni Bir Güç Sisteminin İleri Ekserji ve Eksergo-Ekonomik Analizleri” adlı tez çalışması 11/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

#### Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Numan Kaya

#### Danışman

Doç. Dr. Dilek Nur Özen

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Esra Hançer Güleriyüz

### İmza

.....

.....

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun ....../.../20.. gün ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY  
FBE Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Yağmur ÇAĞLI

Tarih:

# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

### JEOTERMAL VE BİYOKÜTLE KAYNAKLARI İLE HİDROJEN ÜRETEN YENİ BİR GÜÇ SİSTEMİNİN İLERİ EKSERJİ VE EKSERGO-EKONOMİK ANALİZLERİ

Yağmur ÇAĞLI

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç.Dr. Dilek Nur ÖZEN

2025,51 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Dilek Nur Özen

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Numan Kaya

Dr. Öğr. Üyesi Esra Hançer Güteryüz

Bu çalışma, sürdürülebilir hidrojen üretimi sorununa çözüm olarak, ısı talebini karşılarken yeşil hidrojen üretimi sağlayan biyokütle gazlaştırması ve jeotermal enerjiyi entegre eden hibrit bir güç sistemi önermektedir. Sistemin yeniliği, iki yenilenebilir enerji kaynağının bir proton değişim membranlı (PEM) elektrolizör ile birleştirilmesi ve verimsizliklerin belirlenmesinde ileri ekserji tabanlı tekniklerin uygulanmasında yatmaktadır. Yöntem kapsamında geleneksel ve ileri ekserji ile eksergo-ekonomik analizler gerçekleştirilmiş; bunlara ek olarak, maliyet ve verimlilik iyileştirmelerini hedefleyen duyarlılık analizleri ve tek amaçlı optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Sonuçlara göre, en yüksek geri döndürülemezlik ve maliyete sahip bileşenler gazlaştırıcı (76.26 MW), genleşme vanası-2 (4.01 MW), ısı değiştirici-4 (3.83 MW) ve ısı değiştirici-1 (1.16 MW) olmuştur. İleri analiz sonucunda, iyileştirme açısından en kritik bileşenler gazlaştırıcı (4.60 MW), türbin-1 (0.27 MW), kompresör-1 (0.21 MW) ve kompresör-2 (0.12 MW) olarak belirlenmiştir. Optimizasyon sonucunda ekserji verimi ( $\eta_{ekserji}$ ) %8.69'dan %14.99'a yükselmiş, ortalama birim ürün maliyeti ( $c_{p,amaç,toplam}$ ) ise 34.28 \$/GJ'den 18.04 \$/GJ'ye düşürülerek sırasıyla %72.38 ve %47.37 oranlarında iyileştirme sağlanmıştır. Bu bulgular, önerilen sistemin yenilenebilir enerji kaynaklarını birleştirerek düşük emisyonlu ve maliyet etkin hidrojen üretimi için etkili olduğunu doğrulamaktadır. Kullanılan yöntem ve elde edilen sonuçlar, gelecekteki sürdürülebilir enerji tasarımları için pratik bir rehber sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Biyokütle enerjisi, Hidrojen üretimi, İleri eksergo-ekonomik analiz, İleri ekserji analizi, Jeotermal enerji, Proton değişim membranlı (PEM) elektrolizör

## ABSTRACT

## MS THESIS

# ADVANCED EXERGY AND EXERGO-ECONOMIC ANALYSES OF A NOVEL POWER SYSTEM PRODUCING HYDROGEN DRIVEN BY GEOTHERMAL AND BIOMASS SOURCES

Yağmur ÇAĞLI

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

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Dilek Nur ÖZEN

2025, 51 Pages

Jury

Doç. Dr. Dilek Nur Özen

Asst. Prof. Dr. Mehmet Numan Kaya

Asst. Prof. Dr. Esra Hançer Gülerüz

This study addresses the challenge of sustainable hydrogen production by proposing a hybrid power system that integrates biomass gasification and geothermal energy to produce green hydrogen while meeting heat demand. The novelty of the system lies in the combination of two renewable energy sources with a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer and the application of advanced exergy-based techniques to pinpoint inefficiencies. The methodology includes conventional and advanced exergy and exergoeconomic analyses, supported by sensitivity and single-objective optimization studies targeting both cost and efficiency improvements. Results show that the components with the highest irreversibility and cost are the gasifier (76.26 MW), expansion valve-2 (4.01 MW), heat exchanger-4 (3.83 MW), and heat exchanger-1 (1.16 MW). Advanced analysis identifies the gasifier (4.60 MW), turbine-1 (0.27 MW), and compressor-1 (0.21 MW) and compressor-2 (0.12 MW) as the most critical for improvement. Through optimization, exergy efficiency ( $\eta_{exergy}$ ) increased from 8.69% to 14.99%, and the average unit product cost ( $c_{p,aim,total}$ ) decreased from 34.28 to 18.04 \$/GJ representing improvements of 72.38% and 47.37%, respectively. These findings confirm the effectiveness of the proposed system in combining renewable energy sources for cost-effective and low-emission hydrogen production. The methodology and results offer practical guidance for future sustainable energy designs.

**Keywords:** Advanced exergo-economic analysis, Advanced exergy analysis, Biomass energy, Geothermal energy, Hydrogen production, Proton exchange membrane (PEM) electrolyzer

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışması süresince bilgisi, tecrübesi, emeği ve her türlü desteği ile beni yönlendiren Değerli Hocam Doç. Dr. Dilek Nur Özen'e sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca destekleri ile her zaman arkamda duran tüm Sayın Hocalarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca sevgileri ile her daim yanımda olan sevgili eşim Yunus Çağlı'ya, çocuklarıma, aileme, bana verdikleri emek, maddi ve manevi her türlü destek ve duydukları sonsuz güven için sonsuz teşekkür ederim.

Yağmur ÇAĞLI  
KONYA-2025

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGE DİZİNİ.....	xi
<b>1.GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>3</b>
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>9</b>
3.1. Sistemin Çalışma Prensibi .....	9
3.1.1. Proton değişim membranlı (PEM) elektroliz çalışma prensibi.....	10
3.2. Sistemin Matematik Modeli ve Kabuller .....	11
3.2.1. Enerji analizi .....	12
3.2.2. Biyokütle gazlaştırma modeli .....	13
3.2.3. Proton değişim membranlı elektrolizör (PEME) modeli.....	15
3.2.4. Geleneksel ekserji analizi .....	18
3.2.5. Geleneksel eksergo-ekonomik analiz .....	20
3.2.6. İleri ekserji analizi .....	24
3.2.7. İleri eksergo-ekonomik analizi .....	26
3.2.8. Sistemin performans kriterleri .....	27
3.2.9. Sistemin duyarlılık analizi .....	28
3.2.10. Sistemin optimizasyon çalışması .....	28
3.2.11. Sistemin doğrulama çalışması .....	28
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....</b>	<b>31</b>
4.1. Enerji, Geleneksel Ekserji ve İleri Ekserji Analiz Sonuçları.....	31
4.2. Geleneksel ve İleri Eksergo-Ekonomik Analiz Sonuçları .....	34
4.3. Duyarlılık Analizi ve Optimizasyon Çalışmasının Sonuçları.....	39
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>45</b>
<b>6.KAYNAKLAR .....</b>	<b>46</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Kısaltmalar

EES	: Engineering Equation Solver
FT	: Flanş Tankı
G	: Gazlaştırıcı
GV	: Genleşme Valfi
ID	: Isı değiştiricisi
K	: Kompresör
PEME	: Proton değişim membranlı elektrolizör
SPECO	: Özgöl ekserji maliyeti
T	: Türbin

### Simgeler

$A$	: Isı transfer yüzeyi ( $m^2$ )
$c$	: Birim ekserji maliyeti ( $\$/kJ$ )
$c_{f,k}$	: Bileşen $k$ 'nin besleme birim ekserji maliyeti ( $\$/kJ$ )
$c_{p,amaç,toplam}$	: Ortalama birim ürün maliyeti ( $\$/GJ$ )
$c_{p,amaç,toplam}^{adv}$	: Ortalama modifiye birim ürün maliyeti ( $\$/GJ$ )
$c_{p,k}$	: Bileşen $k$ 'nin ürün birim ekserji maliyeti ( $\$/kJ$ )
$\dot{C}$	: Maliyet oranı ( $\$/s$ )
$\dot{E}x$	: Ekserji oranı (kW)
$\dot{E}x_{in}$	: Giriş ekserji oranı (kW)
$\dot{E}x_{F,k}$	: Bileşen $k$ 'nin besleme ekserji oranı (kW)
$\dot{E}x_{P,k}$	: Bileşen $k$ 'nin ürün ekserji oranı (kW)
$h$	: Özgöl entalpi (kJ/kg)
$\dot{m}$	: Kütlesel debi (kg/s)
$P_R$	: Basınç oranı
$\dot{Q}$	: Isı transfer oranı (kW)
$s$	: Özgöl entropi (kJ/(kg·K))
$T$	: Sıcaklık (K)
$\dot{W}$	: Bileşenler tarafından üretilen veya tüketilen güç (kW)
$\dot{Z}_k$	: Bileşen $k$ 'nin sermaye maliyet oranı ( $\$/s$ )

### Üst indisler

$adv$	: İleri
$AV$	: Kaçınılabilir
$CHE$	: Kimyasal
$EN$	: Endojen
$EX$	: Eksojen
$KN$	: Kinetik
$UN$	: Kaçınılamaz

## Alt indisler

0	: Referans çevre durumu
<i>D</i>	: Yıkım
GV-1	: Birinci genişleme valfi
GV-2	: İkinci genişleme valfi
ID-1	: Birinci ısı değiştirici
ID-2	: İkinci ısı değiştirici
ID-3	: Üçüncü ısı değiştirici
ID-4	: Dördüncü ısı değiştirici
<i>giriş</i>	: Giriş
K-1	: Birinci kompresör
K-2	: İkinci kompresör
<i>T</i> -1	: Birinci türbin
<i>T</i> -2	: İkinci türbin

## Yunan Harfleri

$\eta_{enerji}$	: Sistemin enerji verimi (%)
$\eta_{ekserji}$	: Sistemin ekserji verimi (%)
$\eta_{ekserji}^{adv}$	: İleri ekserji verimi (%)
$\eta_k$	: Kompresör izentropik verimi (%)
$\eta_T$	: Türbin izentropik verimi (%)

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Hidrojen Üretimi jeotermal ve biyokütle enerjisiyle çalışan çok nesil bir sistemin modellenmesi.....	10
Şekil 3.2. Sentez gazının ortalama özgül ısısının sıcaklığa göre değişimi.....	15
Şekil 3.3. $EX_{D,k}$ bölümlerini elde etmek için kullanılan denklemler(Özen ve ark., 2022)..	25
Şekil 3.4. Ekserji yıkım maliyet ve yatırım maliyet hız oranlarının hesaplanması için kullanılan denklemler (Özen, 2024 ; Gülerüz,2022).....	26
Şekil 3.5. PEME modelinin ref. (Yılmaz, 2024) ile doğrulama grafiği.....	29
Şekil 4.1. Tüm sistem ve sistem bileşenleri için ekserji yıkım oranları yüzdelik değerleri. ....	34
Şekil 4.2. Sistem bileşenleri için ekserji yıkım maliyetleri oranının yüzdelik değerleri...37	
Şekil 4.3. Sistem bileşenleri için yatırım maliyeti oranlarının yüzdelik değerleri.....	39
Şekil 4.4. (a,b) ID-1 ve ID-2'nin sıcaklık farkının değişiminin, $\eta_{enerji}$ , $\eta_{ekserji}$ ve $C_{p,amaç,toplam}$ değerleri üzerindeki etkisini göstermektedir.....	40
Şekil 4.5.(c) T-1'in basınç oranının değişiminin $\eta_{enerji}$ , $\eta_{ekserji}$ ve $C_{p,amaç,toplam}$ değerleri üzerindeki etkisini göstermektedir. ....	40
Şekil 4.6.(a) Gazlaştırıcı sıcaklığının, (b) ise jeotermal sıcaklığı değişiminin $\eta_{enerji}$ , $\eta_{ekserji}$ ve $C_{p,amaç,toplam}$ değerleri üzerindeki etkisini göstermektedir. ....	41
Şekil 4.7.(a) flanş basıncının (P2) değişimini, (b, c) PEME akım yoğunluğunun değişiminin $\eta_{enerji}$ , $\eta_{ekserji}$ ve $C_{p,amaç,toplam}$ değerleri üzerindeki etkisini gösterir.....	43

## ÇİZELGE DİZİNİ

<b>Çizelge 2.1.</b> Literatürde Biyokütle ve jeotermal sistemlerin geleneksel/ileri ekserji eksergo-ekonomik analizleri üzerine çalışmalar.....	6
<b>Çizelge 3.1.</b> Tasarım girdi parametreleri.....	11
<b>Çizelge 3.2.</b> Sistem bileşenlerine ait yatırım denklemleri.....	23
<b>Çizelge 3.3.</b> Isı geçiş dağılımı.....	24
<b>Çizelge 3.4.</b> Sistem bileşenlerine ait gerçek, ideal ve kaçınılmaz koşulları (Lv ve ark., 2023; Alirahmi ve ark.,2022 ; Güteryüz,2023; Liu ve ark.,2020; Srinivas ve ark., 2009; Fallah ve ark.,2022;Alirahmi ve ark.,2022; Haghghi ve ark., 2023; Baghernejad ve ark., 2015; Moharamian ve ark., 2018).....	25
<b>Çizelge 3.5.</b> Karar değişkenlerinin değişken aralığı.....	28
<b>Çizelge 3.6.</b> Jeotermal açık güç çevrimi için mevcut model ile ref.(Wang ve ark., 2015) çalışmasının karşılaştırılması .....	29
<b>Çizelge 3.7.</b> Biyokütlenin gazlaştırılma modelinin mevcut çalışma ve ref. (Habibollahzade ve ark., 2021) çalışması ile karşılaştırılması .....	30
<b>Çizelge 4.1.</b> Gerçek koşullar altında her bir noktanın termofiziksel özellikleri, ekserji yıkım oranları ve eksergo-ekonomik analiz sonuçları.....	31
<b>Çizelge 4.2.</b> Sistem bileşenlerinin geleneksel ekserji ve ileri ekserji analiz sonuçları....	32
<b>Çizelge 4.3.</b> Sistem bileşenlerinin ileri ekserji analiz sonuçları. ....	33
<b>Çizelge 4.4.</b> Sistem bileşenleri için ekserji yıkım maliyet oranları. ....	35
<b>Çizelge 4.5.</b> Sistem bileşenleri için ekserji yıkım maliyet oranları devamı.....	36
<b>Çizelge 4.6.</b> Sistem bileşenlerinin geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analiz sonuçları. ....	38
<b>Çizelge 4.7.</b> Kararlı Değişkenlerin Durumuna Göre Optimizasyon Çalışması.....	44
<b>Çizelge 4.8.</b> Optimize Edilmiş Durum ile Sistemin Genel Durumu Karşılaştırması.....	44

## 1.GİRİŞ

Jeotermal ve biyokütle enerji sistemlerinin yeşil hidrojen üretimi amacıyla birleştirilmesi, sürdürülebilir enerji çözümleri için uygulanabilir bir yoldur. Fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjiyle suyun elektrolizi yoluyla üretilen yeşil hidrojen, karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltan temiz bir enerji kaynağıdır (David ve ark.,2019). Jeotermal ve biyokütle enerjisinin birleşimi, hidrojen üretim verimliliğini artırmanın yanı sıra enerji altyapısını da daha sağlam hale getirmektedir. Tarım atıkları, orman artıkları ve kentsel katı atıklar gibi biyokütle örnekleri, gazlaştırma ve anaerobik sindirim gibi çeşitli tekniklerle hidrojen açısından zengin gazlara dönüştürülebilmektedir (David ve ark.,2019). Atık malzemelerin kullanılması nedeniyle, bu hidrojen üretim yöntemi atık yönetimi sorunlarına çözüm sağlarken aynı zamanda enerji üretimi açısından da oldukça faydalı olmaktadır (Cormos ,2023). Yapılan çalışmalar, biyokütle gazlaştırmasının güneş ve jeotermal enerji gibi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla daha üstün enerji ve ekserji verimi sağladığını göstermiştir (Awaleh ve ark.,2023). Ayrıca, biyokütle jeotermal enerjiyle birleştirildiğinde, hidrojen üretimi için gerekli olan sürekli ve kesintisiz enerji kaynağını sağlayabilmektedir (Ghazvini ve ark.,2016). Dünyanın iç ısısından elde edilen jeotermal enerji, sabit ve güvenilir bir enerji kaynağı sunarak hidrojen üretiminde kullanılabilir. Jeotermal enerji, elektrolizörleri doğrudan beslemek veya termokimyasal çevrimler aracılığıyla hidrojen üretmek için kullanılmaktadır (Ghazvini ve ark.,2019). Araştırmalar, jeotermal enerjinin özellikle her iki kaynağın da bol bulunduğu bölgelerde biyokütle sistemlerine faydalı bir katkı sağlayabileceğini göstermektedir (Ahmadi ve ark.,2018). Örneğin, jeotermal ısı biyokütle gazlaştırma işlemlerinin verimliliğini artırarak hidrojen verimini yükseltebilmektedir (Yüksel ,2020). Ayrıca, güneş ve rüzgâr gibi diğer yenilenebilir kaynaklarla sıkça ilişkilendirilen kesintilik sorunları, hidrojen üretim sistemlerine jeotermal enerjinin entegre edilmesiyle azaltılabilmektedir (Pascuzzi ve ark.,2016). Araştırmacılar, bu tür entegre sistemlerin ekonomik açıdan uygulanabilirliğini de incelemiştir. Karşılaştırmalı analizlere göre, jeotermal ve biyokütle enerjisini birleştirerek hidrojen üreten sistemler benzer maliyet ve işletim verimliliklerine ulaşabilmektedir (Awaleh ve ark.,2022). Bu sistemler, her iki enerji kaynağının avantajlarını kullanarak daha düşük maliyetli ve çevre dostu hidrojen üretimi sağlayabilir ve hidrojen ekonomisine geçiş yönündeki küresel çabalara destek olmaktadır (Löhr ve ark.,2016). Ayrıca, bu tür sistemlerin uygulanması fosil yakıtlara

olan bağımlılığı azaltabilir ve enerji güvenliğini teşvik edebilir; bu da iklim değişikliği ve enerji sürdürülebilirliği bağlamında kritik öneme sahiptir (Yusupov ve ark., 2022). Sonuç olarak, yeşil hidrojen üretimi için jeotermal ve biyokütle enerji kaynaklarının birleştirilmesi, sürdürülebilir enerji hedeflerine ulaşmak için bütüncül bir stratejidir. Bu yöntem yalnızca hidrojen üretim verimliliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda atık malzemeler ve yer altı jeotermal kaynaklarının kullanımı sayesinde çevresel ve ekonomik açıdan daha geniş hedeflere katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada biyokütle ve jeotermal enerjiye dayalı yeni bir yeşil hidrojen ve ısı üreten güç sistemi tasarlanmıştır. Literatürde jeotermal ve biyokütle enerjisine dayalı hidrojen üreten güç sistemlerinin ileri ekserji ve ileri eksergo-ekonomik analizleri üzerine herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Önceki çalışmalardan farklı olarak, bu araştırmada hem geleneksel hem de gelişmiş ekserji/eksergoekonomik analizler uygulanarak kapsamlı bir termodinamik ve ekonomik değerlendirme yapılmaktadır. Bu tezde, literatürdeki bu boşluğa katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Çünkü geleneksel ekserji ve eksergo-ekonomik analizler karar vericiye sistemin genel performansı hakkında detaylı bilgi sağlamaz ve iyileştirme konusunda onlara rehberlik edemez. Bu çalışmanın literatüre başlıca katkıları aşağıda verilmiştir:

- Sürdürülebilir enerji sistemlerine katkı sağlayacak yeni bir güç sistemi tasarlandı.
- Önerilen sistemin detaylı matematiksel modeli oluşturulmuş ve enerji analizi, geleneksel ekserji analizi, geleneksel eksergo-ekonomik analiz, ileri ekserji analizi ve ileri eksergo-ekonomik analiz yapılmıştır.
- Bu çalışmada, jeotermal ve biyokütle enerjisine dayalı hidrojen üreten güç sistemleri için literatürde ilk kez ileri ekserji analizi ve ileri eksergo-ekonomik analiz yapılmıştır.
- Hem geleneksel hem de ileri ekserji/eksergo-ekonomik analiz konseptlerinde sistemin performansını etkileyen karar değişkenleri ve performans kriterlerini temsil eden amaç fonksiyonları belirlenerek duyarlılık analizi ve optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır.

Bu çalışma, bir sistem tasarımı, bu sistemin geçerli denklemlerle matematiksel modellenmesi, karar değişkenleri ile performans kriterlerinin belirlenmesi ve ileri analiz teknikleri sunarak sürdürülebilir enerji sistemleri için karar vericilere yol göstermeyi amaçlamaktadır.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatürde jeotermal ve biyokütle enerjisine dayalı hidrojen üreten güç sistemlerinin ileri ekserji ve ileri eksergo-ekonomik analizleri üzerine herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu bölümde, literatürde ekserji analizi, eksergoekonomik analiz, ileri ekserji analizi ve ileri eksergoekonomik analiz ile alakalı yapılmış olan çalışmalar tez çalışmasının yenilikçi yönü ekseninde taranmış ve hazırlanan karşılaştırmalı çizelgeler ile sunulmuştur.

Xing ve ark., (2022) yaptıkları çalışmada karbondioksit yakalamalı, ısıtma, soğutma, güç ve hidrojen üretimini merkezleyen biyokütle ve jeotermal tahrikli hibrit bir üretim santrali geliştirmişlerdir. Tasarlana sistem hidrojen ve elektrik enerjisi üretmektedir. Bunların yanı sıra ısıtma ve soğutma etkisi de sağlamaktadır. Üzerinde çalışılan sistemin enerji verimliliği %79.47 ve ekserji verimliliği ise %17.87 olarak bulunmuştur. Sistem yaklaşık olarak 22.23MW net güç sağlamaktadır.

Yüksel ve ark., (2017) yaptıkları çalışmalarında, enerji kaynağı olarak jeotermal ısı kullanılan yeni çok nesilli sistem geliştirmişlerdir. Çok nesilli jeotermal enerji üretim sistemi beş ana alt sistemden oluşmaktadır; jeotermal enerji santrali, ORC, Dörtlü Etkili Absorpsiyonlu Soğutma Sistemi, PEM elektrolizörü ve evsel sıcak su alt sistemi. Parametrik çalışmalar, kondenser sıcaklığının, türbin giriş basıncının, buharlaştırıcı sıcaklığının veya ORC türbin giriş sıcaklığının artmasının elektrik enerjisi üretimi ve hidrojen üretimi üzerinde olumsuz etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Bai ve ark., (2023) yaptıkları çalışmada, jeotermal ve biyokütle enerjisiyle çalışan tatlı su kojenerasyon santrali geliştirmişlerdir. Tasarladıkları tesis jeotermal enerjinin rankin çevrimi performansını artırmak için kullanılmaktadır.

Fan ve ark., (2023) yaptıkları araştırmada, hibrit biyokütle yakıtıyla çalışan yeni bir Elektrik Üretim Sistemi (EGS) ve jeotermal kaynak geliştirilmiş ve performansı sadece biyokütle yakıtı ile sağlanmıştır.

Ganjehsarabi ve ark., (2012) yaptıkları çalışmada endüstriyel üretim için güç, sıcak su, soğutma, faydalı ısı ve ısıtma için jeotermal enerji santrali ve parabolik güneş kolektörü sistemine dayalı yeni birçok üretim sistemini analiz etmişlerdir. Çoklu üretim sürecinin verimliliğini analiz etmek ve tek üretim, eş üretim, üç üretim ve çoklu üretim süreçlerinin ekserji performansını karşılaştırmak için enerji ve ekserji değerlendirmelerini yapmışlardır. Çalışmanın sonuçları, çoklu üretim ve tekli üretim süreçleri için enerji verimliliğinin sırasıyla %16.4 ve %78 olarak gerçekleştirildiğini ve

ayrıca tek üretim yerine jeotermal enerjiye dayalı çoklu üretim kullanılmasının çevreye zararlı emisyonları önemli ölçüde azalttığını göstermektedir.

Ying ve ark., (2023) yaptıkları çalışmada, biyokütle ve jeotermal enerji kaynaklarına dayalı hibrit bir kojenerasyon modeli tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemin temel amacı, atık yönetimini iyileştirirken enerji üretimini optimize etmektir. Sistem, termodinamik ve ekonomik açılarından kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Ekonomik değerlendirme sürecinde Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu (MOPSO) yöntemi kullanılmış; karar verme analizleri için ise TOPSIS ve LINMAP yöntemlerinden yararlanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre sistemin en yüksek ekserji verimliliği %44.083 olarak belirlenmiş; ekserji yıkım oranları ise sırasıyla %32.6 ve %19.9 olarak bulunmuş ve bu değerlerin sistemde gazlaştırıcı kullanımının etkisini yansıttığı ifade edilmiştir.

Dinçer ve ark., (2014) yaptıkları çalışmada yenilenebilir enerji kaynakları olarak biyokütle ve jeotermal enerjiyi entegre biçimde kullanan, çok nesilli yeni bir güneş destekli sistem geliştirilmiştir. Geliştirilen sistemin termodinamik performansı detaylı olarak analiz edilmiştir. Sistem; elektrik üretimi, soğutma, kurutma ve sıcak su üretimi alt modüllerinden oluşmakta olup, iki adet Organik Rankin Çevrimi (ORC), ısı transfer akışkanının sıcaklığını artırmak üzere bir güneş enerjisi kolektörü, ORC'lerden birini besleyen jeotermal bir kaynak, soğutma amacıyla bir absorpsiyonlu soğutucu ve kurutma için sıcak kuru hava sağlayan bir ısı eşanjörünü içermektedir. Yapılan analizler sonucunda, sistemin genel enerji verimi %54.7, ekserjetik verimi ise %76.4 olarak tespit edilmiştir.

Siddiqui ve ark., (2021) yaptıkları çalışmada, tarımsal biyolojik atıkları kullanarak bir Brayton çevrimi başlatmışlar ve atık ısını çok nesilli bir işlem için kullanmışlardır. Bu işlem organik rankin çevrimleri (ORC'ler), bir absorpsiyon soğutucusu ve tuzdan arındırma işlemlerini içermektedir. Yapılan çalışmada termodinamik verimliliklerin; Brayton çevrimlerinin kompresörünün çıkış basıncıyla azaldığını ve %52.9'luk bir ekserji verimliliğinin mevcut olduğu gösterilmektedir.

Zhang ve ark., (2019) yaptıkları çalışmada, biyokütle ve jeotermal kaynaklı ısıtma, elektrik üretimi ve soğutma işlevlerini birleştiren dört alt bileşenli yeni bir sistem geliştirilmiştir: Biyokütle gazlaştırma, biyogaz türbini, enerji depolama ve yer altı ısı pompası. Sistem için enerji, ekserji ve ekonomik analizler yapılmış; enerji verimi %90.06, ekserji verimi ise %31.52 olarak hesaplanmıştır.

Ayub ve ark., (2024) yaptıkları çalışmada, biyokütle ve plastik atıklar için yeni bir eş gazlaştırma işlemini; mavi ve yeşil hidrojen üretmek için önerilmişlerdir. İşlem

fizibilitesi için bir Aspen Plus simülasyon modeli geliştirilmekte ve ekonomik uygulanabilirlik, ekserji, gelişmiş ekserji hususları ve eksergo-ekonomik değerlendirmelerine odaklanan bir sürdürülebilirlik analizi yürütülmektedir. Mevcut işlem, %70 işlem verimliliği seviyesinde %8'lik bir iç getiri oranı (IRR) ile kanıtlandığı üzere ekonomik sürdürülebilirliği göstermektedir.

Mofrad ve ark., (2023) yaptıkları çalışmada, güç ve hidrojen üretimi için jeotermal ve ikincil çevrimlerden oluşan jeotermal tahrikli bir kojenerasyon sistemi değerlendirmiştir. Çalışmada ORC performansını artırmak için, zeotropik karışımlar çalışma sıvısı olarak kullanılmaktadır. Kojenerasyon sistemi için enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla %19.34 ve %58.67 oranında artmıştır. Çok amaçlı optimizasyon bulguları, optimum koşullarda enerji verimliliğinin ve ekserji yıkım maliyetinin %20.06 ve 22.64 \$/s'ye ulaştığını göstermektedir.

Moharamian ve ark., (2018) yaptıkları çalışmada, buhar türbini çıkış gücüyle hidrojen üreten biyokütle destekli kombine çevrim önerilmiş ve ilk kez ileri ekserji ile eksergo-ekonomik analiz uygulanmıştır. Kompresör basınç oranı üretimi artırırken, türbin giriş sıcaklığı azaltılmaktadır. Hidrojen enjeksiyonu ise ekserji yıkım ve kayıplarını azaltmaktadır.

Liu ve ark., (2025) yaptıkları çalışmada jeotermal sıvı ve biyogaz kaynaklı enerjiyle elektrik, tatlı su, hidrojen, sıcak ve soğuk suyun eşzamanlı üretimini amaçlayan yeni bir sistem önermektedir. Karbondioksit ayrımı için yanma sonrası mekanizma kullanılırken, biyogazdan elde edilen ısı Kalina ve organik Rankin çevrimleriyle güç üretiminde değerlendirilmiştir. Sürecin ekserji, elektrik ve enerji verimleri sırasıyla %23.67, %16.38 ve %51.15'tir.

Fu ve ark., (2024) yaptıkları çalışmada, biyokütle enerjisinin kullanımını artırmak ve karbon emisyonunu azaltmak için bir biyokütle gazlaştırma oksijen-yakıt yakma güç sistemi kurmuşlardır.

Tianchao ve ark., (2024) biyokütleden metanol, elektrik, ısı ve soğutma üretimi amacıyla kimyasal döngü gazlaştırma ve yüksek sıcaklıklı PEM yakıt hücresine dayalı entegre bir sistem önermiştir. Üretilen ısı, karbon yakalama, organik rankin çevrimi ve absorpsiyonlu soğutma süreçlerinde değerlendirilerek çok kademeli enerji kullanımı sağlanmıştır. Sistem, %54 enerji ve %35.4 ekserji verimliliğine ulaşmakta, %99.2 saflıkta metanolü saatte 6.48 ton üretmektedir.

**Çizelge 2.1.** Literatürde Biyokütle ve jeotermal sistemlerin geleneksel/ileri ekserji eksergo-ekonomik analizleri üzerine çalışmalar

Çalışma	Ekserji Analizi	Eksergo ekonomik Analiz	İleri Ekserji Analizi	İleri Eksergoekonomik Analiz	Açıklamalar
Zhang ve ark. (2019)	✓	✓	-	-	Yeni bir yer kaynaklı ısı pompası ve PEM elektrolizör tabanlı çoklu üretim sistemi tanıtılmıştır. Önerilen sistemin enerji verimi %94.93, ekserji verimi ise %31.62'dir. Enerji düzeyine dayalı eksergoekonomik yaklaşıma göre, hidrojen ve elektriğin birim ekserji maliyetleri sırasıyla 20.41 \$/kJ ve 5.24 \$/GJ'dir.
Hashemian ve ark. (2022)	✓	✓	-	-	Bu makalede jeotermal ve biyokütle ile çalışan yeni bir çoklu üretim tesisi önerilmiştir. En iyi durumda, ürünün toplam maliyet oranı 1.57 \$/s ve enerji verimi %17.26'dır.
Xing ve ark. (2022)	✓	✓	-	-	Hibrit yenilenebilir enerji kaynaklarıyla çalışan entegre bir çoklu üretim sistemi önerilmiştir. Enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %17.87 ve %79.47'dir.
Ding ve ark. (2022)	✓	✓	-	-	Jeotermal, biyokütle ve güneş enerjisiyle çalışan yeni bir çoklu üretim sistemi mevcuttur. İdeal ürün birim maliyeti 36.95 \$/GJ ve enerji verimi %35.9'dur.
Zhang ve ark. (2023)	✓	✓	-	-	Doğal gaz, biyokütle ve güneş enerjisi ile çalışan yeni bir entegre çoklu üretim sistemi tanıtılmıştır. Enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %74.2 ve %32.3'tür.
Bozgeyik ve ark.(2023)	✓	✓	-	-	Güç, hidrojen, ısıtma, soğutma ve temiz su üretmek amacıyla güneş, jeotermal ve biyokütle kaynaklarını birleştiren yeni bir çoklu üretim sistemi önerilmiştir. Sistem genelinde enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %65.55 ve %27.09'dur. Ürün toplam maliyeti 21.79 \$/GJ, sosyal-ekolojik faktör ise 1.37'dir.

Wang ve ark. (2023)	✓	✓	-	-	İki yenilenebilir enerji kaynağını kullanan bütünleşik bir sistem oluşturmak için yeni bir iki aşamalı yöntem önerilmiştir. En iyi durumda ekserji verimi %64.82, seviyelendirilmiş toplam emisyon 0.2 ton/MWs ve net kâr 17.38 milyon \$ olarak elde edilmiştir.
Wang ve ark. (2024)	✓	✓	-	-	HDH (nemlendirme-nem giderme) tuzdan arındırma ünitesi, biyokütle gazlaştırıcı, PEM elektrolizör, jeotermal enerji kaynağı ve termoelektrik jeneratörlerden oluşan yeni bir sistem önerilmiştir.
Kubilay Karayel ve ark. (2024)	✓	✓	-	-	Jeotermal ve güneş enerjisi temelli yeni bir çoklu üretim sistemi önerilmiştir. Organik Rankin çevriminin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %21.14 ve %18.07'dir. Tüm sistemin maliyet oranı 123.3 \$/saat; parabolik oluk kolektörlerinin maliyet oranı ise 31.3 \$/saat olarak hesaplanmıştır.
Yin (2024)	✓	✓	-	-	Jeotermal ve biyokütle hibritleşmesine dayalı yeni bir hibrit sistem tanıtılmıştır. Optimizasyon sonucunda enerji seviyelendirilmiş maliyeti 63.4 USD/MWs'ye düşmüş, ekserji verimi %44.1'e yükselmiş ve emisyon endeksi 127.1 g/kWs'ye inmiştir.
Wang ve ark. (2024)	✓	✓	-	-	Jeotermal ve biyokütle yenilenebilir kaynaklarını kullanarak hidrojen ve yüksek verimli enerji birlikte üretimi için yeni bir çerçeve önerilmiştir. İdeal çalışma koşullarında enerji verimi %42.37, seviyelendirilmiş ürün maliyeti 68.52 \$/MWs ve CO <sub>2</sub> emisyonu 0.7443 kg/kWh olarak belirlenmiştir.
Lykas ve ark. (2024)	✓	✓	-	-	s-CO <sub>2</sub> Brayton çevrimine dayalı güneş ve biyokütle kaynaklı çoklu üretim sistemi önerilmiştir. Yıllık enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %32.52 ve %18.51'dir.

Taheri ve ark. (2024)	✓	✓	-	-	Genetik algoritmalara dayalı optimizasyonla yeni bir jeotermal sistem inşa edilmiştir. Enerji verimi %29.8; yıllık toplam ürün maliyet oranı ise 6 milyon \$'dır.
Khalil ve ark.(2024)	✓	-	-	-	Bu çalışmada jeotermal, biyokütle ve fotovoltaik güneş enerjilerini kullanan eşsiz bir sistem havaalanı için tasarlanmıştır. Enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %41.83 ve %32.94'tür.
Zoghi ve ark. (2025)	✓	✓	-	-	Dört yenilenebilir enerji kaynağı kullanılarak kararlı yeşil hidrojen üretilmiştir. Biyokütle kullanılan sistem, en yüksek çevrimsel enerji verimine sahiptir. Enerji-ekonomik açıdan en iyi performansı gösteren sistem ise jeotermal olandır.
Bu çalışmada	✓	✓	✓	✓	

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

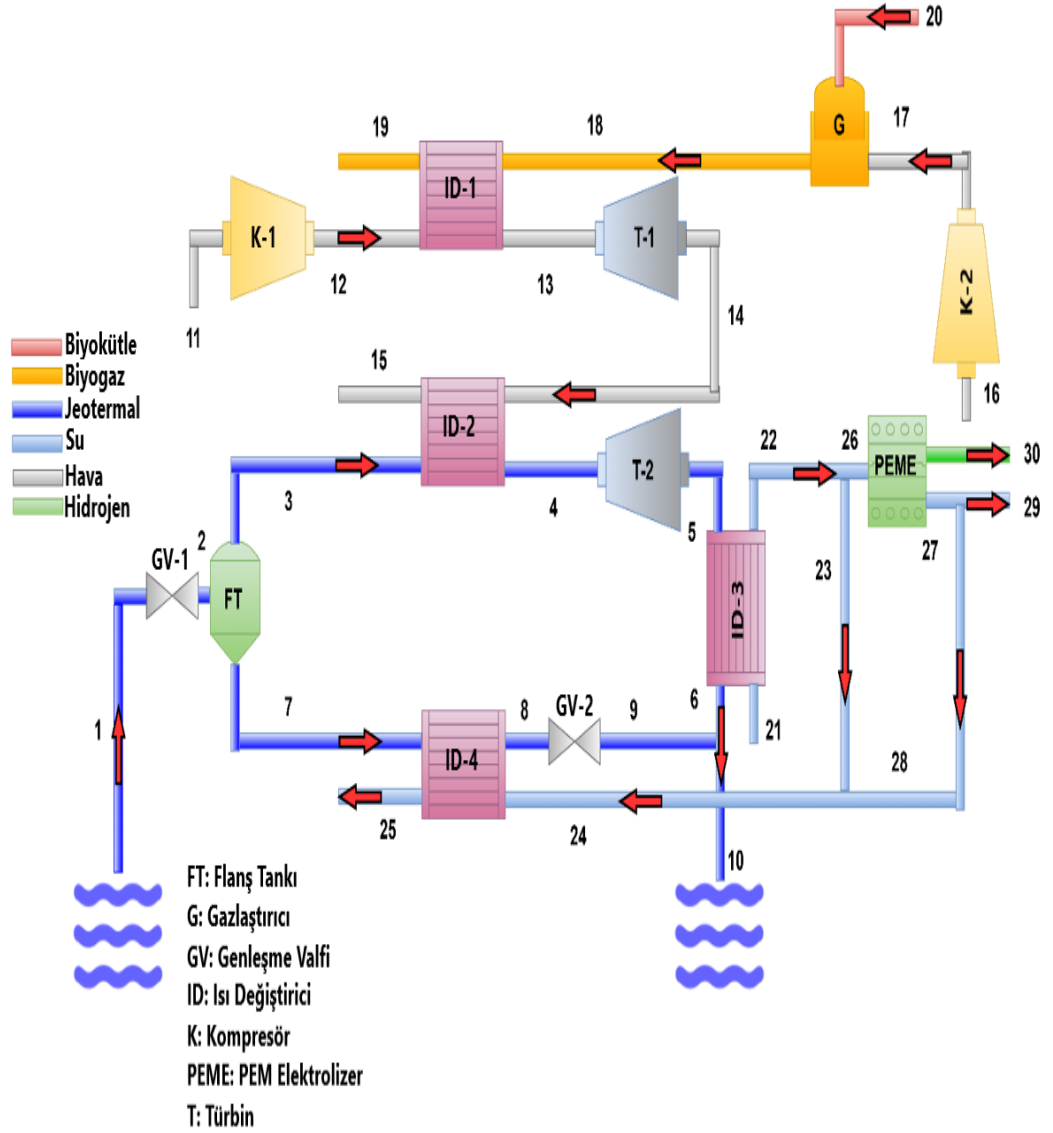
Bu bölümde önerilen sistemin termodinamik analizi için oluşturulan matematik modelin kurulumu ile ilgili kabuller ve yönetici denklemler verilmektedir.

#### 3.1. Sistemin Çalışma Prensibi

Bu çalışmada biyokütle ve jeotermal enerjiye dayalı bir güç ve hidrojen üretim sistemi tasarlanmıştır. Önerilen güç sisteminin şematik görünümü Şekil 3.1'de verilmiştir. Bu sistem, biyokütle enerjisi kaynaklı açık Brayton çevrimi, bir flanşlı jeotermal güç sistemi ve bir proton değişim membranlı elektrolizörden (PEME) oluşmaktadır. Bu çalışmada, yüksek verimliliği, kompakt tasarımı, hızlı dinamik tepkisi ve biyokütle ile jeotermal temelli sistemler gibi süreksiz yenilenebilir enerji kaynaklarıyla çalışmaya uygunluğu nedeniyle proton değişim membranlı elektrolizör tercih edilmiştir.

Sistemin çalışma prensibi şu şekildedir: Kompresör-2 (K-2) üzerinden geçirilerek sıcaklığı ve basıncı artırılan hava, gazlaştırıcıda (G) biyokütleyi oksitleyerek biyogaz adı verilen yüksek sıcaklıklı bir sentez gazı oluşturmaktadır. Bu biyogaz, açık Brayton çevrimi için bir ısı kaynağıdır. Kompresör-1 (K-1) üzerinden geçirilen basınçlı hava, ısı değiştirici-1 (ID-1) üzerinden geçerek ısıtılır ve ardından türbin-1 (T-1)'de genişerek güç üretmektedir. T-1'den çıkan hava, ısı değiştirici-2 (ID-2)'den geçerek bir flanşlı jeotermal güç çevrimi için bir ısı kaynağı oluşturmaktadır.

Genleşme vanası (GV)'ndan geçen jeotermal su, basıncını flanş (ani buharlaşma) basıncına düşürür ve flanş tankında (FT) doymuş buhar-doymuş sıvı fazlarına ayrılmaktadır. Doymuş buhar fazındaki jeotermal su ID-2'den geçerek ısıtılır ve türbin-2 (T-2)'de genişerek güç üretmektedir. T-2'den çıkan jeotermal akışkan, ısı değiştirici-3 (ID-3)'ten geçerek PEME'e gidecek olan suyu PEME sıcaklığına kadar ısıtır ve bu sayede hidrojen üretimi sağlanmaktadır. FT'den doymuş sıvı fazda çıkan jeotermal akışkan, ısı değiştirici-4 (ID-4)'ten geçerek ısısını kullanım suyuna aktarmaktadır. ID-4'ten çıkan jeotermal akışkan, genleşme vanası-2 (GV-2)'ye girerek basıncını ID-3 basıncına düşürmektedir.



Şekil 3.1. Hidrojen Üretimi jeotermal ve biyokütle enerjisiyle çalışan çok nesil bir sistemin modellenmesi

### 3.1.1. Proton değişim membranlı (PEM) elektroliz çalışma prensibi

Proton değişim membranlı (PEM) elektroliz, suyun bileşenleri olan hidrojen ( $H_2$ ) ve oksijen ( $O_2$ ) gazlarına ayrıştırılmasını sağlayan gelişmiş bir elektroliz teknolojisidir. Bu sistemin temel bileşenleri; anot ve katot elektrotları, proton iletimine olanak sağlayan katı polimer elektrolit membranı (genellikle Nafion), akım kollektörleri ve gaz-difüzyon katmanlarıdır.

PEM elektrolizör hücresinde su, anot tarafında reaksiyona girerek oksijen gazı, protonlar ( $H^+$ ) ve elektronlara ayrışır.

### 3.2. Sistemin Matematik Modeli ve Kabuller

Bu bölümde amaçlanan sistemin matematik modelinin çözümü için gerekli yönetici denklemler verilmiştir. Matematik modelin çözümü için (EES) kullanılmış ve aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

Ayrıca analizde şu kabuller yapılmıştır:

- Bütün prosesler kararlı şartlardadır.
- Potansiyel ve kinetik enerji değişimleri ihmal edilmiştir.
- Kompresörler, türbinler, borular ve ısı değiştiricilerindeki ısı kaybı ihmal edilmiştir.

Matematik modelin çözümü ve sistemin tasarlanması için bazı parametrelerin ilk girdi kabulleri Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

**Çizelge 3.1.** Tasarım girdi parametreleri

Sembol	Parametreler	Değer	Ref.
$T_0$	Ortam sıcaklığı	298.15 K	(Habibollahzade ve ark., 2021)
$P_0$	Ortam basıncı	101.3 kPa	(Habibollahzade ve ark., 2021)
$P_2$	Flanş basıncı	400 kPa	(Zhao ve ark., 2016)
$T_1$	Jeotermal sıcaklık	150 C <sup>0</sup>	(Zhou ve ark., 2013)
$P_1$	Giriş sıcaklığı	1000 kPa	(Şen ve ark., 2022)
$T_{20}$	Biyokütle giriş sıcaklığı	25 C <sup>0</sup>	(Habibollahzade ve ark., 2021)
$T_{22}$	PEME sıcaklığı	80 C <sup>0</sup>	(Alirahmi ve ark.,2022)
$L$	PEME membran genişliği	200 µm	(Kim ve ark., 2013)
$J$	Akım yoğunluğu	10000 A/m <sup>2</sup>	(Kim ve ark., 2013)
$\lambda_a$	Anot membran arayüzü	14	(Zogni ve ark., 2025)
$\lambda_c$	Katot membran arayüzü	10	(Zogni ve ark., 2025)
$E_{act,a}$	Anot aktivasyon enerjisi	76 kJ/mol	(Zogni ve ark., 2025)
$E_{act,c}$	Katot aktivasyon enerjisi	18 kJ/mol	(Zogni ve ark., 2025)
$J_a^{ref}$	Anot için üssel ön faktör	1.7x 10 <sup>5</sup>	(Zogni ve ark., 2025)
$J_c^{ref}$	Katot için üssel ön faktör	4.6x10 <sup>3</sup>	(Zogni ve ark., 2025)
$N$	Hücre sayısı	120	(Kim ve ark., 2013)
$A_{hücre}$	Hücre alanı	0.0314 m <sup>2</sup>	(Kim ve ark., 2013)

### 3.2.1. Enerji analizi

Bir sistemin termodinamik açıdan anlaşılabilmesi için kullanılan en temel analiz enerji analizidir. Üzerinde çalışılan sistemin enerji analizi için enerji ve kütle korunum denklemleri aşağıda genel haliyle verilmiştir:

$$\sum \dot{m}_{giriş} - \sum \dot{m}_{çıkış} = 0 \quad (3.1)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_{çıkış} h_{çıkış} - \sum \dot{m}_{giriş} h_{giriş} \quad (3.2)$$

Sistem birleşenleri sürekli rejimde çalışan kontrol hacimleri olarak kabul edilmiş ve her bir sisteme ait enerji denklemler aşağıda verilmiştir:

- Kompresör 1 (K1) için;

$$\dot{W}_{K1} = \dot{m}_{11}(h_{12} - h_{11}) \quad (3.3)$$

$$\eta_{k1} = \frac{h_{12s} - h_{11}}{h_{12} - h_{11}} \quad (3.4)$$

- Kompresör 2 (K2) için;

$$\dot{W}_{K2} = \dot{m}_{16}(h_{17} - h_{16}) \quad (3.5)$$

$$\eta_{k2} = \frac{h_{17s} - h_{16}}{h_{17} - h_{16}} \quad (3.6)$$

- Türbin 1 (T1) için;

$$\dot{W}_{T1} = \dot{m}_{13}(h_{13} - h_{14}) \quad (3.7)$$

$$\eta_{t1} = \frac{h_{13} - h_{14}}{h_{13} - h_{14,S}} \quad (3.8)$$

- Türbin 2 (T2) için;

$$\dot{W}_{T2} = \dot{m}_4(h_4 - h_5) \quad (3.9)$$

$$\eta_{t2} = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{5,S}} \quad (3.10)$$

- Flaş Tankı (FT) için;

$$\dot{m}_2.h_2 = \dot{m}_3.h_3 + \dot{m}_7.h_7 \quad (3.11)$$

- Isı Değiştiricisi 1 (ID-1) için;

$$\dot{m}_{13}(h_{13} - h_{12}) = \dot{m}_{18}(h_{18} - h_{19}) \quad (3.12)$$

- Isı Değiştiricisi 2 (ID-2) için;

$$\dot{m}_4(h_4 - h_3) = \dot{m}_{14}(h_{14} - h_{15}) \quad (3.13)$$

- Isı Değiştiricisi 3 (ID-3) için;

$$\dot{m}_5(h_5 - h_6) = \dot{m}_{21}(h_{22} - h_{21}) \quad (3.14)$$

- Isı Değiştiricisi 4 (ID-4) için;

$$\dot{m}_7(h_7-h_8) = \dot{m}_{25}(h_{25}-h_{24}) \quad (3.15)$$

- PEM Elektrolizör (PEME) için;

$$\dot{m}_{26}\underline{h} + \dot{W}^{PEME} = \dot{m}_{27}\underline{h}_{27} + \dot{m}_{30}\underline{h}_{30} \quad (3.16)$$

- Genleşme Valfi 1 (GV-1) için;

$$\dot{m}_2.h_2 = \dot{m}_1.h_1 \quad (3.17)$$

- Genleşme Valfi 2 (GV-2) için;

$$\dot{m}_7.h_7 = \dot{m}_8.h_8 \quad (3.18)$$

- Gazlaştırma (Gaz) için;

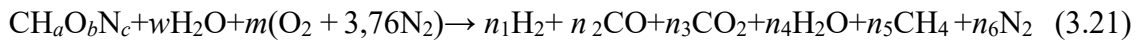
$$\dot{m}_{17}.h_{17} + \dot{m}_{20}.h_{20} = \dot{m}_{18}h_{18} \quad (3.19)$$

Sistemdeki türbinler tarafından üretilen güç, kompresör ve PEM tarafından tüketilen güce göre net güç aşağıdaki denklemden hesaplanmıştır.

$$\dot{W}_{net} = (\dot{W}_{T1} + \dot{W}_{T2}) - (\dot{W}_{K1} + \dot{W}_{K2} + \dot{W}_{PEM}) \quad (3.20)$$

### 3.2.2. Biyokütle gazlaştırma modeli

Bu çalışmada biyokütle hammaddesi odun olarak düşünülmüştür ve kimyasal bileşeni %50 karbon (C), %6 hidrojen (H) ve %44 oksijen (O) içeriğinden oluşmaktadır. Biyokütlenin hava ile kimyasal tepkime denklemi aşağıda verilmiştir (Lv ve ark., 2023):



Burada  $CH_aO_bN_c$  biyokütle hammaddesinin formülünü,  $w$  biyokütle hammaddesinin mol başına nem içeriğini,  $m$  ve  $n_1$  ile  $n_5$  hava bileşeninin mol içeriğini ve gazlaştırma işlemi yoluyla üretilen bileşikleri göstermektedir.

Burada  $MC_B$  nemli biyokütlenin bir kilogramında taşıdığı nemi göstermektedir. Nemin molü aşağıdaki denklemden bulunur (Habibollahzade ve ark., 2021).

$$w = \frac{M_B \cdot x \cdot MC_B}{M_{H_2O} \cdot x \cdot (1 - MC_B)} \quad (3.22)$$

Aşağıdaki denklemlerle eş zamanlı gerçekleşen ayrışmaları göstermektedir, tepkimelerin her biri için denge sabiti bulunur ve burası piroliz bölümüdür (Lv ve ark., 2023).



Su-gaz değişim reaksiyonu birleştirilerek aşağıdaki denklem elde edilmiştir (Lv ve ark., 2023).



Aşağıdaki denge sabitleri (3.25) ve (3.26) denklemlerine göre yazılmıştır.

$$K_1 = \frac{n_5}{n_1} \left( \frac{P}{P_0 x n_{tot}} \right)^{-1} \quad (3.27)$$

$$K_2 = \frac{n_1 n_3}{n_2 n_4} \left( \frac{P}{P_0 x n_{tot}} \right)^0 \quad (3.28)$$

Reaksiyonların denge sabiti K, gibbs serbest enerjisi  $\Delta G$ 'deki değişim olarak işlev görebilir, matematiksel ilişkiler aşağıdaki gibidir (Habibollahzade ve ark., 2021).

$$-\frac{\Delta G_1^0}{R T_s} = \ln K_1 \quad (3.29)$$

$$-\frac{\Delta G_2^0}{R T_s} = \ln K_2 \quad (3.30)$$

$$-\Delta G_1^0 = (h_{CH_4} - T_g s_{CH_4}^0) - 2(h_{H_2} - T_g s_{H_2}^0) \quad (3.31)$$

$$-\Delta G_2^0 = (h_{CO_2} - T_g s_{CO_2}^0) + (h_{H_2} - T_g s_{H_2}^0) - (h_{CO} - T_g s_{CO}^0) - (h_{H_2O} - T_g s_{H_2O}^0) \quad (3.32)$$

Biyokütlenin alt ısıl değeri (LHV<sub>odun</sub>), kimyasal ekserjisi ( $ex_{odun}^{kim}$ ) ve kimyasal ekserji katsayısı ( $\beta_{odun}$ ) aşağıdaki denklemler kullanılarak belirlenmektedir (Lv ve ark., 2023 ; Zhang ve ark., 2022).

$$LHV_{odun} = 4.1868 \times 10^{-3} (1 + 0.15z_o) (7837.667z_c + 33888.889z_H - \frac{z_o}{8}) \quad (3.33)$$

$$\dot{E}x_{\text{odun}}^{\text{kim}} = \beta_{\text{odun}} LHV_{\text{odun}} \quad (3.34)$$

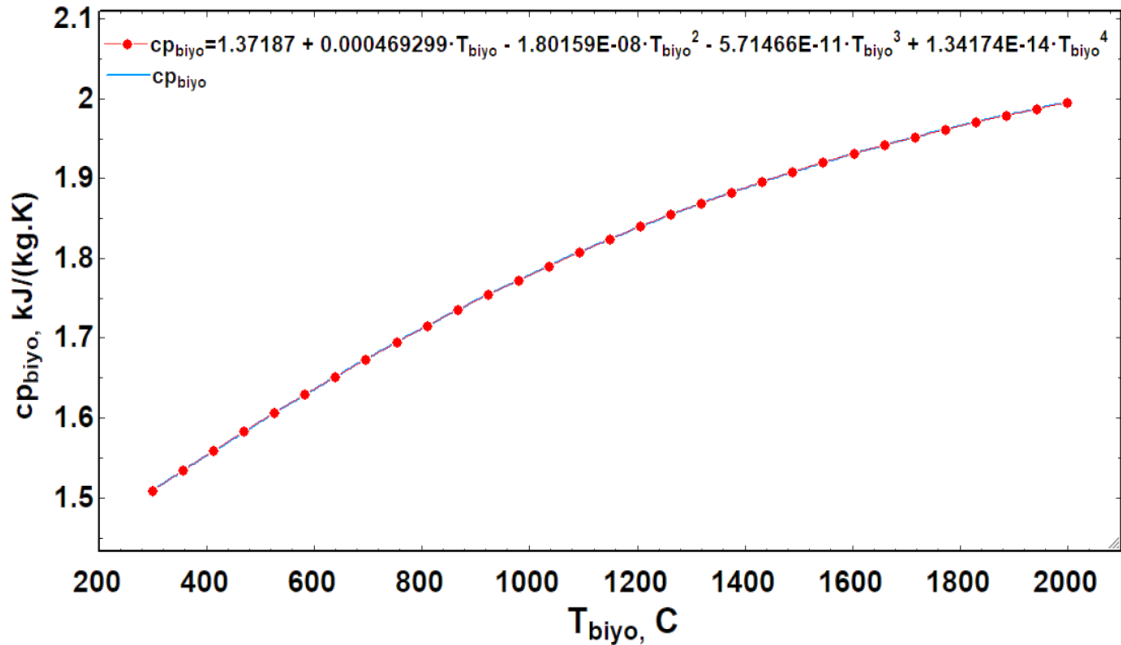
$$\beta_{\text{odun}} = \frac{1.044 + \frac{0.0177z_h}{z_c} - \frac{0.3328z_o}{z_c} \left(1 + \frac{1.0537z_H}{z_C}\right)}{1 - \frac{0.4021z_O}{z_c}} \quad (3.35)$$

Burada  $Z_H$ ,  $Z_O$  ve  $Z_C$  katı yakıtın kuru bazda içerisindeki hidrojen, oksijen ve karbonun kütle oranlarıdır.

Sentez gazının mol oranlarına göre ortalama özgül ısısı, EES programının eğri uydurma özelliğinde en küçük kareler yöntemiyle bulunmuştur.

$$c_{p,\text{biyo}} = 1.37187 + 0.000469299T_{\text{biyo}} - 1.80159 \times 10^{-8}T_{\text{biyo}}^2 - 5.71466 \times 10^{-11}T_{\text{biyo}}^3 + 1.34174 \times 10^{-14}T_{\text{biyo}}^4 \quad (3.36)$$

Şekil 3.2 de sentez gazının ortalama özgül ısısının sıcaklığa göre değişimi grafik olarak verilmiştir.



Şekil 3.2. Sentez gazının ortalama özgül ısısının sıcaklığa göre değişimi

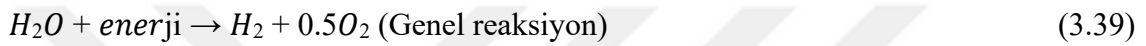
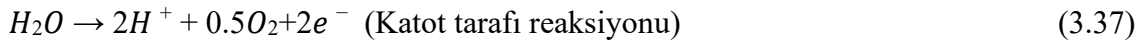
### 3.2.3. Proton değişim membranlı elektrolizör (PEME) modeli

PEM elektrolizör modeli; ohmik, aktivasyon ve yoğunluk (konsantrasyon) kayıplarını içermektedir. Ancak gaz geçişi gibi küçük kayıplar, sistemin genel davranışı

üzerindeki etkilerinin sınırlı olması nedeniyle ihmal edilmiştir. Bu varsayım, benzer termodinamik ve eksergo-ekonomik çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Modellemede kullanılan PEM elektrolizörde, sıvı fazdaki su katottan 80 °C ve 101.325 kPa koşullarında giriş yaparken, anoda herhangi bir gaz verilmemektedir; oksijen yalnızca anottan çıkış yapmaktadır.

Elektroliz tepkimesi iki aşamadan oluşmaktadır: anot ve katot yarı tepkimeleri. Elektroliz tepkimesi aşağıda verilmiştir:

Anot, katot ve genel formulla ilgili reaksiyon denklemleri (Zhang ve ark., 2019)



Elektroliz reaksiyonundan elde edilen  $H_{2,\text{çıkış}}$  ve reaksiyonda tepkimeye giren  $H_2O$ 'nun mol miktarları (Pasture,2022) :

$$\dot{N}_{H_{2,\text{çıkış}}} = \frac{I.n_{\text{hücre}}}{2F} = \dot{N}_{H_2O_{\text{reaktif}}} \quad (3.40)$$

Elektroliz reaksiyonunda açığa çıkan  $O_{2,\text{çıkış}}$ 'nin mol miktarı (Pasture,2022):

$$\dot{N}_{O_{2,\text{çıkış}}} = \frac{I.n_{\text{hücre}}}{4F} \quad (3.41)$$

Elektroliz reaksiyonuna girmeyen  $H_2O_{,\text{çıkış}}$ 'nin mol miktarı (Pasture,2022):

$$\dot{N}_{H_2O_{\text{çıkış}}} = \dot{N}_{H_2O_{\text{giriş}}} - \frac{I.n_{\text{hücre}}}{2F} \quad (3.42)$$

F Faraday sabitidir (F=96485C/mol). J ise akım yoğunluğudur (Pasture, 2022).Elektrolizöre elektrik gücü girişi şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$\dot{W}_{\text{PEME}} = JA_{\text{hücre}}n_{\text{hücre}}V \quad (3.43)$$

$$V = V_0 + V_{\text{act,a}} + V_{\text{act,b}} + V_{\text{ohm}} \quad (3.44)$$

$V_0$  tersinir potansiyeldir ve aşağıdaki denklem ile bulunmaktadır (Pasture, 2022).

$$V_0 = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4} (T_{PEM}(K) - 298) \quad (3.45)$$

$V_{ohm}$  ohmik aşırı potansiyeldir ve aşağıdaki denklem ile bulunmaktadır (Pasture, 2022).

$$V_{ohm} = J R_{ohm} \quad (3.46)$$

Toplam ohmik direnç ( $R_{ohm}$ ) denklemini şu şekilde vermiştir (Pasture, 2022):

$$R_{ohm} = \int_0^L \frac{dx}{\sigma_{PEM}[\lambda(x)]} \quad (3.47)$$

Burada  $L, \sigma_{PEM}[\lambda(x)], \lambda(x), \lambda_a$  ve  $\lambda_c$  sırasıyla membran kalınlığı ( $\mu\text{m}$ ), yerel iyonik iletkenlik, membrandaki su içeriği ( $\Omega^{-1}$ ), anot-membran arayüzü ve katot-membran arayüzüdür. (Zhang ve ark., 2019)

$$\sigma_{PEM}[\lambda(x)] = (0.5139\lambda(x) - 0.326) \exp \left[ 1268 \left( \frac{1}{303} - \frac{1}{T_{PEM}(K)} \right) \right] \quad (3.48)$$

$$\lambda(x) = \frac{\lambda_a - \lambda_c}{L} x + \lambda_c \quad (3.49)$$

Aktivasyon aşırı potansiyeli ( $V_{act}$ ) aşağıdaki denklem ile bulunmaktadır (Ni ve ark., 2008).

$$V_{act,i} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left( \frac{J}{2J_{0,i}} \right) \quad i = a, c \quad (3.50)$$

Elektrolizör değişim akım yoğunluğu ( $J_0$ ) aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır (Ni ve ark., 2008).

$$J_{0,i} = J_i^{ref} \exp \left( -\frac{E_{act,i}}{RT} \right), \quad i = a, c (J) \quad (3.51)$$

Burada  $J_{ref}$  ve  $E_{act}$  sırasıyla anot veya katodun ön-üstel faktörü ve aktivasyon enerjisidir.

### 3.2.4. Geleneksel ekserji analizi

Bu bölümde, Geleneksel Ekserji Analizi (GEA) ve İleri Ekserji Analizi (İEA) için temel denklemler verilmiştir. Sistem bileşenlerine ait yakıt (besleme) ( $\dot{E}x_{f,k}$ ) ve ürün ekserjileri ( $\dot{E}x_{p,k}$ ) denklemleri aşağıda verilmiştir. Sistem bileşenlerinin ekserji yıkımları, yakıt ve ürün ekserjilerine göre belirlenmekte olup, temelde aşağıdaki denklem kullanılmaktadır (Wang ve ark., 2016).

$$\dot{E}x_{D,k} = \dot{E}x_{f,k} - \dot{E}x_{p,k} \quad (3.52)$$

Kinetik ve potansiyel ekserjiler ihmal edildiğinde, bir sistemin ekserjisi fiziksel ve kimyasal ekserjilerin toplamından oluşmaktadır. Fiziksel ve kimyasal ekserji hız denklemleri aşağıda verilmiştir (Wang ve ark., 2023).

$$\dot{E}x_{Fiz} = \dot{m}(h(T, P) - h(T_0, P_0) - T_0(s(T, P) - s(T_0, P_0))) \quad (3.53)$$

$$\dot{E}x_{Kim} = \dot{N}(\sum_{i=1}^n y_i \bar{e}x_{kim,i} + RT_0 \sum_{i=1}^n y_i \ln y_i) \quad (3.54)$$

Burada  $y_i$  ve  $\bar{e}x_{kim,i}$  sırasıyla bileşenlerin mol oranlarını ve standart haldeki kimyasal ekserjiyi göstermektedir.

- Kompresör 1 (K1) için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,K1} = \dot{W}_{K1} \quad (3.55)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,K1} = \dot{E}x_{12} - \dot{E}x_{11} \quad (3.56)$$

$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x_{D,K1} = \dot{W}_{K1} - (\dot{E}x_{12} - \dot{E}x_{11}) \quad (3.57)$$

- Kompresör 2 (K2) için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,K2} = \dot{W}_{K2} \quad (3.58)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,K2} = \dot{E}x_{17} - \dot{E}x_{16} \quad (3.59)$$

$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x_{D,K2} = \dot{W}_{K2} - (\dot{E}x_{17} - \dot{E}x_{16}) \quad (3.60)$$

- Türbin 1 (T1) için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,T1} = \dot{E}x_{13} - \dot{E}x_{14} \quad (3.61)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,T1} = W_{T1} \quad (3.62)$$

$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x_{D_{T1}} = (\dot{E}x_{13} - \dot{E}x_{14}) - \dot{W}_{T1} \quad (3.63)$$

- Türbin 2 (T2) için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,T2} = \dot{E}x_4 - \dot{E}x_5 \quad (3.64)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,T2} = \dot{W}_{T2} \quad (3.65)$$

$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x_{D_{T1}} = (\dot{E}x_4 - \dot{E}x_5) - \dot{W}_{T2} \quad (3.66)$$

- Flaş Tankı (FT) için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,FT} = \dot{E}x_2 \quad (3.67)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,FT} = \dot{E}x_3 + \dot{E}x_7 \quad (3.68)$$

$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x_{D_{FT}} = \dot{E}x_2 - (\dot{E}x_3 + \dot{E}x_7) \quad (3.69)$$

- Isı Değiştiricisi 1 (ID-1) için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,ID-1} = \dot{E}x_{18} - \dot{E}x_{19} \quad (3.70)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,ID-1} = \dot{E}x_{13} - \dot{E}x_{12} \quad (3.71)$$

$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x_{D_{ID-1}} = \dot{E}x_{18} - \dot{E}x_{19} - (\dot{E}x_{13} - \dot{E}x_{12}) \quad (3.72)$$

- Isı Değiştiricisi 2 (ID-2) için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,ID-2} = \dot{E}x_{14} - \dot{E}x_{15} \quad (3.73)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,ID-2} = \dot{E}x_4 - \dot{E}x_3 \quad (3.74)$$

$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x_{D_{ID-2}} = \dot{E}x_{14} - \dot{E}x_{15} - (\dot{E}x_4 - \dot{E}x_3) \quad (3.75)$$

- Isı Değiştiricisi 3 (ID-3) için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,ID-3} = \dot{E}x_5 - \dot{E}x_6 \quad (3.76)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,ID-3} = \dot{E}x_{22} - \dot{E}x_{21} \quad (3.77)$$

$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x_{D_{ID-3}} = \dot{E}x_5 - \dot{E}x_6 - (\dot{E}x_{22} - \dot{E}x_{21}) \quad (3.78)$$

- Isı Değiştiricisi 4 (ID-4) için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,ID-4} = \dot{E}x_7 - \dot{E}x_8 \quad (3.79)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,ID-4} = \dot{E}x_{25} - \dot{E}x_{24} \quad (3.80)$$

$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x_{D_{ID-4}} = \dot{E}x_7 - \dot{E}x_8 - (\dot{E}x_{25} - \dot{E}x_{24}) \quad (3.81)$$

- PEM Elektrolizör (PEME) için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,PEME} = \dot{E}x_{26} - \dot{E}x_{27} + \dot{W}^{PEME} \quad (3.82)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,PEME} = \dot{E}x_{26} \quad (3.83)$$

$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x_{D_{PEME}} = \dot{E}x_{26} + \dot{W}^{PEME} - \dot{E}x_{27} - \dot{E}x_{30} \quad (3.84)$$

- Genleşme Valfi 1 (GV-1) için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,GV-1} = \dot{E}x_1 \quad (3.85)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,GV-1} = \dot{E}x_2 \quad (3.86)$$

$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x_{DEV-1} = \dot{E}x_1 - \dot{E}x_2 \quad (3.87)$$

- Genleşme Valfi 2 (GV-2) için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,GV-2} = \dot{E}x_8 \quad (3.88)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,GV-2} = \dot{E}x_9 \quad (3.89)$$

$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x_{DEV-2} = \dot{E}x_8 - \dot{E}x_9 \quad (3.90)$$

- Gazlaştırıcı (G) için;

$$\text{Yakıt ekserji denklemi: } \dot{E}x_{f,G} = \dot{E}x_{20} \quad (3.91)$$

$$\text{Ürün ekserji denklemi: } \dot{E}x_{p,G} = \dot{E}x_{18} - \dot{E}x_{17} \quad (3.92)$$

$$\text{Ekserji yıkım denklemi: } \dot{E}x = \dot{E}x_{20} - (\dot{E}x_{18} - \dot{E}x_{17}) \quad (3.93)$$

### 3.2.5. Geleneksel eksergo-ekonomik analiz

Eksergo-ekonomik analiz sistemin ekserji analizi ile maliyet analizini birleştiren bir analizdir. Bu çalışmada eksergo-ekonomik analiz için literatürde yaygın olarak kullanılan Özgül Ekserji Maliyeti (SPECO) metodu kullanılmıştır. SPECO metodu her bir sistem bileşenin yakıt ve ürün maliyetlerinin dengesine bağlıdır. Bu kapsamda SPECO yönteminin uygulama adımları, her sistem bileşenin 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 (Güleryüz,2023).

Sistem bileşenlerinin yakıt-ürün maliyet denklemleri genel olarak aşağıda verilmektedir (Güleryüz,2023).

$$\sum_k \dot{C}_{f,k} + \dot{Z}_k = \sum_k \dot{C}_{p,k} \quad (3.94)$$

Sistem elemanlarının maliyet dengesi aşağıdaki denklem ile bulunmuştur (Güleryüz,2023).

$$\sum_k \dot{C}_{çıkan,k} + \dot{C}_{w,k} = \sum_k \dot{C}_{giren,k} + \dot{C}_{q,k} + \dot{Z}_k \quad (3.95)$$

Ekserji akışının maliyeti ( $\dot{C}$ ), bileşene ait ekserji hız değeri ( $\dot{E}_x$ ) 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 (Güleryüz,2023).

$$\dot{C} = c \cdot \dot{E}_x \quad (3.96)$$

$\dot{Z}_k$ , k' elemanına ait ilk yatırım, işletme ve bakım masrafları ile ilgili zamana bağlı maliyet değeridir ve aşağıdaki denklem ile bulunmuştur (Hekmatshoa ve ark., 2022).

$$\dot{Z}_k = \frac{Z_k \cdot CRF \cdot \varphi}{3600 \cdot N} \quad (3.97)$$

CRF sermaye geri kazanma faktörüdür ve aşağıdaki denklem ile bulunmuştur. (Hekmatshoa ve ark., 2022).

$$CRF = \left( \frac{\lambda(1+\lambda)^N}{(1+\lambda)^N - 1} \right) \quad (3.98)$$

Burada  $\varphi$  bakım faktörünü,  $\lambda$  yıllık faiz oranını ve N sistemin ekonomik ömrünü göstermektedir. Bu değerler çizelge 3.1’de sunulmuştur.

Şekil 3.1’deki sistem için uygulanan SPECO metoduna ait maliyet denge denklemleri ve yardımcı denklemler aşağıda verilmiştir.

- Kompresör 1 (K1) için;

$$\text{Maliyet Denklemi: } \dot{C}_{11} + \dot{Z}_{K1} + \dot{C}_{W_{K1}} = \dot{C}_{12} \quad (3.99)$$

$$\text{Yardımcı Denklem: } c_{K1} = c_{T1} \quad (3.100)$$

$$c_{11} = 0 \quad (3.101)$$

- Kompresör 2 (K2) için;

$$\text{Maliyet Denklemi: } \dot{C}_{16} + \dot{Z}_{K2} + \dot{C}_{W_{K2}} = \dot{C}_{17} \quad (3.102)$$

$$\text{Yardımcı Denklem: } c_{K2} = c_{T1} \quad (3.103)$$

$$c_{16} = 0 \quad (3.104)$$

- Türbin 1 (T1) için;

$$\text{Maliyet Denklemi: } \dot{C}_{13} + \dot{Z}_{T1} = \dot{C}_{14} + \dot{C}_{W_{T1}} \quad (3.105)$$

$$\text{Yardımcı Denklem: } c_{13}=c_{14} \quad (\text{F kuralı}) \quad (3.106)$$

- Türbin 2 (T2) için;

$$\text{Maliyet Denklemi: } \dot{C}_4 + \dot{Z}_{T2} = \dot{C}_5 + \dot{C}_{W_{T2}} \quad (3.107)$$

$$\text{Yardımcı Denklem: } c_4=c_5 \quad (\text{F kuralı}) \quad (3.108)$$

- Flaş Tankı (FT) için;

$$\text{Maliyet Denklemi: } \dot{C}_2 + \dot{Z}_{FT} = \dot{C}_3 + \dot{C}_7 \quad (3.109)$$

$$\text{Yardımcı Denklem: } c_7=c_3 \quad (\text{P kuralı}) \quad (3.110)$$

$$\dot{Z}_{FT} = 0 \quad (\text{Kabul}) \quad (3.111)$$

- Isı Değiştiricisi 1 (ID-1) için;

$$\text{Maliyet Denklemi: } \dot{C}_{18} + \dot{C}_{12} + \dot{Z}_{ID-1} = \dot{C}_{19} + \dot{C}_{13} \quad (3.112)$$

$$\text{Yardımcı Denklem: } c_{18}=c_{19} \quad (\text{F Kuralı}) \quad (3.113)$$

- Isı Değiştiricisi 2 (ID-2) için;

$$\text{Maliyet Denklemi: } \dot{C}_{14} + \dot{C}_3 + \dot{Z}_{ID-2} = \dot{C}_{15} + \dot{C}_4 \quad (3.114)$$

$$\text{Yardımcı Denklem: } c_3=c_4 \quad (\text{F Kuralı}) \quad (3.115)$$

- Isı Değiştiricisi 3 (ID-3) için;

$$\text{Maliyet Denklemi: } \dot{C}_{21} + \dot{C}_5 + \dot{Z}_{ID-3} = \dot{C}_{22} + \dot{C}_6 \quad (3.116)$$

$$\text{Yardımcı Denklem: } c_6=c_5 \quad (\text{F Kuralı}) \quad (3.117)$$

$$c_{21}=0 \quad (3.118)$$

- Isı Değiştiricisi 4 (ID-4) için;

$$\text{Maliyet Denklemi: } \dot{C}_{24} + \dot{C}_7 + \dot{Z}_{ID-4} = \dot{C}_{25} + \dot{C}_8 \quad (3.119)$$

$$\text{Yardımcı Denklem: } c_7=c_8 \quad (\text{F Kuralı}) \quad (3.120)$$

- PEM Elektrolizör (PEME) için;

$$\text{Maliyet Denklemi: } \dot{C}_{26} + \dot{C}_{W_{pem}} + \dot{Z}_{pem} = \dot{C}_{27} + \dot{C}_{30} \quad (3.121)$$

$$\text{Yardımcı Denklem: } c_{pem}=c_{T2} \quad (\text{Kabul}) \quad (3.122)$$

$$c_{30}=c_{27} \quad (\text{P Kuralı}) \quad (3.123)$$

- Genleşme Valfi 1 (GV-1) için;

$$\text{Maliyet Denklemi: } \dot{C}_1 + \dot{Z}_{EV1} = \dot{C}_2 \quad (3.124)$$

$$\text{Yardımcı Denklem: } c_1=1.3 \times 10^{-6} \quad (\text{Wang ve ark., 2023}) \quad (3.125)$$

- Genleşme Valfi 2 (GV-2) için;

$$\text{Maliyet Denklemi: } \dot{C}_8 + \dot{Z}_{EV2} = \dot{C}_9 \quad (3.126)$$

- Gazlaştırıcı (G) için;

$$\text{Maliyet Denklemi: } \dot{C}_{20} + \dot{Z}_G + \dot{C}_{17} = \dot{C}_{18} \quad (3.127)$$

$$\text{Yardımcı Denklem: } c_{20}=2.10^{-6} \text{ (Kabul) (Lv ve ark.,2023)} \quad (3.128)$$

- Karışım Alanı 1 (Mik-1) için;

$$\text{Maliyet Denklemi: } \dot{C}_6+\dot{Z}_{\text{Mik-1}}+\dot{C}_9=\dot{C}_{10} \quad (3.129)$$

$$\text{Yardımcı Denklem: } \dot{Z}_{\text{Mik-1}} = 0 \text{ (Kabul)} \quad (3.130)$$

- Karışım Alanı 2 (Mik-2) için;

$$\text{Maliyet Denklemi: } \dot{C}_{23}+\dot{Z}_{\text{Mik-2}}+\dot{C}_{28}=\dot{C}_{24} \quad (3.131)$$

$$\text{Yardımcı Denklem: } \dot{Z}_{\text{Mik-2}} = 0 \text{ (Kabul)} \quad (3.132)$$

- Ayrılma Hatları 1 (S-1) İçin;

$$\text{Maliyet Denklemi: } \dot{C}_{22}+\dot{Z}_{\text{S-1}}=\dot{C}_{23}+\dot{C}_{26} \quad (3.133)$$

$$\text{Yardımcı Denklem: } c_{26}=c_{23} \quad (\text{P kuralı}) \quad (3.134)$$

$$\dot{Z}_{\text{S-1}} = 0 \text{ (Kabul)} \quad (3.135)$$

- Ayrılma Hatları 2 (S-2) İçin;

$$\text{Maliyet Denklemi: } \dot{C}_{27}+\dot{Z}_{\text{S-2}}=\dot{C}_{28}+\dot{C}_{29} \quad (3.136)$$

$$\text{Yardımcı Denklem: } c_{28}=c_{29} \quad (\text{P kuralı}) \quad (3.137)$$

$$\dot{Z}_{\text{S-2}} = 0 \text{ (Kabul)} \quad (3.138)$$

Sistem ekipmanları için kullanılan yatırım denklemleri referans alınan makalelere göre yazılıp Çizelge 3.2 de verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Sistem bileşenlerine ait yatırım denklemleri

Bileşenler	Orijinal Yılındaki Yatırım Maliyeti	REF
T-1	$\dot{Z}_{T-1}=479.34.m_{13} \cdot \left(\frac{1}{0.93-\eta_{T-1}}\right) \cdot \ln \frac{P_{13}}{P_{14}} \cdot (1+\exp(0.036.(T_{13}) - 54.4))$	(Lv ve ark.,2023)
T-2	$\dot{Z}_{T-2}=479.34.m_{14} \cdot \left(\frac{1}{0.93-\eta_{T-2}}\right) \cdot \ln \frac{P_4}{P_5} \cdot (1+\exp(0.036.(T_4) - 54.4)$	(Lv ve ark.,2023)
K-1	$\dot{Z}_{k1}=\left(\frac{71.1}{0.9-\eta_{C1}}\right) \cdot P_{RT1} \cdot \ln(P_{RT1})$	(Khanmohammadi ve ark., 2015)
K-2	$\dot{Z}_{k2}=\left(\frac{71.1}{0.9-\eta_{C2}}\right) \cdot P_{RT1} \cdot \ln(P_{RC2})$	(Khanmohammadi ve ark., 2015)
GV-1	$\dot{Z}_{EV1}=114.5.m_1$	(Azariyan ve ark., 2021)
GV-2	$\dot{Z}_{EV2}=114.5.m_8$	(Azariyan ve ark., 2021)
G	$\dot{Z}_G=1600.(3600.m_{20})^{0.67}$	(Khanmohammadi ve ark., 2015)
ID-1	$\dot{Z}_{ID-1}=4122.A_{ID-1}^{0.6}$	(Bai ve ark., 2023)
ID-2	$\dot{Z}_{ID-2}=2681.A_{ID-2}^{0.59}$	(Lv ve ark.,2023)
ID-3	$\dot{Z}_{ID-3}=2143.A_{ID-3}^{0.514}$	(Li ve ark., 2022)
ID-4	$\dot{Z}_{ID-4}=10000+324.A_{ID-4}^{0.91}$	(Bai ve ark., 2023)
PEME	$\dot{Z}_{PEM}=10000.W_{PEM}$	(Koç ve ark., 2022)

Sistemde 4 adet bulunan ısı değiştiricisinin  $Z_k$  değerleri hesaplanabilmesi için alanlarını bilmek gerekmektedir. Isı miktarını veren denklem aşağıda verilmiştir (Gülyüz, 2023).

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (3.139)$$

Yukarıdaki denklemde  $U$  toplam ısı transfer katsayı,  $\dot{Q}$  ısı akısı,  $A$  ısı transferi alanı ve  $\Delta T_m$  ortalama logaritmik sıcaklık farkıdır.  $\Delta T_m$  genel denklemi aşağıda verilmiştir (Gülyüz, 2023).

$$\Delta T_m = \frac{T_{\text{sıcak,giren}} - T_{\text{soğuk,çıkan}} - (T_{\text{sıcak,çıkan}} - T_{\text{soğuk,giren}})}{\ln\left(\frac{T_{\text{sıcak,giren}} - T_{\text{soğuk,çıkan}}}{T_{\text{sıcak,çıkan}} - T_{\text{soğuk,giren}}}\right)} \quad (3.140)$$

Isı değiştiricilerine ait  $U$  değerleri izelge 3.3'de verilmiştir.

**Çizelge 3.3.** Isı geçiş dağılımı

Bileşen	Isı geçiş dağılımı	Referans
Isı değiştiricisi 1	$U_{ID-1} = 0.03$	(Bai ve ark., 2023)
Isı değiştiricisi 2	$U_{ID-2} = 0.75$	(Bai ve ark., 2023)
Isı değiştiricisi 3	$U_{ID-3} = 1$	(Bai ve ark., 2023)
Isı değiştiricisi 4	$U_{ID-4} = 0.5$	(Bai ve ark., 2023)

### 3.2.6. İleri ekserji analizi

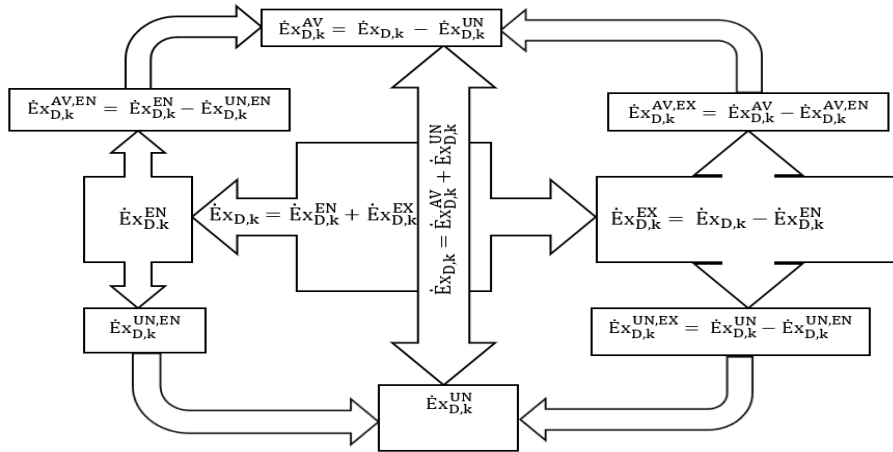
İleri ekserji analizi, ekserji yıkımını parçalara ayırarak birleşenlerdeki tersinmezliklerin (entropi üretimi) daha iyi araştırılması imkânı tanımaktadır. Toplamda dört bölüme ayrılmaktadır.

- İçsel ekserji yıkımı: Sistem bileşeninin kendisinden sorumlu olan ekserji yıkımıdır. Diğer bileşenlerin tersinmezliklerinden etkilenmez  $\dot{E}x_{D,k}^{EN}$  ile göstermektedir.
- Dışsal ekserji yıkımı: Söz konusu olan sistem bileşeninin diğer sistem bileşenleriyle ilişkili olan, onlardan kaynaklanan ekserji yıkımıdır.  $\dot{E}x_{D,k}^{EX}$
- Kaçınılabilir ekserji yıkımı: Önlenebilir ekserji, sistemde iyileştirme yapabileceğimiz alanı vermektedir. Kaçınabilir ekserji parçasına daha

çok dikkat edilmelidir. Ekserjinin büyük olması "k" bileşenin bir yenilenme potansiyeli olduğunu göstermektedir.  $\dot{E}x_{D,k}^{AV}$

- Kaçınılamaz ekserji yıkımı: Bu sistem bileşeni çalışırken en iyi değerlerle aldığımız hali göstermektedir. Son teknoloji sistem uygulanması durumunda sistemde yok edilemeyen yıkımdır. Bunların sebebi de teknik sınırlamalardan kaynaklanmaktadır.  $\dot{E}x_{D,k}^{UN}$

İleri ekserji analizi, sistem performansına geleneksel ekserji analizinden daha ayrıntılı bir yaklaşım sağlamaktadır. Geleneksel ekserji analizi, ekserji yok oluşunun yerini niceliksel olarak belirler, ancak ileri ekserji analizi aynı zamanda ekserji yok oluşunun kaynağını da belirlemektedir. İleri ekserji analizi, sistem bileşenlerindeki ekserji yıkımını endojen, ekzojen, önlenabilir ve kaçınılmaz olarak sınıflandırmaktadır. Aynı zamanda önlenebilir ve kaçınılamaz ekserji yıkımlarını içsel ve dışsal parçalara bölerek analiz etmektedir. Bu ayrıntılı görünüm, tasarımcıya sistem bileşenlerinin iyileştirme potansiyelini göstermekle kalmaz, aynı zamanda tasarımcıya sistemin kendisine mi yoksa sistem bileşenleri arasındaki ilişkiye mi odaklanacağı konusunda rehberlik etmektedir. Ekserji yıkım oranlarının ileri ekserji analizine göre parçalarını bulmaya yönelik denklemler Şekil 3.3 da verilmiştir.



Şekil 3.3.  $\dot{E}x_{D,k}$  bölümlerini elde etmek için kullanılan denklemler (Özen ve ark., 2022)

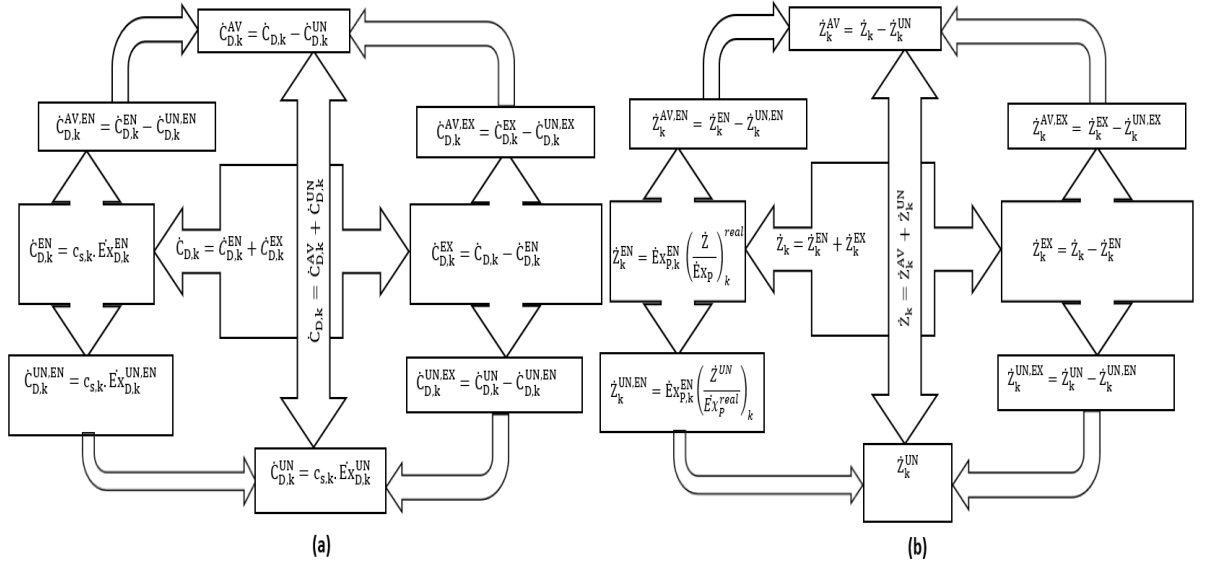
İleri ekserji analizi için gerekli değerler için literatür taraması yapılmıştır. Tarama neticesinde elde edilen değerler tabloda verilmiştir. Sistem koşullarına uygun çalışmayan değerler için değerlendirme yapılmış ve değerler kabul edilmiştir. Sistem bileşenlerine ait gerçek, ideal ve kaçınılamaz koşulları Çizelge 3.4’te verilmiştir.

**Çizelge 3.4.** Sistem bileşenlerine ait gerçek, ideal ve kaçınılmaz koşulları (Lv ve ark., 2023; Alirahmi ve ark.,2022 ; Gülerüz,2023; Liu ve ark.,2020; Srinivas ve ark., 2009; Fallah ve ark.,2022;Alirahmi ve ark.,2022; Haghghi ve ark., 2023; Baghernejad ve ark., 2015; Moharamian ve ark., 2018)

Bileşen	Gerçek	İdeal	Kaçınılmaz Ekserji Yıkımı	Kaçınılmaz Yatırım Maliyeti
Biyokütle verimliliği	$T_g=800\text{ C}$	$T_g=950\text{ C}$	$T_g=900\text{ C}$	0.90
Türbin 1	$\eta = 85\%$	$\eta = 100\%$	$\eta = 95\%$	0.70
Türbin 2	$\eta = 85\%$	$\eta = 100\%$	$\eta = 95\%$	0.70
Kompresör 1	$\eta = 85\%$	$\eta = 100\%$	$\eta = 95\%$	0.70
Kompresör 2	$\eta = 85\%$	$\eta = 100\%$	$\eta = 95\%$	0.70
GV 1	İzentropik	İzentropik	İzentropik	0.90
GV 2	İzentropik	İzentropik	İzentropik	0.90
ID-1	$\Delta T = 10\text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 0\text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 5\text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 20\text{ }^\circ\text{C}$
ID-2	$\Delta T = 10\text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 0\text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 3\text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 20\text{ }^\circ\text{C}$
ID-3	$\Delta T = 10\text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 0\text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 3\text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 20\text{ }^\circ\text{C}$
ID-4	$\Delta T = 10\text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 0\text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 3\text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 20\text{ }^\circ\text{C}$
PEME	$T=80\text{ }^\circ\text{C}$	$T=90\text{ }^\circ\text{C}$	$T=85\text{ }^\circ\text{C}$	0.90

### 3.2.7. İleri eksergo-ekonomik analizi

Geleneksel eksergo-ekonomik analizden farklı olarak ileri eksergo-ekonomik analiz, tıpkı geleneksel eksergo-ekonomik analiz gibi, ekserji imha maliyetleri ve yatırım maliyetleri içsel, dışsal, kaçınılabılır ve kaçınılmaz olarak bölünmüştür. Maliyetlerin bu şekilde ayrılması, tasarımcıya öncelik verilmesi gereken sistem bileşenini göstermekle kalmaz, aynı zamanda maliyet kaynağının nedenini de ortaya çıkarmaktadır. Ekserji yıkım oranları ve yatırım maliyet oranlarının ileri eksergo-ekonomik analize göre hesaplandığı denklemler Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Ekserji yıkım maliyet ve yatırım maliyet hız oranlarının hesaplanması için kullanılan denklemler (Özen, 2024 ; Gülerüz,2022)

### 3.2.8. Sistemin performans kriterleri

Sistemin enerji verimliliği sistemin tasarım amacına göre belirlenmektedir. Sistemin amacı elektrik, hidrojen üretimi ve sıcak su üretmektir. Sistemin amacına göre enerji verimliliği aşağıda tanımlanmıştır.

$$\eta_{enerji} = \frac{W_{net} + \dot{m}_{H_2} LHV_{H_2} + \dot{Q}_{ISI}}{\dot{m}_1(h_1 - h_{10}) + \dot{m}_{biyokütle} LHV_{biyokütle}} \quad (3.141)$$

Geleneksel ekserji analizine göre sistemin ekserji verimliliği ( $\eta_{ekserji}$ ) ve ileri ekserji analizine göre modifiye edilmiş ekserji verimliliği ( $\eta_{sistem}^{adv}$ ) sistemin amacı dikkate alınarak sırasıyla aşağıda verilmiştir.

$$\eta_{ekserji} = \frac{W_{net} + \dot{m}_{H_2} ex_{H_2} + (\dot{E}x_{25} - \dot{E}x_{24})}{(\dot{E}x_1 - \dot{E}x_{10}) + \dot{m}_{biyokütle} ex_{biyokütle}} \quad (3.142)$$

$$\eta_{ekserji}^{adv} = \frac{W_{net} + \dot{m}_{H_2} ex_{H_2} + (\dot{E}x_{25} - \dot{E}x_{24})}{(\dot{E}x_1 - \dot{E}x_{10}) + \dot{m}_{biyokütle} ex_{biyokütle} - \sum \dot{E}x_{D,k}^{UN}} \quad (3.143)$$

Geleneksel eksergo-ekonomik analizine göre sistemin amacına göre genel sistemin ortalama birim ürün maliyeti ( $c_{p,amaç,toplam}$ ) ve ileri eksergo-ekonomik

analizine göre modifiye edilmiş ortalama birim ürün maliyeti ( $C_{p,amaç,toplam}^{adv}$ ) sırasıyla aşağıdaki denklemlerden bulunmaktadır:

$$C_{p,amaç,toplam} = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} \dot{z}_k + \sum_{i=1}^{n_k} \dot{c}_{f,k}}{\dot{W}_{net} + \dot{m}_{H_2} ex_{H_2} + (\dot{E}x_{25} - \dot{E}x_{24})} \quad (3.144)$$

$$C_{p,amaç,toplam}^{adv} = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} \dot{z}_k + \sum_{i=1}^{n_k} \dot{c}_{f,k} - (\sum_{i=1}^{n_k} \dot{c}_{D,k})_{UN}}{\dot{W}_{net} + \dot{m}_{H_2} ex_{H_2} + (\dot{E}x_{25} - \dot{E}x_{24})} \quad (3.145)$$

### 3.2.9. Sistemin duyarlılık analizi

Güç sisteminin performansını etkileyen kararlı değişkenler ve değişim aralıkları çizelge 3.5 de verilmiştir. Duyarlılık analizi için performans kriterleri  $\eta_{ekserji}$ ,  $\eta_{enerji}$  ve  $C_{p,amaç,toplam}$  olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.5. Karar değişkenlerinin değişim aralığı

Değişken	Değişim Aralığı
$\Delta T$ ve ID-1, °C	5-20
$\Delta T$ ve ID-2, °C	3-20
$P_{flans}$ , kPa	300-450
$T_g$ , °C	800-900
$T_{jeo}$ , °C	145-155
$P_R$ , T-	2-8
$J$ , A/m <sup>2</sup>	100-15000

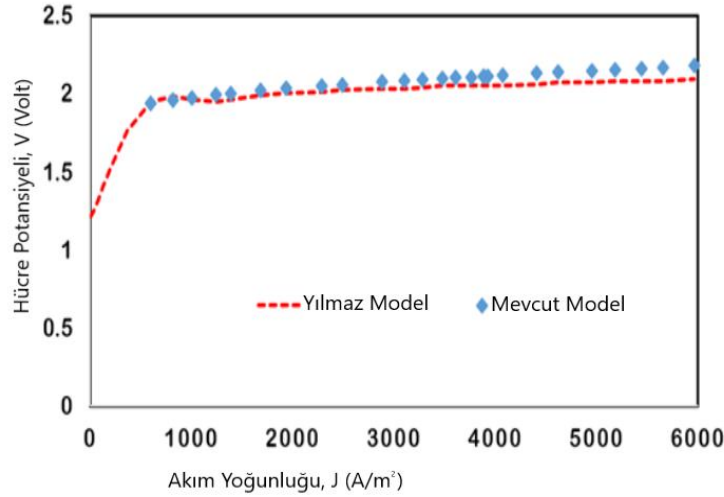
### 3.2.10. Sistemin optimizasyon çalışması

Her ne kadar hem maliyetin minimize edilmesi ( $C_{p,amaç,toplam}$ ) hem de ekserji veriminin ( $\eta_{ekserji}$ ) maksimize edilmesi araştırılmış olsa da, çalışma parametrik bir tek amaçlı optimizasyon yaklaşımını benimsemektedir. Her bir amaç fonksiyonu, diğer tasarım değişkenleri sabit tutulmak suretiyle ayrı ayrı analiz edilmiştir. Bu nedenle, çalışma resmi birçok amaçlı optimizasyonu değil, ardışık olarak gerçekleştirilen tek amaçlı değerlendirmeleri temsil etmektedir.

### 3.2.11. Sistemin doğrulama çalışması

Şekil 3.5, bu çalışmanın PEME matematiksel modeli ile (Yılmaz, 2024)'deki Yılmaz'ın matematiksel modeli arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Doğrulama

grafığı, hücre voltajının akım yoğunluğuna göre değişimini göstermektedir. Şekil 3.5'de verilen doğrulama grafığıni oluşturan verilerdeki en büyük tutarsızlık %4'ü geçmemektedir. Modelleme sonuçları (Yılmaz, 2024)'in bulgularıyla uyumlu olup, modelleme sonuçlarının (Yılmaz, 2024) sonuçlarıyla uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.5. PEME modelinin ref. (Yılmaz, 2024) ile doğrulama grafığı

Açık tek flaşlı jeotermal güç sistemi literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır (Wang ve ark., 2015) . Çizelge 3.7 de görüldüğü gibi bu sayfadaki modelden elde edilen sonuçlar (Wang ve ark., 2015) sonuçlarıyla uyumludur.

Çizelge 3.6. Jeotermal açık güç çevrimi için mevcut model ile ref.(Wang ve ark., 2015) çalışmasının karşılaştırılması

Durum Noktası (Wang ve ark., 2015)	Çalışma Durum Noktası	$\dot{m}$ (kg/s)		Hata %	h (kj/kg)		Hata %	s (kj/kg.K)		Hata %
		(Wang ve ark., 2015)	Çalışma		(Wang ve ark., 2015)	Çalışma		(Wang ve ark., 2015)	Çalışma	
1	1	Veri Girişi	Veri Girişi	-	719.4	719.4	0	2.041	2.042	0.04
2	2	10	10	0	719.4	719.4	0	2.046	2.046	0.00
3	3	0.375	0.375	0	2748.11	2748.12	0	6.821	6.821	0.00
4	4	9.625	9.625	0	640.09	640.09	0	1.860	1.860	0.00
5	5	0.375	0.375	0	2347.13	2347.13	0	7.121	7.122	0.01
6	6	0.375	0.375	0	251.42	251.42	0	0.832	0.832	0.00
Giriş Verileri	Jeotermal kütleli debi=10 kg/s Jeotermal sıcaklık=170°C Jeotermal basınç=900kPa Flaşlama basıncı=500 kPa				Türbin izantropik verimi=%80 Türbin çıkış basıncı=20 kPa Ortam ölü durum basıncı=101.33 kPa Ortam ölü durum sıcaklığı=20°C					

Gazlaştırıcı modelinin doğrulanması için (Habibollahzade ve ark., 2021) 'deki çalışmadaki sentez gazının mol yüzdeleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Çizelge 3.7'de görülebileceği gibi bu sayfadaki modelden ve (Habibollahzade ve ark., 2021)'deki çalışmalardan elde edilen sonuçlar uyumludur.

**Çizelge 3.7.** Biyokütlenin gazlaştırılma modelinin mevcut çalışma ve ref. (Habibollahzade ve ark., 2021) çalışması ile karşılaştırılması

	Sentez gazı bileşimi (%)					
	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
(Habibollahzade ve ark., 2021)	19.20	18.30	11.09	0.89	39.75	10.77
Bu Çalışma	18.58	18.54	10.08	1.023	39.84	11.21
Giriş Verileri	Biyokütle mol akış hızı=1 kmol/s Gazlaştırıcı basıncı=101.3 kPa Gazlaştırıcı sıcaklığı=800°C MCB=0.2 Faktör/biyokütle=4.76m/1					

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, önerilen güç sistemine ait geleneksel ekserji analizi, ileri ekserji analizi, geleneksel eksergo-ekonomik analiz, ileri eksergo-ekonomik analiz sonuçları ile duyarlılık analizleri ve optimizasyon çalışmasının sonuçları ayrıntılı olarak tartışılmaktadır.

##### 4.1. Enerji, Geleneksel Ekserji ve İleri Ekserji Analiz Sonuçları

Önerilen sistemin Şekil 3.1’de verilen şematik görselinde akış numaraları belirtilmiştir. Önerilen sistemdeki çalışma akışkanlarının termodinamik özellikleri, bu akış numaralarına göre Çizelge 4.1’de sunulmuştur.

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

Durum	Akışkan	$\dot{m}$ [kg/s]	P [kPa]	T[°C]	$\dot{E}_x$ [kW]
1	Jeotermal	544.6	1000	150	47983
2	Jeotermal	544.6	400	143.6	47649
3	Jeotermal	7.109	400	143.6	4882
4	Jeotermal	7.109	400	446.7	6960
5	Jeotermal	7.109	40	194.8	2953
6	Jeotermal	7.109	40	75.86	1825
7	Jeotermal	537.5	400	143.6	42767
8	Jeotermal	537.5	400	114.4	25473
9	Jeotermal	537.5	40	75.86	21467
10	Jeotermal	544.6	40	75.86	23292
11	Hava	15	101.3	25	0
12	Hava	15	607.8	256.6	3224
13	Hava	15	607.8	790	8607
14	Hava	15	101.3	456.7	2585
15	Hava	15	101.3	170.3	409.7
16	Hava	12.05	101.3	25	0
17	Hava	12.05	303.9	153.7	1397
18	Biyogaz	23.98	101.3	800	16139
19	Biyogaz	23.98	101.3	586.1	9601
20	Biyokütle	6	101.3	25	176677
21	Su	27.81	101.3	25	0
22	Jeotermal	27.81	101.3	80	526.8
23	Su	17.81	101.3	80	337.3
24	Su	27.8	101.3	80.26	531.5
25	Jeotermal	27.8	101.3	133.6	13996
26	Jeotermal	10	101.3	80	189.4
27	Su,oksijen	10	101.3	80.73	194.2
28	Su	9.996	101.3	80.73	194.2
29	Oksijen	0.003124	101.3	80.73	0.01339
30	Hidrojen	0.0003905	101.3	80.73	0.02609

Sistem bileşenleri için yakıt ve ürün ekserji hızları ile ekserji yıkım hız değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

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

Bileşen	$\dot{E}x_{F,k}$ [kW]	$\dot{E}x_{P,k}$ [kW]	$\dot{E}x_{D,k}$ [kW]
G	176677	100417	76260.00
K-1	3532	3224	308.00
K-2	1565	1397	168.00
T-1	6022	5600	422.00
T-2	4007	3583	424.00
ID-1	6538	5383	1155.00
ID-2	2175	2079	96.00
ID-3	1128	527	601.20
ID-4	17294	13465	3829.00
PEME	82	47	34.99
GV-1	47983	47649	334.00
GV-2	25473	21467	4006.00
<b>Toplam</b>	<b>292476</b>	<b>204837</b>	<b>87638.19</b>

Sistem bileşenlerinin ekserji yıkım hız değerleri Çizelge 4.3’de ve ekserji yıkım hızlarının yüzdelik değerleri Şekil 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.3 ve Şekil 4.1 beraber incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Geleneksel ekserji analizine göre en fazla  $\dot{E}x_{D,k}$  değerini veren sistem bileşenleri sırasıyla G (76260 kW), GV-2 (4006 kW), ID-4 (3829 kW) ve ID-1 (1155 kW) dir. Geleneksel ekserji analizine göre karar-verici iyileştirme çalışmaları için bu sistem bileşenlerine odaklanmalıdır. Çünkü en fazla tersinmezlikler bu sistem bileşenlerinde olmaktadır.
- İleri ekserji analizinde de sistem bileşeni kaynaklı değerlendirme yapılırsa en yüksek  $\dot{E}x_{D,k}^{AV,EN}$  değerlerine sahip sistem bileşenleri sırasıyla G (4605 kW, %6 sı  $\dot{E}x_{D,k}$ ’nın), T-1 (275.7 kW, %65 sı  $\dot{E}x_{D,k}$ ’nın), K-1 (214.1 kW, %69 sı  $\dot{E}x_{D,k}$ ’nın) ve K-2 (116.95 kW, %69 sı  $\dot{E}x_{D,k}$ ’nın) olmaktadır. Bu sıralama sistem bileşenlerinin iyileştirme çalışmalarında öncelik sırasındır. Bu sistem bileşenleri daha verimli sistem bileşenleri ile değiştirilebilir.
- İleri ekserji analizinde de sistemleri diğer sistem bileşenleri ile olan ilişkileri bazında değerlendirme yapılırsa en yüksek  $\dot{E}x_{D,k}^{AV,EX}$  değerlerine sahip sistem bileşenleri sırasıyla GV-2 (2641.7 kW, %65 sı  $\dot{E}x_{D,k}$ ’nın), ID-4 (2158.7 kW, %56 sı  $\dot{E}x_{D,k}$ ’nın), ID-3 (357.05 kW, %59 sı  $\dot{E}x_{D,k}$ ’nın) ve T-2 (303.8 kW, %72 sı  $\dot{E}x_{D,k}$ ’nın) olmaktadır. Optimizasyon çalışması ile bu sistem bileşenlerinin diğer

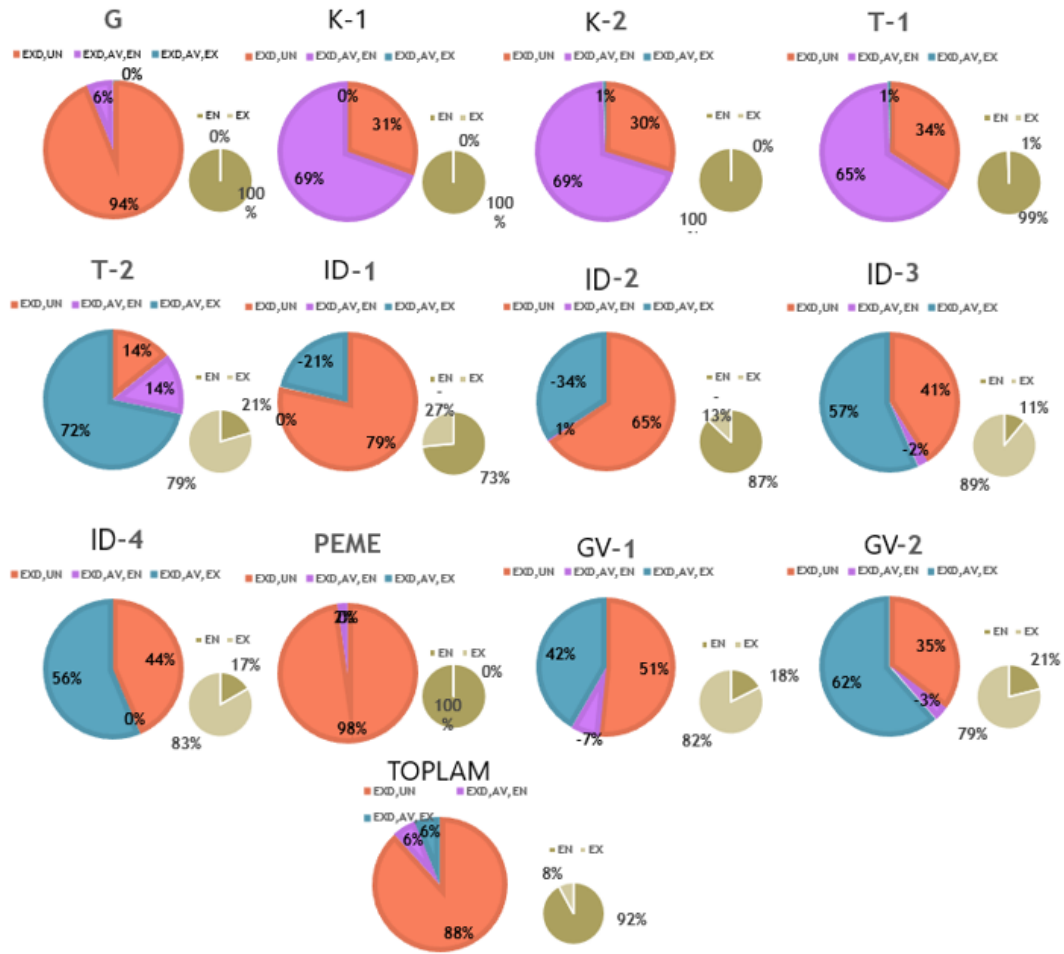
sistem bileşenleri ile olan ilişkisi iyileştirilebilir. .Negatif  $\dot{E}x_{D,k}^{AV,EX}$  değerlerine sahip sistem bileşenleri ID-1 (-432 kW) ve ID-2 (-103.4 kW) yapılacak bir iyileştirme diğer sistem bileşenlerinin ekserji yıkım maliyetlerini arttıracaktır.

- Bütün sistem genelinde bakıldığında  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV}$  değeri 10233.12 kW (%12 sı  $\dot{E}x_{D,k}^{AV}$ 'nin ) dır. Bu durum bütün sistemin iyileştirme oranının %12 olduğunu ve bu değer (  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV}$  ) yaklaşık %50 sini  $\dot{E}x_{D,toplam}^{AV}$  (5096.12 kW) ve %50 sini  $\dot{E}x_{D,k}^{AV,EX}$  (5137 kW) oluşturmaktadır. Sistemin iyileştirme potansiyelinde sistem bileşenlerinin kendisi kadar diğer sistem bileşenleri ile olan ilişkisinin de etkili olduğu görülmektedir.

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

Bileşen	$\dot{E}x_{D,k}$ [kW]	$\dot{E}x_{D,k}^{EN}$ [kW]	$\dot{E}x_{D,k}^{EX}$ [kW]	$\dot{E}x_{D,k}^{UN}$ [kW]	$\dot{E}x_{D,k}^{AV}$ [kW]	$\dot{E}x_{D,k}^{UN,EN}$ [kW]	$\dot{E}x_{D,k}^{UN,EX}$ [kW]	$\dot{E}x_{D,k}^{AV,EN}$ [kW]	$\dot{E}x_{D,k}^{AV,EX}$ [kW]
<b>G</b>	76260	76193	67	71608	4652	71588	20	4605	47
<b>K-1</b>	308	308.2	-0.20	94	214	94.1	-0.1	214.1	-0.1
<b>K-2</b>	168	167.8	0.20	50	118	50.85	-0.85	116.95	1.05
<b>T-1</b>	422	419.6	2.40	144	278	143.90	0.10	275.70	2.30
<b>T-2</b>	424	87.06	336.94	60	364	26.86	33.14	60.20	303.80
<b>ID-1</b>	1155	1810	-655.00	1583	-428	1806	-223	4.00	-432
<b>ID-2</b>	96	112.8	-16.80	198	-102	111.40	86.60	1.40	-103.40
<b>ID-3</b>	601.2	66.1	535.01	258.90	342.3	80.94	177.96	-14.75	357.05
<b>ID-4</b>	3829	637.2	3191.8	1668	2161	634.9	1033.10	2.30	2158.70
<b>PEME</b>	34.99	34.9	0.00	34.17	0.82	34.18	-0.01	0.81	0.01
<b>GV-1</b>	334	58.5	275.48	199	135	84.41	114.59	-25.89	160.89
<b>GV-2</b>	4006	842.6	3163.4	150	2498	986.30	521.70	-143.7	2641.7
<b>Toplam</b>	87638	80737	6900.2	77405	10233	75641.84	1763.23	5096.12	5137

Şekil 4.1'te tüm sistem ve sistem bileşenleri için ekserji yıkım oranları yüzdelerik değerleri verilmiştir.



Şekil 4.1. Tüm sistem ve sistem bileşenleri için ekserji yıkım oranları yüzdelik değerleri.

## 4.2. Geleneksel ve İleri Eksergo-Ekonomik Analiz Sonuçları

Sistem bileşenlerinin ekserji yıkım maliyet hız değerleri Çizelge 4.4 ve 4.5'te ve ekserji yıkım maliyet hızlarının yüzdelik değerleri Şekil 4.2'de verilmiştir. Ekserji yıkımı ile ekserji yıkımı maliyetleri orantılı olarak değiştiği için Şekil 4.1 ve 4.2 birbirlerine benzemektedir. Ekserji yıkım oranında yapılacak herhangi bir iyileştirme ekserji yıkımı maliyet oranını da aynı şekilde etkileyecektir. Dolayısı ile yukarıda ekserji yıkım hızları için yapılan yorumlar ekserji yıkım maliyetleri için de geçerlidir.

Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Şekil 4.2 beraber incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Geleneksel eksergo-ekonomik analizine göre en fazla  $\dot{C}_{D,k}$  değerini veren sistem bileşenleri sırasıyla G (549.07 \$/saat), GV-2 (18.99 \$/saat), ID-4 (18.15 \$/saat) ve ID-1 (15.17 \$/ saat) dir. Geleneksel eksergo-ekonomik analizine göre karar-verici

iyileştirme çalışmaları için bu sistem bileşenlerine odaklanmalıdır. Çünkü en fazla ekserji yıkım maliyetleri bu sistem bileşenlerinde olmaktadır.

- İleri ekserji analizinde de sistem bileşeni kaynaklı değerlendirme yapılırsa en yüksek  $\dot{C}_{D,k}^{AV,EN}$  değerlerine sahip sistem bileşenleri sırasıyla G (33.16 \$/ h, %6 sı  $\dot{C}_{D,k}$ 'nin), T-1 (5.76 \$/saat, %65 sı  $\dot{C}_{D,k}$ 'nin ), K-1 (4.95 \$/h, %69 sı  $\dot{C}_{D,k}$ 'nin ), ve K-2 (2.70 \$/h, %69 sı  $\dot{C}_{D,k}$ 'nin ) olmaktadır. Bu sıralama sistem bileşenlerinin iyileştirme çalışmalarında öncelik sırasıdır. Bu sistem bileşenleri daha verimli sistem bileşenleri ile değiştirilebilir böylelikle ekserji yıkım maliyetleri azaltılabilir.
- İleri ekserji analizinde de sistemleri diğer sistem bileşenleri ile olan ilişkileri bazında değerlendirme yapılırsa en yüksek  $\dot{C}_{D,k}^{AV,EX}$  değerlerine sahip sistem bileşenleri sırasıyla GV-2 (12.52 \$/h, %65 sı  $\dot{C}_{D,k}$ 'nin), ID-4 (10.23 \$/ h, %56 sı  $\dot{C}_{D,k}$ 'nin), ID-3 (1.69 \$/h, %59 sı  $\dot{C}_{D,k}$ 'nin) ve T-2 (1.44 \$/h, %72 sı  $\dot{C}_{D,k}$ 'nin) olmaktadır. Optimizasyon çalışması ile bu sistem bileşenlerinin diğer sistem bileşenleri ile olan ilişkisi iyileştirilebilir ve böylelikle ekserji yıkım maliyetleri azaltılabilir. Negatif  $\dot{C}_{D,k}^{AV,EX}$  değerlerine sahip sistem bileşenleri ID-1 (-5.67 \$/h) ve ID-2 (-0.43 \$/h) yapılacak bir iyileştirme diğer sistem bileşenlerinin ekserji yıkım maliyetlerini arttıracaktır.
- Bütün sistem genelinde bakıldığında  $\dot{C}_{D,toplam}^{AV}$  değeri 67.21 \$/saat (%7 sı  $\dot{C}_{D,k}$ 'nin) dir. Bu durum bütün sistemin ekserji yıkım maliyetinde iyileştirme oranının %7 olduğunu ve bu değer (  $\dot{C}_{D,toplam}^{AV}$  ) yaklaşık %69 sini  $\dot{C}_{D,k}^{AV,EN}$  (46.26 \$/saat) ve %31 sini  $\dot{C}_{D,k}^{AV,EX}$  (20.95 \$/saat) oluşturmaktadır. Bütün sistemin iyileştirme potansiyelinde sistem bileşenlerinin kendisinin diğer sistem bileşenleri ile olan ilişkisinden daha etkili olduğu görülmektedir.

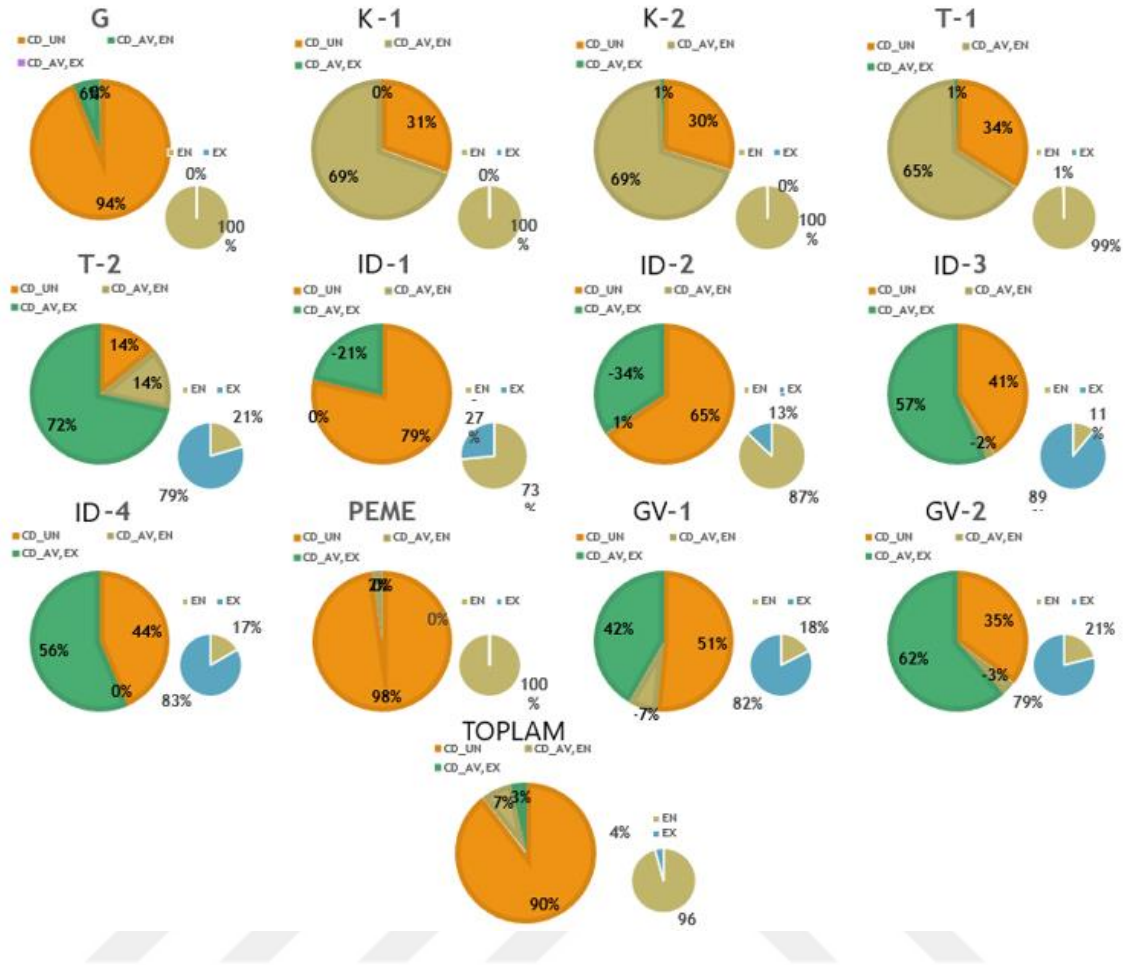
**Çizelge 4.4.** Sistem bileşenleri için ekserji yıkım maliyet oranları.

Bileşen	$c_f$ [\$/GJ]	$c_p$ [\$/GJ]	$\dot{C}_{D,k}$ [\$/h]	$\dot{C}_{D,k}^{EN}$ [\$/h]	$\dot{C}_{D,k}^{EX}$ [\$/h]	$\dot{C}_{D,k}^{UN}$ [\$/h]	$\dot{C}_{D,k}^{AV}$ [\$/h]
G	2.00	3.60	549.07	548.59	0.48	515.58	33.49
K-1	6.42	7.06	7.12	7.12	0.00	2.17	4.95
K-2	6.42	7.23	3.88	3.88	0.00	1.16	2.73
T-1	5.80	6.42	8.81	8.76	0.05	3.01	5.81
T-2	1.32	1.65	2.01	0.41	1.60	0.28	1.73

ID -1	3.65	5.05	15.17	23.78	-8.60	20.79	-5.62
ID-2	1.17	1.32	0.40	0.47	-0.07	0.83	-0.43
ID-3	1.32	3.05	2.85	0.31	2.54	1.23	1.62
ID-4	1.32	1.81	18.15	3.02	15.13	7.91	10.25
PEME	73.63	245.70	9.27	9.27	0.00	9.06	0.22
GV-1	1.30	1.32	1.56	0.27	1.29	0.93	0.63
GV-2	1.32	1.58	18.99	3.99	15.00	7.15	11.84
Toplam	105.66	285.79	637.31	609.90	27.41	570.10	67.21

**Çizelge 4.5.** Sistem bileşenleri için ekserji yıkım maliyet oranları devamı

Bileşen	$\dot{C}_{D,k}^{UN,EN}$ [\$/h]	$\dot{C}_{D,k}^{UN,EX}$ [\$/h]	$\dot{C}_{D,k}^{AV,EN}$ [\$/h]	$\dot{C}_{D,k}^{AV,EX}$ [\$/h]
G	515.43	0.14	33.16	0.34
K-1	2.18	0.00	4.95	0.00
K-2	1.18	-0.02	2.70	0.02
T-1	3.01	0.00	5.76	0.05
T-2	0.13	0.16	0.29	1.44
ID -1	23.72	-2.93	0.05	-5.67
ID-2	0.47	0.36	0.01	-0.43
ID-3	0.38	0.84	-0.07	1.69
ID-4	3.01	4.90	0.01	10.23
PEME	9.06	0.00	0.21	0.00
GV-1	0.40	0.54	-0.12	0.75
GV-2	4.68	2.47	-0.68	12.52
Toplam	563.63	6.46	46.26	20.95



Şekil 4.2. Sistem bileşenleri için ekserji yıkım maliyetleri oranının yüzdelik değerleri.

Sistem bileşenlerine ait yatırım maliyetleri, bölümlerine ayrılarak Çizelge 4.6'da verilmiştir. Sistem bileşen yatırım maliyetlerinin kaçınılabilir, kaçınılamaz, içsel ve dışsal yüzdelik oranları ise Şekil 4.3'de verilmiştir. Çizelge 4.6 ve Şekil 4.3'e beraber bakıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Geleneksel ekserji analizine göre en fazla  $\dot{Z}_k$  değerini veren sistem bileşenleri sırasıyla G (29.18 \$/h), PEME (19.58 \$/h) ve ID-1 (11.89 \$/h) dir. Geleneksel ekserji analizine göre karar-verici iyileştirme çalışmaları için bu sistem bileşenlerine odaklanmalıdır. Çünkü en fazla yatırım maliyetleri bu sistem bileşenlerinde olmaktadır.
- İleri ekserji analizinde de sistem bileşeni kaynaklı değerlendirme yapılırsa en yüksek  $\dot{Z}_{D,k}^{AV,EN}$  değerlerine sahip sistem bileşenleri sırasıyla G (2.92 \$/h, %10  $\dot{Z}_k$ 'nın ), ID-1 (2.05 \$/h, %17  $\dot{Z}_k$ 'nın ) ve PEME (1.96 \$/h, %10  $\dot{Z}_k$ 'nın ) olmaktadır. Bu sıralama sistem bileşenlerinin iyileştirme çalışmalarında öncelik

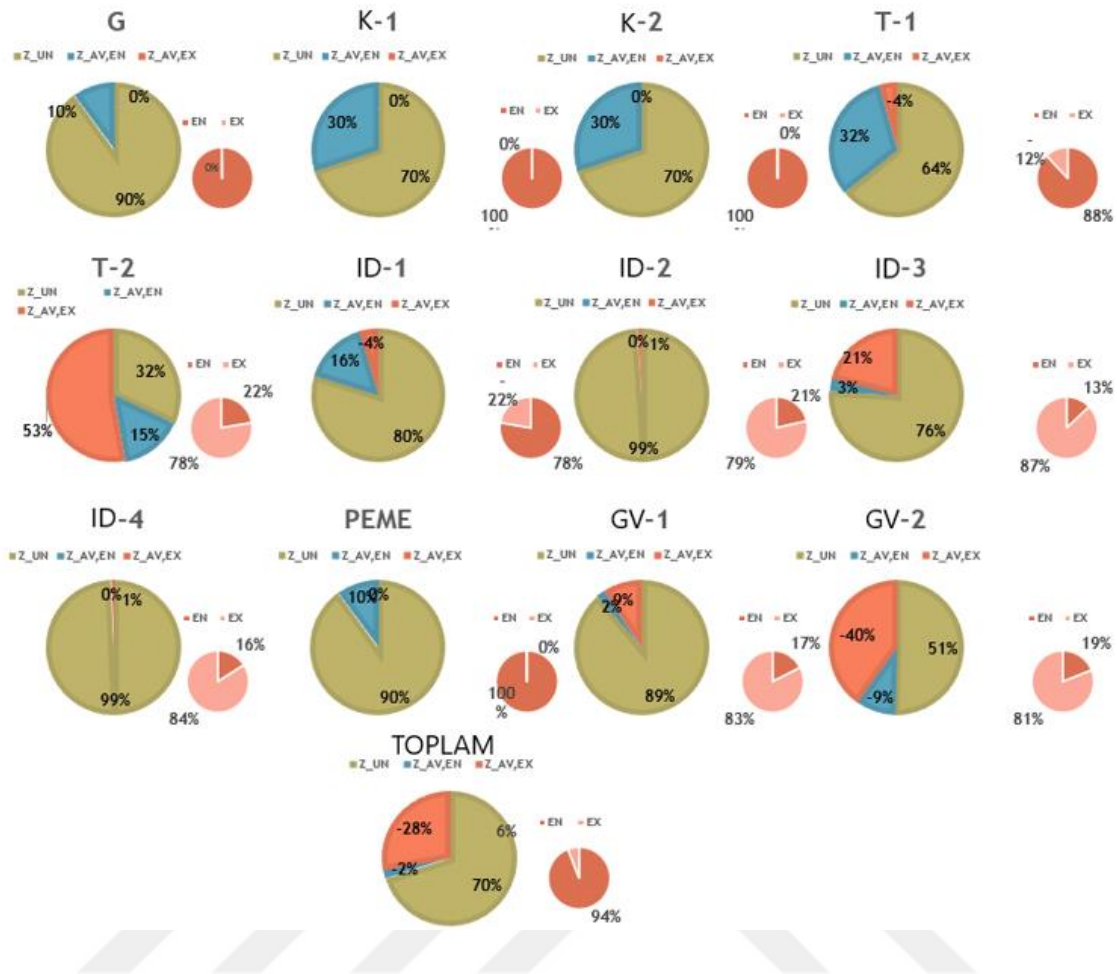
sırasıdır. Bu sistem bileşenleri daha uygun maliyetli sistem bileşenleri ile değiştirilebilir.

- İleri ekserji analizinde de sistemleri diğer sistem bileşenleri ile olan ilişkileri bazında değerlendirme yapılırsa en yüksek  $\dot{Z}_k^{AV,EX}$  değerlerine sahip sistem bileşenleri sırasıyla T-2 (0.52 \$/h, %23 s<sub>1</sub>  $\dot{Z}_k$ 'nin), GV-1 (0.12 \$/h, %8 s<sub>1</sub>  $\dot{Z}_k$ 'nin) ve GV-2 (0.11 \$/h, %8 s<sub>1</sub>  $\dot{Z}_k$ 'nin) olmaktadır. Diğer sistem bileşenlerinde yapılacak bir iyileştirme bu sistem bileşenlerinin daha uygun maliyetli olmasını sağlayabilir.
- Bütün sistem genelinde bakıldığında  $\dot{Z}_{toplamlar}^{AV}$  değeri 8.71 \$/saat dır. Bu değer bütün sistemde yatırım maliyeti açısından %11.32 değerinde bir iyileştirme göstermektedir.

**Çizelge 4.6.** Sistem bileşenlerinin geleneksel ve ileri eksergo-ekonomik analiz sonuçları.

Bileşen	$\dot{Z}_k$ [\$/h]	$\dot{Z}_k^{EN}$ [\$/h]	$\dot{Z}_k^{EX}$ [\$/h]	$\dot{Z}_k^{UN}$ [\$/h]	$\dot{Z}_k^{AV}$ [\$/h]	$\dot{Z}_k^{UN,EN}$ [\$/h]	$\dot{Z}_k^{UN,EX}$ [\$/h]	$\dot{Z}_k^{AV,EN}$ [\$/h]	$\dot{Z}_k^{AV,EX}$ [\$/h]
<b>G</b>	29.18	29.20	-0.02	26.26	2.92	26.28	-0.02	2.92	0.00
<b>K-1</b>	0.35	0.35	0.00	0.24	0.10	0.24	0.00	0.10	0.00
<b>K-2</b>	0.21	0.21	0.00	0.15	0.06	0.15	0.00	0.06	0.00
<b>T-1</b>	3.66	4.23	-0.57	2.56	1.10	2.96	-0.40	1.27	-0.17
<b>T-2</b>	2.23	0.50	1.73	1.56	0.67	0.35	1.21	0.15	0.52
<b>ID-1</b>	11.89	16.65	-4.76	10.43	1.46	14.60	-4.18	2.05	-0.59
<b>ID-2</b>	0.72	0.15	0.57	0.71	0.01	0.15	0.56	0.00	0.01
<b>ID-3</b>	0.43	0.06	0.38	0.33	0.10	0.04	0.29	0.01	0.09
<b>ID-4</b>	5.83	0.93	4.90	5.79	0.04	0.92	4.86	0.01	0.04
<b>PEME</b>	19.58	19.58	0.00	17.63	1.96	17.63	0.00	1.96	0.00
<b>GV-1</b>	1.42	0.25	1.17	1.28	0.14	0.22	1.05	0.02	0.12
<b>GV-2</b>	1.40	0.27	1.13	1.26	0.14	0.24	1.02	0.03	0.11
<b>Toplam</b>	76.91	72.38	4.53	68.19	8.71	63.79	4.40	8.59	0.12

Şekil 4.3'te Sistem bileşenleri için yatırım maliyeti oranlarının yüzdelik değerleri verilmiştir.

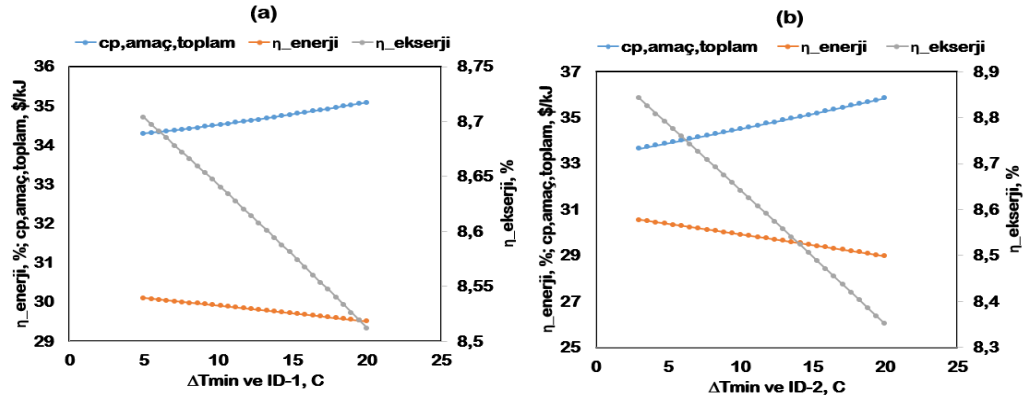


Şekil 4.3. Sistem bileşenleri için yatırım maliyeti oranlarının yüzdelik değerleri.

### 4.3. Duyarlılık Analizi ve Optimizasyon Çalışmasının Sonuçları

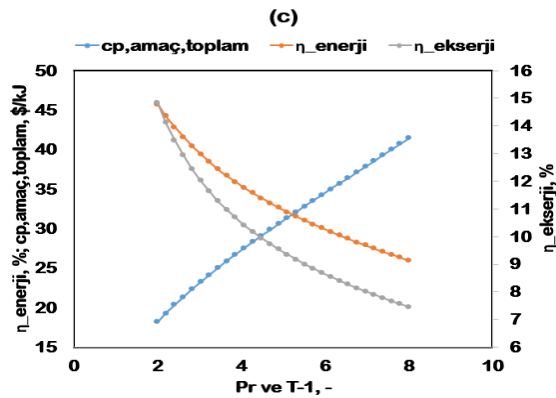
Çizelge 3.5'te verilen kararlı değişkenlerin değişimine göre duyarlılık analizi yapılmış ve sonuçlar aşağıda paylaşılmıştır:

- Şekil 4.4. (a,b) ID-1 ve ID-2'nin sıcaklık farkının değişiminin  $\eta_{\text{enerji}}$ ,  $\eta_{\text{ekserji}}$  ve  $C_{p,\text{amaç,toplam}}$  değerleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Sıcaklık farkları arttıkça  $C_{p,\text{amaç,toplam}}$  artmakta,  $\eta_{\text{enerji}}$  ve  $\eta_{\text{ekserji}}$  azalmaktadır. ID-1 ve ID-2'deki sıcaklık farklarının artması T-1 ve T-2 türbin giriş sıcaklıklarının düşmesine neden olur bu durum da sabit  $W_{\text{net}}$  değerinin sağlanması için jeotermal akış kütleli hızını artırır. Jeotermal akış kütleli hızının artması bütün sistemin  $\eta_{\text{enerji}}$  ve  $\eta_{\text{ekserji}}$  azaltmakta aynı zamanda ekserji yıkım maliyetlerini arttırdığı için  $C_{p,\text{amaç,toplam}}$  değerini arttırmaktadır.



Şekil 4.4. (a,b) ID-1 ve ID-2'nin sıcaklık farkının değişiminin,  $\eta_{enerji}$ ,  $\eta_{ekserji}$  ve  $c_{p,amaç,toplam}$  değerleri üzerindeki etkisini göstermektedir.

- Şekil 4.5. (c) T-1'in basınç oranının değişiminin  $\eta_{enerji}$ ,  $\eta_{ekserji}$  ve  $c_{p,amaç,toplam}$  değerleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Basınç oranı  $c_{p,amaç,toplam}$  artmakta,  $\eta_{enerji}$  ve  $\eta_{ekserji}$  azalmaktadır. Basınç oranının artması T-1 çıkış sıcaklığını ( $T_{14}$ ) ve dolayısı ile T4 ve T-5 sıcaklıklarını düşürmektedir. T-5 sıcaklığının düşmesi  $\eta_{enerji}$  ve  $\eta_{ekserji}$  değerlerinde etkili olan  $Q_4$  değerini düşürmektedir. Çünkü ID-3 ve ID-4 ün kütle hızını düşürmektedir. Sıcaklıkların düşmesi sabit  $W_{net}$  kabulünden dolayı bütün sisteme verilen enerji ve ekserjiyi arttırmıştır ve  $Q_4$  ün de azalmasının etkisiyle  $\eta_{enerji}$  ve  $\eta_{ekserji}$  düşmüştür. Jeotermal akış kütle hızının artması bütün sistemin  $c_{p,amaç,toplam}$  değerini arttırmaktadır.

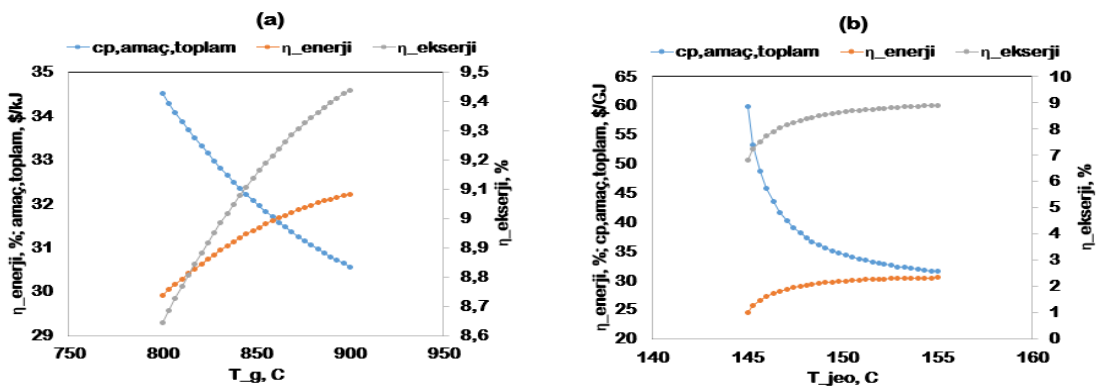


Şekil 4.5.(c) T-1'in basınç oranının değişiminin  $\eta_{enerji}$ ,  $\eta_{ekserji}$  ve  $c_{p,amaç,toplam}$  değerleri üzerindeki etkisini göstermektedir.

- Şekil 4.6, (a) gazlaştırıcı sıcaklığının, (b) ise jeotermal sıcaklığının değişiminin  $\eta_{enerji}$ ,  $\eta_{ekserji}$  ve  $c_{p,toplam}$  değerleri üzerindeki etkisini göstermektedir.

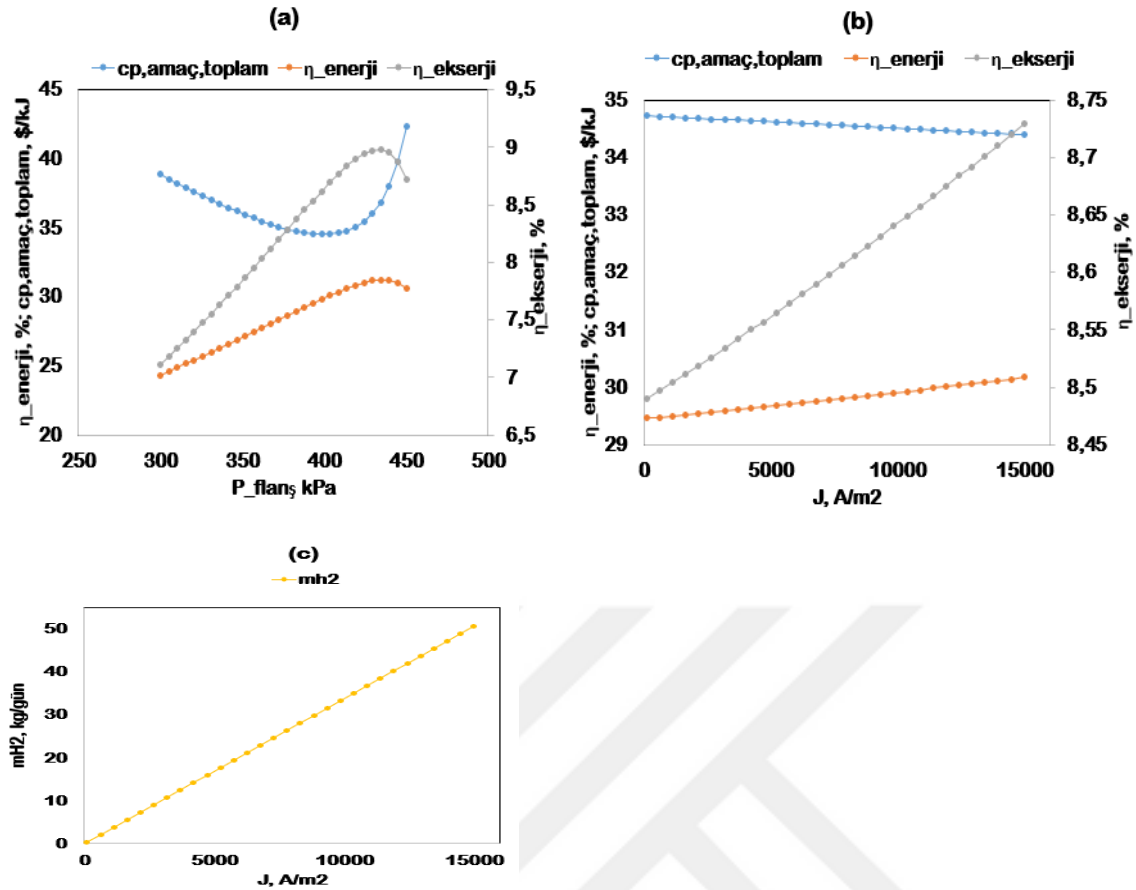
Gazlaştırıcı ve jeotermal sıcaklığı arttıkça  $\eta_{\text{enerji}}$  ve  $\eta_{\text{ekserji}}$  artmakta,  $c_{p,\text{amaç,toplam}}$  azalmaktadır. Jeotermal sıcaklığının artması sabit güç çıktısı kabul edildiği için jeotermal kütlenin azalmasına sebep olmuştur. Her ne kadar jeotermal sıcaklığının artması flanş basıncı sabit kaldığı için 2 noktasının kuruluk derecesini arttırsa da jeotermal kütlenin azalması neredeyse 3 numaralı hattın kütlesini sabit tutmaktadır, bu durumda ID-4 ün ısı kapasitesi fazla değişmediği için ve jeotermal akışın sisteme verdiği enerji ve ekserji hızı azaldığı için bütün sistemin  $\eta_{\text{enerji}}$  ve  $\eta_{\text{ekserji}}$  artmaktadır. Ayrıca jeotermal akış kütle hızının azalması toplam ekserji yıkım maliyetini ve toplam yatırım maliyetini azalttığı için  $c_{p,\text{amaç,toplam}}$  azalmıştır.

- Şekil 4.6, (b) jeotermal sıcaklığının değişiminin  $\eta_{\text{enerji}}$ ,  $\eta_{\text{ekserji}}$  ve  $c_{p,\text{amaç,toplam}}$  değerleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Gazlaştırıcı sıcaklığının artması T-1 ve T-2 sıcaklıklarının artmasına ve sabit güç çıktısı kabulü ile jeotermal akışın kütle debisinin azalmasına sebep olmuştur. T-2'den daha sıcak çıkan jeotermal akış ID-3'ün çıkış sıcaklığı (T22) sabit kabul edildiği için ID-3'den geçen kütle debiyi arttırmıştır. Bu durumda bütün sistemin enerji ve ekserji veriminde etkili olan ID-4 ün ısı kapasitesini ( $Q_4$ ) arttırmış,  $Q_4$  ün artması da enerji ve ekserji verimlerini arttırmıştır. Jeotermal akış kütle hızının azalması toplam ekserji yıkım maliyetini ve toplam yatırım maliyetini azalttığı için  $c_{p,\text{amaç,toplam}}$  azalmıştır.



Şekil 4.6. (a) Gazlaştırıcı sıcaklığının, (b) ise jeotermal sıcaklığı değişiminin  $\eta_{\text{enerji}}$ ,  $\eta_{\text{ekserji}}$  ve  $c_{p,\text{amaç,toplam}}$  değerleri üzerindeki etkisini göstermektedir.

- Şekil 4.7, (a) flanş basıncının (P2) değişiminin  $\eta_{\text{enerji}}$ ,  $\eta_{\text{ekserji}}$  ve  $C_{p,\text{amaç,toplam}}$  değerleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Flanş basıncı 434.5 kPa değerine gelinceye kadar  $\eta_{\text{enerji}}$  ve  $\eta_{\text{ekserji}}$  değerleri artmakta, flanş basıncı 434.5 kPa değerini geçince azalmaya başlamıştır. Flanş basıncının artması akış 2 de kuruluk derecesini düşüreceği için sabit  $W_{\text{net}}$  'den dolayı jeotermal akış kütlesi artmıştır. Jeotermal akış kütleli hızının artması ID-3 ün ısı kapasitesini arttırmış ve bu durum aynı zamanda ID-4 ün de ısı kapasitesinin artmasına neden olmuştur çünkü ID-4'den geçen kütleli hız artmıştır. Flanş basıncı 434.5 kPa değerini gelinceye kadar  $Q_4$ 'deki artış jeotermal kütledeki artışın neden olduğu sisteme verilen enerji ve ekserji artışına baskın geldiği için  $\eta_{\text{enerji}}$  ve  $\eta_{\text{ekserji}}$  değerleri artmıştır. Flanş basıncı 434.5 kPa değerini geçince jeotermal kütledeki artışın neden olduğu sisteme verilen enerji ve ekserji artışı,  $Q_4$ 'deki artışa baskın geldiği için  $\eta_{\text{enerji}}$  ve  $\eta_{\text{ekserji}}$  değerleri azalmaya başlamıştır. Flanş basıncı 398.3 kPa değerine gelinceye kadar  $C_{p,\text{amaç,toplam}}$  değeri azalmakta, flanş basıncı 398.3 kPa değerini geçince artmaya başlamıştır. Flanş basıncı 398.3 kPa değerini gelinceye kadar  $Q_4$  deki artış jeotermal kütledeki artışın neden olduğu ekserji yıkım ve yatırım maliyetlerindeki artışa baskın geldiği için  $C_{p,\text{amaç,toplam}}$  değeri azalmıştır. Flanş basıncı 398.3 kPa değerini geçince jeotermal kütledeki artışın neden olduğu ekserji yıkım ve yatırım maliyetlerindeki artış,  $Q_4$ 'deki artışa baskın geldiği için  $C_{p,\text{toplam}}$  değeri artmaya başlamıştır.
- Şekil 4.7, (b, c) PEME akım yoğunluğunun değişiminin  $\eta_{\text{enerji}}$ ,  $\eta_{\text{ekserji}}$  ve  $C_{p,\text{amaç,toplam}}$  değerleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Akım yoğunluğunun artması üretilen  $H_2$  miktarını arttırmakta bu durum da  $\eta_{\text{enerji}}$  ve  $\eta_{\text{ekserji}}$  değerlerini arttırmaktadır. Akım yoğunluğunun artması PEME de harcanan gücü arttırmaktadır.  $W_{\text{net}}$  sabit kaldığı için PEME de harcanan gücün artması jeotermal akış kütlesini arttırmaktadır. Üretilen  $H_2$  deki artış jeotermal kütledeki artışın neden olduğu sisteme verilen enerji ve ekserji artışına baskın geldiği için  $\eta_{\text{enerji}}$  ve  $\eta_{\text{ekserji}}$  değerleri artmıştır. Üretilen  $H_2$  deki artış, jeotermal kütledeki artışın neden olduğu ekserji yıkım ve yatırım maliyetlerindeki artışa baskın olduğu için  $C_{p,\text{amaç,toplam}}$  değeri azalmıştır.



Şekil 4.7. (a) flanş basıncının ( $P_2$ ) değişimini, (b, c) PEME akım yoğunluğunun değişiminin  $\eta_{enerji}$ ,  $\eta_{ekserji}$  ve  $c_{p,amaç,toplam}$  değerleri üzerindeki etkisini gösterir

Optimizasyon çalışmasında çizelge 3.5'te verilen kararlı değişkenlerin değişimine göre minimum  $c_{p,amaç,toplam}$  değerini ve maksimum  $\eta_{enerji}$  ve  $\eta_{ekserji}$  değerlerini elde etmek amaçlanmıştır. Çizelge 4.7 incelendiği zaman flanş basıncı ( $P_{flanş}$ ) dışındaki diğer kararlı değişkenlerde aynı değerler için minimum  $c_{p,amaç,toplam}$  değerini ve maksimum  $\eta_{enerji}$  ve  $\eta_{ekserji}$  değerlerine ulaşıldığı görülmüştür.  $P_{flanş}$  değeri 398.3 kPa olduğunda minimum  $c_{p,amaç,toplam}$  değerine ulaşılmakta,  $P_{flanş}$  değeri 434.5 kPa olduğunda ise maksimum  $\eta_{enerji}$  ve  $\eta_{ekserji}$  değerlerine ulaşılmaktadır. Fakat en iyi değerlere T-1 in basınç oranı ( $P_R$ ) 2 olduğunda ulaşılmaktadır. Bu nedenle optimum girdi değerleri  $P_R=2$  olduğunda diğer sistem bileşenlerinden mantıklı çıktı değerlerinin elde edildiği kararlı değişkenler olarak alınmıştır. Buna göre amaçlanan güç sisteminin optimum çalışma koşulları çizelge 4.8 de ki değerler olarak belirlenmiş ve bu değerlere göre  $c_{p,amaç,toplam}$ ,  $\eta_{enerji}$ ,  $\eta_{ekserji}$  ve  $\eta_{ekserji}^{adv}$  değerleri bulunmuştur. Ayrıca çizelge 4.8 de optimizasyon

sonucu elde edilen değerler temel durum ile karşılaştırılmış ve bütün performans kriterlerinde %40 dan fazla iyileşme görülmüştür.

**Çizelge 4.7.** Kararlı Değişkenlerin Durumuna Göre Optimizasyon Çalışması

Değişken	Optimizasyon Değeri	$c_{p,toplam}$ \$/GJ	$\eta_{enerji}$ %	$\eta_{ekserji}$ %	$c_{p,toplam}$ Minimum	$\eta_{enerji}$ Maksimum	$\eta_{ekserji}$ Maksimum
$\Delta T$ ve ID-1, °C	5 °C	34.29	30.1	8.704	✓	✓	✓
$\Delta T$ ve ID-2, °C	3 °C	33.65	30.54	8.842	✓	✓	✓
$P_{flaş}$ , kPa	398.3kPa	34.51	29.82	8.610	✓		
	434.5kPa	36.84	31.23	8.970		✓	✓
$T_g$ , °C	900 °C	30.56	32.22	9.44	✓	✓	✓
$T_{jeo}$ , °C	155 °C	31.56	30.49	8.907	✓	✓	✓
$P_R, T-1$	2	18.19	45.75	14.85	✓	✓	✓
$J, A/m^2$	15000	34.4	30.17	8.729	✓	✓	✓

**Çizelge 4.8.** Optimize Edilmiş Durum ile Sistemin Genel Durumu Karşılaştırması

Değişken	Optimizasyon Giriş Değeri	Sistem Temel Durum Giriş Değeri	Performans Kriterleri	Sistem Temel Durum Çıkış Değeri	Optimizasyon Çıkış Değeri	İyileşme Oranı
$\Delta T$ ve ID-1, °C	5 °C	10 °C	$c_{p,amaç,toplam}$ \$/GJ	34.28	18.04	47.37
$\Delta T$ ve ID-2, °C	3 °C	10 °C	$\eta_{enerji}$ %	30.63	46.07	50.41
$P_{flaş}$ , kPa	398.3kPa	400 kPa	$\eta_{ekserji}$ %	8.696	14.99	72.38
$T_g$ , °C	900 °C	800 °C	$\dot{m}_{H_2}$ kg/saat	33.74	47.24	40.01
$T_{jeo}$ , °C	155 °C	150 °C	$c_{p,amaç,toplam}^{adv}$ \$/GJ	24.15	12.24	49.32
$P_R, T-1$	2	6	$\eta_{ekserji}^{adv}$ %	14.13	24.02	69.99
$J, A/m^2$	15000 A/m <sup>2</sup>	10000 A/m <sup>2</sup>				

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde biyokütle ve jeotermal enerji kaynaklı hidrojen üreten ve aynı zamanda ısı ihtiyacını karşılayan bir güç sistemi tasarlanmıştır. Amaçlanan güç sisteminin geleneksel ekserji analizi, ileri ekserji analizi, geleneksel eksergo-ekonomik analizi ve ileri eksergo-ekonomik analizleri yapılmıştır. Ayrıca sistemin performans kriterlerini etkileyen kararlı değişkenler ve performans kriterleri belirlenmiş ve duyarlılık analizi ile optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerin sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

- Geleneksel ekserji analizine göre iyileştirilmesi gereken başlıca sistem bileşenleri en yüksek ekserji yıkım hız değerleri ile sırasıyla G (76260 kW), GV-2 (4006 kW), ID-4 (3829 kW) ve ID-1 (1155 kW) dir.
- İleri ekserji analizine göre üzerinde iyileştirilme çalışması yapılması gerekene başlıca sistem bileşenlerin en yüksek kaçınılabılır içsel ekserji yıkım hız değerleri ile sırasıyla G (4605 kW, %6 s<sub>1</sub>  $\dot{E}_{D,k}$ 'nin), T-1 (275.7 kW, %65 s<sub>1</sub>  $\dot{E}_{D,k}$ 'nin), K-1 (214.1 kW, %69 s<sub>1</sub>  $\dot{E}_{D,k}$ 'nin) ve K-2 (116.95 kW, %69 s<sub>1</sub>  $\dot{E}_{D,k}$ 'nin) olmaktadır.
- İleri eksergo-ekonomik analizine göre ekserji yıkım maliyetleri açısından iyileştirilmesi gereken başlıca sistem bileşenleri en yüksek kaçınılabılır içsel ekserji yıkım maliyet hız değerleri ile sırasıyla G (33.16 \$/h, %6 s<sub>1</sub>  $\dot{C}_{D,k}$ 'nin), T-1 (5.76 \$/h, %65 s<sub>1</sub>  $\dot{C}_{D,k}$ 'nin), K-1 (4.95 \$/h, %69 s<sub>1</sub>  $\dot{C}_{D,k}$ 'nin), ve K-2 (2.70 \$/h, %69 s<sub>1</sub>  $\dot{C}_{D,k}$ 'nin) olmaktadır.
- İleri eksergo-ekonomik analizine göre yatırım maliyetleri iyileştirilmesi gereken sistem bileşenleri en yüksek kaçınılabılır içsel yatırım maliyet hız değerleri ile sırasıyla G (2.92 \$/h, %10 s<sub>1</sub>  $\dot{Z}_k$ 'nin), ID-1 (2.05 \$/h, %17 s<sub>1</sub>  $\dot{Z}_k$ 'nin) ve PEME (1.96 \$/h, %10 s<sub>1</sub>  $\dot{Z}_k$ 'nin) olmaktadır. Duyarlılık analizi sonucunda sistemin performansını en çok etkileyen kararlı değişkenin türbin-1 (T-1) in basınç oranı ( $P_R$ ) olduğu görülmüştür. En iyi performan kriterleri  $P_R=2$  değerinde elde edilmiştir.
- Optimizasyon çalışmasının sonucunda; enerji veriminde ( $\eta_{\text{enerji}}$ ) %50.41 iyileşme, ortalama birim ürün maliyetinde ( $c_{p,\text{amaç,toplam}}$ ) %47.37 iyileşme, ileri ortalama birim ürün maliyetinde ( $c_{p,\text{amaç,toplam}}^{\text{adv}}$ ) %49.32 iyileşme, ekserji veriminde ( $\eta_{\text{ekserji}}$ ) %72.38 iyileşme, ileri ekserji veriminde ( $\eta_{\text{ekserji}}^{\text{adv}}$ ) %69.99 iyileşme ulaşılmıştır.

## 6.KAYNAKLAR

- Ahmadi, M. H., Banihashem, S. A., Ghazvini, M. ve Sadeghzadeh, M. 2018, Thermo-economic and exergy assessment and optimization of performance of a hydrogen production system by using geothermal energy, *Energy and Environment*, 29(8), 1373-1392. doi:10.1177/0958305X18779573
- Ai, T., Chen, H., Wu, D., Zhong, F. ve Song, Y. 2024, Thermodynamic and exergoeconomic evaluation of biomass-to-X system combined the chemical looping gasification and proton exchange membrane fuel cell, *Energy Conversion and Management*, 322. doi:10.1016/j.enconman.2024.119132
- Ali, R. M., Elhewatty, M., Zahran, A. ve Elfadaly, E. (t.y.-c). *New Horizons Towards Sustainable Development*, Egypt International Journal of Environmental Studies and Researches (C. 2).
- Alirahmi, S. M., Khoshnevisan, A., Shirazi, P., Ahmadi, P. ve Kari, D. 2022, Soft computing based optimization of a novel solar heliostat integrated energy system using artificial neural networks, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50. doi:10.1016/j.seta.2021.101850
- Awaleh, M. O., Adan, A. B., Dabar, O. A., Jalludin, M., Ahmed, M. M. ve Guirreh, I. A. 2022, Economic feasibility of green hydrogen production by water electrolysis using wind and geothermal energy resources in asal-ghoubbet rift (Republic of Djibouti): A comparative evaluation, *Energies*, 15(1). doi:10.3390/en15010138
- Ayub, Y., Ren, J., He, C. ve Azzaro-Pantel, C. 2024, Co-gasification of biomass and plastic waste for green and blue hydrogen Production: Novel process development, economic, exergy, advanced exergy, and exergoeconomics analysis, *Chemical Engineering Journal*, 480. doi:10.1016/j.cej.2023.148080
- Azariyan, H., Vajdi, M. ve Rostamnejad Takleh, H. 2021, Assessment of a high-performance geothermal-based multigeneration system for production of power, cooling, and hydrogen: Thermodynamic and exergoeconomic evaluation, *Energy Conversion and Management*, 236. doi:10.1016/j.enconman.2021.113970
- Bai, H., Lin, H., Singh Chauhan, B., Amer, A. M., Fayed, M., Ayed, H., ... Truong, N. 2023, Development of a novel power and freshwater cogeneration plant driven by hybrid geothermal and biomass energy, *Case Studies in Thermal Engineering*, 52. doi:10.1016/j.csite.2023.103695
- Bozgeyik, A., Altay, L. ve Hepbasli, A. 2023, Energetic, exergetic, exergoeconomic, environmental and sustainability analyses of a solar, geothermal and biomass based novel multi-generation system for production of power, hydrogen, heating, cooling and fresh water, *Process Safety and Environmental Protection*, 177, 400-415. doi:10.1016/j.psep.2023.07.018
- Cormos, C. C. 2023, Green hydrogen production from decarbonized biomass gasification: An integrated techno-economic and environmental analysis, *Energy*, 270. doi:10.1016/j.energy.2023.126926
- David, E., Kopac, J., Armeanu, A., Niculescu, V., Sandru, C. ve Badescu, V. 2019, Biomass - Alternative renewable energy source and its conversion for hydrogen rich gas production, *E3S Web of Conferences içinde* (C. 122). EDP Sciences. doi:10.1051/e3sconf/201912201001
- Ding, G. C., Ji, P. ve GENG, M. Y. 2022, Technical assessment of Multi-generation energy system driven by integrated renewable energy Sources: Energetic, exergetic and optimization approaches, *Fuel*, 331. doi:10.1016/j.fuel.2022.125689

- Fan, X., Moria, H., Reda, S. A., Aldawi, F., Truong, N. ve Wu, S. 2023, Geothermal assisted Rankine cycle for performance enhancement of a biomass-driven power plant; Thermoeconomic and environmental impact assessment, *Process Safety and Environmental Protection*, 175, 341-354. doi:10.1016/j.psep.2023.05.008
- Fu, Y., Cai, L., Liu, C., Wu, M. ve Guan, Y. 2024, Thermodynamic and economic performance comparison of biomass gasification oxy-fuel combustion power plant in different gasifying atmospheres using advanced exergy and exergoeconomic approach, *Renewable Energy*, 226. doi:10.1016/j.renene.2024.120290
- Ganjehsarabi, H., Gungor, A. ve Dincer, I. 2012, Exergetic performance analysis of Dora II geothermal power plant in Turkey, *Energy*, 46(1), 101-108. doi:10.1016/j.energy.2012.02.039
- Ghazvini, M., Sadeghzadeh, M., Ahmadi, M. H., Moosavi, S. ve Pourfayaz, F. 2019, 1 Kasım, Geothermal energy use in hydrogen production: A review, *International Journal of Energy Research*. John Wiley and Sons Ltd. doi:10.1002/er.4778
- Gülyüz, E. H. 2023, *Gelişmiş Adyabatik Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolayan Yeni Bir Güç Sisteminin Termodinamik Analizi ve Çok Amaçlı Optimizasyonu, Doktora Tezi*. Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.
- Habibollahzade, A., Ahmadi, P. ve Rosen, M. A. 2021, Biomass gasification using various gasification agents: Optimum feedstock selection, detailed numerical analyses and tri-objective grey wolf optimization, *Journal of Cleaner Production*, 284. doi:10.1016/j.jclepro.2020.124718
- Habibollahzade, A., Ahmadi, P. ve Rosen, M. A. 2021, Biomass gasification using various gasification agents: Optimum feedstock selection, detailed numerical analyses and tri-objective grey wolf optimization, *Journal of Cleaner Production*, 284. doi:10.1016/j.jclepro.2020.124718
- Hançer Gülyüz, E. ve Özen, D. N. 2022, Advanced exergy and exergo-economic analyses of an advanced adiabatic compressed air energy storage system, *Journal of Energy Storage*, 55. doi:10.1016/j.est.2022.105845
- Hashemian, N. ve Noorpoor, A. 2022, A geothermal-biomass powered multi-generation plant with freshwater and hydrogen generation options: Thermo-economic-environmental appraisals and multi-criteria optimization, *Renewable Energy*, 198, 254-266. doi:10.1016/j.renene.2022.07.149
- Hekmatshoar, M., Deymi-Dashtebayaz, M., Gholizadeh, M., Dadpour, D. ve Delpisheh, M. 2022, Thermoeconomic analysis and optimization of a geothermal-driven multi-generation system producing power, freshwater, and hydrogen, *Energy*, 247. doi:10.1016/j.energy.2022.123434
- Khalil, M. ve Dincer, I. 2024, Investigation of a new holistic energy system for a sustainable airport with green fuels, *Sustainable Cities and Society*, 113. doi:10.1016/j.scs.2024.105624
- Khanmohammadi, S., Atashkari, K. ve Kouhikamali, R. 2015, Exergoeconomic multi-objective optimization of an externally fired gas turbine integrated with a biomass gasifier, *Applied Thermal Engineering*, 91, 848-859. doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.08.080
- Kim, H., Park, M. ve Lee, K. S. 2013, One-dimensional dynamic modeling of a high-pressure water electrolysis system for hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(6), 2596-2609. doi:10.1016/j.ijhydene.2012.12.006
- Koc, M., Yuksel, Y. E. ve Ozturk, M. 2022, Thermodynamic and exergo-economic assessments of a new geothermally driven multigeneration plant, *International*

- Journal of Hydrogen Energy, 47(45), 19463-19480.  
doi:10.1016/j.ijhydene.2022.01.044
- Kubilay Karayel, G. ve Dincer, I. 2024, Design of an integrated multigenerational energy system for clean hydrogen and oleic acid fuels production, *Fuel*, 373.  
doi:10.1016/j.fuel.2024.132307
- Li, J., Zoghi, M. ve Zhao, L. 2022, Thermo-economic assessment and optimization of a geothermal-driven tri-generation system for power, cooling, and hydrogen production, *Energy*, 244. doi:10.1016/j.energy.2022.123151
- Liu, J., Hsu, C. Y., Ahmad, S. F., Alotaibi, M. A., Allahham, M. I. ve Qin, M. 2025, Design and energy, exergy, thermoeconomic, and exergo-environmental (4E) analyses of a novel hybrid geothermal/biogas-powered green multi-generation system using a post-combustion CO<sub>2</sub> capture unit, *Applied Energy*, 377.  
doi:10.1016/j.apenergy.2024.124662
- Löhr, K., Matavel, C. E., Tadesse, S., Yazdanpanah, M., Sieber, S. ve Komendantova, N. 2022, Just Energy Transition: Learning from the Past for a More Just and Sustainable Hydrogen Transition in West Africa, *Land*, 11(12).  
doi:10.3390/land11122193
- Lv, X., Lv, Y. ve Zhu, Y. 2023, Multi-variable study and MOPSO-based multi-objective optimization of a novel cogeneration plant using biomass fuel and geothermal energy: A complementary hybrid design, *Energy*, 270.  
doi:10.1016/j.energy.2023.126921
- Lv, X., Lv, Y. ve Zhu, Y. 2023, Multi-variable study and MOPSO-based multi-objective optimization of a novel cogeneration plant using biomass fuel and geothermal energy: A complementary hybrid design, *Energy*, 270.  
doi:10.1016/j.energy.2023.126921
- Lykas, P., Bellos, E., Kitsopoulou, A. ve Tzivanidis, C. 2024, Dynamic analysis of a solar-biomass-driven multigeneration system based on s-CO<sub>2</sub> Brayton cycle, *International Journal of Hydrogen Energy*, 59, 1268-1286.  
doi:10.1016/j.ijhydene.2024.02.093
- Mofrad, K. G., Zandi, S. ve Salehi, G. 2023, Exergoeconomic and exergoenvironmental assessment of a geothermal-driven cogeneration system utilizing dual-pressure organic Rankine cycle and zeotropic mixtures, *Energy Reports*, 9, 5206-5223.  
doi:10.1016/j.egy.2023.04.271
- Moharamian, A., Soltani, S., Rosen, M. A. ve Mahmoudi, S. M. S. 2018, Advanced exergy and advanced exergoeconomic analyses of biomass and natural gas fired combined cycles with hydrogen production, *Applied Thermal Engineering*, 134, 1-11. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.01.103
- Moret, S., Peduzzi, E., Gerber, L. ve Maréchal, F. 2016, Integration of deep geothermal energy and woody biomass conversion pathways in urban systems, *Energy Conversion and Management*, 129, 305-318. doi:10.1016/j.enconman.2016.09.079
- Ni, M., Leung, M. K. H. ve Leung, D. Y. C. 2008, Energy and exergy analysis of hydrogen production by a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer plant, *Energy Conversion and Management*, 49(10), 2748-2756.  
doi:10.1016/j.enconman.2008.03.018
- Özen, D. N., Hançer Güleriyüz, E. ve Acılar, A. M. 2024, Advanced exergo-economic analysis of an advanced adiabatic compressed air energy storage system with the modified productive structure analysis method and multi-objective optimization study, *Journal of Energy Storage*, 81. doi:10.1016/j.est.2023.110380

- Özen, D. N. ve 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. doi:10.1016/j.energy.2022.123531
- Pascuzzi, S., Anifantis, A. S., Blanco, I. ve Mugnozza, G. S. 2016, Electrolyzer performance analysis of an integrated hydrogen power system for greenhouse heating a case study, *Sustainability (Switzerland)*, 8(7). doi:10.3390/su8070629
- Siddiqui, O. ve Dincer, I. 2021, Sustainable utilization of agricultural bio-waste for multigeneration of electricity, heating, cooling and freshwater, *Journal of Cleaner Production*, 319. doi:10.1016/j.jclepro.2021.128540
- “*Study of the dynamic behaviour of large scale PEM electrolyzers in a fast demand response perspective.*” (t.y.-ap). <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:37876> adresinden erişildi.
- Suleman, F., Dincer, I. ve Agelin-Chaab, M. 2014, Development of an integrated renewable energy system for multigeneration, *Energy*, 78, 196-204. doi:10.1016/j.energy.2014.09.082
- Şen, O. ve Yilmaz, C. 2022, Thermodynamic analysis of geothermal and solar assisted power generation and heating system, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37(3), 1625-1637. doi:10.17341/gazimmfd.879077
- Taheri, M. H., Seker, U., Akkurt, G. G. ve Mohammadpourfard, M. 2024, Design, evaluation, and optimization of an integrated proton exchange membrane and double flash geothermal based organic Rankine cycle multi-generation system fed by a biomass-fueled gasifier, *Sustainable Cities and Society*, 101. doi:10.1016/j.scs.2023.105126
- Wang, D., Ali, M. A., Alizadeh, A., Singh, P. K., Almojil, S. F., Alali, A. F., ... Almohana, A. I. 2024, Thermoeconomic appraisal of a novel power and hydrogen cogeneration plant with integration of biomass and geothermal energies, *International Journal of Hydrogen Energy*, 52, 385-400. doi:10.1016/j.ijhydene.2023.02.066
- Wang, Jianyong, Wang, J., Dai, Y. ve Zhao, P. 2015, Thermodynamic analysis and optimization of a flash-binary geothermal power generation system, *Geothermics*, 55, 69-77. doi:10.1016/j.geothermics.2015.01.012
- Wang, Jing, Basem, A., Shami, H. O., Musa, V. A., Singh, P. K., Alanazi, Y. M., ... El-Shafay, A. S. 2024, A renewable multigeneration system based on biomass gasification and geothermal energy: Techno-economic analysis using neural network and Grey Wolf optimization, *Journal of Energy Storage*, 104. doi:10.1016/j.est.2024.114519
- Wang, S., Liu, C., Tang, J., Xiao, T., Huo, E. ve Guan, Z. 2023, Multi-mode and exergoeconomic analysis of a novel combined cooling, heating, and power system applied in the geothermal field, *Energy Conversion and Management*, 276. doi:10.1016/j.enconman.2022.116565
- Wang, X., Yuan, Y., Li, M. ve Pugazhendhi, A. 2023, A novel hybrid process with a sustainable auxiliary approach concerning a biomass-fed solid oxide fuel cell and triple-flash geothermal cycle, *Separation and Purification Technology*, 315. doi:10.1016/j.seppur.2023.123724
- Wang, Z., Xiong, W., Ting, D. S. K., Carriveau, R. ve Wang, Z. 2016, Conventional and advanced exergy analyses of an underwater compressed air energy storage system, *Applied Energy*, 180, 810-822. doi:10.1016/j.apenergy.2016.08.014

- Xing, L. ve Li, J. 2022, Proposal of biomass/geothermal hybrid driven poly-generation plant centering cooling, heating, power, and hydrogen production with CO<sub>2</sub> capturing: Design and 3E evaluation, *Fuel*, 330. doi:10.1016/j.fuel.2022.125593
- Xing, L. ve Li, J. 2022, Proposal of biomass/geothermal hybrid driven poly-generation plant centering cooling, heating, power, and hydrogen production with CO<sub>2</sub> capturing: Design and 3E evaluation, *Fuel*, 330. doi:10.1016/j.fuel.2022.125593
- Yilmaz, F. 2024, An innovative study on a geothermal based multigeneration plant with transcritical CO<sub>2</sub> cycle: Thermodynamic evaluation and multi-objective optimization, *Process Safety and Environmental Protection*, 185, 127-142. doi:10.1016/j.psep.2023.11.025
- Yin, N. 2024, Enhancing energy efficiency and reducing emissions in a novel biomass-geothermal hybrid system for hydrogen/ammonia production using machine learning and multi-level heat recovery, *International Journal of Hydrogen Energy*, 92, 959-974. doi:10.1016/j.ijhydene.2024.10.343
- Yuksel, Y. E. 2020, Thermodynamic and performance evaluation of an integrated geothermal energy based multigeneration plant, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 7(2), 381-401. doi:10.31202/ecjse.648657
- Yuksel, Y. E. ve Ozturk, M. 2017, Thermodynamic and thermoeconomic analyses of a geothermal energy based integrated system for hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(4), 2530-2546. doi:10.1016/j.ijhydene.2016.04.172
- Yusupov, Z. ve Almaktar, M. (t.y.-bf). *Geothermal Power Generation*. www.intechopen.com adresinden erişildi.
- Zhang, S., Jian, W., Zhou, J., Li, J. ve Yan, G. 2023, A new solar, natural gas, and biomass-driven polygeneration cycle to produce electrical power and hydrogen fuel; thermoeconomic and prediction approaches, *Fuel*, 334. doi:10.1016/j.fuel.2022.126825
- Zhang, X., Zeng, R., Deng, Q., Gu, X., Liu, H., He, Y., ... 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. doi:10.1016/j.enconman.2019.111953
- Zhang, X., Zeng, R., Du, T., He, Y., Tian, H., Mu, K., ... Li, H. 2019, Conventional and energy level based exergoeconomic analysis of biomass and natural gas fired polygeneration system integrated with ground source heat pump and PEM electrolyzer, *Energy Conversion and Management*, 195, 313-327. doi:10.1016/j.enconman.2019.05.017
- Zhang, X., Zeng, R., Du, T., He, Y., Tian, H., Mu, K., ... Li, H. 2019, Conventional and energy level based exergoeconomic analysis of biomass and natural gas fired polygeneration system integrated with ground source heat pump and PEM electrolyzer, *Energy Conversion and Management*, 195, 313-327. doi:10.1016/j.enconman.2019.05.017
- Zhang, Y., Salem, M., Elmasry, Y., Hoang, A. T., Galal, A. M., Pham Nguyen, D. K. ve Wae-hayee, M. 2022, Triple-objective optimization and electrochemical/technical/environmental study of biomass gasification process for a novel high-temperature fuel cell/electrolyzer/desalination scheme, *Renewable Energy*, 201, 379-399. doi:10.1016/j.renene.2022.10.059
- Zhao, Y. ve Wang, J. 2016, Exergoeconomic analysis and optimization of a flash-binary geothermal power system, *Applied Energy*, 179, 159-170. doi:10.1016/j.apenergy.2016.06.108

- Zhou, C., Doroodchi, E. ve Moghtaderi, B. 2013, An in-depth assessment of hybrid solar-geothermal power generation, *Energy Conversion and Management*, 74, 88-101. doi:10.1016/j.enconman.2013.05.014
- Zoghi, M., Gharaie, S., Hosseinzadeh, N. ve Zare, A. 2025, Thermo-economic and environmental comparison of renewable feed compressed air energy storage systems for stable green hydrogen production, *Journal of Energy Storage*, 110. doi:10.1016/j.est.2025.115326

