

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİLENEBİLİR ENERJİ TEKNOLOJİLERİ DESTEKLİ BİR
HİBRİT ÇOKLU ÜRETİM SİSTEMİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK
ANALİZİ

SELÇUK İNAÇ
DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2020

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİLENEBİLİR ENERJİ
TEKNOLOJİLERİ DESTEKLİ BİR HİBRİT
ÇOKLU ÜRETİM SİSTEMİNİN
SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ANALİZİ

SELÇUK İNAÇ
DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ SALİH ÖZEN ÜNVERDİ
II. DANIŞMANI
PROF. DR. ADNAN MİDİLLİ

GEBZE
2020

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**SUSTAINABILITY ANALYSIS OF A
RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES
BASED HYBRID MULTIGENERATION
SYSTEM**

SELÇUK İNAÇ

**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF PHILOSOPHY
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

THESIS SUPERVISOR
ASSIST. PROF. DR. SALİH ÖZEN ÜNVERDİ
II. THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. ADNAN MİDİLLİ

GEBZE

2020



GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 29/01/2020 tarih ve 2020/7 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 22/05/2020 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Şelçuk İNAÇ'ın tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Dr. Öğr. Üyesi Salih Özen ÜNVERDİ

ÜYE

: Prof. Dr. Alp Er Şevki KONUKMAN

ÜYE

: Prof. Dr. İlyas KANDEMİR

ÜYE

: Prof. Dr. Haydar KÜÇÜK

ÜYE

: Prof. Dr. Tahir Hikmet KARAKOÇ

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

ÖZET

Bu tez çalışmasında, orta sıcaklıklı jeotermal enerji kaynakları ile birlikte biyokütle ve güneş enerjisi teknolojilerinin hibrit bir şekilde kullanıldığı, faydalı çıktılar olarak; elektrik, sıcak su, kurutma havası, biyogaz, hidrojen ve oksijen üreten aynı zamanda ısıtma ve soğutma sağlayan yeni bir hibrit çoklu üretim sistemin sürdürülebilirlik analizi gerçekleştirilmiştir. Sistem, güneş ışınımının gün içindeki değişimine göre yirmi dört saatlik zaman dilimi göz önüne alınarak dört farklı modda (M1: 08.00-16.00, M2: 16.00-18.00/06.00-08.00, M3: 18.00-02.00, M4: 02.00-06.00) çalışacak şekilde dizayn edilmiştir.

Sürdürülebilirlik analiz çalışmaları; i) performans göstergeleri (sistem net elektrik gücü, sistem enerji verimi, sistem ekserji verimi), ii) çevresel göstergeler (küresel ısınma potansiyeli, CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli), iii) ekonomik göstergeler (eksergoekonomik faktör), iv) ekserjetik sürdürülebilirlik göstergeler (atık ekserji oranı, ekserji geri kazanılabilirlik oranı, ekserji yıkım oranı, çevresel etki faktörü, ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi) gibi göstergelere bağlı olarak gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak; hibrit çoklu üretim sisteminin maksimum değerleri M1, M2, M3, M4 çalışma modları için sırasıyla, i) net elektrik gücü 12233 kW, 12389 kW, 13926 kW, 13618 kW, ii) enerji verimi %76, %82, %89, %83, iii) ekserji verimi %22, %23, %47, %25, iv) ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 0,27, 0,29, 0,85, 0,34, v) CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli 77,36 ton CO₂-e/h, 44 ton CO₂-e/h, 45,64 ton CO₂-e/h, 48,64 ton CO₂-e/h, vi) minimum toplam ürün birim maliyeti 15,64 \$/GJ, 73,67 \$/GJ, 39,92 \$/GJ, 48,3 \$/GJ olarak bulunmuştur. Önemli bir beklenti olarak; bilimsel, akademik ve teknolojik anlamda bu tez çalışmasının, ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarını ve teknolojilerini kullanan hibrit çoklu üretim sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir Enerji, Çoklu Üretim Sistemleri, Hibrit Sistemler, Sürdürülebilirlik, Enerji ve Ekserji Analizi.

SUMMARY

In this thesis, sustainability analysis of a hybrid multigeneration system has been performed, utilizing medium temperature geothermal energy resources in a hybrid manner with biomass and solar energy technologies, and simultaneously producing electricity, hot water, drying air, biogas, hydrogen and oxygen as well as providing heating and cooling as the useful outcomes. The system has been designed to be able to operate in four different modes (M1: 08.00-16.00, M2: 16.00-18.00/06.00-08.00, M3: 18.00-02.00, M4: 02.00-06.00) by taking into consideration a time period of twenty-four hours according to the variation of the solar irradiation quantity during a day.

Sustainability analysis studies have been conducted by depending on the following indicators such as i) performance indicators (system net electric power, system energy efficiency, system exergy efficiency), ii) environmental indicators (global warming potential and the reduction potential of CO₂ emission), iii) economic indicators (exergoeconomic factor), and iv) exergetic sustainability indicators (waste exergy ratio, exergy recoverability ratio, exergy destruction ratio, environmental effect factor, and exergetic sustainability index).

Accordingly, considering the M1, M2, M3, and M4 operating modes, the maximum values of the hybrid multigeneration system have been respectively calculated to be i) 12233 kW, 12389 kW, 13926 kW, 13618 kW for the net electricity power generation, ii) %76, %82, %89, %83 for the energy efficiency, iii) 22%, 23%, 47%, 25% for the exergy efficiency, iv) 0,27, 0,29, 0,85, 0,34 for the exergetic sustainability index, v) 77.36 tons CO₂-e/h, 44 tons CO₂-e/h, 45.64 tons CO₂-e/h, 48.64 tons CO₂-e/h for the reduction potential of CO₂ emission, and vi) 15.64 \$/GJ, 73.67 \$/GJ, 39.92 \$/GJ, 48.3 \$/GJ for the minimum total product unit cost. As an important expectation, it is considered that, in terms of the scientific, academic and technologic aspects, this study will, in our country, contribute to the development of hybrid multigeneration system utilizing the renewable energy sources and technologies.

Key Words: Renewable Energy, Multigeneration Systems, Hybrid Systems, Sustainability, Energy and Exergy Analysis.

TEŞEKKÜR

Öncelikle, doktora eğitimim ve akademik hayatım boyunca bilimsel, akademik teknik destek ve her konuda yardımlarını benden esirgemeyen, bilgi ve fikirleriyle bu tez çalışmasının önünü açan değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Salih Özen ÜNVERDİ'ye ve eş danışmanım Prof. Dr. Adnan MİDİLLİ'ye teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

Tez çalışmam boyunca değerli fikirlerini benimle paylaşan TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, Enerji Enstitüsü değerli mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Maddi ve manevi her konuda yardımlarını benden esirgemeyen annem Gülay İNAÇ'a, ablam Suna TÜRKYILMAZ'a ve kardeşim Serpil İNAÇ'a sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
TABLolar DİZİNİ	xx
1. GİRİŞ	1
1.1. Tez Çalışmasının Amacı ve Önemi	4
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	6
2.1. Yenilenebilir Enerji Destekli Çoklu Üretim Sistemleri	6
2.1.1. Jeotermal-Güneş Destekli Çoklu Üretim Sistemleri	6
2.1.2. Jeotermal-Biyokütle Destekli Çoklu Üretim Sistemleri	8
2.1.3. Güneş-Biyokütle Destekli Çoklu Üretim Sistemleri	8
2.1.4. Diğer Çoklu Üretim Sistemleri Üzerine Yapılan Çalışmalar	9
2.2. Sürdürülebilirlik Analizleri	13
3. YAPILAN ÇALIŞMALAR	18
3.1. Giriş	18
3.2. Kavramsal Tasarım	18
3.2.1. Genel Kabuller	19
3.2.2. Hibrit Çoklu Üretim Sisteminin Proses Akış Diyagramı ve Çalışma Prensibi	19
3.3. Termodinamik Analiz	23
3.3.1. Kütlenin Korunumu	24
3.3.2. Enerjinin Korunumu	24
3.3.3. Entropi Dengesi	25
3.3.4. Ekserji Analizi	25
3.3.5. Sürdürülebilirlik Analizi	27
3.3.5.1. Performans Göstergesi	27

3.3.5.1.1. Enerji Verimi	27
3.3.5.1.2. Ekserji Verimi	28
3.3.5.2. Çevresel Gösterge	28
3.3.5.2.1. Küresel Isınma Potansiyeli	28
3.3.5.2.2. CO ₂ Emisyonu Azaltım Potansiyeli	28
3.3.5.3. Ekonomik Gösterge	30
3.3.5.3.1. Eksergoekonomik Faktör	30
3.3.5.4. Ekserjetik Sürdürülebilirlik Gösterge	32
3.3.5.4.1. Atık Ekserji Oranı	33
3.3.5.4.2. Ekserji Geri Kazanılabilirlik Oranı	33
3.3.5.4.3. Ekserji Yıkım Oranı	33
3.3.5.4.4. Çevresel Etki Faktörü	34
3.3.5.4.5. Ekserjetik Sürdürülebilirlik İndeksi	34
3.3.5.5. Termodinamik Modelleme	35
3.3.5.5.1. Isı Depolamalı Parabolik Oluklu Güneş Kollektör Sistemi	35
3.3.5.5.2. Isı Depolama Sistemi	42
3.3.5.5.3. Biyokütle Yakma Sistemi	48
3.3.5.5.4. Kombine Tek Flaş/Binary Jeotermal Güç Üretim Sistemi	52
3.3.5.5.5. Absorbsiyonlu Soğutma Sistemi	58
3.3.5.5.6. Bölge Isıtma Sistemi	62
3.3.5.5.7. Sıcak Su Üretim Sistemi	63
3.3.5.5.8. Kurutma Sistemi	63
3.3.5.5.9. Biyogaz Üretim Sistemi	64
3.3.5.5.10. Katı Oksit Yakıt Pili Sistemi	69
3.3.5.5.11. PEM Elektrolizör Sistemi	81
3.3.5.5.12. Hibrit Çoklu Üretim Sistemi	84
4.BULGULAR ve TARTIŞMALAR	90
4.1. Giriş	90
4.2. Doğrulama Çalışmaları	92
4.3. Sürdürülebilirlik Analizi Sonuçları	96
4.3.1. Performans Göstergesi Sonuçları	96

4.3.2. Çevresel Gösterge Sonuçları	120
4.3.3. Ekonomik Gösterge Sonuçları	129
4.3.4. Ekserjetik Sürdürülebilirlik Gösterge Sonuçları	135
4.4. Durum Çalışması	155
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	158
5.1. Sonuçlar	159
5.2. Öneriler	161
 KAYNAKLAR	 162
ÖZGEÇMİŞ	175
EKLER	176



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u> <u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
A	: Alan (m^2)
a_{aeo}	: Atık ekserji oranı
$\dot{C}$	: Ekserji maliyeti akısı (\$/h)
c	: Birim ekserji maliyeti (\$/GJ)
CH_4	: Metan
CO_2	: Karbondioksit
CO	: Karbon monoksit
c_p	: Özgül ısı ($kJ/kg \cdot K$)
$\dot{E}$	: Birim zamanda enerji aktarımı (kW)
$\dot{E}x$	: Birim zamanda ekserji aktarımı (kW)
e_{cef}	: Çevresel etki faktörü
ex^{fiz}	: Fiziksel ekserji
ex^{kim}	: Kimyasal ekserji
g_{gko}	: Ekserji geri kazanılabilirlik oranı
h	: Özgül entalpi (kJ/kg)
$\bar{h}$	: Özgül molar entalpi ($kJ/kmol$)
$I_{gün}$	: Güneş ışınlam miktarı (W/m^2)
H_2	: Hidrojen
H_2O	: Su
$LiBr$	: Lityum bromür
$\dot{m}$	: Kütleli debi (kg/s)
$\dot{n}$	: Molar debi (mol/s)
N_2	: Azot
Nu	: Nusselt sayısı
O_2	: Oksijen
P	: Basınç (kPa)
P_0	: Çevre basıncı (kPa)
Pr	: Prandtl sayısı

Re	: Reynolds sayısı
s	: Özgül entropi (kJ/kg·K)
$\bar{s}$	: Özgül molar entropi (kJ/kmol·K)
s_{esi}	: Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi
T	: Sıcaklık (°C)
T_0	: Çevre sıcaklığı (°C)
$\dot{Q}$	: Birim zamanda ısı aktarımı (kW)
$\dot{W}$	: Birim zamanda yapılan iş (kW)
γ_{eyo}	: Ekserji yıkım oranı
Z	: Satın alma maliyeti (\$)
$\Delta T_{LOS F}$	: Logaritmik ortalama sıcaklık farkı
η	: Enerji verimi
λ	: Hava yakıt oranı
ρ	: Yoğunluk
ψ	: Ekserji verimi
ABS	: Absorber
AD	: Anaerobik digester
AID	: Alt ısı değer (kJ/kg)
al	: Alıcı
ASS	: Absorbsiyonlu soğutma sistemi
AZA	: Azaltım
bg	: Biyogaz
BIS	: Bölge ısıtma sistemi
bin	: Binary
BK	: Biyokütle kazanı
bka	: Belediye katı atıkları
BT	: Buhar türbini
buh	: Buhar
BÜS	: Biyogaz üretim sistemi
ç	: Çıkan
dg	: Doğalgaz
EF	: Emisyon faktörü
el	: Elektrik

emi	: Emisyon
EŞJ	: Eşanjör
et	: Eriyik tuz
EVA	: Evaporatör
fo	: Sıvı yakıt
FYT	: Fosil yakıt tüketimi
fy	: Fosil yakıt
g	: Giren
gün	: Güneş
GV	: Genleşme vanası
HÇÜS	: Hibrit çoklu üretim sistemi
IDS	: Isı depolama sistemi
ID-PGKS	: Isı depolamalı parabolik oluklu güneş kollektör sistemi
IGBJ	: Isı geri kazanım buhar jeneratörü
İNV	: İnvertör
iz	: İzantropik
JEN	: Jeneratör
jeo	: Jeotermal
kay	: Kayıp
KGS	: Kombine tek flaş/binary jeotermal güç üretim sistemi
KIZ	: Kızdırıcı
KOM	: Kompresör
kol	: Kollektör
KON	: Kondenser
KOYP	: Katı oksit yakıt pili
KOYPS	: Katı oksit yakıt pili sistemi
köm	: Kömür
kp	: Kaplayıcı
KS	: Kollektör sayısı
KUS	: Kurutma sistemi
ORC	: Organik Rankine çevrimi
OT	: Organik türbin
PEME	: Polimer elektrolit membranlı elektrolizör

PEMES	: Polimer elektrolit membranlı elektrolizör sistemi
PGK	: Parabolik oluklu güneş kollektörü
PGKS	: Parabolik oluklu güneş kollektör sistemi
pn	: Pinch noktası
SDT	: Sıcak depolama tankı
SEP	: Seperatör
sis	: Sistem
SKF	: Yatırım dönüşüm faktörü
SODT	: Soğuk depolama tankı
SP	: Sirkülasyon pompası
SÜS	: Sıcak su üretim sistemi
tal	: Talaş
top	: Toplam
ty	: Isı transfer yağı
übm	: Ürün birim maliyeti
ÜID	: Üst ısı değeri (kJ/kg)
wf	: İş akışkanı

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
3.1: Kavramsal tasarımın akış şeması.	18
3.2: Hibrit çoklu üretim sisteminin çalışma modları.	21
3.3: Hibrit çoklu üretim sisteminin proses akış diyagramı.	22
3.4: Sürdürülebilirlik analiz çalışmasının akış şeması.	23
3.5: Modelleme kapsamının analiz akış şeması.	35
3.6: Isı depolamalı parabolik oluklu güneş kollektör sisteminin proses akış diyagramı.	36
3.7: İndirekt iki tanklı eriyik tuzlu ısı depolama sisteminin proses akış diyagramı.	43
3.8: Biyokütle yakma sisteminin proses akış diyagramı.	48
3.9: Kombine tek flaş/binary jeotermal güç üretim sisteminin proses akış diyagramı.	53
3.10: Kızdırıcı için jeotermal ve ORC iş akışkanı arasındaki sıcaklık ilişkisi.	56
3.11: Tek kademeli absorpsiyonlu soğutma sisteminin proses akış diyagramı.	59
3.12: Bölge ısıtma sisteminin proses akış diyagramı.	62
3.13: Kurutma sisteminin proses akış diyagramı.	63
3.14: Biyogaz üretim sisteminin proses akış diyagramı.	65
3.15: Katı oksit yakıt pili sisteminin proses akış diyagramı.	70
3.16: Yüksek basınçlı PEM elektrolizör sisteminin proses akış diyagramı.	81
3.17: M1 çalışma modunun ekserji akış diyagramı.	84
3.18: M2 çalışma modunun ekserji akış diyagramı.	86
3.19: M3 çalışma modunun ekserji akış diyagramı.	86
3.20: M4 çalışma modunun ekserji akış diyagramı.	86
4.1: PGK doğrulama sonuçları.	93
4.2: KOYP doğrulama sonuçları.	95
4.3: Çalışma modlarına göre sistem net elektrik gücünün jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi.	97

4.4:	Çalışma modlarına göre sistem net elektrik gücünün jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi.	98
4.5:	M1 çalışma modunda sistem net elektrik gücünün eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi.	98
4.6:	Çalışma modlarına göre sistem net elektrik gücünün eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı değişimi.	99
4.7:	Çalışma modlarına göre sistem net elektrik gücünün flaşlama basıncına bağlı değişimi.	100
4.8:	Çalışma modlarına göre sistem net elektrik gücünün ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi.	101
4.9:	Çalışma modlarına göre sistem elektrik veriminin jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi.	102
4.10:	M1 çalışma modunda sistem elektrik veriminin eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi.	103
4.11:	Çalışma modlarına göre sistem elektrik veriminin eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı değişimi.	104
4.12:	Çalışma modlarına göre sistem elektrik veriminin flaşlama basıncına bağlı değişimi.	104
4.13:	Çalışma modlarına göre sistem elektrik veriminin ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi.	105
4.14:	Çalışma modlarına göre sistem enerji veriminin jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi.	106
4.15:	Çalışma modlarına göre sistem enerji veriminin jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi.	107
4.16:	M1 çalışma modunda sistem enerji veriminin eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi.	108
4.17:	Çalışma modlarına göre sistem enerji veriminin eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı değişimi.	109
4.18:	Çalışma modlarına göre sistem enerji veriminin flaşlama basıncına bağlı değişimi.	109
4.19:	Çalışma modlarına göre sistem enerji veriminin ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi.	110
4.20:	Çalışma modlarına göre sistem ekserji veriminin jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi.	111

4.21:	Çalışma modlarına göre sistem ekserji veriminin jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi.	112
4.22:	M1 çalışma modunda sistem ekserji veriminin eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi.	113
4.23:	Çalışma modlarına göre sistem ekserji veriminin flaşlama basıncına bağlı değişimi.	114
4.24:	Çalışma modlarına göre sistem ekserji veriminin ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi.	114
4.25:	Çalışma modlarına göre sistem ekserji kaybının jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi.	115
4.26:	Çalışma modlarına göre sistem ekserji kaybının jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi.	116
4.27:	Çalışma modlarına göre sistem ekserji kaybının eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı değişimi.	117
4.28:	Çalışma modlarına göre sistem ekserji kaybının ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi.	117
4.29:	Çalışma modlarına göre sistem toplam ekserji kayıpları.	118
4.30:	Çalışma modlarına göre alt sistemlerin toplam ekserji kayıpları.	119
4.31:	Çalışma modlarına göre birim CO ₂ emisyon miktarının jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi.	121
4.32:	Çalışma modlarına göre birim CO ₂ emisyon miktarının jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi.	122
4.33:	Çalışma modlarına göre birim CO ₂ emisyon miktarının eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı değişimi.	123
4.34:	M1 çalışma modunda birim CO ₂ emisyon miktarının eşanjör-p çıkış sıcaklığı ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi.	123
4.35:	Çalışma modlarına göre birim CO ₂ emisyon miktarının ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi.	124
4.36:	Çalışma modlarına ve yakıt türüne göre jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı CO ₂ emisyonu azaltım potansiyeli.	125
4.37:	Çalışma modlarına ve yakıt türüne göre jeotermal kaynak debisine bağlı CO ₂ emisyonu azaltım potansiyeli.	126
4.38:	Çalışma modlarına ve yakıt türüne göre eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı CO ₂ emisyonu azaltım potansiyeli.	127

4.39:	Çalışma modlarına ve yakıt türüne göre ORC türbin giriş basıncına bağlı CO ₂ emisyonu azaltım potansiyeli.	128
4.40:	Çalışma modlarına göre toplam ürün birim maliyetinin jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi.	130
4.41:	Çalışma modlarına göre toplam ürün birim maliyetinin jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi.	130
4.42:	Çalışma modlarına göre toplam ürün birim maliyetinin eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı değişimi.	131
4.43:	Çalışma modlarına göre toplam ürün birim maliyetinin kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi.	132
4.44:	Çalışma modlarına göre toplam ürün birim maliyetinin flaşlama basıncına bağlı değişimi.	133
4.45:	Çalışma modlarına göre toplam ürün birim maliyetinin ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi.	134
4.46:	Çalışma modlarına göre atık ekserji oranının jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi.	135
4.47:	Çalışma modlarına göre atık ekserji oranının jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi.	136
4.48:	M1 çalışma modunda atık ekserji oranının eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi.	137
4.49:	Çalışma modlarına göre atık ekserji oranının flaşlama basıncına bağlı değişimi.	137
4.50:	Çalışma modlarına göre atık ekserji oranının ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi.	138
4.51:	Çalışma modlarına göre ekserji geri kazanılabilirlik oranının jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi.	139
4.52:	Çalışma modlarına göre ekserji geri kazanılabilirlik oranının jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi.	140
4.53:	M1 çalışma modunda ekserji geri kazanılabilirlik oranının eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi.	141
4.54:	Çalışma modlarına göre ekserji geri kazanılabilirlik oranının eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı değişimi.	141
4.55:	Çalışma modlarına göre ekserji geri kazanılabilirlik oranının flaşlama basıncına bağlı değişimi.	142

4.56:	Çalışma modlarına göre ekserji geri kazanılabilirlik oranının ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi.	143
4.57:	Çalışma modlarına göre ekserji yıkım oranının jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi.	144
4.58:	Çalışma modlarına göre ekserji yıkım oranının jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi.	144
4.59:	Çalışma modlarına göre ekserji yıkım oranının eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı değişimi.	145
4.60:	Çalışma modlarına göre ekserji yıkım oranının flaşlama basıncına bağlı değişimi.	146
4.61:	Çalışma modlarına göre çevresel etki faktörünün jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi.	147
4.62:	Çalışma modlarına göre çevresel etki faktörünün jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi.	147
4.63:	M1 çalışma modunda çevresel etki faktörünün eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi.	148
4.64:	Çalışma modlarına göre çevresel etki faktörünün flaşlama basıncına bağlı değişimi.	149
4.65:	Çalışma modlarına göre çevresel etki faktörünün ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi.	150
4.66:	Çalışma modlarına göre ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi.	151
4.67:	Çalışma modlarına göre ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi.	151
4.68:	M1 çalışma modunda ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi.	152
4.69:	Çalışma modlarına göre ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin flaşlama basıncına bağlı değişimi.	153
4.70:	Çalışma modlarına göre ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi.	154
4.71:	Türkiye'deki orta sıcaklıklı jeotermal enerji kaynaklarının dağılımı.	156

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Mevcut literatür özet tablosu.	11
2.2: Enerji sistemlerinin sürdürülebilirlik analizleri üzerine yapılan çalışmalar.	15
2.3: Ekserjetik sürdürülebilirlik analizleri üzerine yapılan çalışmalar.	17
3.1: Fosil yakıtların alt ısı değerleri ve CO ₂ emisyon faktörü değerleri.	30
3.2: ID-PGKS ekipman listesi.	37
3.3: ID-PGKS ekipmanlarının kütle ve enerji denge denklemleri.	45
3.4: ID-PGKS ekipmanlarının ekserji denge denklemleri.	46
3.5: ID-PGKS ekipmanlarının yatırım maliyeti denklemleri.	46
3.6: ID-PGKS ekipmanlarının maliyet denge ve yardımcı denklemleri.	47
3.7: BYS ekipman listesi.	49
3.8: Odun talaşının elemental analiz değerleri.	49
3.9: BYS ekipmanlarının kütle ve enerji denge denklemleri.	51
3.10: BYS ekipmanlarının ekserji denge denklemleri.	51
3.11: BYS ekipmanlarının yatırım maliyeti denklemleri.	52
3.12: BYS ekipmanlarının maliyet denge ve yardımcı denklemleri.	52
3.13: KGS ekipman listesi.	54
3.14: KGS ekipmanlarının kütle ve enerji denge denklemleri.	57
3.15: KGS ekipmanlarının ekserji denge denklemleri.	57
3.16: KGS ekipmanlarının yatırım maliyeti denklemleri.	58
3.17: KGS ekipmanlarının maliyet denge ve yardımcı denklemleri.	58
3.18: ASS ekipman listesi.	60
3.19: ASS ekipmanlarının kütle ve enerji denge denklemleri.	61
3.20: ASS ekipmanlarının ekserji denge denklemleri.	61
3.21: ASS ekipmanlarının yatırım maliyeti denklemleri.	61
3.22: ASS ekipmanlarının maliyet denge ve yardımcı denklemleri.	62
3.23: BÜS ekipman listesi.	65
3.24: Belediye katı atıklarının yaklaşık içerik analizi.	66
3.25: Tipik biyogaz içeriği.	67
3.26: Belediye katı atıklarının elemental analizi.	67

3.27:	BÜS ekipmanlarının kütle ve enerji denge denklemleri.	68
3.28:	BÜS ekipmanlarının ekserji denge denklemleri.	69
3.29:	BÜS ekipmanlarının yatırım maliyeti denklemleri.	69
3.30:	BÜS ekipmanlarının maliyet denge ve yardımcı denklemleri.	69
3.31:	KOYPS ekipman listesi.	71
3.32:	KOYP giriş ve çıkış bileşenlerinin mol oranları.	78
3.33:	KOYPS ekipmanlarının molar ve enerji denge denklemleri.	79
3.34:	KOYPS ekipmanlarının ekserji denge denklemleri.	79
3.35:	KOYPS ekipmanlarının yatırım maliyeti denklemleri.	80
3.36:	KOYPS ekipmanlarının maliyet denge ve yardımcı denklemleri.	80
3.37:	PEMES ekipman listesi.	82
3.38:	PEMES ekipmanlarının molar ve enerji denge denklemleri.	83
3.39:	PEMES ekipmanlarının ekserji denge denklemleri.	83
3.40:	PEMES ekipmanlarının yatırım maliyeti denklemleri.	84
3.41:	PEMES ekipmanlarının maliyet denge ve yardımcı denklemleri.	84
3.42:	Performans alt gösterge denklemleri.	87
3.43:	Küresel ısınma potansiyeli denklemleri.	88
3.44:	CO ₂ emisyonu azaltım potansiyeli denklemleri.	88
3.45:	Toplam ürün birim maliyeti denklemleri.	88
3.46:	Ekserjetik sürdürülebilirlik alt göstergelerinin denklemleri.	89
4.1:	Sistem temel işletim parametreleri.	90
4.2:	Tasarım ve işletim büyüklükleri.	91
4.3:	BYS doğrulama sonuçları.	93
4.4:	KGS doğrulama sonuçları.	94
4.5:	ASS doğrulama sonuçları.	94
4.6:	PEME doğrulama sonuçları.	95
4.7:	Performans göstergelerinin sonuçları.	120
4.8:	Jeotermal kaynak sıcaklığına göre sistem sürdürülebilirlik göstergelerinin sonuçları.	155
4.9:	Durum çalışmasının giriş parametreleri.	156
4.10:	Durum çalışmasının sonuçları.	157

1. GİRİŞ

Enerji, temel olarak insan ihtiyaçlarını karşılamak ve yaşam kalitesini arttırmak için kullanılmakla birlikte bir ülkenin ekonomik ve sosyal kalkınma potansiyelini yansıtan en önemli göstergelerden biridir [1]. Dünyanın geleneksel enerji kaynakları sınırlı olmasına rağmen nüfusun ve sanayileşmenin sürekli artmasının bir sonucu olarak enerji talebi gün geçtikçe artmaktadır. Günümüzde fosil enerji kaynaklarının giderek artan kullanımı küresel düzeyde evre üzerinde birçok yıkıcı etkiye neden olmakla birlikte bölgesel ve küresel huzursuzluğu önemli ölçüde arttırdığı açıkça görülmektedir. Aslında yeşil enerji kaynakları nispeten uzun vadede daha srdrlebilirken fosil enerji kaynakları sınırlıdır ve dolayısıyla istikrar ve sürdürülebilirlik için gerekli özelliklerden yoksundur. Özellikle maliyeti etkin ve çevresel açıdan uyumlu bir yeşil enerji kaynağı bir toplumun yaşam standardının yanı sıra sürdürülebilir teknolojik gelişmesini ve endüstriyel verimini yükseltmek için en önemli araçtır. Bu bağlamda, gelecek açısından güneş, rüzgâr, hidrolik, jeotermal ve biyoktle gibi çevresel ve sürdürülebilir temiz enerji kaynaklarına önemli ölçüde ihtiyaç duyulmaktadır [2].

Fosil enerji kaynaklarına olan bağımlılığı azaltmanın ilk stratejisi, konut ve endüstriyel alanlarda enerji talebini düşürmek ve enerji verimliliği üzerine odaklanan enerji tasarruf programları uygulanarak enerji sarfiyatını azaltmaya dayanmaktadır. Bu amaca ulaşmak için ikinci bir strateji ise sadece büyük ölçekli enerji üretimi için değil aynı zamanda bağımsız sistemler için de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasıdır [3], [4]. Yenilenebilir enerji kaynakları evre üzerinde zararlı etkileri olmayan ve yüksek kalitede bir kaynağı temsil ettikleri için çok değerli enerji kaynakları olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarını yüksek verimlilikle kullanmak oldukça önemlidir. Herhangi bir enerji dönüştürme işleminin verimi tersinmezlikler (rneğin, sürtünme nedeniyle oluşan ısı vb.) sebebiyle sınırlıdır. Enerji dönüşüm süreçleri, tekli üretim süreçlerinde her zaman kullanılan enerjinin bir formu olmak zorundadır. Sistem kayıplarına örnek olarak ısı makinelerindeki ısı kayıpları, eksik yanma ve frenleme sebebiyle iş kayıpları verilebilir. Bu kayıp enerjiler tekrar kullanılır ve faydalı çıktılar veya ürünler haline dnştrlrlerse birincil enerji kaynağı çok daha verimli kullanılmış olur [5].

Günümüzde enerji üretim teknolojilerinden biri olan kojenerasyon sistemleri ya da ısı ve gücün birlikte üretildiği sistemler, elektrik üretiminin yanı sıra atık ısıdan faydalı ısı üretimi üzerine iki ürünü bütünleşik bir biçimde üretmek için nispeten basit bir prosesi temsil eder. Kullanılan yakıtın bir bölümünü hem elektrik hem de faydalı ısıya dönüştüren bir kojenerasyon sisteminin genel enerji verimi yaklaşık olarak %60'dır. Son zamanlarda bazı araştırmacılar, kojenerasyon sistemlerine alternatif olarak ortak bir enerji kaynağından elektrik, ısıtma ve soğutma enerjisini aynı anda üreten verimi yaklaşık %80'e kadar ulaşabilen trijenerasyon sistemlerini geliştirmişlerdir [6]. Bahsedilen bu iki enerji üretim sistemlerinin yanı sıra birçok ülkede küresel ısınmayı azaltmak ve enerji sistemlerinin verimini daha da arttırmak için yeni teknolojiler önerilmekte, geliştirilmekte ve test edilmektedir. Bu teknolojiler arasında çoklu üretim (multigeneration) sistemlerinin yüksek verimlilik potansiyelleri, düşük enerji maliyetleri ve birim enerji üretimi başına düşük emisyonları nedeniyle önemi giderek artmaktadır. En basit ifadeyle, çoklu üretim sistemleri bir veya daha fazla enerji girdisinden birçok faydalı çıktı üreten sistemlerdir. Genel olarak çoklu üretim sistemlerinin temel amacı verimi ve sürdürülebilirliği arttırmak, çevresel etki ve maliyeti azaltmaktır. Çoklu üretim sistemlerinin olası faydalı çıktıları olarak elektrik, ısıtma, soğutma, sıcak su, sıcak hava, hidrojen vb. verilebilir [7].

Yenilenebilir enerji teknolojileri destekli çoklu üretim sistemlerinin gelecekte fosil enerji kaynaklarının ve sistemlerinin sebep olduğu küresel düzeyde olumsuz etkilerinin azaltılmasında çok önemli katkılar sağlayacağı açıktır. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji teknolojileri destekli çoklu üretim sistemlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması için çalışmalar yapılması oldukça önemlidir. Mevcut literatürde yenilenebilir enerji teknolojileri destekli çoklu üretim sistemleri üzerine çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışmalar ile ilgili ayrıntılı bilgiler tez çalışmasının literatür araştırması bölümünde detaylı bir şekilde verilmiştir. Söz konusu bu çalışmalar, genel olarak farklı yenilenebilir enerji kaynakları ve üretilen faydalı çıktılara göre çeşitli sistemler geliştirme ve geliştirilen sistemlerin genel olarak teknik, ekonomik, çevresel vb. açıdan teorik analizlerini kapsamaktadır.

Yenilenebilir enerji teknolojilerinin geleneksel elektrik enerjisi dönüşüm sistemlerine göre daha az rekabetçi olduğu bilinmekte, çünkü nispeten yüksek yatırım ve bakım maliyetleri vardır. Diğer taraftan, belirli bir yerde yenilenebilir enerji sistemlerini kurup kurmamak ve hangi yenilenebilir enerji kaynağının veya kaynaklarının kombinasyonunun en iyi seçim olduğunu belirlemek hükümetler ve

işletmeler için önemli bir karar verme sürecidir [3]. Bu karar verme sürecinde teknik analizlerin yanı sıra en önemli parametrelerden birisi de yenilenebilir enerji teknolojileri destekli sistemlerin sürdürülebilirlik açısından analizleridir. Sürdürülebilirlik analizleri, sürdürülebilir kalkınma konusundaki tartışmanın itici gücü olmasının yanı sıra oldukça önemli bir konudur. Sürdürülebilirliği güvenilir bir şekilde ölçen araçlar geliştirmek, sürdürülebilir olmayan süreçleri belirlemek, tasarımcılara ürün kalitesini bildirmek, sosyal ve çevresel etkileri öngörmek için bir ön şarttır. Bu hızla büyüyen alanda geliştirilen göstergelerin ve lme araçlarının çokluğu, bu alandaki kavramsal ve yöntemsel çalışmaların önemini ortaya koymaktadır [8].

Sürdürülebilir enerji konusunda ortak bir anlayış, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama kabiliyetinden ödün vermeksizin günümüz ihtiyaçlarını karşılayan bir enerjinin sağlanmasıdır [4]. Bununla birlikte, enerji üretimine ilişkin sürdürülebilirlik konusunun genel kapsamı şu şekilde açıklanabilir; enerji üretim potansiyelini devamlı arttırmak, enerji üretiminden kaynaklanan atıkları doğal yöntemlerle temizlenebilir bir seviyede tutmak, insan sağlığıyla ilgili riskleri en düşük seviyede tutmak ve mümkün olan en düşük seviyede çevresel kaynakları içeren hammaddeleri kullanarak enerji üretimini gerçekleştirmektedir. Kısacası yeşil enerji kavramıyla tanımlanabilen sürdürülebilir enerji üretimi, doğal kaynakların kullanımını, zararlı gaz emisyonlarına ve atıklara neden olan enerji üretim yöntemlerinin kullanımını mümkün olan en düşük seviyeye indirmeyi amaçlamaktadır. Bu sayede küresel ısınmayı ve iklim değişikliklerini yavaşlatma sürecine ve yeni uzun vadeli istihdam fırsatlarına katkıda bulunulacak ve küresel düzeyde daha dengeli ekonomik kalkınma sağlanacaktır [9].

Bu düşünceler ışığında, bu tez çalışmasında geliştirilen yenilenebilir enerji teknolojileri destekli hibrit çoklu üretim sistemini (HS) oluşturan tüm alt sistemlerin termodinamiğin birinci ve ikinci yasaı kapsamında enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilmeli ve bu analizler doğrultusunda evre ve temel işletim koşullarına bağlı olarak HS'n sürdürülebilirlik analizi yapılmalı ve elde edilen sonuçlar ayrıntılı bir şekilde ortaya konulmalıdır. Bu tez çalışması kapsamında yapılan detaylı literatür araştırmasında, yenilenebilir enerji teknolojileri destekli HS'ler üzerine gerçekleştirilen sürdürülebilirlik analiz çalışmalarının oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Mevcut literatürde yenilenebilir enerji teknolojileri destekli kojenerasyon, trijenerasyon ve çoklu üretim sistemleri üzerine yapılan farklı çalışmalar bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında, sürdürülebilirlik analizi

gerçekleştirilecek olan HÇÜS literatürden farklı olarak orta sıcaklıklı jeotermal enerji kaynaklarının biyokütle ve güneş enerji teknolojileri ile birlikte hibrit bir şekilde kullanılarak konutların ve çeşitli sektörlerin enerji ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla geliştirilmiş ve modellenmiştir.

1.1. Tez Çalışmasının Amacı ve Önemi

Bu tez çalışmasının temel amacı, orta sıcaklıklı jeotermal enerji kaynaklarının (100-150°C) biyokütle ve güneş enerjisi teknolojileri ile birlikte kullanıldığı yeni bir HÇÜS'ün kavramsal tasarımı, geliştirilmesi, modellenmesi, performans, çevresel, ekonomik ve ekserji temelli göstergeleri içeren sürdürülebilirlik analizini sistem temel işletim parametrelerine bağlı olarak dört çalışma modu için gerçekleştirmektir. Bu tez çalışmasında yürütülen çalışmalar parametrik niteliktedir. Tez çalışmasının ana hatlarıyla belirli amaçları aşağıda açıklanmıştır.

- Yenilenebilir enerji teknolojileri destekli yeni bir HÇÜS geliştirmek,
- Geliştirilen HÇÜS'ün sürdürülebilirlik analizini gerçekleştirmek için detaylı enerji ve ekserji analizlerinin yanı sıra HÇÜS'ü oluşturan tüm alt sistemlerin ekserji kayıplarını belirlemek için ekserji kaybı modellerini geliştirmek,
- Geliştirilen HÇÜS'ü çevresel açıdan değerlendirmek için küresel ısınma ve CO₂ emisyonu azaltım potansiyellerini belirlemek,
- HÇÜS'ü ekonomik açıdan değerlendirmek için eksergoekonomik analizini gerçekleştirmek,
- HÇÜS'ün atık ekserji oranı, ekserji geri kazanılabilirlik oranı, ekserji yıkım oranı, çevresel etki faktörü ve ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi gibi ekserji temelli sürdürülebilirlik analizini gerçekleştirmek,
- Geliştirilen HÇÜS'ün dört çalışma modu için elde edilen sürdürülebilirlik göstergelerinin sonuçlarını karşılaştırmak,
- Geliştirilen HÇÜS'ün uygulanabilir olduğunu göstermek amacıyla örnek bir bölgede, çevre ve sistem temel işletim parametrelerine göre durum çalışmasını gerçekleştirmek,

Bu tez çalışmasında, konutlar ve çeşitli sektörler için elektrik, sıcak su, kurutma havası, biyogaz, hidrojen ve oksijen üreten, ısıtma ve soğutma sağlayan yenilenebilir enerji teknolojileri destekli yeni bir HÇÜS geliştirilmiştir. Literatürde farklı yenilenebilir enerji teknolojileri destekli HÇÜS'ler üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında, orta sıcaklıklı jeotermal enerji kaynaklarının güneş ve biyokütle enerji teknolojileri ile birlikte hibrit, konutların ve çeşitli sektörlerin enerji ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla entegre bir şekilde çalışan yeni bir HÇÜS'ün sürdürülebilirlik analizi üzerine yapılan ilk çalışma olması tez çalışmasının mevcut literatürde gerçekleştirilen çalışmalardan farkını, özgünlüğünü ve önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca bu tez çalışmasının ülkemizde bulunan orta sıcaklıklı jeotermal enerji kaynakları ile birlikte diğer yenilenebilir enerji kaynaklarımızın en verimli şekilde değerlendirilmesine katkı sağlayacağı ve ülkemizin birçok bölgesinde farklı modeller ile uygulanabileceği düşünülmektedir.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmaların;

- Ülkemizde orta sıcaklıklı jeotermal kaynakların verimli bir şekilde kullanılmasına yönelik gelecekte yapılacak olan uygulamalara referans bir çalışma oluşturması,
- Gerçekleştirilen bu parametrik çalışmanın gelecekte yapılması düşünülen deneysel ve uygulama çalışmalarına bir referans oluşturması,
- Yenilenebilir enerji teknolojileri destekli HÇÜS'ler üzerine gerçekleştirilecek teknolojik, endüstriyel ve akademik çalışmalara referans, alternatif bir çalışma oluşturacak olması,
- Sürdürülebilirlik analizlerinin, yenilenebilir enerji teknolojileri destekli HÇÜS'ler hakkında teknik, ekonomik ve çevresel açıdan daha akılcı ve etkin kararların alınmasında önemli katkılar sağlayacak olması,
- Özellikle yenilenebilir enerji teknolojileri destekli sistemlerin enerji, ekserji ve sürdürülebilirlik analizlerinin en kapsamlı biçimde literatüre kazandırılacak olması,

gibi bilimsel, akademik, teknolojik ve endüstriyel açıdan birçok önemli katkıları sağlayacağı tahmin edilmektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatür araştırması kapsamında, yenilenebilir enerji teknolojileri destekli kojenerasyon, trijenerasyon ve çoklu üretim sistemleri üzerine gerçekleştirilen çeşitli çalışmalar detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Ayrıca mevcut literatürde farklı enerji sistemleri üzerine gerçekleştirilen sürdürülebilirlik analizleri ile ilgili çalışmalar da ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Gerçekleştirilen literatür araştırmasında, geliştirilen HÇÜS'ün mevcut literatürdeki diğer sistemlerden farkının belirlenmesi, tez çalışmasının öneminin ve özgünlüğünün ortaya konulması amaçlanmıştır.

2.1. Yenilenebilir Enerji Destekli Çoklu Üretim Sistemleri

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen HÇÜS için enerji kaynağı olarak düşünülen güneş, jeotermal ve biyokütle enerjileri destekli kojenerasyon, trijenerasyon ve çoklu üretim sistemleri üzerine mevcut literatürde yapılmış çalışmalar detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Bu bölümde, jeotermal-güneş, güneş-biyokütle, jeotermal-biyokütle ve diğer yenilenebilir enerji destekli çoklu üretim sistemleri üzerine sınıflandırma yapılmış ve yapılan çalışmalar aşağıda ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

2.1.1. Jeotermal-Güneş Destekli Çoklu Üretim Sistemleri

Al-Ali ve Dinçer [10] jeotermal ve güneş enerjileri destekli bir çoklu üretim sisteminin termodinamik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Geliştirilen çoklu üretim sistemi elektrik ve sıcak su üretimi, ısıtma ve soğutma alt sistemlerinden oluşmaktadır. Bu çalışmada tekli, kojenerasyon, trijenerasyon ve çoklu üretim sistemlerinin enerji ve ekserji analizleri detaylı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonucunda tekli ve çoklu üretim sistemlerinin enerji verimleri sırasıyla %16,4 ve %78 iken ekserji verimleri %26,2 ve %36,6 olarak belirlenmiştir.

İslam ve Dinçer [11] jeotermal ve güneş enerjileri destekli yeni bir çoklu üretim sisteminin modellenmesi, termodinamik analizi ve performansının değerlendirilmesi üzerine çalışmalar yürütmüşlerdir. Geliştirilen çoklu üretim sistemi elektrik üretimi, ısı depolama, ısıtma, soğutma ve kurutma alt sistemlerinden oluşmaktadır. Bu çalışmada, çoklu üretim sistemini oluşturan alt sistemlerin ve tüm sistemin genel

performansı üzerine enerji ve ekserji temelli analiz çalışmaları ayrıntılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar geliştirdikleri çoklu üretim sisteminin enerji ve ekserji verimlerini sırasıyla %51 ve %62, tekli üretim modu için bu verim değerlerini %22 ve %54 olarak hesaplamışlardır.

Calise ve arkadaşları [12] elektrik ve tatlı su (tuzdan arındırılmış) üretimi , ısıtma ve soğutma alt sistemlerinden oluşan jeotermal ve güneş enerjileri destekli bir çoklu üretim sisteminin ekserji ve eksergoekonomik analizlerini yapmışlardır. Yapılan çalışmada, çoklu üretim sisteminin TRNSYS programı vasıtasıyla dinamik simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, elektrik, soğutma suyu ve tatlı su üretimi için eksergoekonomik maliyet değerlerinin sırasıyla 0,1475-0,1722 €/kWh, 0,01612-0,01702 €/kWh ve 0,5695-0,6023 €/kWh aralıklarında değiştiği belirlenmiştir.

Zhou ve arkadaşları [13] jeotermal güç üretim santralının güç çıkışını arttırmak için güneş ve jeotermal enerjileri birlikte kullanan yeni bir sistem geliştirmişlerdir. Söz konusu bu çalışmada, jeotermal enerjinin tek başına kullanımı ve güneş enerjisi ile birlikte kullanımı arasında performans farkları incelenmiştir. Araştırmacılar 150 °C’de sıcaklığa sahip bir jeotermal kaynağın sadece jeotermal güç üretim sistemi yerine güneş enerjisi ile birlikte kullanılması durumunda elektrik üretim maliyetinin %20 azaltılabileceğini tespit etmişlerdir.

Suleman ve arkadaşları [14] jeotermal ve güneş enerjileri destekli elektrik üretimi, soğutma ve kurutma alt sistemlerini içeren yeni bir çoklu üretim sisteminin parametrik olarak termodinamik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, ORC türbin giriş sıcaklığına, basıncına ve çevresel şartlara göre çoklu üretim sisteminin enerji ve ekserji performansları incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, çoklu üretim sisteminin toplam enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %54,7 ve %76,4 olarak hesaplanmıştır.

Karapekmez ve Dinçer [15] jeotermal ve güneş enerjileri destekli elektrik, sıcak kullanım suyu, kurutma havası ve hidrojen üreten, ısıtma ve soğutma sağlayan yeni bir çoklu üretim sistemi üzerine termodinamik analizler yapmışlardır. Araştırmacılar geliştirdikleri çalışmada tüm sistemin ve alt sistemlerin enerji, ekserji verimlerini ve ekserji kayıplarını ayrı ayrı hesaplamışlardır. Bu çalışmada, çoklu üretim sisteminin depolama zamanında enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %98,37 ve %58,4 olarak belirlenmiştir.

Biçer ve Dinçer [16] elektrik, sıcak su ve kurutma havası üretmek, ısıtma ve soğutma ihtiyacını karşılamak amacıyla jeotermal enerji ve PV/T sistem kullanan yeni bir çoklu üretim sisteminin dizaynı ve termodinamik açıdan değerlendirilmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, seçilen bir durum için çoklu üretim sisteminin enerji ve ekserji analizleri parametrik olarak yapılmıştır. Ayrıca durum çalışması temel alınarak çoklu üretim sisteminin çeşitli çevre şartlarında enerji ve ekserji performansları değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, çoklu üretim sisteminin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla yaklaşık %11 ve %18 olarak elde edilmiştir.

2.1.2. Jeotermal-Biyokütle Destekli Çoklu Üretim Sistemleri

Malik ve arkadaşları [17] yenilenebilir enerji kaynağı olarak biyokütle ve jeotermal enerjileri birlikte kullanan yeni bir çoklu üretim sisteminin termodinamik analiz çalışmalarını yürütmüşlerdir. Bu çalışmada geliştirilen sistem elektrik üretimi, soğutma, sıcak su üretimi ve kurutma alt sistemlerinden oluşmaktadır. Bu çalışmanın sonucunda, çoklu üretim sisteminin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %56,5 ve %20,3 olarak belirlenmiştir.

Zhang ve arkadaşları [18] biyokütle ve jeotermal enerjileri destekli elektrik üretimi, ısıtma ve soğutma alt sistemlerinden oluşan yeni bir sistem dizayn etmişlerdir. Yazarlar dizayn ettikleri sistemin enerji, ekserji ve ekonomik analizlerini yapmışlardır. Araştırmacılar gerçekleştirdikleri simülasyon çalışmalarında, sistemin enerji ve ekserji verimini sırasıyla %90,06 ve %31,52, toplam yatırım maliyetini 908008 \$ ve dinamik geri ödeme süresini 3,002 yıl olarak hesaplamışlardır.

2.1.3. Güneş-Biyokütle Destekli Çoklu Üretim Sistemleri

Karellas ve arkadaşları [19] güneş ve biyokütle enerjileri destekli bir kojenerasyon ve trijenerasyon sisteminin termodinamik modellenmesini ve ekonomik analizlerini yapmışlardır. Ayrıca ORC güç üretim sisteminde kullanılan farklı iş akışkanlarının sistem performansı üzerine etkileri araştırılmıştır. Araştırmacılar ekonomik analizler kapsamında bir durum çalışması gerçekleştirmişler ve sistemin geri ödeme süresini yedi yıl olarak hesaplamışlardır.

Sahoo ve arkadaşları [20] güneş ve biyokütle enerjileri destekli bir çoklu üretim sisteminin termodinamik ve sürdürülebilirlik analizleri üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Geliştirilen bu sistem, elektrik ve tatlı su üretimi, ısıtma ve soğutma alt sistemlerinden oluşmaktadır. Bu çalışma sonucunda çoklu üretim sisteminin birincil enerji tasarruf oranı %15,3 olarak belirlenmiştir.

Khalid ve arkadaşları [21] güneş ve biyokütle enerjileri destekli bir çoklu üretim sisteminin eksergoekonomik analizlerini içeren bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada, çoklu üretim sistemi güç ve sıcak su üretmek, ısıtma ve soğutma sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Araştırmacılar sistemin toplam enerji ve ekserji verimlerini sırasıyla %91 ve %34,9 olarak belirlemişlerdir. Bununla birlikte, sistemin net bugünkü elektrik maliyeti 2700496 \$ ve düzeltilmiş birim elektrik maliyeti 0,117 \$/kWh olarak hesaplanmıştır.

Ishaq ve Dinçer [22] güneş ve biyokütle enerjileri destekli bir gaz türbin çevrimi, bir Rankine çevrimi, dört kademeli bir bakır-klor çevrimi, bir yoğunlaştırılmış güneş sistemi ve absorpsiyonlu soğutma sistemi içeren yeni bir çoklu üretim sisteminin tasarımı ve performansının değerlendirilmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Geliştirilen çoklu üretim sistemi elektrik, hidrojen, sıcak su üretimi ve soğutma ihtiyacını karşılamak amacıyla dizayn edilmiştir. Araştırmacılar çeşitli sistem çalışma parametrelerine ve çevre şartlarına göre sistemin enerji ve ekserji analizlerini kapsamlı bir şekilde yapmışlardır. Bu çalışma sonucunda, tüm sistemin enerji verimi %29,9 iken ekserji verimi %31,5 olarak belirlenmiştir.

2.1.4. Diğer Çoklu Üretim Sistemleri Üzerine Yapılan Çalışmalar

Soltani ve arkadaşları [23] biyokütle destekli bir kojenerasyon sistemi ile çoklu üretim sisteminin termodinamik analizleri üzerine parametrik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar her iki sistemin enerji ve ekserji analizlerini yaparak elde ettikleri sonuçlar doğrultusunda performanslarını karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada, biyokütle destekli sistemin elektrik üretimi için enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %11 ve %13, çoklu üretim sisteminin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %60 ve %25 olarak belirlenmiştir.

Al-Sulaiman ve arkadaşları [24] ORC kullanan biyokütle destekli bir trijenerasyon sisteminin enerji ve ekserji analizlerini parametrik olarak yapmışlardır. Yazarlar yalnız elektrik üretimi için sistemin yakıt kullanım oranını %12, trijenerasyon

sistemi için ise %88 olarak hesaplamışlardır. Bu çalışmada, aynı enerji kaynağı için yalnız ORC sisteminin en yüksek ekserji verimi %13 iken trijenerasyon sistem için bu değer %28 olarak belirlenmiştir.

Öztürk ve Dinçer [25] güneş enerjisi destekli bir çoklu üretim sisteminin termodinamik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Geliştirdikleri sistem güç, sıcak su ve hidrojen üreten, ısıtma ve soğutma sağlayan beş alt sistemden oluşmaktadır. Bu çalışmada, tüm alt sistemlerin ve çoklu üretim sisteminin enerji ve ekserji analizleri parametrik olarak gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar güneş destekli çoklu üretim sisteminin ekserji verimini %57,35 olarak hesaplamışlardır. Bununla birlikte, tüm alt sistemlerin ekserji verimleri hesaplanmış ve çoklu üretim sisteminin ekserji veriminin tüm alt sistemlerin ekserji verimlerinden yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Ahmadi ve arkadaşları [26] biyokütle destekli bir çoklu üretim sisteminin modellenmesi ve termodinamik analizleri üzerine parametrik çalışmalar yürütmüşlerdir. Geliştirdikleri çoklu üretim sistemi ORC güç üretimi, absorpsiyonlu soğutma, PEM elektrolizör ve sıcak su üretimi alt sistemlerinden oluşmaktadır. Bu çalışmada, her bir alt sistemin ve çoklu üretim sisteminin ekserji analizleri detaylı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çoklu üretim sisteminin çevresel analizleri CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli dikkate alınarak incelenmiştir.

Almahdi ve arkadaşları [27] güneş enerjisi destekli bir çoklu üretim sisteminin termodinamik analizlerini parametrik olarak yürütmüşlerdir. Geliştirilen bu sistemde güç üretimi, ısıtma, soğutma, hidrojen üretimi ve talaş kurutma olmak üzere toplam beş alt sistem bulunmaktadır. Bu çalışmanın sonucunda, çoklu üretim sisteminin toplam enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %20,7 ve %13,7 olarak hesaplanmıştır.

Bu tez çalışmasında, mevcut literatürdeki yenilenebilir enerji teknolojileri destekli kojenerasyon, trijenerasyon ve çoklu üretim sistemleri üzerine yapılan çalışmalar, kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarına ve sistem faydalı çıktılarına göre sınıflandırılarak detaylı bir şekilde araştırılmıştır ve bu doktora tezinin diğer çalışmalardan farkını ortaya koyan karşılaştırmalı sonuçların özeti Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1: Mevcut literatür özet tablosu.

Ref.	Enerji Türleri					Sistem Türü			Sistem Çıktıları								
	JEO	CST	PV	BİY	RÜZ	KOJ	TRİJ	ÇÜ	G	I	S	SS	K	B	H	O	D
[16]	x		x			x	x	x	x	x	x	x	x				
[27]		x				x	x	x	x	x	x		x		x	x	
[19]		x		x		x	x		x	x	x						
[17]	x			x		x	x	x	x		x	x	x				x
[28]		x			x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	
[29]				x		x	x		x	x	x						
[30]				x		x	x	x	x						x	x	x
[31]		x	x			x	x	x	x	x	x	x			x	x	
[32]	x	x				x	x		x	x	x	x					
[14]	x	x				x	x	x	x	x	x	x	x				
[10]	x	x				x	x	x	x	x	x	x					
[33]		x			x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x
[34]		x	x			x	x	x	x		x	x			x	x	x
[35]				x		x	x		x		x	x					
[36]	x	x			x	x	x	x	x	x	x		x				x
[25]		x				x	x	x	x	x	x	x			x	x	
[26]				x		x	x	x	x	x	x	x			x	x	
[37]				x		x	x	x	x	x				x			x
[38]	x					x	x	x	x	x	x	x					
TEZ	x	x		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Enerji türleri: Jeotermal (JEO), Yoğunlaştırılmış termal güneş sistemi (CST), PV (Fotovoltaik), Biyokütle (BİY), Rüzgâr (RÜZ), Sistem Türü: Kojenerasyon (KOJ), Trijenerasyon (TRİJ), Çoklu Üretim (ÇÜ), Sistem Çıktıları: Güç (G), Isıtma (I), Soğutma (S), Sıcak Su (SS), Kurutma (K), Biyogaz (B), Hidrojen (H), Oksijen (H), Diğer (D)																	

Tablo 2.1: Devam.

Ref.	Enerji Türleri					Sistem Türü			Sistem Çıktıları								
	JEO	CST	PV	BİY	RÜZ	KOJ	TRİJ	ÇÜ	G	I	S	SS	K	B	H	O	D
[39]				X		X	X		X	X	X						
[40]		X				X	X		X	X	X						
[41]				X		X	X		X	X	X						
[42]		X			X	X	X	X	X	X	X	X					
[43]		X		X		X	X	X	X	X	X	X					X
[44]				X		X	X	X	X	X	X				X	X	
[45]				X		X	X	X	X		X				X	X	
[46]	X					X	X	X	X	X	X						X
[47]		X		X		X	X		X	X	X						
[48]	X	X				X	X	X	X	X	X						X
[49]				X		X	X		X	X	X						
[50]		X		X		X	X	X	X	X	X						X
[51]	X	X				X	X	X	X	X	X						X
[52]	X	X				X	X	X	X		X				X	X	
[53]		X		X		X	X	X	X	X	X						X
[54]			X	X		X	X	X	X		X			X	X	X	
[55]		X			X	X	X	X	X		X	X			X	X	
[56]		X		X		X	X		X	X	X						
[22]		X		X		X	X	X	X	X	X				X	X	
TEZ	X	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Enerji türleri: Jeotermal (JEO), Yoğunlaştırılmış termal güneş sistemi (CST), PV (Fotovoltaik), Biyokütle (BİY), Rüzgâr (RÜZ), Sistem Türü: Kojenerasyon (KOJ), Trijenerasyon (TRİJ), Çoklu Üretim (ÇÜ), Sistem Çıktıları: Güç (G), Isıtma (I), Soğutma (S), Sıcak Su (SS), Kurutma (K), Biyogaz (B), Hidrojen (H), Oksijen (H), Diğer (D)																	

Gerçekleştirilen literatür araştırmasında yenilenebilir enerji destekli trijenerasyon, kojenerasyon ve çoklu üretim sistemleri üzerine çeşitli çalışmaların olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmalar genel olarak teknik, ekonomik ve çevresel analizleri kapsamaktadır. Yapılan bu doktora tez çalışmasının mevcut literatürdeki çalışmalardan farkı orta sıcaklıklı jeotermal, güneş ve biyokütle enerjileri destekli yeni bir HÇÜS'ün kavramsal tasarımı, geliştirilmesi, modellenmesi ve sürdürülebilirlik analizlerini içeren kapsamlı ve yeni bir çalışma olmasıdır. Bununla birlikte, bu tez çalışmasında geliştirilen HÇÜS üzerine ekserji temelli sürdürülebilirlik analizlerini içeren ilk çalışma olması ve literatüre bu kapsamda yeni bir çalışma kazandırılacak olması bu tez çalışmasının önemini ve orijinalitesini ortaya koymaktadır. Diğer taraftan, bu çalışma aşağıdaki yönlerden gelecekte yapılması düşünülen çalışmalara katkılar sağlayacağı düşünülmektedir: Yenilenebilir enerji destekli hibrit çoklu üretim sistemlerinin i) modellenmesi ve çalışma prensibi ii) termodinamik analizleri iii) ekserji temelli sürdürülebilirlik analizleri.

2.2. Sürdürülebilirlik Analizleri

Enerji sistemlerinin sürdürülebilirliğinin belirlenmesi üzerine birçok yöntem bulunmasına rağmen tam olarak standart bir yöntem bulunmamaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, farklı enerji sistemleri üzerine mevcut literatürde yapılan sürdürülebilirlik analizleri detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Bu bölümde gerçekleştirilen literatür araştırmasında geliştirilen HÇÜS'ün sürdürülebilirlik göstergelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Açık literatürde enerji sistemlerinin sürdürülebilirliği üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda enerji sistemlerinin sürdürülebilirliği genel olarak teknik, ekonomik, sosyal ve çevresel olmak üzere dört ana başlık altında değerlendirilmiştir. Her bir başlık altında enerji sistemlerinin sürdürülebilirlik alt göstergeleri belirlenmiştir. Yapılan bu çalışmalar aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Afgan ve Carvalho [8] hidrojen enerji sistemlerinin sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesi üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada, hidrojen, doğal gaz türbini, PV ve rüzgâr enerji sistemlerinin performans, çevresel, piyasa ve sosyal sürdürülebilirlik göstergeleri değerlendirilmiştir. Performans göstergeleri kapsamında verimlilik, elektrik fiyatı, yatırım maliyeti ve ömür alt göstergeleri, çevresel

göstergeler kapsamında CO₂, NO_x ve Kyoto alt göstergeleri, piyasa göstergesi kapsamında Avrupa ve Dünya piyasası alt göstergeleri, sosyal gösterge kapsamında alan ve istihdam alt göstergeleri olmak üzere toplam on bir adet sürdürülebilirlik göstergesi geliştirilmiştir.

Hacatoğlu ve arkadaşları [57] hidrojen destekli yeni bir hibrit enerji sisteminin sürdürülebilirlik analizi üzerine çalışmalar yürütmüşlerdir. Bu çalışmada, verimlilik kapsamında enerji ve ekserji verimi alt göstergeleri, ekonomik kapsamda karşılanabilirlik ve ticari geçerlilik alt göstergeleri, boyut faktörü kapsamında kütle, alan ve hacim alt göstergeleri, küresel ölçekte çevreye etki kapsamında küresel ısınma potansiyeli, ozon tabakası inceltme potansiyeli ve inorganik azaltım potansiyeli alt göstergeleri, hava kirliliği kapsamında madde parçacıkları-2,5, madde parçacıkları-10, SO₂, CO, NO₂, O₃ ve Pb alt göstergeleri, su kirliliği kapsamında sudaki azot ve fosfatı arttırma potansiyeli, tatlı ve tuzlu su çevreyi zehirlleme potansiyelleri alt göstergeleri olmak üzere toplam yirmi adet sürdürülebilirlik göstergesi geliştirilmiştir.

Stamford ve Azapagic [58] nükleer güç santrallerinin sürdürülebilirlik göstergelerinin belirlenmesi üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada, teknolojik kapsamda kullanılabilirlik, teknolojiye bağımlılık, aciliyet, enerji üretimi maliyeti, maliyet değişkenliği ve mali teşvikler alt göstergeleri, çevresel kapsamda malzeme geri dönüşebilirliği, çevredeki suyu kirliletme, küresel ısınma, ozon tabakasını inceltme, asitleşme, sudaki azot ve fosfatı arttırma ve fotokimyasal sis oluşturma potansiyelleri ve arazi kullanım alt göstergeleri, sosyal kapsamda istihdam, insan sağlığına etkiler, büyük kaza riski, yerel topluma etkiler, insan hakları ve yolsuzluk, enerji güvenliği, nükleer silahlanma ve kuşaklar arası eşitlik alt göstergeleri olmak üzere toplam yirmi iki adet sürdürülebilirlik göstergesi geliştirilmiştir.

Afgan ve arkadaşları [59] sürdürülebilirlik göstergeleriyle enerji sistemlerinin değerlendirilmesi üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Söz konusu bu çalışmada, güneş, rüzgâr, biyokütle ve kömür destekli güç üretim santrallerinin sürdürülebilirlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar kaynak göstergeleri olarak yakıt kaynağı, karbon çelik kaynağı, bakır kaynağı ve alüminyum kaynağı alt göstergeleri; çevresel göstergeler olarak karbondioksit, azot, kükürt ve çevresel atık alt göstergeleri; sosyal göstergeler olarak istihdam, sermaye ve çeşitlilik-canlılık alt göstergeleri; ekonomik göstergeler olarak verimlilik, sermaye yatırımı ve topluluk alt göstergeleri olmak üzere toplam on dört adet sürdürülebilirlik göstergesi geliştirmişlerdir.

García ve arkadaşları [60] Meksika’da sorgum ve şeker kamışından etanol üretiminin sürdürülebilirlik değerlendirilmesi üzerine kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, etanol üretim süreçleri ekonomik, sosyal, arazi kullanımı, su kullanımı, sera gazı salınımı ve enerji sürdürülebilirlik göstergeleri açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca enerji sistemlerinin sürdürülebilirlik analizleri üzerine yapılan diğer çalışmalar Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2: Enerji sistemlerinin sürdürülebilirlik analizleri üzerine yapılan çalışmalar.

Ref.	Çalışma kapsamı	Sürdürülebilirlik göstergeleri
[61]	Bir hibrit enerji sisteminin sürdürülebilirlik analizi	Ekonomik:3; Çevresel:1 Sosyal:1; Toplam:5
[62]	On farklı güç santralının sürdürülebilirlik analizi	Toplam:8
[63]	Yenilenebilir enerji teknolojileri için sürdürülebilirlik göstergelerinin değerlendirilmesi	Toplam:7
[64]	Termik santral ünitesinin çok kriterli sürdürülebilirlik analizinde enerji göstergelerine etkisi	Kaynak:2; Çevresel:4 Ekonomik:2; Sosyal: 6 Toplam: 14
[65]	Çok kriterli karar analizi kullanılarak elektrik üretim teknolojilerinin sürdürülebilirlik değerlendirmesi	Toplam:10
[66]	Enerji sisteminin sürdürülebilir kalkınma modelinin geliştirilmesi	Ekonomik:11; Sosyal: 3 Çevresel:12 Toplam: 26
[67]	Elektrik sektörünün sürdürülebilir genişlemesi: Karar vermeyi desteklemek için bir araç olarak sürdürülebilirlik göstergelerinin analizi	Ekonomik:3; Teknolojik: 4 Çevresel:5; Sosyal:3 Toplam:15

Enerji sistemlerinin sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesinde diğer bir kriter ekserji temelli sürdürülebilirlik analizleridir. Ekserjetik sürdürülebilirlik analizi bir sistemin çevreye ve kullandığı enerji kaynağıyla uyumlu olup olmadığını belirlemek için yapılmaktadır. Mevcut literatürde enerji sistemlerinin ekserjetik sürdürülebilirlik analizleri üzerine farklı çalışmalar yürütülmüştür ve bu çalışmalar kapsamında farklı göstergeler geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmalar ve geliştirilen ekserjetik sürdürülebilirlik göstergeleri aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Midilli ve Dinçer [68] bir PEM yakıt pili için literatür verileri ve bazı gerçek verilere bağlı olarak ekserjetik sürdürülebilirlik göstergeleri geliştirmişlerdir. Araştırmacılar PEM yakıt pili için çalışma ve çevre parametrelerine bağlı olarak ekserjetik sürdürülebilirlik parametrelerinin değişimi incelemişlerdir. Bu çalışmada, PEM yakıt pili için ekserji verimi, atık ekserji oranı, kullanılabilir atık ekserji oranı, kullanılamayan atık ekserji oranı, ekserji yıkım faktörü, çevresel yıkım katsayısı, çevresel yıkım indeksi, ekserjetik kararlılık faktörü, çevresel uyum indeksi ve

ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi olmak üzere toplam on adet ekserjetik sürdürülebilirlik göstergesi geliştirilmiştir.

İnaç [69] yüksek basınçlı hidrojen gazı üreten bir sistemin termodinamik modellenmesi ve ekserjetik sürdürülebilirlik analizi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, sistem çalışma sıcaklığı ve basıncına göre sistemin performansı ve ekserjetik sürdürülebilirlik göstergelerinin değişimi parametrik olarak analiz edilmiştir. Ekserjetik sürdürülebilirlik parametreleri olarak ekserji verimi, atık ekserji oranı, yeniden kullanılabilir atık ekserji oranı, yeniden kullanılamayan atık ekserji oranı, ekserji yıkım oranı, çevresel yıkım katsayısı, çevresel yıkım indeksi, çevresel uyum indeksi, ekserjetik kararlılık faktörü ve ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi olmak üzere toplam on adet ekserjetik sürdürülebilirlik göstergesi geliştirilmiştir.

Özsaban ve Midilli [70] yüksek basınçlı hidrojen gazı sıkıştırma işleminin ekserjetik sürdürülebilirlik analizi üzerine parametrik çalışmalar yürütmüşlerdir. Bu çalışmada, tek-aşamalı, iki-aşamalı, üç-aşamalı ve dört-aşamalı hidrojen gazı sıkıştırma işlemleri için ayrı ayrı ekserjetik sürdürülebilirlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar ekserjetik sürdürülebilirlik parametreleri olarak ekserji verimi, atık ekserji oranı, ekserji geri kazanılabilirlik oranı, ekserji yıkım oranı, çevresel etki faktörü ve ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi olmak üzere toplam altı adet ekserjetik sürdürülebilirlik göstergesi geliştirmişlerdir.

Midilli ve arkadaşları [71] yüksek basınçlı hidrojen üretim ve depolama sisteminin ekserjetik sürdürülebilirlik analizi üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada, yüksek basınçlı hidrojen üretim sisteminden elde edilen hidrojen gazı ve hidrojen depolama basıncına bağlı olarak ekserjetik sürdürülebilirlik göstergelerinin değişimi parametrik olarak incelenmiştir. Araştırmacılar ekserjetik sürdürülebilirlik göstergeleri olarak ekserji verimi, atık ekserji oranı, ekserji geri kazanılabilirlik oranı, ekserji yıkım oranı, çevresel etki faktörü ve ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi olmak üzere toplam altı adet ekserjetik sürdürülebilirlik göstergesi geliştirmişlerdir.

Aydın [72] güç üretim santrali destekli bir gaz türbininin sürdürülebilirliğini belirlemek için bazı ekserjetik sürdürülebilirlik göstergelerinin geliştirilmesi üzerine bir çalışma yürütmüştür. Bu çalışmada, gaz türbini için öncelikle detaylı bir ekserji analizi yapılmış, daha sonra iki adet güç santralinin çalışma şartlarına göre gaz türbini için ekserjetik sürdürülebilirlik göstergeleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada, gaz türbin sistemi için ekserji verimi, atık ekserji oranı, ekserji geri kazanılabilirlik oranı, ekserji

yıkım oranı, çevresel etki faktörü ve ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi olmak üzere toplam altı adet ekserjetik sürdürülebilirlik göstergesi geliştirilmiştir.

Turan ve Aydın [73] 72 kN'luk bir itme gücüne sahip turbo fan motorun ekserji temelli sürdürülebilirlik analizi üzerine parametrik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, düşük baypaslı uçak gaz türbin motoru için ekserji verimi, atık ekserji oranı, ekserji geri kazanılabilirlik oranı, ekserji yıkım oranı, çevresel etki faktörü ve ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi olmak üzere toplam altı adet ekserjetik sürdürülebilirlik göstergesi geliştirilmiştir.

Yukarıda sunulan ekserjetik sürdürülebilirlik çalışmalarına ek olarak farklı sektörler için gerçekleştirilen diğer ekserjetik sürdürülebilirlik çalışmaları Tablo 2.3'te özetlenmiştir. Geliştirilen bu göstergeler ışığında, bu tez çalışmasında sürdürülebilirlik göstergeleri olarak dikkate alınan göstergeler ve bu göstergelere ait ayrıntılı bilgiler sonraki bölümlerde açıklanmıştır.

Tablo 2.3: Ekserjetik sürdürülebilirlik analizleri üzerine yapılan çalışmalar.

Ref.	Çalışma kapsamı	Ekserjetik sürdürülebilirlik göstergeleri									
		ψ	aeo	ykn	eyo	$\dot{c}yk$	$\dot{c}yi$	$\dot{c}ui$	$\dot{c}ef$	ekf	esi
[74]	Devir daim su ürünleri sistemi	x	x	x	x				x		x
[75]	Tersinmez karnot soğutma sistemi	x									x
[76]	Uçuş aşamaları için turborop uçaklar	x	x	x	x				x		x
[77]	Ticari Uçaklar: Turbo fan Motor	x	x	x	x				x		x
[78]	Hidrojen kullanan hava aracı	x	x						x		x
[79]	Farklı buharlaştırıcı soğutma sistemleri	x	x		x						x
[80]	Akarsu tipi hidroelektrik santrali	x			x	x	x	x		x	x
Kısaltmalar: ekserji verimi (ψ), atık ekserji oranı (aeo), yeniden kullanılabilir atık ekserji oranı (ykn), ekserji yıkım oranı (eyo), çevresel yıkım katsayısı ($\dot{c}yk$), çevresel yıkım indeksi ($\dot{c}yi$), çevresel uyum indeksi ($\dot{c}ui$), çevresel etki faktörü ($\dot{c}ef$), ekserjetik kararlılık faktörü (ekf), ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi (esi).											

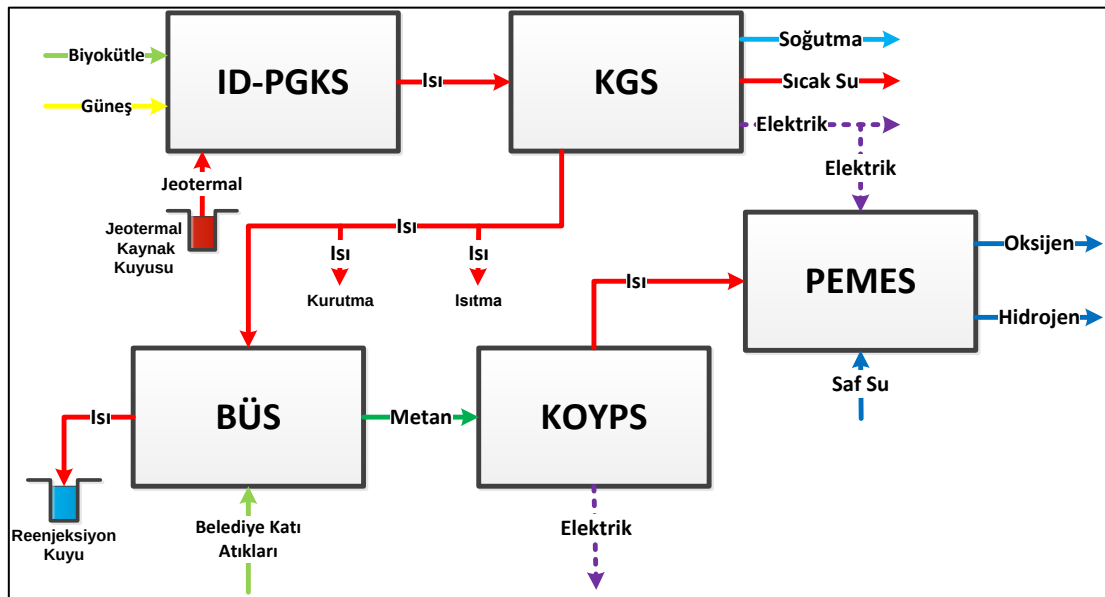
3. YAPILAN ÇALIŞMALAR

3.1. Giriş

Bu bölümde, HÇÜS'ün kavramsal tasarımı, geliştirilmesi, termodinamik analizleri, sürdürülebilirlik analizi ve termodinamik modellemeleri üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Termodinamik modellemeler kapsamında tüm alt sistemlerin kütle, enerji, ekserji ve eksergoekonomik denge denklemleri yazılmıştır. Ayrıca HÇÜS'ün sürdürülebilirlik göstergelerinin belirlenmesi için gerekli olan denklemler tüm çalışma modları için detaylı bir şekilde verilmiştir.

3.2. Kavramsal Tasarım

Bu başlık altında, HÇÜS'ün kavramsal tasarımı doğrultusunda sürdürülebilirlik analizini gerçekleştirmek için gerekli olan genel kabuller, sistemin proses akış diyagramı ve çalışma prensibi ile ilgili çalışmalar yürütülmüştür. HÇÜS'ün kavramsal tasarımı ID-PGKS, KGS, BÜS, KOYPS ve PEMES olmak üzere beş ana alt sistem dikkate alınarak gerçekleştirilmiş ve kavramsal tasarımın akış şeması Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1: Kavramsal tasarımın akış şeması.

3.2.1. Genel Kabuller

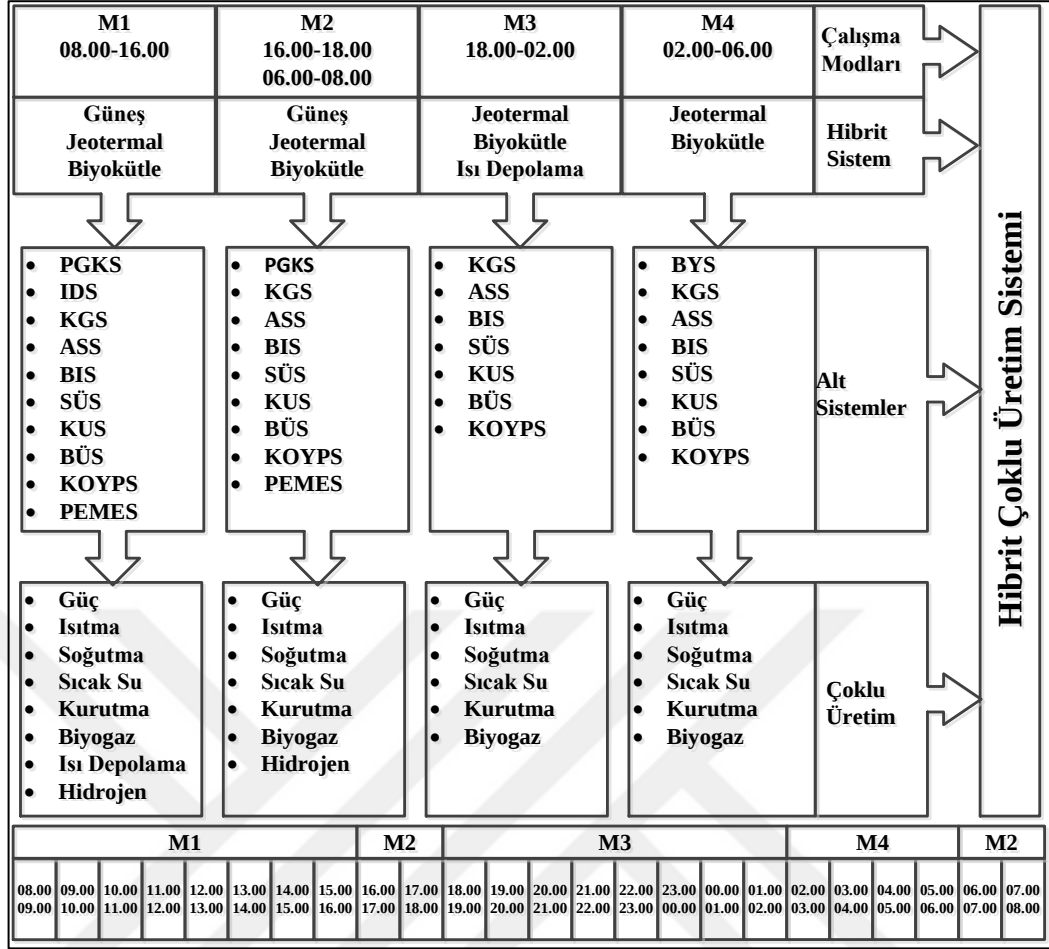
HÇÜS'ün termodinamik ve sürdürülebilirlik analizlerini gerçekleştirmek için yapılan genel kabuller aşağıda verilmiştir.

- Sistemin çevre sıcaklığı ve basıncı 25 °C ve 101,3 kPa olarak kabul edilmiştir.
- Sisteme verilen hava %79 N₂ ve %21 O₂'den oluşmaktadır.
- Sistemler, sürekli akışlı sürekli açık sistem olarak kabul edilmiştir.
- Sisteme sağlanan hava, yakıt ve suyun çevre koşullarında sisteme girdiği kabul edilmiştir.
- Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilmiştir.
- Sistemdeki tüm gazlar ideal gaz olarak kabul edilmiştir.
- Jeotermal akışkanın termodinamik özelliklerinin belirlenmesinde suyun özellikleri esas alınmıştır.
- Tez çalışması kapsamında yapılan hesaplamalarda EES (Engineering Equations Solver) programı kullanılmıştır [81].
- Sistemin verim hesaplamalarında yakıtların alt ısı değerleri dikkate alınmıştır.
- Sistemde kullanılan ısı değiştiriciler, pompalar, kompresörler ve türbinler adyabatik olarak kabul edilmiştir [82].
- Sistemde kullanılan pompaların ve türbinlerin izantropik verimleri 0,85 olarak alınmıştır [17].
- Sistemde kullanılan yakıt ve hava kompresörlerinin izantropik verimleri 0,85 olarak alınmıştır [49].
- Ekserji hesaplamalarında kullanılan kimyasal ekserji değerleri literatürden alınmıştır [83].
- Yakıt, hava ve su KOYP kanal girişlerinde aynı sıcaklığa sahiptir ve benzer şekilde KOYP kanal çıkış sıcaklıkları da eşit kabul edilmiştir [84].

3.2.2. Hibrit Çoklu Üretim Sisteminin Proses Akış Diyagramı ve Çalışma Prensibi

Şekil 3.3'te orta sıcaklıklı jeotermal enerji kaynağı ile birlikte biyokütle ve güneş enerji teknolojilerinin hibrit bir şekilde kullanıldığı ve faydalı çıktılar olarak elektrik,

sıcak su, kurutma havası, biyogaz, hidrojen ve oksijen üreten, aynı zamanda ısıtma ve soğutma sağlayan bir HÇÜS'ün proses akış diyagramı gösterilmiştir. Geliştirilen HÇÜS ısı depolamalı parabolik oluklu güneş kolektör sistemi (ID-PGKS), kombine tek flaş/binary jeotermal güç üretim sistemi (KGS), absorpsiyonlu soğutma sistemi (ASS), ısı depolama sistemi (IDS), bölge ısıtma sistemi (BIS), sıcak su üretim sistemi (SÜS), kurutma sistemi (KUS), biyogaz üretim sistemi (BÜS), katı oksit yakıt pili sistemi (KOYPS) ve yüksek basınçlı PEM elektrolizör sistemi (PEMES) olmak üzere on alt sistemden oluşmaktadır. HÇÜS'ün çalışma prensibi genel olarak şu şekilde açıklanabilir; orta sıcaklıklı jeotermal akışkanın basıncı kuyu pompası vasıtasıyla istenilen çalışma basıncına kadar arttırılmaktadır. Basıncı arttırılmış jeotermal akışkanın sıcaklığı ID-PGKS'den elde edilen ısı kullanılarak 175-250 °C aralığına kadar arttırılır. Daha sonra basıncı ve sıcaklığı arttırılmış jeotermal akışkan genleşme vanası vasıtasıyla flaşlama işleminden geçirilir ve seperatör ünitesinde buhar ve sıvı olarak ayrılır. Buhar ve sıvı olarak ayrılan jeotermal akışkan KGS'de bulunan buhar türbinine ve ikincil akışkanın sıcaklığını arttırmak üzere ORC'de bulunan kızdırıcıya gönderilmektedir. KGS'de kızdırıcıdan ayrılan jeotermal akışkan, ID-PGKS'de sıcaklığı tekrar arttırıldıktan sonra ilk önce BIS'a, daha sonra kurutma havası elde etmek amacıyla KUS'a gönderilmektedir. Tasarım kriterlerine göre enerjisinin belirli bir kısmı kullanılmış jeotermal akışkan BÜS'ün ısı ihtiyacını karşılamak için BÜS eşanjörüne gönderilir. En son olarak HÇÜS'ün alt sistemlerinde kullanılan jeotermal akışkan kaynağın sürdürülebilirliği için reenjeksiyon kuyusuna geri beslenir. Ayrıca BÜS'e biyogaz üretimi için belediye katı atıkları KOYPS için gerekli olan metan ihtiyacına göre çamur haline getirilerek beslenmektedir. Daha sonra BÜS'te üretilen biyogaz, saf metan gazını elde edilmesi için gaz ayrıştırıcı kolona gönderilir. Burada biyogaz içerisinde bulunan su buharı, karbon dioksit ve hidrojen sülfür gazları ayrıştırılarak metan gazı elde edilir. Elde edilen saf metan gazı, KOYP'ye çalışma şartlarının gerektirdiği debide beslenir. HÇÜS'ün diğer bir alt sistemi olan PEMES'e gerekli basınçlarda hidrojen gazı elde etmek için uygun çalışma sıcaklığında ve basıncında saf su gönderilir. PEMES'e beslenen saf su, elektrokimyasal reaksiyonlar vasıtasıyla hidrojen ve oksijen gazına ayrıştırılır. PEMES'in hidrojen üretimi için ihtiyaç duyduğu elektrik KGS'de bulunan ORC türbininden sağlanmaktadır.

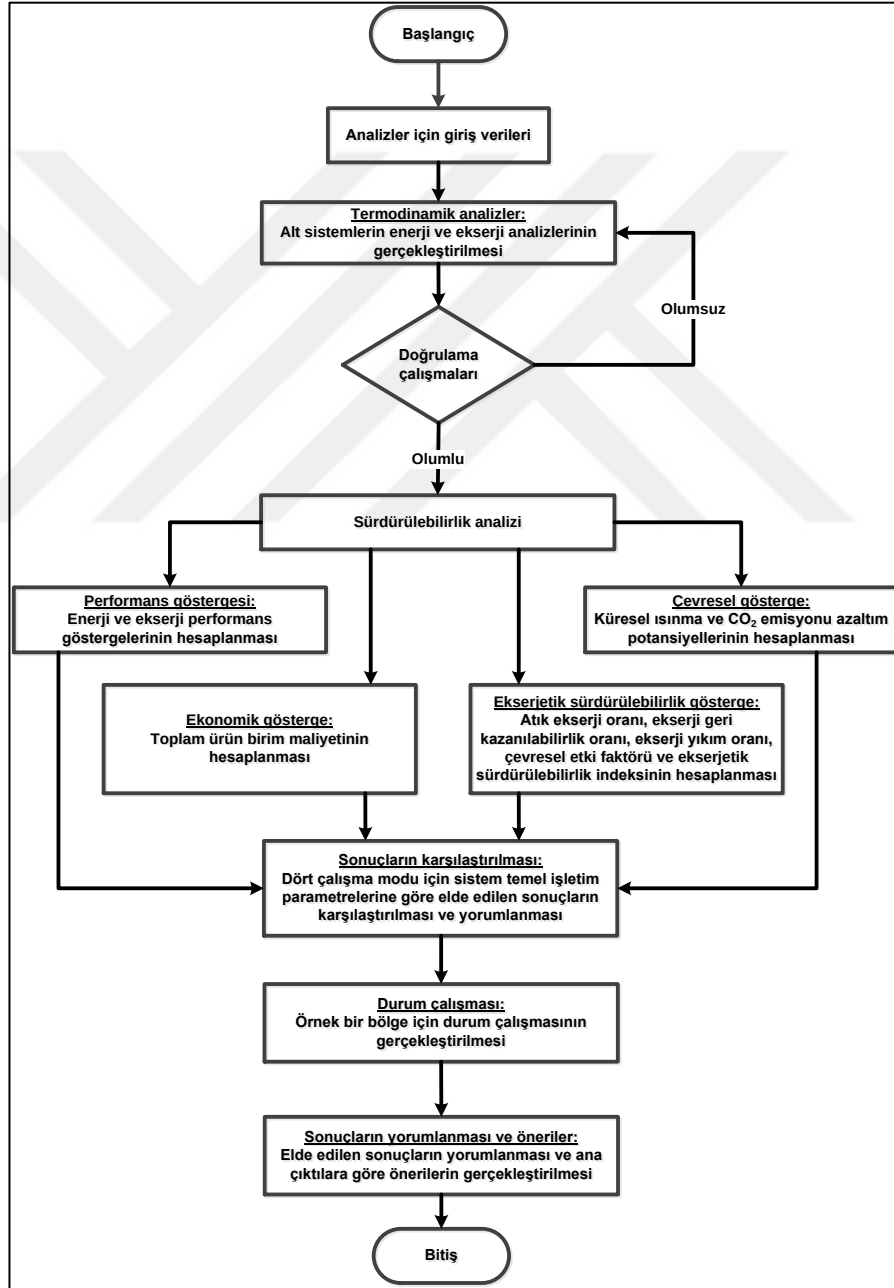


Şekil 3.2: Hibrit çoklu üretim sisteminin çalışma modları.

Şekil 3.2’de HÇÜS’ün yirmi dört saatlik zaman diliminde çalışma modları gösterilmiştir. HÇÜS güneş ışınımının gün içerisindeki değişimine göre dört farklı modda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. HÇÜS’ün istenilen modlarda çalıştırılması için sistemin belirli noktalarına üç yollu kontrol vanaları konulmuştur. HÇÜS’ün çalışma modları yirmi dört saatlik zaman dilimi baz alınarak şu şekilde açıklanabilir; sistem M1 çalışma modunda 08.00-16.00 saatleri arasında enerji kaynağı olarak jeotermal, güneş ve biyokütle enerji kaynaklarını kullanacaktır. Ayrıca M1 çalışma modunda ID-PGKS’de ısı depolama yapılacaktır. Depolanan ısı, güneş enerjisinin yeterli olmadığı 18.00-02.00 saatleri arasında enerji kaynağı olarak kullanılacaktır. M2 çalışma modunda 06.00-08.00 ve 16.00-18.00 saatleri arasında enerji kaynağı olarak güneş, jeotermal ve biyokütle, M3 çalışma modunda 18.00-02.00 saatleri arasında jeotermal, biyokütle ve ısı depolama, güneş ışınımının yetersiz olduğu günlerde ve 02.00-06.00 arasında devreye giren M4 çalışma modunda ise jeotermal ve biyokütle kaynakları kullanılacaktır.

3.3. Termodinamik Analiz

Bir sistemin termodinamik analizini gerçekleştirmek için ilk önce kütle, enerji, entropi ve ekserji denge denklemlerinin yazılması gerekmektedir. Söz konusu termodinamik denge denklemleri aşağıdaki alt başlıklarda ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Bu doktora tez çalışmasında gerçekleştirilen sürdürülebilirlik analiz çalışmalarının genel akış şeması Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4: Sürdürülebilirlik analiz çalışmasının akış şeması.

3.3.1. Kütlenin Korunumu

Kütlenin korunumu prensibi herhangi bir termodinamik sistemin analizi için temel bir prensiptir. Bir kontrol hacmi için kütlenin korunumu yasası genel olarak aşağıdaki gibi yazılabilir [85]:

$$\sum \dot{m}_g - \sum \dot{m}_\zeta = \frac{dm_{KH}}{dt} \quad (3.1)$$

Burada $\sum \dot{m}_g$ ve $\sum \dot{m}_\zeta$ kontrol hacmine birim zamanda giren ve çıkan toplam kütle, $\frac{dm_{KH}}{dt}$ kontrol hacmindeki kütlenin birim zamandaki değişimini ifade eder.

3.3.2. Enerjinin Korunumu

Termodinamiğin birinci yasasına göre herhangi bir sistem için enerjinin korunumu aşağıdaki gibi formüle edilebilir [85]:

$$\sum \dot{E}_g - \sum \dot{E}_\zeta = \Delta \dot{E}_{sis} \quad (3.2)$$

Burada $\sum \dot{E}_g$ ve $\sum \dot{E}_\zeta$ birim zamanda sisteme giren ve çıkan toplam enerjiyi ve $\Delta \dot{E}_{sis}$ birim zamanda sistemdeki toplam enerji değişimini ifade etmektedir. Sürekli akışlı bir kontrol hacmindeki toplam enerjinin içeriği sabittir ve bu yüzden kontrol hacmindeki toplam enerji değişimi sıfırdır ($\Delta \dot{E}_{sis} = 0$). Sürekli akışlı bir kontrol hacmi için genel enerji denge denklemi daha açık bir ifadeyle aşağıdaki gibi yazılabilir [85]:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_g + \dot{W}_g + \sum \dot{m}_g \left(h_g + \frac{V_g^2}{2} + gz_g \right) \\ = \dot{Q}_\zeta + \dot{W}_\zeta + \sum \dot{m}_\zeta \left(h_\zeta + \frac{V_\zeta^2}{2} + gz_\zeta \right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Burada $\dot{Q}$ ve $\dot{W}$ sırasıyla birim zamanda kontrol hacmi sınırlarını ısı ve iş olarak geçen enerjiyi ifade etmektedir. h , V , z ve g sırasıyla özgül entalpi, hız, yükseklik ve yer çekimi ivmesini ifade etmektedir.

3.3.3. Entropi Dengesi

Termodinamiğin ikinci yasasına göre bir kontrol hacminde birim zamanda entropi değişimi genel olarak aşağıdaki denklemde belirtildiği şekilde tanımlanabilir [85]:

$$\frac{dS_{KH}}{dt} = \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \sum \dot{m}_g s_g - \sum \dot{m}_\zeta s_\zeta + \dot{S}_{\text{üret},KH} \quad (3.4)$$

Burada $\frac{dS_{KH}}{dt}$ birim zamanda kontrol hacmindeki entropi değişimi, $\sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k}$ kontrol hacmi sınırları boyunca ısı geçişi sonucu birim zamanda geçen entropi transferini ve $\dot{S}_{\text{üret},KH}$ tersinmezliklerin bir sonucu olarak birim zamanda kontrol hacmi içinde entropi üretimini ifade etmektedir.

3.3.4. Ekserji Analizi

Termodinamiğin ikinci yasasına göre bir kontrol hacmi için en genel ifadeyle ekserji denge denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir [7]:

$$\dot{E}x^Q + \sum \dot{m}_g ex_g = \sum \dot{m}_\zeta ex_\zeta + \dot{E}x^W + \dot{E}x_{kay} \quad (3.5)$$

Burada $\dot{E}x^Q$, $\dot{E}x^W$, $\sum \dot{m}_g ex_g$ ve $\sum \dot{m}_\zeta ex_\zeta$ sırasıyla birim zamanda kontrol hacmi boyunca ısı transferi ile ilgili ekserji aktarımını, birim zamanda sistem tarafından yapılan veya sisteme sağlanan iş ile ilgili ekserji aktarımını, birim zamanda sisteme giren ve çıkan toplam kütle akışı ile sağlanan ekserji aktarımını, $\dot{E}x_{kay}$ birim zamanda ekserji kaybını ifade etmektedir. Denklem (3.5)'te verilen tüm bu terimler aşağıda detaylı bir şekilde verilmiştir.

Isı transferi ile ilgili ekserji ifadesi;

$$\dot{E}x^Q = \left(1 - \frac{T_o}{T_s}\right) \dot{Q}_s \quad (3.6)$$

İş ile ilgili ekserji ifadesi;

$$\dot{E}x^W = \dot{W} \quad (3.7)$$

Spesifik akış ile sağlanan ekserji ifadesi fiziksel, kimyasal, kinetik ve potansiyel ekserji değerlerinin toplamıdır ve aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$ex = ex^{fiz} + ex^{kim} + ex^{ke} + ex^{pe} \quad (3.8)$$

Bu tez çalışmasında ex^{ke} ve ex^{pe} terimleri ihmal edilmiştir. Fiziksel ekserji ifadesi aşağıdaki denklem ile belirlenmektedir.

$$ex^{fiz} = (h - h_o) - T_o(s - s_o) \quad (3.9)$$

Burada h , s , h_o ve s_o sırasıyla belirli termodinamik durum ve çevresel şartlar için özgül entalpi ve entropi değerleridir. Denklem 3.9'da belirtilen kimyasal ekserji değeri ideal gaz kabulü dikkate alınarak gaz halinde bir karışım için aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir [86]:

$$ex^{kim} = \sum_i x_i \bar{e}x^{kim,0} + \bar{R}T_o \sum_i x_i \ln x_i \quad (3.10)$$

Burada x_i gaz karışımındaki her bir bileşenin mol oranıdır. $\bar{e}x^{kim,0}$ gaz karışımında bulunan her bir gaz bileşeninin standart kimyasal ekserji değeridir. Ayrıca katı bir yakıt için kimyasal ekserji değeri aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir [24]:

$$ex_{biy}^{kim} = \beta AID_{biy} \quad (3.11)$$

Burada β katı yakıtın kimyasal ekserji katsayısıdır ve $\frac{o}{c}$ oranına göre aşağıdaki denklemler ile ifade edilmektedir [87].

$$\beta = 1,0438 + 0,0158 \frac{h}{c} + 0,0813 \frac{o}{c} \quad (3.12)$$

Bu denklem $\frac{o}{c} \leq 0,5$ için geçerlidir [87].

$$\beta = \frac{1,044 + 0,016 \left(\frac{h}{c}\right) - 0,3493 \left(\frac{o}{c}\right) \left[1 + 0,0531 \left(\frac{h}{c}\right)\right]}{1 - 0,4124 \left(\frac{o}{c}\right)} \quad (3.13)$$

Bu denklem $0,5 < \frac{o}{c} \leq 2$ için geçerlidir. Burada h, c ve o katı yakıtın kuru bazda içerisindeki hidrojen, oksijen ve karbonun kütle oranlarıdır.

3.3.5. Sürdürülebilirlik Analizi

HÇÜS'ün sürdürülebilirlik analizi performans, çevresel, ekonomik ve ekserjetik sürdürülebilirlik göstergeleri olmak üzere dört ana alt başlık altında incelenmiştir.

3.3.5.1. Performans Göstergesi

Bu tez çalışmasında, HÇÜS'ün performans göstergeleri net elektrik gücü, elektrik, enerji ve ekserji verimleri olmak üzere dört alt gösterge altında incelenmiştir. Bu başlık altında HÇÜS'ün enerji ve ekserji verim ifadeleri genel olarak tanımlanmıştır. Tüm performans alt göstergelerinin çalışma modlarına göre denklemleri sonraki bölümlerde detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

3.3.5.1.1. Enerji Verimi

Bir sistemin verimi o sistemin performansının etkinliğinin bir ölçüsü olarak tanımlanabilir. Herhangi bir termodinamik süreç veya sistem için enerji verimi, toplam faydalı çıktı enerjisinin sisteme giren toplam enerjiye oranı olarak tanımlanabilir. Enerji verimi aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\eta = \frac{\sum \text{faydalı çıktının enerjisi}}{\sum \text{enerji girişi}} \quad (3.14)$$

3.3.5.1.2. Ekserji Verimi

Ekserji verimi termodinamiğin ikinci yasası dikkate alınarak sisteme giren ve çıkan ekserji içeriğine göre tanımlanır. Ekserji verimi kavramı enerji sistemlerinin performansının daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. Ekserji verimi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\psi = \frac{\sum \text{faydalı çıktının ekserjisi}}{\sum \text{ekserji girişi}} \quad (3.15)$$

3.3.5.2. Çevresel Gösterge

HÇÜS'ün çevresel göstergeleri küresel ısınma potansiyeli ve CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli olmak üzere iki alt gösterge altında incelenmiştir. Çevresel alt göstergelerin çalışma modlarına göre denklemleri sonraki bölümlerde detaylı bir şekilde verilmiştir.

3.3.5.2.1. Küresel Isınma Potansiyeli

HÇÜS'ün küresel ısınma potansiyelinin belirlenmesinde her bir çalışma modu için birim CO₂ emisyonu dikkate alınmıştır. Birim CO₂ emisyonu aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenebilir [88]:

$$emi_{CO_2, sis} = \frac{\sum \dot{m}_{CO_2, sis}}{\sum \dot{E}_{\text{ç}, sis}} \times 3600 \quad (3.16)$$

Burada $emi_{CO_2, sis}$ sistemden elde edilen toplam faydalı enerji çıkışı başına birim CO₂ emisyonunu (kg/kWh) ifade etmektedir.

3.3.5.2.2. CO₂ Emisyonu Azaltım Potansiyeli

Bu bölümde, HÇÜS'ten elde edilen faydalı çıktılar için kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları sayesinde CO₂ emisyonun ne kadar azaltıldığı incelenmiştir. Bu tez

çalışmasında, CO₂ emisyonu azaltım potansiyelinin belirlenmesi için fosil yakıt olarak doğalgaz (CH₄), kömür (linyit) ve sıvı yakıt (fuel oil) dikkate alınmış ve üç fosil yakıt türüne göre HÇÜS'ün CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli belirlenmiştir. Söz konusu bu çevresel gösterge hesaplanırken HÇÜS'te faydalı çıktılar olarak net elektrik gücü ve ısı dikkate alınmıştır. CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli belirlenirken HÇÜS'ten elde edilen net elektrik gücünün ve ısı üretiminin yenilenebilir enerji kaynakları yerine fosil yakıt kullanılarak elde edilmesi durumunda ihtiyaç duyulan fosil yakıt miktarı ve bu fosil yakıt tüketimi sonunda açığa çıkabilecek CO₂ emisyonu aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanabilir [89], [90]. Hesaplanan bu değer HÇÜS'ün en önemli avantajlarından biri olan CO₂ emisyonu azaltım potansiyelini ifade etmektedir. HÇÜS'ün fosil yakıt türlerine göre toplam CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli denklem (3.17) kullanılarak hesaplanabilir [89]:

$$AZA_{CO_2, fy} = FYT_{top} EF_{fy} \quad (3.17)$$

Burada EF_{fy} fosil yakıt türlerine göre CO₂ emisyon faktörüdür ve bu değerler Tablo 3.1'de verilmiştir. Fosil yakıt türlerine göre toplam yakıt azaltım miktarı (FYT_{top}) aşağıdaki gibi hesaplanabilir [89]:

$$FYT_{top} = FYT_{el} + FYT_{isl} \quad (3.18)$$

Burada FYT_{el} ve FYT_{isl} net elektrik gücü ve ısı üretimi için fosil yakıt tüketimini ifade eder ve bu değerler aşağıdaki denklemler ile belirlenebilir [88], [90]:

$$FYT_{el} = \frac{\sum \dot{W}_{net, sis}}{(AID_{fy} \eta_{el})} \quad (3.19)$$

$$FYT_{isl} = \frac{\sum \dot{Q}_{top, sis}}{(AID_{fy} \eta_{isl})} \quad (3.20)$$

Burada AID_{fy} fosil yakıtın alt ısı değeri, η_{el} ve η_{isl} yakıt türlerine göre konvansiyonel elektrik üretim santrali ve ısı üretim kazanının verimidir.

Tablo 3.1: Fosil yakıtların alt ısı değerleri ve CO₂ emisyon faktörü değerleri.

Yakıt tipi	Doğalgaz	Sıvı yakıt	Kömür (linyit)
AİD (kJ/kg) [90]	50050	40594	19234
EF_{fy} (kg CO ₂ -e/GJ) [89]	50,15	70,29	91,16

3.3.5.3. Ekonomik Gösterge

HÇÜS'ün diğer önemli sürdürülebilirlik göstergelerinden biri olan ekonomik göstergenin değerlendirilmesinde eksergoekonomik faktör dikkate alınmıştır. Eksergoekonomik alt gösterge altında HÇÜS'ün toplam ürün birim maliyetinin analizleri gerçekleştirilmiştir.

3.3.5.3.1. Eksergoekonomik Faktör

Son yıllarda eksergoekonomik analizler kapsamında farklı yöntemler uygulanmıştır. Bu tez çalışmasında, HÇÜS'ün eksergoekonomik analizinde literatürde yaygın olarak kullanılan spesifik ekserji maliyet teorisi (SPECO) kullanılmıştır. Bu yöntem her bir ekserji akışının (sistem ürünleri dahil) spesifik maliyetinin değerlendirilebileceği ekserji akışlarının maliyet oranlarını değerlendirmek için rasyonel bir teknik sağlamaktadır. SPECO yaklaşımına göre genel olarak eksergoekonomik analiz aşağıdaki üç adımdan oluşmaktadır [92]:

- i) Bir termodinamik sistemi oluşturan her bir sistem bileşenine ait giriş ve çıkış ekserji değerlerinin belirlenmesi,
- ii) Sistemde yakıt ve ürün olarak bilinen ekserji akışlarının her bir sistem bileşeni için ayrı ayrı hesaplanması,
- iii) Her bir sistem bileşeni için maliyet ve yardımcı denklemlerin belirlenmesi,

Maliyet dengesi denklemi, tüm çıkan ekserji maliyet oranlarının toplamının, tüm giren ekserji maliyet oranları ile yatırım maliyeti ve işletme ve bakım ile ilgili maliyet oranlarının toplamına eşit olduğunu belirtir. HÇÜS'ü oluşturan her bir sistem ekipmanı için genel maliyet denge denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir [86], [93].

$$\dot{C}_{q,k} + \sum \dot{C}_{g,k} + \dot{Z}_{top}^{YM} + \dot{Z}_{top}^{BO} = \dot{C}_{w,k} + \sum \dot{C}_{\varsigma,k} \quad (3.21)$$

Burada $\dot{C}$ ekserji akımları (akışkan, ısı ve güç dahil) ile ilişkili maliyet aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\dot{C} = c\dot{E}x \quad (3.22)$$

Burada her bir sistem ekipmanına giren ve çıkan akışkanların, güç ve ısı transferinin birim ekserji maliyeti hesaplamalarında aşağıdaki denklemlerden faydalanılmaktadır [92], [93].

$$\dot{C}_g = c_g \dot{E}x_g \quad (3.23)$$

$$\dot{C}_{\varsigma} = c_{\varsigma} \dot{E}x_{\varsigma} \quad (3.24)$$

$$\dot{C}_w = c_w \dot{E}x_w \quad (3.25)$$

$$\dot{C}_q = c_q \dot{E}x_q \quad (3.26)$$

Burada c_g , c_{ς} , c_w ve c_q birim ekserji maliyeti değerleridir (\$/GJ). Sistem ekipmanlarının toplam maliyeti oranı, yatırım maliyeti ($\dot{Z}_k^{YM}$) ve işletme ve bakımın onarım maliyeti ($\dot{Z}_k^{BO}$) toplamıdır [94], [95].

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_k^{YM} + \dot{Z}_k^{BO} \quad (3.27)$$

Her bir sistem ekipmanı için bir değere getirilmiş yıllık yatırım maliyeti aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır [86], [93], [96].

$$\dot{Z}_k^{YM} = SKF \frac{\phi_r}{3600N} Z_k \quad (3.28)$$

Burada Z_k her bir sistem ekipmanı için satın alma maliyetini, N yıllık çalışma saatini ve ϕ_r bakım faktörünü ifade etmektedir. Bu çalışmada $\phi_r = 1,06$ olarak

alınmıştır. Yatırım dönüşüm faktörü aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir [86], [97], [98].

$$SKF = \frac{i_r(1 + i_r)^n}{(1 + i_r)^n - 1} \quad (3.29)$$

Burada i_r ve n sırasıyla faiz oranını ve sistem ekipmanları için beklenen yaşam ömrünü ifade etmektedir. Bu çalışmada $i_r = 0,15$ ve $n = 20$ yıl olarak alınmıştır. [93]. Sistem ekipmanları için bir değere getirilmiş yıllık işletme ve bakım onarım maliyeti aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [86], [95], [99].

$$\dot{Z}_k^{BO} = \gamma_k Z_k + \omega_k \dot{E}_{P,k} + \dot{R}_k \quad (3.30)$$

Burada γ_k ve ω_k her bir sistem ekipmanı ile ilgili sırasıyla sabit ve değişken işletme ve bakım maliyetleridir. $\dot{R}_k$ yatırım maliyetinden ve ürün ekserji değerinden bağımsız olan diğer tüm işletme ve bakım maliyetlerini içermektedir. Bu çalışmada $\gamma_k = 0,1$ olarak kabul edilmiştir. Denklem (3.30)'un sağ tarafındaki son iki terim ilk terime göre çok küçük oldukları için ihmal edilmiştir [95], [99], [100].

3.3.5.4. Ekserjetik Sürdürülebilirlik Gösterge

Ekserji, herhangi bir proses boyunca bir sistemin veriminin değişimini ve sistemdeki termodinamik kayıpların artış ve azalışını belirlemeye yardımcı olmaktadır. Bir sistem veya prosesin ekserji verimini arttırmaya yönelik alınan önlemler, enerji kayıplarını azaltarak olumsuz çevresel etkileri azaltabilir. Bu yüzden ekserji yöntemleri, çevresel zararlar gibi olumsuz etkileri en aza indirirken bir toplumun enerji kaynaklarından sağladığı faydaları en üst düzeye çıkarmaya olanak sağlayarak verimlilik arttırmayı temel teşkil eder. Neticede bir veya daha fazla enerji kaynağı sürekli olarak daha ucuza ve yaygın olarak bulunsa bile artan verimlilik büyük olasılıkla kilit unsurlardan biri olarak kalacaktır. Bunun nedeni artan verimin çevresel etkileri ve kaynak gereksinimlerini azaltmasıdır. Ayrıca sürdürülebilirliği arttırmak için de ekserji yöntemleri kullanılabilir. Yukarıda anlatılanlar ışığında herhangi bir sistem veya proses için ekserji temelli sürdürülebilirlik göstergeleri geliştirilebilir

[68], [71]. Bu tez çalışması kapsamında, HÇÜS için geliştirilen ekserjetik sürdürülebilirlik göstergeleri literatürde farklı sistemler için geliştirilmiş çalışmalardan alınmıştır. Bu bölümde, HÇÜS için geliştirilen ekserjetik sürdürülebilirlik göstergeleri; atık ekserji oranı, ekserji geri kazanılabilirlik oranı, ekserji yıkım oranı, çevresel etki faktörü ve ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi olmak üzere beş alt gösterge altında incelenmiş ve aşağıda alt başlıklar altında ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

3.3.5.4.1. Atık Ekserji Oranı

Bir sistem için atık ekserji oranı toplam atık ekserji çıkışı ve toplam ekserji girişine bağlı olarak aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır. Atık ekserji oranı 0 ile 1 arasında değişmektedir [68], [70], [71], [74].

$$a_{aeo} = \frac{\text{Toplam atık ekserji çıkışı}}{\text{Toplam ekserji girişi}} \quad (3.31)$$

3.3.5.4.2. Ekserji Geri Kazanılabilirlik Oranı

Ekserji geri kazanılabilirlik oranı herhangi bir sistemde geri kazanılması mümkün olan ekserji potansiyelini ifade etmektedir. HÇÜS'ün ekserji geri kazanılabilirlik oranını belirlemek için denklem (3.32) dikkate alınmıştır. Ekserji geri kazanılabilirlik oranı 0 ile 1 aralığında değişmektedir [68], [70], [71], [74].

$$g_{gko} = \frac{\text{Toplam geri kazanılabilir ekserji}}{\text{Toplam ekserji girişi}} \quad (3.32)$$

3.3.5.4.3. Ekserji Yıkım Oranı

Bir sistemin ekserji yıkım oranı toplam ekserji yıkımı ve toplam ekserji girişine bağlı olarak denklem (3.33)'teki gibi ifade edilmektedir. Ekserji yıkım oranı 0 ile 1 arasında değişmektedir [68], [70], [71], [74], [86].

$$y_{eyo} = \frac{\text{Toplam ekserji yıkımı}}{\text{Toplam ekserji girişı}} \quad (3.33)$$

3.3.5.4.4. Çevresel Etki Faktörü

Çevresel etki faktörü toplam atık ekserji çıktısından kaynaklanan bir sistemin veya prosesin çevre üzerindeki bazı zararlı potansiyellerinin olup olmadığını gösteren önemli bir göstergedir. Çevresel etki faktörü atık ekserji oranı ve ekserji verimine bağlı olarak hesaplanmaktadır. HÇÜS'ün çevresel etki faktörünü belirlemek için denklem (3.34) dikkate alınmıştır. Çevresel etki faktörü 0 ile $+\infty$ arasında değişmektedir [68], [70], [71], [74].

$$e_{\text{çef}} = \frac{\text{Atık ekserji oranı}}{\text{Ekserji verimi}} = \frac{\text{Toplam atık ekserji çıkışı}}{\text{Toplam faydalı çıktının ekserjisi}} \quad (3.34)$$

3.3.5.4.5. Ekserjetik Sürdürülebilirlik İndeksi

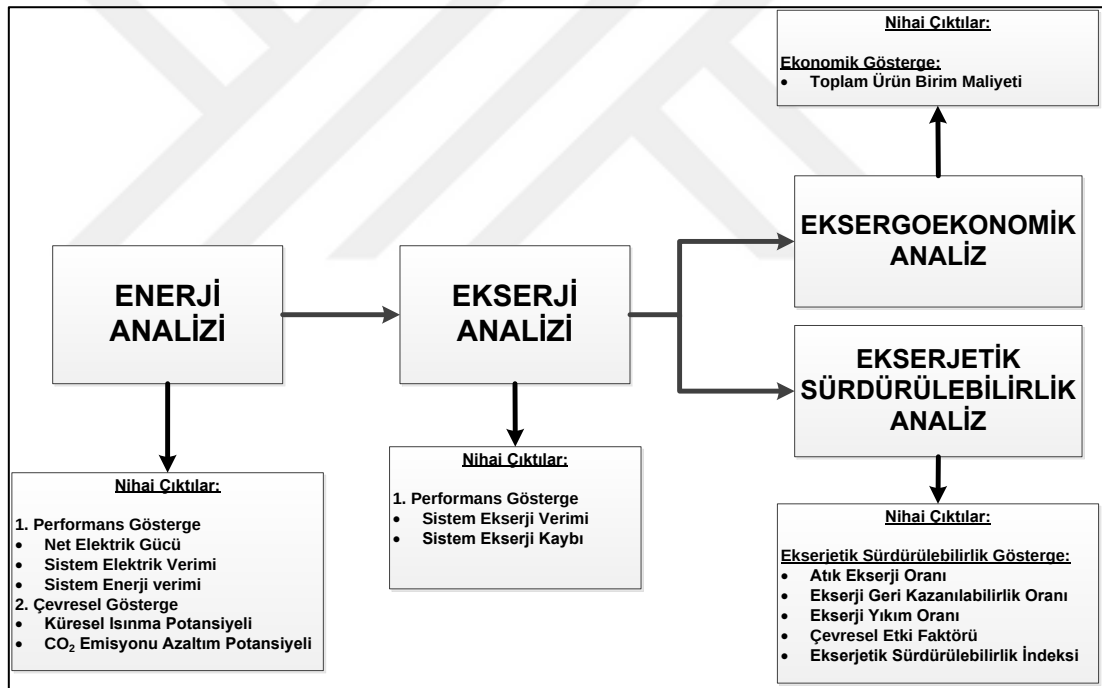
Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi termodinamiğin ikinci yasası açısından bir sistemin ekserji temelli sürdürülebilirliğini belirlemek için oldukça önemli bir göstergedir. Bir sistemin ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi çevresel etki faktörünün bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi yukarıda açıklanan tüm göstergelerin bir fonksiyonu olduğu kabul edilebilir. Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi çevresel etki faktörünün tersi olarak ifade edilmektedir. Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 0 ile $+\infty$ arasında bir değer almaktadır. En genel ifade ile bir sistemin ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi aşağıdaki gibi yazılabilir [68], [70], [71], [74].

$$s_{esi} = \frac{1}{\text{Çevresel etki faktörü}} \quad (3.35)$$

3.3.5.5. Termodinamik Modelleme

Bu bölümde, alt sistemlerin ve HÇÜS'ün termodinamik modelleme çalışmaları detaylı bir şekilde sunulmuştur. HÇÜS'ün termodinamik modelleme kapsamının analiz akış şeması Şekil 3.5'te verilmiştir.

Bu tez çalışmasında, alt sistemlerin ve HÇÜS'ün termodinamik modellemelerinde ve sürdürülebilirlik analiz çalışmalarında EES (Engineering Equations Solver) programı kullanılmıştır. EES programı binlerce lineer olmayan ve diferansiyel denklemi sayısal olarak çözebilen genel bir denklem çözme programıdır. Ayrıca EES programı yüzlerce madde için kurulan matematiksel ve termodinamik denklemlerin çözümünü sağlayacak yüksek doğrulukta termodinamik özellikler sağlayan geniş bir veri tabanına sahiptir.



Şekil 3.5: Modelleme kapsamının analiz akış şeması.

3.3.5.5.1. Isı Depolamalı Parabolik Oluklu Güneş Kollektör Sistemi

Parabolik oluklu güneş kolektörleri, küçük bir alanda yoğunlaşan güneş ışınlarının sağladığı ısıyı kullanan bir elektrik üretim teknolojisinin en önemli alt sistemlerinden biridir. Günümüzde yoğunlaştırılmış güneş enerji (CSP) santrallerinde güç üretimi için PGK'ler termal güneş teknolojileri arasında en yaygın olarak

ID-PGKS'nin çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilir; PGK'lerde alıcılar vasıtasıyla toplanan güneş enerjisi ısı transfer yağına aktarılır. Daha sonra ısı transfer yağına aktarılan bu ısı M1 çalışma modunda IDS'de bulunan eriyik tuzun ve jeotermal akışkanın sıcaklığını artırmak için EŞJ-D ve EŞJ-P ekipmanlarına gönderilir. M2 çalışma modunda sadece ısı transfer yağına aktarılan ısı jeotermal akışkanın sıcaklığını arttırmak için kullanılır. M3 çalışma modunda IDS'de depolanan ısı EŞJ-D ve EŞJ-P ekipmanları vasıtasıyla sırasıyla ısı transfer yağına ve daha sonra jeotermal akışkana aktarılır. M4 çalışma modunda ise güneş enerjisinin ve IDS'nin yetersiz olduğu durumlarda ısı transfer yağının sıcaklığını arttırmak ve eriyik tuzun donmasını önlemek için sisteme entegre edilen BYS çalışmaktadır. ID-PGKS'de söz konusu bu dört çalışma modu arasında geçişlerin sağlanması için sistemin belirli noktalarında üç yollu kontrol vanaları kullanılmıştır. ID-PGKS'nin ekipman listesi Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2: ID-PGKS ekipman listesi.

Ekipman adı	Kısaltma	Miktar	Birim
Parabolik oluklu güneş kollektörü	PGK	Değişken	Adet
Isı eşanjörü	EŞJ-D	1	Adet
	EŞJ-P	1	Adet
	EŞJ-K	1	Adet
Sirkülasyon pompası	SP-P	1	Adet
	SP-D1	1	Adet
	SP-D2	1	Adet
	SP-K	1	Adet
Isı depolama tankı	SDT	1	Adet
	SODT	1	Adet
Üç yollu kontrol vanası	-	8	Adet

Kollektörler vasıtasıyla elde edilen kullanılabilir ısı miktarı aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir [104].

$$\dot{Q}_{gün} = F_{ikf} A_{y,kol} \left[S - \frac{A_{y,al}}{A_{y,kol}} U_{kay,kol} (T_{g,kol} - T_0) \right] \quad (3.36)$$

Burada F_{ikf} ısı kaldırma faktörü, $A_{y,kol}$ kollektör açıklığının gölgelenmemiş yüzey alanı, $A_{y,al}$ kollektör alıcısının yüzey alanı, S alıcı tarafından absorbe edilen güneş ışıınım miktarı ve $U_{kay,kol}$ güneş kollektörü toplam ısı kaybı katsayısıdır.

Denklem (3.36)'da bulunan ifadeler aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır [105].

$$S = I_{gün} \eta_{al} \quad (3.37)$$

$$A_{y,al} = \pi D_{al,d} L_{kol} \quad (3.38)$$

$$A_{y,kp} = \pi D_{kp,d} L_{kol} \quad (3.39)$$

$$A_{y,kol} = (w_{kol} - D_{kp,d}) L_{kol} \quad (3.40)$$

$$F_{ikf} = \frac{\dot{m}_{ty} c_{p,ty}}{A_{y,al} U_{kay,kol}} \left(1 - \exp\left(-\frac{A_{y,al} U_{kay,kol} F_{kvf}}{\dot{m}_{ty} c_{p,ty}}\right) \right) \quad (3.41)$$

Burada $I_{gün}$ güneş ışınlam miktarı ve η_{al} kolektör alıcısının verimidir. w_{kol} kolektör genişliği, $D_{kp,d}$ cam kaplayıcı dış çapı, $D_{al,d}$ alıcı dış çapı ve L_{kol} kolektör uzunluğudur. $\dot{m}_{ty}$ ve $c_{p,ty}$ sırasıyla ısı transfer yağının kütleli debisi ve özgül ısıdır. Kolektör verimlilik faktörü aşağıdaki denklem ile belirlenmektedir [106].

$$F_{kvf} = \frac{U_0}{U_{kay,kol}} \quad (3.42)$$

$$U_{kay,kol} = \left(\frac{D_{al,d}}{(h_{kv,kp-0} + h_{rd,kp-0}) D_{kp,d}} + \frac{1}{h_{rd,al-kp}} \right)^{-1} \quad (3.43)$$

Burada $h_{kv,kp-0}$ cam kaplayıcı ile çevre arasındaki taşınım ısı transfer katsayısı, $h_{rd,kp-0}$ cam kaplayıcı ile çevre arasındaki radyasyon ısı transfer katsayısı ve $h_{rd,al-kp}$ alıcı ile cam kaplayıcı arasındaki radyasyon ısı transfer katsayısıdır. Cam kaplayıcı ile çevre arasında taşınım ısı transfer katsayısı aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır [105].

$$h_{kv,kp-0} = \frac{Nu_{kp-0} k_{hava}}{D_{kp,d}} \quad (3.44)$$

Burada k_{hava} ortalama sıcaklık ve atmosfer basıncında havanın ısı iletim katsayısıdır. Nusselt sayısı Reynolds sayısına bağlı olarak aşağıdaki denklemler vasıtasıyla hesaplanmaktadır [105].

$$Nu_{kp-0} = 0,4 + 0,54Re_{kp-0}^{0,52}; 0,1 < Re_{kp-0} < 1000 \quad (3.45)$$

$$Nu_{kp-0} = 0,3Re_{kp-0}^{0,6}; 1000 < Re_{kp-0} < 50000 \quad (3.46)$$

$$Re_{kp-0} = \frac{V_{hava} D_{kp,d}}{v_{hava}} \quad (3.47)$$

Burada V_{hava} ve v_{hava} sırasıyla ortalama sıcaklık ve atmosfer basıncında havanın hızı ve kinematik viskozitesidir. Cam kaplayıcı ile çevre arasında radyasyon ısı transfer katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [106].

$$h_{rd,kp-0} = \varepsilon_{kp} \sigma (T_{kp} + T_0)(T_{kp}^2 + T_0^2) \quad (3.48)$$

Burada σ Stefan Boltzmann sabitidir ($5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$). T_{kp} cam kaplayıcının sıcaklığıdır ve bu çalışmada 337 K olarak alınmıştır [107]. Cam kaplayıcı ile alıcı arasında radyasyon ısı transfer katsayısı aşağıdaki denklem ile belirlenmektedir [106].

$$h_{rd,al-kp} = \frac{\sigma (T_{kp} + T_{al})(T_{kp}^2 + T_{al}^2)}{\frac{1}{\varepsilon_{al}} + \frac{D_{al,d}}{D_{kp,d}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{kp}} - 1 \right)} \quad (3.49)$$

Burada ε_{al} ve ε_{kp} alıcı ve cam kaplayıcının emisivite değeridir. Toplam ısı transfer katsayısı aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır [105].

$$U_0 = \left[\frac{1}{U_{kay,kol}} + \frac{D_{al,d}}{h_{al} D_{al,i}} + \frac{D_{al,d}}{2k_{al}} \ln \left(\frac{D_{al,d}}{D_{al,i}} \right) \right]^{-1} \quad (3.50)$$

Burada k_{al} alıcının ısı iletim katsayısıdır. Alıcının tüp içindeki taşınım ısı transfer katsayısı aşağıdaki denklemler kullanılarak belirlenmektedir [108].

$$h_{al} = \frac{Nu_{al}k_{ty}}{D_{al,i}} \quad (3.51)$$

$$Nu_{al} = 4,364 ; Re_{al} < 2300 \quad (3.52)$$

$$Nu_{al} = 0,023Re_r^{0,8}Pr_r^{0,4} ; Re_{al} > 4000 \quad (3.53)$$

$$Re_{al} = \frac{V_{ty}D_{al,i}}{v_{ty}} \quad (3.54)$$

Burada V_{ty} , v_{ty} ve k_{ty} sırasıyla, ısı transfer yağının hızı, kinematik viskozitesi ve ısı iletim katsayısıdır. $D_{al,i}$ alıcı iç çapıdır. Ayrıca kollektörler vasıtasıyla elde edilen kullanılabilir ısı miktarı aşağıdaki denklem vasıtasıyla da elde edilebilir:

$$\dot{Q}_{gün} = \dot{m}_{ty}(c_{p,g,kol}T_{g,kol} - c_{p,\varsigma,kol}T_{\varsigma,kol}) \quad (3.55)$$

Burada $c_{p,g,kol}$ ve $c_{p,\varsigma,kol}$ sırasıyla kollektöre giren ve çıkan ısı transfer yağının özgül ısısıdır. $\dot{m}_{ty}$ ısı transfer yağının kütleli debisidir. Kollektör yüzeyine düşen toplam güneş ışınlam miktarı aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır [104].

$$\dot{Q}_{gün,top} = A_{y,kol}F_{lkf}I_{gün}\eta_{al}KS \quad (3.56)$$

Burada KS toplam parabolik kollektör sayısıdır. Güneş kollektörünün ekserji değeri aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenmektedir [109].

$$Ex_{gün} = A_{y,kol}S \left(1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_{gün}} \right)^4 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_0}{T_{gün}} \right) \right) \quad (3.57)$$

PGK'nin kütle, enerji ve ekserji denge denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{m}_{46} = \dot{m}_{47} = \dot{m}_{ty} \quad (3.58)$$

$$\dot{Q}_{gün} = \dot{m}_{ty}(h_{47} - h_{46}) \quad (3.59)$$

$$\dot{E}x_{kay,PGK} = \dot{E}x_{gün} + \dot{E}x_{46} - \dot{E}x_{47} \quad (3.60)$$

- Eşanjör-P

EŞJ-P, kuyu pompası vasıtasıyla basıncı arttırılmış jeotermal akışkanın sıcaklığını istenilen çalışma şartlarına arttırmak için kullanılmaktadır. EŞJ-P için kütle, enerji ve ekserji denge denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{m}_{40} = \dot{m}_{41} = \dot{m}_{ty} \quad (3.61)$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_{jeo} \quad (3.62)$$

$$\dot{m}_{40}(h_{40} - h_{41}) = \dot{m}_2(h_3 - h_2) \quad (3.63)$$

$$\dot{E}x_{kay,EŞJ-P} = \dot{E}x_{40} + \dot{E}x_2 - \dot{E}x_{41} - \dot{E}x_3 \quad (3.64)$$

Burada $\dot{E}x_{kay,EŞJ-P}$ ve $\dot{m}_{jeo}$ sırasıyla, EŞJ-P'nin ekserji kaybı ve jeotermal akışkanın kütleli debisidir.

- Sirkülasyon pompası-P

HÇÜS'te bulunan sirkülasyon pompaları çevrimlerde bulunan akışkanların basıncının istenilen çalışma şartlarına kadar arttırılması amacıyla kullanılmaktadır. SP-P için kütle, enerji ve ekserji denge denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{m}_{43} = \dot{m}_{44} = \dot{m}_{ty} \quad (3.65)$$

$$\dot{W}_{SP-P} = \dot{m}_{43}(h_{44} - h_{43}) \quad (3.66)$$

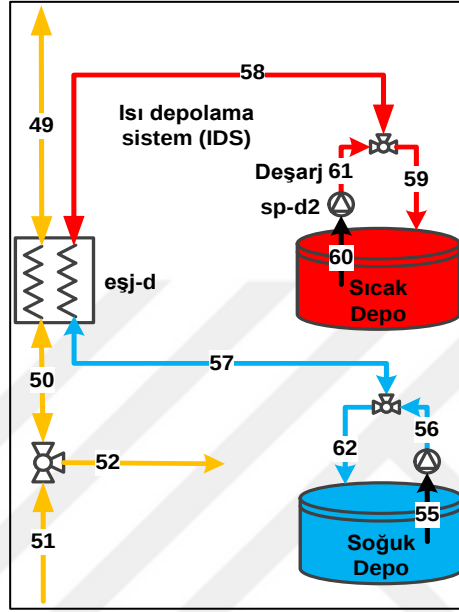
$$\dot{E}x_{kay,SP-P} = \dot{E}x^{\dot{W}_{SP-P}} + \dot{E}x_{43} - \dot{E}x_{44} \quad (3.67)$$

3.3.5.5.2. Isı Depolama Sistemi

CSP santralleri genel olarak yoğunlaştırıcı, alıcı, iletim/depolama sistemi ve güç üretim sistemi olmak üzere dört temel alt sistemden oluşmaktadır [110]. Bu tür santrallerde en önemli konulardan biri güneş enerjisinin ısı olarak depolanmasıdır. Aslında güneş enerji sistemlerinin en büyük dezavantajı güneş ışınımının gün içerisinde devamlılığının olmamasıdır. Bu sorunun üstesinden gelebilmek üzere günümüzde kurulan veya kurulması planlanan CSP santrallerinde IDS'ler oldukça önem kazanmaya başlamıştır [111]. CSP santrallerinde elektrik üretiminin kesintisiz bir şekilde sağlanabilmesi için gün boyunca güneş ışınımının en yüksek olduğu zamanlarda IDS şarj olacak ve depolanan ısı gece saatlerinde veya güneş enerjisinin elektrik üretmek için yetersiz olduğu günün belirli zaman aralıklarında elektrik üretiminin devam etmesini sağlayacaktır [112]. Ticari olarak CSP santrallerinde direkt ve indirekt olmak üzere iki tip IDS kullanılmaktadır [102]. İndirekt IDS entegreli CSP santrallerinde iki adet ısı transfer akışkanına gereksinim duyulmaktadır [113]. Bu ısı transfer akışkanlarından birisi güneş kollektörlerinde ısıyı absorbe eder ve ısıyı eşanjörler vasıtasıyla IDS'ye ve güç çevrimine aktarır. İndirekt IDS'ler direkt IDS'lere göre kontrolü daha kolaydır. Bu tür sistemlerde çevrimde therminol VP-1 ısı transfer akışkanı ve IDS'de eriyik tuz (molten salt) ısı depolama materyali kullanılmaktadır [113]. Son yıllarda indirekt iki tanklı eriyik tuzlu IDS'ler mevcut CSP santrallerinde yaygın olarak kullanılan bir sistemdir [114]. Bu tür sistemlerde düşük buhar basıncı ve nispeten yüksek termal kararlılığından dolayı ısı transfer akışkanı veya depolama ortamı için eriyik tuz kullanılmaktadır [102]. Erimiş nitrat tuzu ağırlıkça %60 sodyum nitrat (NaNO_3) ve %40 potasyum nitrat (KNO_3) birleşimidir. Kararlı bir karışımdır ve düşük buhar basıncına sahiptir. 260 °C ile 621 °C sıcaklık aralığında kullanılabilir. Sıcaklık düştükçe 238 °C'de kristalleşmeye başlar ve 221 °C'de ise katılaşır [112], [115]. Bu tez çalışmasında, ID-PGKS için indirekt iki tanklı eriyik tuzlu IDS seçilmiştir. Şekil 3.7'de indirekt iki tanklı eriyik tuzlu IDS'nin proses akış diyagramı verilmiştir.

IDS'nin çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilir; IDS şarj ve deşarj olmak üzere iki modda çalışmaktadır. Şarj modunda SODT'de bulunan eriyik tuz, sirkülasyon pompası vasıtasıyla EŞJ-D ekipmanına gönderilerek çalışma şartlarına kadar sıcaklığı artırılır ve SDT'de depolanır. Güneş enerjisinin yetersiz olduğu durumda SDT'de depolanan sıcak eriyik tuz, sirkülasyon pompası vasıtasıyla deşarj edilerek ısı transfer

yağının sıcaklığını çalışma şartlarına getirmek için EŞJ-D ekipmanına tekrardan gönderilir. Daha sonra ısı transfer yağına ısı aktarımını sağlayan eriyik tuz depolanmak üzere SODT'ye gönderilir. Söz konusu bu iki çalışma modu arasında geçişlerin sağlanması için sistemin belirli yerlerinde üç yollu kontrol vanaları kullanılmıştır. IDS'de kullanılan ekipman listesi Tablo 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.7: İndirekt iki tanklı eriyik tuzlu ısı depolama sisteminin proses akış diyagramı.

IDS'nin termodinamik modellemeleri her iki tankın şarj, deşarj ve depolama zamanları için gerçekleştirilmiş ve detaylı bir şekilde aşağıda verilmiştir.

- Sıcak depo

IDS'de bulunan sıcak depolama tankına şarj modunda giren toplam ısı miktarı aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir:

$$\dot{Q}_{SDT} = \dot{Q}_{59} - \dot{Q}_{kay,SDT} \quad (3.68)$$

Burada $\dot{Q}_{kay,SDT}$ sıcak depolama tankının ısı kaybı aşağıdaki denklem ile belirlenebilir:

$$\dot{Q}_{kay,SDT} = U_{SDT} A_{d,SDT} (T_{SDT} - T_0) \quad (3.69)$$

Burada U_{SDT} toplam ısı transfer katsayısıdır. Sıcak ısı depolama tankı tarafından elde edilen toplam ısı kazancı aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır [116].

$$\sum Q_{SDT} = \dot{Q}_{SDT} \Delta t_d \quad (3.70)$$

Burada Δt_d sıcak depolama işleminin toplam şarj süresidir. Teorik olarak sıcak deponun sıcaklığı aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir [101]:

$$T_{SDT} = \frac{\sum Q_{SDT}}{M_{et,SDT} c_{p,et,SDT}} \quad (3.71)$$

Burada $M_{et,SDT}$ ve $c_{p,et,SDT}$ sırasıyla, IDS’de bulunan toplam eriyik tuzu kütlesi ve özgül ısıdır. Depolama boyunca sıcak depodaki sıcaklık değişimi ve toplam ısı kaybı aşağıdaki denklemler ile elde edilebilir [116]:

$$T_{SDT,d} = T_{SDT} - \Delta t_{d,s} \frac{\dot{Q}_{kay,SDT}}{M_{et,SDT} c_{p,et,SDT}} \quad (3.72)$$

$$Q_{kay,SDT,top} = M_{et,SDT} c_{p,et,SDT} (T_{SDT} - T_{SDT,d}) \quad (3.73)$$

Sıcak depodan deşarj edilen toplam ısı aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$Q_{60} = \sum Q_{SDT} - Q_{kay,SDT,top} \quad (3.74)$$

- Soğuk depo

Soğuk depolama tankında şarj süresi boyunca depolanan toplam ısı ve depolama sonundaki sıcaklık aşağıdaki denklemler ile belirlenebilir [101]:

$$Q_{SODT,top} = M_{et,SODT} c_{p,et,SODT} (T_{SODT} - T_{SODT,d}) \quad (3.75)$$

$$T_{SODT,d} = T_{SODT} - \Delta t_{d,so} \frac{\dot{Q}_{kay,SODT}}{M_{et,SODT} c_{p,et,SODT}} \quad (3.76)$$

Burada $\dot{Q}_{kay,SODT}$ soğuk depolama tankında depolama işlemi boyunca meydana gelen ısı kaybı aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$\dot{Q}_{kay,SODT} = U_{SODT} A_{d,SODT} (T_{SODT} - T_0) \quad (3.77)$$

Sıcak depolama tankına benzer şekilde soğuk deponun deşarj işleminde toplam ısı miktarı aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$Q_{55} = \sum Q_{SODT} - Q_{SODT,top} \quad (3.78)$$

ID-PGKS’de bulunan ekipmanların kütle, enerji ve ekserji denge denklemleri Tablo 3.3’te ve Tablo 3.4’te verilmiştir.

Tablo 3.3: ID-PGKS ekipmanlarının kütle ve enerji denge denklemleri.

Ekipmanlar	Kütle Dengesi	Enerji Dengesi
PGK	$\dot{m}_{46} = \dot{m}_{47} = \dot{m}_{ty}$	$\dot{Q}_{gün} = \dot{m}_{ty}(h_{47} - h_{46})$
EŞJ-P	$\dot{m}_{40} = \dot{m}_{41} = \dot{m}_{ty}$ $\dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_{jeo}$	$\dot{m}_{ty}(h_{40} - h_{41}) = \dot{m}_{jeo}(h_3 - h_2)$
EŞJ-K	$\dot{m}_{41} = \dot{m}_{42} = \dot{m}_{ty}$ $\dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} = \dot{m}_{jeo}$	$\dot{m}_{ty}(h_{41} - h_{42}) = \dot{m}_{jeo}(h_{11} - h_{10})$
EŞJ-D	$\dot{m}_{49} = \dot{m}_{50}$ $\dot{m}_{57} = \dot{m}_{58}$	$\dot{m}_{49}(h_{49} - h_{50}) = \dot{m}_{57}(h_{58} - h_{57})$
SP-P	$\dot{m}_{43} = \dot{m}_{44}$	$\dot{W}_{SP-P} = \dot{m}_{43}(h_{44} - h_{43})$
SP-K	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$	$\dot{W}_{SP-K} = \dot{m}_1(h_2 - h_1)$
SDT	$\dot{m}_{59} = \dot{m}_{60}$	$Q_{60} = Q_{59} - Q_{kay,SDT}$
SODT	$\dot{m}_{62} = \dot{m}_{55}$	$Q_{55} = Q_{62} - Q_{kay,SODT}$
SP-D1	$\dot{m}_{55} = \dot{m}_{56}$	$\dot{W}_{SP-D1} = \dot{m}_{55}(h_{56} - h_{55})$
SP-D2	$\dot{m}_{60} = \dot{m}_{61}$	$\dot{W}_{SP-D2} = \dot{m}_{60}(h_{61} - h_{60})$

Tablo 3.4: ID-PGKS ekipmanlarının ekserji denge denklemleri.

Ekipmanlar	Ekserji Girişi, $\dot{E}x_g$	Ekserji Çıkışı, $\dot{E}x_c$	Ekserji Kaybı, $\dot{E}x_{kay}$
PGK	$\dot{E}x_{gün}$	$\dot{E}x_{47} - \dot{E}x_{46}$	$\dot{E}x_{g,PGK} - \dot{E}x_{c,PGK}$
EŞJ-P	$\dot{E}x_{40} - \dot{E}x_{41}$	$\dot{E}x_3 - \dot{E}x_2$	$\dot{E}x_{g,EŞJ-P} - \dot{E}x_{c,EŞJ-P}$
EŞJ-P	$\dot{E}x_{49} - \dot{E}x_{50}$ (M1) $\dot{E}x_{58} - \dot{E}x_{57}$ (M3)	$\dot{E}x_{58} - \dot{E}x_{57}$ $\dot{E}x_{49} - \dot{E}x_{50}$	$\dot{E}x_{g,EŞJ-D} - \dot{E}x_{c,EŞJ-D}$
EŞJ-K	$\dot{E}x_{41} - \dot{E}x_{42}$	$\dot{E}x_{11} - \dot{E}x_{10}$	$\dot{E}x_{g,EŞJ-K} - \dot{E}x_{c,EŞJ-K}$
SP-P	$\dot{W}_{SP-P}$	$\dot{E}x_{44} - \dot{E}x_{43}$	$\dot{E}x_{g,SP-P} - \dot{E}x_{c,SP-P}$
SP-K	$\dot{W}_{SP-K}$	$\dot{E}x_2 - \dot{E}x_1$	$\dot{E}x_{g,SP-K} - \dot{E}x_{c,SP-K}$
SDT	$\dot{E}x_{59}$	$\dot{E}x_{60} - \dot{E}x_{kay,SDT}$	$\dot{E}x_{g,SDT} - \dot{E}x_{c,SDT}$
SODT	$\dot{E}x_{62}$	$\dot{E}x_{55} - \dot{E}x_{kay,SODT}$	$\dot{E}x_{g,SODT} - \dot{E}x_{c,SODT}$
SP-D1	$\dot{W}_{SP-D1}$	$\dot{E}x_{56} - \dot{E}x_{55}$	$\dot{E}x_{g,SP-D1} - \dot{E}x_{c,SP-D1}$
SP-D2	$\dot{W}_{SP-D2}$	$\dot{E}x_{61} - \dot{E}x_{60}$	$\dot{E}x_{g,SP-D2} - \dot{E}x_{c,SP-D2}$

Eksergoekonomik analiz çalışmalarında kullanılan ID-PGKS'nin tüm ekipmanları için gerekli olan yatırım maliyeti denklemleri Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5: ID-PGKS ekipmanlarının yatırım maliyeti denklemleri.

Ekipmanlar	Yatırım Maliyeti Fonksiyonu (\$)
PGK [117]	$Z_{PGK} = 245A_{PGK}$
EŞJ-P [96]	$Z_{EŞJ-P} = 309,14(A_{EŞJ-P})^{0,88}$
EŞJ-D [96]	$Z_{EŞJ-D} = 309,14(A_{EŞJ-D})^{0,88}$
EŞJ-K [96]	$Z_{EŞJ-K} = 309,14(A_{EŞJ-K})^{0,88}$
SP-P [117]	$Z_{SP-P} = 442(\dot{W}_{SP-P})^{0,71} 1,41 \left(1 + \frac{0,2}{(1 - \eta_{SP-P})}\right)$
SP-K [100]	$Z_{SP-K} = 2100 \left(\frac{\dot{W}_{SP-K}}{10}\right)^{0,26} \left(\frac{1 - \eta_{SP-K}}{\eta_{SP-K}}\right)^{0,5}$
SDT [118]	$Z_{SDT} = 15\dot{Q}_{SDT}$
SODT [118]	$Z_{SODT} = 11\dot{Q}_{SODT}$
SP-D1[117]	$Z_{SP-D1} = 442(\dot{W}_{SP-D1})^{0,71} 1,41 \left(1 + \frac{0,2}{(1 - \eta_{SP-D1})}\right)$
SP-D2 [117]	$Z_{SP-D2} = 442(\dot{W}_{SP-D2})^{0,71} 1,41 \left(1 + \frac{0,2}{(1 - \eta_{SP-D2})}\right)$

Tablo 3.4'te ısı eşanjörleri için verilen yatırım maliyeti denklemlerinde bulunan eşanjör yüzey alanı ($A_{EŞJ}$) ifadesi denklem (4.79) kullanılarak belirlenmektedir [119].

$$A_{EŞJ} = \frac{\dot{Q}_{EŞJ}}{U_{EŞJ} \Delta T_{LOS F}} \quad (4.79)$$

Burada $U_{EŞJ}$ toplam ısı transfer katsayısıdır. Logaritmik ortalama sıcaklık farkı aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır [120].

$$\Delta T_{LOS F} = \frac{[(T_{s,g} - T_{so,\zeta}) - (T_{s,\zeta} - T_{so,g})]}{\ln[(T_{s,g} - T_{so,\zeta}) / (T_{s,\zeta} - T_{so,g})]} \quad (4.80)$$

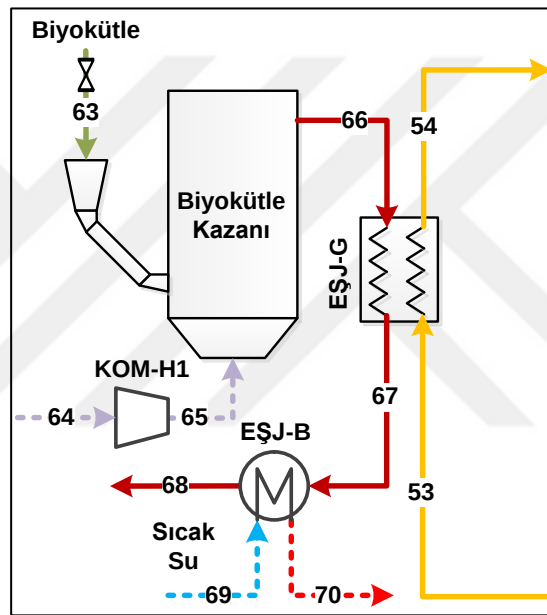
Burada $T_{s,g}$, $T_{s,\zeta}$, $T_{so,g}$ ve $T_{so,\zeta}$ sırasıyla sıcak akışkan giriş ve çıkış, soğuk akışkan giriş ve çıkış sıcaklıklarıdır. HÇÜS'te bulunan tüm eşanjörler için yüzey alanı benzer şekilde hesaplanmıştır. HÇÜS'ün eksergoekonomik analizinin yapılması için gerekli olan maliyet denge ve yardımcı denklemlerinin tüm alt sistemler ve ekipmanlar için ayrı ayrı yazılması gerekmektedir. Bu bağlamda, ID-PGKS'de bulunan ekipmanların maliyet denge ve yardımcı denklemleri Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6: ID-PGKS ekipmanlarının maliyet denge ve yardımcı denklemleri.

Ekipmanlar	Maliyet denge denklemi	Yardımcı denklem
PGK	$\dot{C}_{46} + \dot{C}_{gün} + \dot{Z}_{PGK} = \dot{C}_{47}$	$\dot{C}_{gün} = 0$
EŞJ-P	$\dot{C}_{40} + \dot{C}_2 + \dot{Z}_{EŞJ-P} = \dot{C}_{41} + \dot{C}_3$	$c_{40} = c_{41}$ veya $\frac{\dot{C}_{40}}{\dot{E}x_{40}} = \frac{\dot{C}_{41}}{\dot{E}x_{41}}$
EŞJ-D	$\dot{C}_{49} + \dot{C}_{57} + \dot{Z}_{EŞJ-D} = \dot{C}_{50} + \dot{C}_{58}$ (M1) $\dot{C}_{58} + \dot{C}_{50} + \dot{Z}_{EŞJ-D} = \dot{C}_{49} + \dot{C}_{57}$ (M3)	$c_{41} = c_{42}$ veya $\frac{\dot{C}_{41}}{\dot{E}x_{42}} = \frac{\dot{C}_{42}}{\dot{E}x_{42}}$ $c_{58} = c_{57}$ veya $\frac{\dot{C}_{58}}{\dot{E}x_{58}} = \frac{\dot{C}_{57}}{\dot{E}x_{57}}$
EŞJ-K	$\dot{C}_{41} + \dot{C}_{10} + \dot{Z}_{EŞJ-K} = \dot{C}_{42} + \dot{C}_{11}$	$c_{41} = c_{42}$ veya $\frac{\dot{C}_{41}}{\dot{E}x_{41}} = \frac{\dot{C}_{42}}{\dot{E}x_{42}}$
SP-P	$\dot{C}_{43} + \dot{Z}_{SP-P} + \dot{C}_{\dot{W}_{SP-P}} = \dot{C}_{44}$	$c_{\dot{W}_{SP-P}} = c_{\dot{W}_{OT}}$
SP-K	$\dot{C}_1 + \dot{Z}_{SP-K} + \dot{C}_{\dot{W}_{SP-K}} = \dot{C}_2$	$c_{\dot{W}_{SP-K}} = c_{\dot{W}_{OT}}$
SDT	$\dot{C}_{59} + \dot{Z}_{SDT} = \dot{C}_{60}$	-
SODT	$\dot{C}_{62} + \dot{Z}_{SODT} = \dot{C}_{55}$	-
SP-D1	$\dot{C}_{55} + \dot{Z}_{SP-D1} + \dot{C}_{\dot{W}_{SP-D1}} = \dot{C}_{56}$	$c_{\dot{W}_{SP-D1}} = c_{\dot{W}_{OT}}$
SP-D2	$\dot{C}_{60} + \dot{Z}_{SP-D2} + \dot{C}_{\dot{W}_{SP-D2}} = \dot{C}_{61}$	$c_{\dot{W}_{SP-D2}} = c_{\dot{W}_{OT}}$

3.3.5.5.3. Biyokütle Yakma Sistemi

BYS güneş enerjisinin ve IDS'nin yetersiz kaldığı M4 çalışma modunda sistemin kesintisiz çalışmasını sağlamak için ısı transfer yağının sıcaklığını çalışma şartlarına getirmek ve IDS'deki eriyik tuzun donmasını önlemek amacıyla kullanılmıştır. Günümüzde kurulmuş veya kurulması düşünülen CSP santrallerinin çoğunda fosil yakıt veya biyokütle yakan bir yedek sistem bulunmaktadır. Bu bağlamda, bu tez çalışmasında HÇÜS'e BYS entegre edilmiştir. Şekil 3.8'de BYS'nin proses akış diyagramı gösterilmektedir.



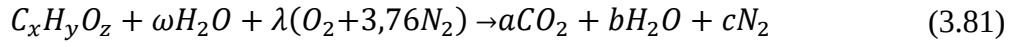
Şekil 3.8: Biyokütle yakma sisteminin proses akış diyagramı.

BYS'nin çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilir; biyokütle yakma kazanına hava yakıt oranına bağlı olarak gerekli miktarlarda odun talaşı ve hava beslenir. Biyokütle kazanı içinde gerçekleşen yanma işlemi sonucunda açığa çıkan sıcak baca gazı HÇÜS'ün M4 çalışma modunda ısı transfer yağının sıcaklığını çalışma şartlarına arttırmak üzere EŞJ-G ekipmanına gönderilir. Daha sonra sıcaklığının belirli bir kısmı kullanılan baca gazı EŞJ-B ekipmanına gönderilerek burada sıcak su üretimi gerçekleştirilir. Bununla birlikte, BYS'nin ekipman listesi Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7: BYS ekipman listesi.

Ekipman adı	Kısaltma	Miktar	Birim
Biyokütle kazanı	BK	1	Adet
Isı eşanjörü	EŞJ-G	1	Adet
	EŞJ-B	1	Adet
Hava kompresörü	KOM-H1	1	Adet
Kesme vanası	-	1	Adet

Biyokütlenin oksijenle tam yanma işleminin kimyasal denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir [26]:



Yanma denkleminin her iki tarafındaki bilinmeyen katsayıları kimyasal denge denklemlerinden yararlanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir [26]:

$$a = x \quad (3.82)$$

$$b = \frac{y + 2\omega}{2} \quad (3.83)$$

$$c = \frac{79}{21} \lambda \quad (3.84)$$

$$\lambda = \frac{2a + b - \omega - z}{2} \quad (3.85)$$

Burada x, y, z ve ω biyokütle içerisindeki C, H, O ve nem miktarıdır. λ hava yakıt oranıdır. Biyokütle olarak seçilen odun talaşının elemental analiz değerleri Tablo 3.8’de verilmiştir [23].

Tablo 3.8: Odun talaşının elemental analiz değerleri.

Elemental bileşim (%)	C	H	O	S	Nem
Odun Talaşı	50,54	7,08	41,11	0,57	10

EŞJ-G girişindeki 66 noktasının entalpi değerleri aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir [24]:

$$\bar{h}_{66} = x_{66,CO_2} \bar{h}_{66,CO_2} + x_{66,H_2O} \bar{h}_{66,H_2O} + x_{66,N_2} \bar{h}_{66,N_2} \quad (3.86)$$

Burada x_{66,CO_2} , x_{66,H_2O} ve x_{66,N_2} CO₂, H₂O ve N₂ gazlarının mol oranları aşağıdaki denklemler ile belirlenebilir:

$$x_{66,CO_2} = \frac{\dot{n}_{66,CO_2}}{\dot{n}_{66}}, x_{66,H_2O} = \frac{\dot{n}_{66,H_2O}}{\dot{n}_{66}}, x_{66,N_2} = \frac{\dot{n}_{66,N_2}}{\dot{n}_{66}} \quad (3.87)$$

Biyokütle kazanına beslenen odun talaşının alt ısı değeri ve üst ısı değeri aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır [121].

$$AID_{tal} = \dot{U}ID_{tal} - 22604H - 2582\omega \quad (3.88)$$

$$\dot{U}ID_{tal} = 33823C + 144249(H - O/8) + 9418S \quad (3.89)$$

Burada C, H, O, S ve ω biyokütle içerisindeki karbon, hidrojen, oksijen, kükürt ve nem oranlarıdır. Biyokütle kazanı için kütle, enerji ve ekserji denge denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{m}_{63} + \dot{m}_{65} = \dot{m}_{66} \quad (3.90)$$

$$\dot{m}_{63}h_{63} + \dot{m}_{65}h_{65} = \dot{m}_{66}h_{66} \quad (3.91)$$

$$\dot{E}x_{kay,BK} = \dot{E}x_{63} + \dot{E}x_{65} - \dot{E}x_{66} \quad (3.92)$$

- Kompresör-H1

KOM-H1 biyokütle kazanına sağlanan havanın basıncını çalışma şartlarına getirmek için kullanılmaktadır. KOM-H1 için kütle, enerji ve ekserji denge denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{m}_{64} = \dot{m}_{65} \quad (3.93)$$

$$\dot{W}_{KOM-H1} = \dot{m}_{64}(h_{65} - h_{64}) \quad (3.94)$$

$$\dot{E}x_{kay,KOM-H1} = \dot{E}x_{64} + \dot{E}x_{KOM-H1} - \dot{E}x_{65} \quad (3.95)$$

Burada $\dot{E}x_{kay,KOM-H1}$ KOM-H1 ekipmanının ekserji kaybının ifade etmektedir. KOM-H1 çıkışında havanın entalpi değeri (h_{65}) kompresör izantropik verim bağıntısı kullanılarak aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$\eta_{KOM-H1,iz} = \frac{h_{65,s} - h_{64}}{h_{65} - h_{64}} \quad (3.96)$$

Burada $h_{65,s}$ ideal şartlarda KOM-H1 çıkışındaki havanın entalpi değerini ifade etmektedir. BYS’de bulunan ekipmanların kütle, enerji ve ekserji denge denklemleri Tablo 3.9’da ve Tablo 3.10’da verilmiştir.

Tablo 3.9: BYS ekipmanlarının kütle ve enerji denge denklemleri.

Ekipmanlar	Kütle Dengesi	Enerji Dengesi
BK	$\dot{m}_{63} + \dot{m}_{65} = \dot{m}_{66}$	$\dot{m}_{63}h_{63} + \dot{m}_{65}h_{65} = \dot{m}_{66}h_{66}$
EŞJ-G	$\dot{m}_{66} = \dot{m}_{67}, \dot{m}_{53} = \dot{m}_{54}$	$\dot{m}_{56}(h_{66} - h_{67}) = \dot{m}_{53}(h_{54} - h_{53})$
KOM-H1	$\dot{m}_{64} = \dot{m}_{65}$	$\dot{W}_{KOM-H1} = \dot{m}_{64}(h_{65} - h_{64})$
EŞJ-B	$\dot{m}_{67} = \dot{m}_{68}, \dot{m}_{69} = \dot{m}_{70}$	$\dot{m}_{67}(h_{67} - h_{68}) = \dot{m}_{69}(h_{70} - h_{69})$

Tablo 3.10: BYS ekipmanlarının ekserji denge denklemleri.

Ekipmanlar	Ekserji Girişi, $\dot{E}x_g$	Ekserji Çıkışı, $\dot{E}x_\zeta$	Ekserji Kaybı, $\dot{E}x_{kay}$
BK	$\dot{E}x_{63} + \dot{E}x_{65}$	$\dot{E}x_{66}$	$\dot{E}x_{g,BK} - \dot{E}x_{\zeta,BK}$
EŞJ-G	$\dot{E}x_{66} - \dot{E}x_{67}$	$\dot{E}x_{54} - \dot{E}x_{53}$	$\dot{E}x_{g,EŞJ-G} - \dot{E}x_{\zeta,EŞJ-G}$
KOM-H1	$\dot{W}_{KOM-H1}$	$\dot{E}x_{65} - \dot{E}x_{66}$	$\dot{E}x_{g,KOM-H1} - \dot{E}x_{\zeta,KOM-H1}$
EŞJ-B	$\dot{E}x_{67} - \dot{E}x_{68}$	$\dot{E}x_{70} - \dot{E}x_{69}$	$\dot{E}x_{g,EŞJ-B} - \dot{E}x_{\zeta,EŞJ-B}$

BYS’de bulunan ekipmanların yatırım maliyeti, maliyet denge ve yardımcı denklemleri Tablo 3.11’de ve Tablo 3.12’de verilmiştir.

Tablo 3.11: BYS ekipmanlarının yatırım maliyeti denklemleri.

Ekipmanlar	Yatırım Maliyeti Fonksiyonu
BK [122]	$Z_{BK} = \frac{48,64(\dot{m}_{65})}{0,995 - \frac{P_{66}}{P_{65}}} [1 + \exp (0,018T_{66} - 26,4)]$
EŞJ-G [96]	$Z_{EŞJ-G} = 309,14(A_{EŞJ-G})^{0,88}$
KOM-H1 [100]	$Z_{KOM-H1} = 91562 \left(\frac{\dot{W}_{KOM-H1}}{455} \right)^{0,67}$
EŞJ-B [96]	$Z_{EŞJ-B} = 309,14(A_{EŞJ-B})^{0,88}$

Tablo 3.12: BYS ekipmanlarının maliyet denge ve yardımcı denklemleri.

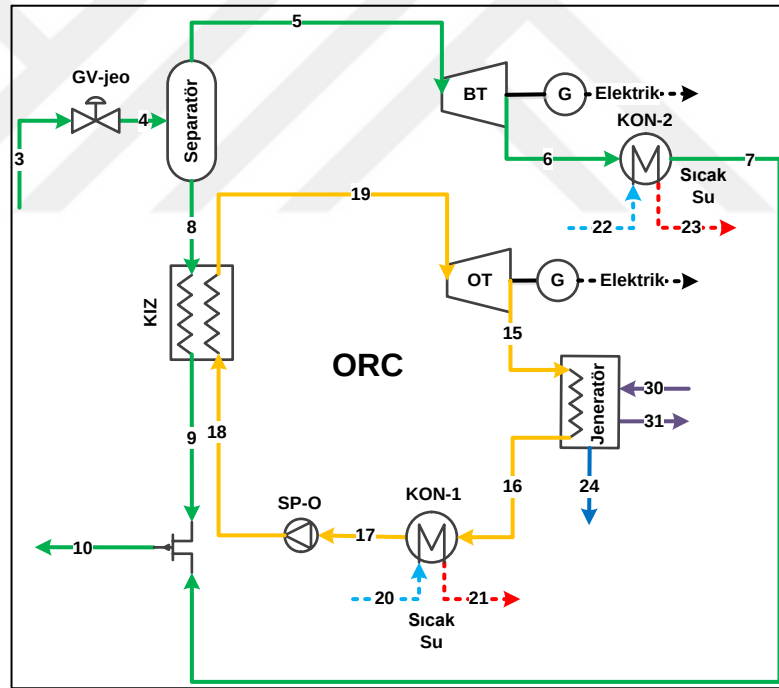
Ekipmanlar	Maliyet denge denklemi	Yardımcı denklem
BK	$\dot{C}_{63} + \dot{C}_{65} + \dot{Z}_{BK} = \dot{C}_{66}$	$\dot{C}_{63} = c_{63}\dot{E}x_{63},$ $c_{63} = 2\$/GJ [123]$
EŞJ-G	$\dot{C}_{66} + \dot{C}_{53} + \dot{Z}_{EŞJ-G} = \dot{C}_{67} + \dot{C}_{54}$	$c_{66} = c_{67}$ veya $\frac{\dot{C}_{66}}{\dot{E}x_{66}} = \frac{\dot{C}_{67}}{\dot{E}x_{67}}$
KOM-H1	$\dot{C}_{64} + \dot{C}_{\dot{W}_{KOM-H1}} + \dot{Z}_{KOM-H1} = \dot{C}_{65}$	$c_{64} = 0, c_{\dot{W}_{KOM-H1}} = c_{\dot{W}_{OT}}$
EŞJ-B	$\dot{C}_{67} + \dot{C}_{69} + \dot{Z}_{EŞJ-B} = \dot{C}_{68} + \dot{C}_{70}$	$c_{67} = c_{68}$ veya $\frac{\dot{C}_{67}}{\dot{E}x_{67}} = \frac{\dot{C}_{68}}{\dot{E}x_{68}}$

3.3.5.5.4. Kombine Tek Flaş/Binary Jeotermal Güç Üretim Sistemi

Günümüzde jeotermal enerjiden elektrik üretimi için buhar Rankine çevrimi ve ORC olmak üzere iki tip elektrik üretim teknolojisi kullanılmaktadır [124]. Jeotermal güç santralleri genel olarak kuru/buhar santralleri, flaş/buhar santralleri ve binary çevrim santralleri olmak üzere üç temel güç üretim santralinden oluşmaktadır. Binary çevrim santralleri ise binary ve son yıllarda dizayn edilen kombine flaş/binary santralleri olmak üzere iki temel santral tipine ayrılmaktadır [125].

Dünya’da ve Türkiye’de jeotermal kaynak kuyuları nispeten orta sıcaklıklı jeotermal akışkana sahip olduğundan dolayı jeotermal güç santrallerinin termodinamik performansları düşüktür [126]. Orta sıcaklıklı jeotermal enerji kaynağına güneş enerjisinden sağlanan ısı ilave edilirse hibrit sistem potansiyel olarak tek flaşlı bir buhar santraline dönüştürülebilir. Bu tip bir santralde, yer altından belirli derinliklerden elde edilen jeotermal enerji kaynağının basıncı düşürülür ve daha sonra seperatör ünitesi vasıtasıyla buhar ve sıvı olarak ayrıştırılır. Sıvı faz halindeki jeotermal akışkan reenjeksiyon kuyusuna gönderilirken elde edilen buhar doğrudan türbine gönderilerek güç üretimi gerçekleştirilir [127]. Günümüzde orta sıcaklıklı

jeotermal kaynakların güç üretiminde kullanılmasına yönelik geliştirilen bir diğer santral türü ise güneş enerjisi destekli flaş/binary hibrit güç üretim santralidir. Bu tür sistemlerde orta sıcaklıklı jeotermal enerji kaynağının basıncını arttırmak için bir kuyu pompası kullanılmaktadır [127], [128]. Güneş enerjisi basıncı arttırılmış jeotermal akışkanı uygun bir basınçta flaş işlemine olanak sağlayacak şekilde yaklaşık olarak doyma sıcaklığına kadar sıcaklığını yükseltmek amacıyla kullanılmaktadır. Daha sonra sıcaklığı arttırılmış jeotermal akışkan genleşme vanası vasıtasıyla basıncı düşürülerek flaşlama işleminden geçirilir ve seperatör ünitesinde buhar ve sıvı olarak iki faza ayrılır. Buhar ve sıvı olarak ayrılan jeotermal akışkan doğrudan KGS’de bulunan buhar türbinine ve ikincil akışkanın sıcaklığını arttırmak için ORC’ye gönderilmektedir [128]. Bu tez çalışmasında, ORC’de iş akışkanı olarak izobütan seçilmiştir. Güç üretimi için geliştirilen KGS’nin proses akış diyagramı Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9: Kombine tek flaş/binary jeotermal güç üretim sisteminin proses akış diyagramı.

KGS’nin çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilir; ID-PGKS’de sıcaklığı ve basıncı arttırılmış jeotermal akışkan genleşme vanası vasıtasıyla çalışma şartlarına bağlı olarak basıncı düşürülerek flaşlama işleminden geçirilir. Daha sonra seperatör ünitesinde buhar ve sıvı olarak iki faza ayrılır. Buhar faza ayrılan jeotermal akışkan

KGS’de bulunan buhar türbinine gönderilerek güç üretilir. Sıvı faza ayrılan jeotermal akışkan ise ORC’de bulunan izobütanın sıcaklığını arttırmak için kızdırıcıya gönderilir. Çevrimdeki izobütan kızdırıcıya gönderilmeden önce basıncı pompa vasıtasıyla çalışma şartlarına bağlı olarak türbin giriş basıncına kadar arttırılır. Daha sonra izobütanın sıcaklığı çalışma şartlarına getirilmesi için kızdırıcıya gönderilir. Sıcaklığı ve basıncı arttırılmış izobütan çevrimdeki buhar türbinine gönderilerek güç üretimi gerçekleşir. Ayrıca KGS’nin atık ısı potansiyelinin değerlendirilmesi için KON-1 ve KON-2 ekipmanlarından sıcak su üretimi gerçekleştirilmektedir. ASS’nin soğutma yapabilmesi için gerekli olan ısı ihtiyacı ORC’de bulunan jeneratör ekipmanından sağlanmaktadır. KGS’nin ekipman listesi Tablo 3.13’te verilmiştir.

Tablo 3.13: KGS ekipman listesi.

Ekipman adı	Kısaltma	Miktar	Birim
Genleşme vanası	GV-jeo	1	Adet
Seperatör	SEP	1	Adet
Isı eşanjörü	KIZ	1	Adet
	KON-1	1	Adet
	KON-2	1	Adet
Sirkülasyon pompası	SP-O	1	Adet
Buhar türbini	BT	1	Adet
	OT	1	Adet

- ORC Türbin

ORC türbini için kütle, enerji ve ekserji denge denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{m}_{19} = \dot{m}_{15} = \dot{m}_{wf} \quad (3.97)$$

$$\dot{W}_{OT} = \dot{m}_{19}(h_{19} - h_{15}) \quad (3.98)$$

$$\dot{E}x_{kay,OT} = \dot{E}x_{19} - \dot{E}x_{15} - \dot{E}x^{\dot{W}_{OT}} \quad (3.99)$$

Burada $\dot{m}_{wf}$ ORC’de iş akışkanı olarak kullanılan izobütanın kütleli debisidir. ORC türbin çıkış entalpi değeri (h_{15}) türbin izantropik verim bağıntısı kullanılarak aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır [38].

$$\eta_{OT,iz} = \frac{h_{19} - h_{15}}{h_{19} - h_{15,s}} \quad (3.100)$$

Burada $h_{15,s}$ ideal şartlarda ORC türbin çıkışındaki izobütanın entalpi değeridir.

- ORC Pompa

ORC’de bulunan pompa izobütanın basıncını türbin giriş basıncına yükseltmek amacıyla kullanılmaktadır. SP-O için kütle, enerji ve ekserji denge denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{m}_{17} = \dot{m}_{18} = \dot{m}_{wf} \quad (3.101)$$

$$\dot{W}_{SP-O} = \dot{m}_{17}(h_{18} - h_{17}) \quad (3.102)$$

$$\dot{E}x_{kay,SP-O} = \dot{E}x_{17} + \dot{E}x^{W_{SP-O}} - \dot{E}x_{18} \quad (3.103)$$

Burada ORC pompa çıkışındaki izobütanın entalpi değeri (h_{18}) pompa izantropik verim bağıntısı kullanılarak elde edilmektedir. SP-O için izantropik verim bağıntısı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [129].

$$\eta_{SP-O,iz} = \frac{h_{18,s} - h_{17}}{h_{18} - h_{17}} \quad (3.104)$$

Burada $h_{18,s}$ ideal şartlarda SP-O çıkışındaki izobütanın entalpi değeridir. HÇÜS’te bulunan diğer türbinlerin ve pompaların çıkış entalpi değerleri benzer şekilde hesaplanmıştır.

- Kızdırıcı

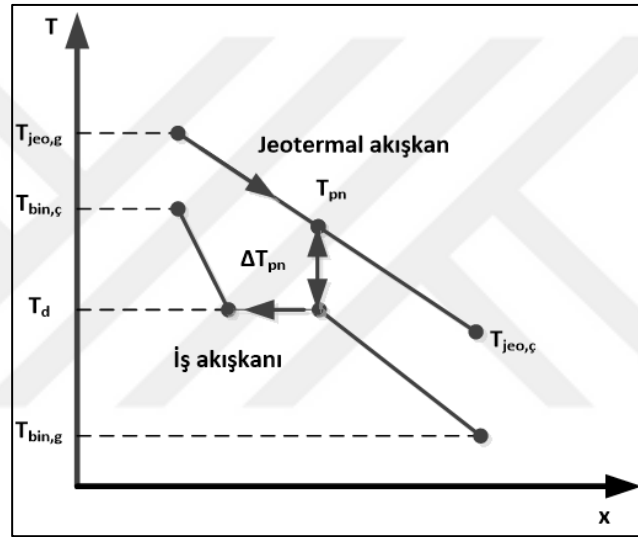
KGS’de bulunan kızdırıcı binary çevriminde kullanılan iş akışkanını buharlaştırmak için kullanılmaktadır. ΔT_{pn} sıcaklık farkı ve kızdırıcı için enerji denge denklemleri aşağıda verilmiştir [130].

$$\dot{m}_{jeo}(h_{jeo,g} - h_{pn}) = \dot{m}_{wf}(h_{bin,\zeta} + h_{bin,f}) \quad (3.105)$$

$$\dot{m}_{jeo}(h_{pn} - h_{jeo,\varsigma}) = \dot{m}_{wf}(h_{bin,f} - h_{bin,g}) \quad (3.106)$$

$$T_{pn} = T_d + \Delta T_{pn} \quad (3.107)$$

Burada h_{pn} ve $h_{bin,f}$ sırasıyla jeotermal akışkanın pinch noktası ve iş akışkanının doyma sıcaklığındaki doymuş sıvı entalpi değerleridir. $h_{bin,g}$ ve $h_{bin,\varsigma}$ sırasıyla ORC’de bulunan iş akışkanının kızdırıcıya giriş ve çıkış entalpi değerini ifade etmektedir. $h_{jeo,g}$ ve $h_{jeo,\varsigma}$ sırasıyla kızdırıcıya giren ve çıkan jeotermal akışkanın entalpi değerleridir.



Şekil 3.10: Kızdırıcı için jeotermal ve ORC iş akışkanı arasındaki sıcaklık ilişkisi.

KGS’de kullanılan kızdırıcı için jeotermal akışkan ile ORC iş akışkanı arasındaki sıcaklık ilişkisi Şekil 3.10’da verilmiştir. Söz konusu bu grafik jeotermal akışkan ile ORC iş akışkanı arasında enerji analizini gerçekleştirmek için gerekli olan sıcaklık değerlerinin değişimlerini görmek ve yorumlamak için kullanılmaktadır. Şekil 3.10’da gösterildiği gibi kızdırıcıya giren jeotermal akışkan ORC iş akışkanının sıcaklığını doyma sıcaklığına kadar arttırmaktadır. Daha sonra ORC iş akışkanı sabit sıcaklıkta entalpi değişimine uğramakta ve bu noktadan sonra sıcaklığı artarak kızdırıcıdan kızgın buhar olarak çıkmaktadır. Bu grafikte jeotermal akışkan ile ORC iş akışkanının doyma sıcaklığı arasındaki fark pinch noktası sıcaklık farkını (ΔT_{pn}) ifade etmektedir. Bu bağlamda, bu tez çalışmasında jeotermal akışkan ile ORC iş akışkanı arasında pinch noktası analizi için gerekli olan hesaplamalar yapılmıştır.

KGS ekipmanlarının kütle, enerji ve ekserji denge denklemleri Tablo 3.14'te ve Tablo 3.15'te verilmiştir.

Tablo 3.14: KGS ekipmanlarının kütle ve enerji denge denklemleri.

Ekipmanlar	Kütle Dengesi	Enerji Dengesi
GV-jeo	$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_{jeo}$	$\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_4 h_4$
SEP	$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 + \dot{m}_8$	$\dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_8 h_8$
KIZ	$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 = \dot{m}_{jeo}$ $\dot{m}_{18} = \dot{m}_{19} = \dot{m}_{wf}$	$\dot{m}_8(h_8 - h_9) = \dot{m}_{18}(h_{19} - h_{18})$
OT	$\dot{m}_{19} = \dot{m}_{15}$	$\dot{W}_{OT} = \dot{m}_{19}(h_{19} - h_{15})$
KON-1	$\dot{m}_{16} = \dot{m}_{17}$ $\dot{m}_{20} = \dot{m}_{21}$	$\dot{m}_{16}(h_{16} - h_{17}) = \dot{m}_{20}(h_{21} - h_{20})$
BT	$\dot{m}_5 = \dot{m}_6$	$\dot{W}_{BT} = \dot{m}_5(h_5 - h_6)$
KON-2	$\dot{m}_6 = \dot{m}_7$ $\dot{m}_{22} = \dot{m}_{23}$	$\dot{m}_6(h_6 - h_7) = \dot{m}_{22}(h_{23} - h_{22})$
SP-O	$\dot{m}_{17} = \dot{m}_{18}$	$\dot{W}_{SP-O} = \dot{m}_{17}(h_{18} - h_{17})$

Tablo 3.15: KGS ekipmanlarının ekserji denge denklemleri.

Ekipmanlar	Ekserji Girişi, $\dot{E}x_g$	Ekserji Çıkışı, $\dot{E}x_\zeta$	Ekserji Kaybı, $\dot{E}x_{kay}$
GV-jeo	$\dot{E}x_3$	$\dot{E}x_4$	$\dot{E}x_{g,GV-jeo} - \dot{E}x_{\zeta,GV-jeo}$
SEP	$\dot{E}x_4$	$\dot{E}x_5 + \dot{E}x_8$	$\dot{E}x_{g,SEP} - \dot{E}x_{\zeta,SEP}$
KIZ	$\dot{E}x_8 - \dot{E}x_9$	$\dot{E}x_{19} - \dot{E}x_{18}$	$\dot{E}x_{g,KIZ} - \dot{E}x_{\zeta,KIZ}$
OT	$\dot{E}x_{19} - \dot{E}x_{15}$	$\dot{W}_{OT}$	$\dot{E}x_{g,OT} - \dot{E}x_{\zeta,OT}$
BT	$\dot{E}x_5 - \dot{E}x_6$	$\dot{W}_{BT}$	$\dot{E}x_{g,BT} - \dot{E}x_{\zeta,BT}$
KON-1	$\dot{E}x_{16} - \dot{E}x_{17}$	$\dot{E}x_{21} - \dot{E}x_{20}$	$\dot{E}x_{g,KON-1} - \dot{E}x_{\zeta,KON-1}$
KON-2	$\dot{E}x_6 - \dot{E}x_7$	$\dot{E}x_{23} - \dot{E}x_{22}$	$\dot{E}x_{g,KON-2} - \dot{E}x_{\zeta,KON-2}$
SP-O	$\dot{W}_{SP-O}$	$\dot{E}x_{18} - \dot{E}x_{17}$	$\dot{E}x_{g,SP-O} - \dot{E}x_{\zeta,SP-O}$

KGS'de bulunan ekipmanların yatırım maliyeti, maliyet denge ve yardımcı denklemleri Tablo 3.16'da ve Tablo 3.17'de verilmiştir.

Tablo 3.16: KGS ekipmanlarının yatırım maliyeti denklemleri.

Ekipmanlar	Yatırım Maliyeti Fonksiyonu
GV-jeo [93]	$Z_{GV-jeo} = 114\dot{m}_3$
SEP-j [131]	$Z_{SEP} = 280,3(\dot{m}_4)^{0,67}$
KIZ [96]	$Z_{KIZ-1} = 309,14(A_{KIZ})^{0,88}$
OT [96]	$Z_{OT} = 4750(\dot{W}_{OT})^{0,65}$
BT [97]	$Z_{BT} = 6000(\dot{W}_{BT})^{0,7}$
KON-1 [96]	$Z_{KON-1} = 516,62(A_{KON-1})^{0,6}$
KON-2 [96]	$Z_{KON-2} = 516,62(A_{KON-2})^{0,6}$
SP-O [96]	$Z_{SP-O} = 200(\dot{W}_{SP-O})^{0,65}$

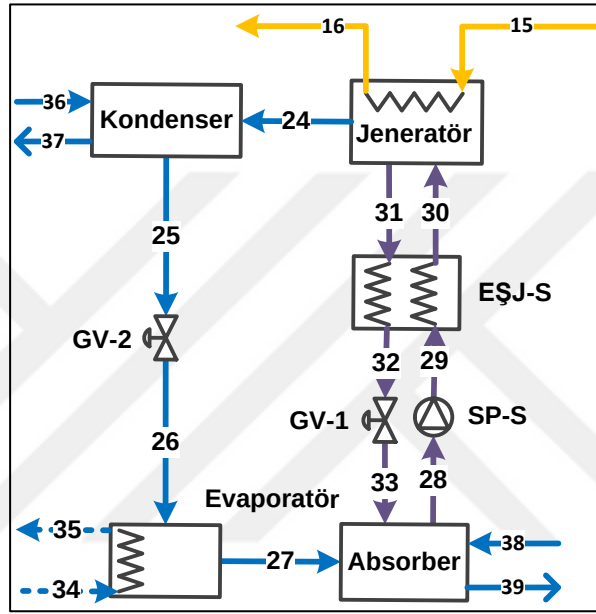
Tablo 3.17: KGS ekipmanlarının maliyet denge ve yardımcı denklemleri.

Ekipmanlar	Maliyet denge denklemi	Yardımcı denklem
GV-jeo	$\dot{C}_3 + Z_{GV-jeo} = \dot{C}_4$	-
SEP	$\dot{C}_4 + \dot{Z}_{SEP} = \dot{C}_5 + \dot{C}_8$	$c_5 = c_8$ veya $\frac{\dot{C}_5}{\dot{E}x_5} = \frac{\dot{C}_8}{\dot{E}x_8}$
KIZ	$\dot{C}_8 + \dot{C}_{18} + \dot{Z}_{KIZ} = \dot{C}_9 + \dot{C}_{19}$	$c_8 = c_9$ veya $\frac{\dot{C}_8}{\dot{E}x_8} = \frac{\dot{C}_9}{\dot{E}x_9}$
OT	$\dot{C}_{19} + \dot{Z}_{OT} = \dot{C}_{15} + \dot{C}_{\dot{W}_{OT}}$	$c_{19} = c_{15}$ veya $\frac{\dot{C}_{19}}{\dot{E}x_{19}} = \frac{\dot{C}_{15}}{\dot{E}x_{15}}$
BT	$\dot{C}_5 + \dot{Z}_{BT} = \dot{C}_6 + \dot{C}_{\dot{W}_{BT}}$	$c_5 = c_6$ veya $\frac{\dot{C}_5}{\dot{E}x_5} = \frac{\dot{C}_6}{\dot{E}x_6}$
KON-1	$\dot{C}_{16} + \dot{C}_{20} + \dot{Z}_{KON-1} = \dot{C}_{17} + \dot{C}_{21}$	$c_{16} = c_{17}$ veya $\frac{\dot{C}_{16}}{\dot{E}x_{16}} = \frac{\dot{C}_{17}}{\dot{E}x_{17}}$ $c_{20} = 0$
KON-2	$\dot{C}_6 + \dot{C}_{22} + \dot{Z}_{KON-2} = \dot{C}_7 + \dot{C}_{23}$	$c_6 = c_7$ veya $\frac{\dot{C}_6}{\dot{E}x_6} = \frac{\dot{C}_7}{\dot{E}x_7}$ $c_{22} = 0$
SP-O	$\dot{C}_{17} + \dot{Z}_{SP-O} + \dot{C}_{\dot{W}_{SP-O}} = \dot{C}_{18}$	$c_{\dot{W}_{SP-O}} = c_{\dot{W}_{OT}}$

3.3.5.5.5. Absorbsiyonlu Soğutma Sistemi

Absorbsiyonlu soğutma sistemleri bilinen en eski soğutma prensiplerinden biri olan ve ısıyla çalışan bir soğutma cihazıdır [36]. Çevrimde birincil akışkan olarak bilinen bir soğutucu ve ikincil akışkan olarak bilinen bir soğurucu kullanılmaktadır. Soğutucu akışkan, ısı aktarımı amacıyla soğurucu tarafından soğrulmaktadır.

Çevrimde birincil akışkan evaporatörde buharlaşmakta ve bu da soğutma etkisini ortaya çıkarmaktadır. ASS'ler genel olarak ısı sağlayan bir jeneratör, ısı transfer eden bir soğurucu ve bir sıvı eriyik pompasından oluşmaktadır [132]. Bu tür sistemlerde ısı kaynağı olarak güneş, jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının yanı sıra atık ısı da kullanılmaktadır [133]. Bu tez çalışmasında, ASS'de birincil akışkan olarak su ve ikincil akışkan olarak LiBr soğurucu kullanılmaktadır. Şekil 3.11'de tek kademeli H₂O-LiBr eriyiği kullanan bir ASS'nin proses akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.11: Tek kademeli absorpsiyonlu soğutma sisteminin proses akış diyagramı.

ASS'nin çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilir; yüksek konsantrasyonlu soğutucu akışkan jeneratör ünitesine gönderilerek burada buharlaştırılır. Buharlaşan soğutucu akışkan kondenser ünitesinde yoğuşturularak doymuş sıvı haline gelir. Daha sonra kondenserden çıkan soğutucu akışkanın basıncı GV-2'de düşürülerek evaporatör ünitesine gönderilir. Burada sisteme sağlanan sudan ısı çekerek buharlaşır ve buda soğutma etkisini ortaya çıkartır. Evaporatör ünitesinden çıkan soğutucu akışkan absorber ünitesine giderek burada jeneratörden gelen düşük konsantrasyonlu eriyik ile birleşerek yüksek konsantrasyonlu eriyiği oluşturur. Absorberde oluşan yüksek konsantrasyonlu eriyik, pompa vasıtasıyla ve eşanjörden geçirilerek tekrardan jeneratöre gönderilir. ASS'nin ekipman listesi Tablo 3.18'de verilmiştir.

Tablo 3.18: ASS ekipman listesi.

Ekipman adı	Kısaltma	Miktar	Birim
Kondenser	KON	1	Adet
Jeneratör	JEN	1	Adet
Absorber	ABS	1	Adet
Evaporatör	EVA	1	Adet
Isı eşanjörü	EŞJ-S	1	Adet
Genleşme vanası	GV-1	1	Adet
	GV-2	1	Adet
Eriyik pompası	SP-S	1	Adet

- Jeneratör

Jeneratör için kütle, enerji ve ekserji denge denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{16} = \dot{m}_{wf} \quad (3.108)$$

$$\dot{m}_{30} = \dot{m}_{31} + \dot{m}_{24} \quad (3.109)$$

$$\dot{Q}_{JEN} + \dot{m}_{30}h_{30} = \dot{m}_{31}h_{31} + \dot{m}_{24}h_{24} \quad (3.110)$$

$$\dot{Q}_{JEN} = \dot{m}_{wf}(h_{15} - h_{16}) \quad (3.111)$$

$$\dot{E}x_{kay,JEN} = \dot{E}x_{15} + \dot{E}x_{30} - \dot{E}x_{31} - \dot{E}x_{24} - \dot{E}x_{16} \quad (3.112)$$

Burada $\dot{Q}_{JEN}$ KGS'den jeneratöre sağlanan ısıyı ifade etmektedir. ASS ekipmanlarının kütle, enerji ve ekserji denge denklemleri Tablo 3.19'da ve Tablo 3.20'de ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Ayrıca ekipmanların yatırım maliyeti, maliyet denge ve yardımcı denklemleri Tablo 3.21'de ve Tablo 3.22'de verilmiştir.

Tablo 3.19: ASS ekipmanlarının kütle ve enerji denge denklemleri.

Ekipmanlar	Kütle Dengesi	Enerji Dengesi
JEN	$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{16} = \dot{m}_{wf}$ $\dot{m}_{30} = \dot{m}_{31} + \dot{m}_{24}$	$\dot{Q}_{JEN} + \dot{m}_{30}h_{30} = \dot{m}_{31}h_{31} + \dot{m}_{24}h_{24}$
EŞJ-S	$\dot{m}_{29} = \dot{m}_{30}, \dot{m}_{31} = \dot{m}_{32}$	$\dot{m}_{31}(h_{31} - h_{32}) = \dot{m}_{29}(h_{30} - h_{29})$
KON	$\dot{m}_{24} = \dot{m}_{25}, \dot{m}_{36} = \dot{m}_{37}$	$\dot{m}_{24}h_{24} = \dot{Q}_{KON} + \dot{m}_{25}h_{25}$
EVA	$\dot{m}_{26} = \dot{m}_{27}, \dot{m}_{34} = \dot{m}_{35}$	$\dot{m}_{26}h_{26} + \dot{Q}_{EVA} = \dot{m}_{27}h_{27}$
ABS	$\dot{m}_{28} = \dot{m}_{27} + \dot{m}_{33}, \dot{m}_{38} = \dot{m}_{39}$	$\dot{m}_{28}h_{28} + \dot{Q}_{ABS} = \dot{m}_{27}h_{27} + \dot{m}_{33}h_{33}$
SP-S	$\dot{m}_{28} = \dot{m}_{29}$	$\dot{W}_{SP-S} = \dot{m}_{28}(h_{29} - h_{28})$
GV-1	$\dot{m}_{32} = \dot{m}_{33}$	$\dot{m}_{32}h_{32} = \dot{m}_{33}h_{33}$
GV-2	$\dot{m}_{25} = \dot{m}_{26}$	$\dot{m}_{25}h_{25} = \dot{m}_{26}h_{26}$

Tablo 3.20: ASS ekipmanlarının ekserji denge denklemleri.

Ekipmanlar	Ekserji Girişi, $\dot{E}x_g$	Ekserji Çıkışı, $\dot{E}x_c$	Ekserji Kaybı, $\dot{E}x_{kay}$
JEN	$\dot{E}x_{15} - \dot{E}x_{16}$	$\dot{E}x_{24} + \dot{E}x_{31} - \dot{E}x_{30}$	$\dot{E}x_{g,JEN} - \dot{E}x_{c,JEN}$
KON	$\dot{E}x_{24} - \dot{E}x_{25}$	$\dot{E}x_{37} - \dot{E}x_{36}$	$\dot{E}x_{g,KON} - \dot{E}x_{c,KON}$
EVA	$\dot{E}x_{26} - \dot{E}x_{27}$	$\dot{E}x_{35} - \dot{E}x_{34}$	$\dot{E}x_{g,EVA} - \dot{E}x_{c,EVA}$
ABS	$\dot{E}x_{33} + \dot{E}x_{27} - \dot{E}x_{28}$	$\dot{E}x_{39} - \dot{E}x_{38}$	$\dot{E}x_{g,ABS} - \dot{E}x_{c,ABS}$
EŞJ-S	$\dot{E}x_{31} - \dot{E}x_{32}$	$\dot{E}x_{30} - \dot{E}x_{29}$	$\dot{E}x_{g,EŞJ-S} - \dot{E}x_{c,EŞJ-S}$
SP-S	$\dot{W}_{SP-S}$	$\dot{E}x_{29} - \dot{E}x_{28}$	$\dot{E}x_{g,SP-S} - \dot{E}x_{c,SP-S}$
GV-1	$\dot{E}x_{32}$	$\dot{E}x_{33}$	$\dot{E}x_{g,GV-1} - \dot{E}x_{c,GV-1}$
GV-2	$\dot{E}x_{25}$	$\dot{E}x_{26}$	$\dot{E}x_{g,GV-2} - \dot{E}x_{c,GV-2}$

Tablo 3.21: ASS ekipmanlarının yatırımın maliyeti denklemleri.

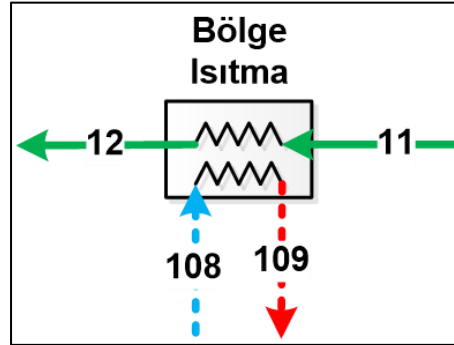
Ekipmanlar	Yatırım Maliyeti Fonksiyonu (\$)
JEN [134]	$Z_{JEN} = 17500 \left(\frac{A_{JEN}}{100} \right)^{0,6}$
KON [134]	$Z_{KON} = 8000 \left(\frac{A_{KON}}{100} \right)^{0,6}$
EVA [134]	$Z_{EVA} = 16000 \left(\frac{A_{EVA}}{100} \right)^{0,6}$
ABS [134]	$Z_{ABS} = 16000 \left(\frac{A_{ABS}}{100} \right)^{0,6}$
EŞJ-S [134]	$Z_{EŞJ-S} = 12000 \left(\frac{A_{EŞJ-S}}{100} \right)^{0,6}$
SP-S [134]	$Z_{SP-S} = 2100 \left(\frac{\dot{W}_{SP-S}}{10} \right)^{0,26} \left(\frac{1 - \eta_{SP-S}}{\eta_{SP-S}} \right)^{0,5}$
GV-1 [93]	$Z_{GV-1} = 114\dot{m}_{30}$
GV-2 [93]	$Z_{GV-2} = 114\dot{m}_{23}$

Tablo 3.22: ASS ekipmanlarının maliyet denge ve yardımcı denklemleri.

Ekipmanlar	Maliyet denge denklemi	Yardımcı denklem
JEN	$\dot{C}_{15} + \dot{C}_{30} + \dot{Z}_{JEN} = \dot{C}_{24} + \dot{C}_{31} + \dot{C}_{16}$	$\frac{\dot{C}_{30} - \dot{C}_{31}}{\dot{E}x_{30} - \dot{E}x_{31}} = \frac{\dot{C}_{24} - \dot{C}_{30}}{\dot{E}x_{24} - \dot{E}x_{30}}$
KON	$\dot{C}_{24} + \dot{C}_{36} + \dot{Z}_{KON} = \dot{C}_{25} + \dot{C}_{37}$	$c_{24} = c_{25}$ veya $\frac{\dot{C}_{24}}{\dot{E}x_{24}} = \frac{\dot{C}_{25}}{\dot{E}x_{25}}$ $c_{36} = 0$
EVA	$\dot{C}_{26} + \dot{C}_{34} + \dot{Z}_{EVA} = \dot{C}_{27} + \dot{C}_{35}$	$c_{26} = c_{27}$ veya $\frac{\dot{C}_{26}}{\dot{E}x_{26}} = \frac{\dot{C}_{27}}{\dot{E}x_{27}}$ $c_{34} = 0$
ABS	$\dot{C}_{27} + \dot{C}_{33} + \dot{Z}_{ABS} + \dot{C}_{38} = \dot{C}_{28} + \dot{C}_{39}$	$\frac{\dot{C}_{33} + \dot{C}_{27}}{\dot{E}x_{33} + \dot{E}x_{27}} = \frac{\dot{C}_{28}}{\dot{E}x_{28}}, c_{38} = 0$
EŞJ-S	$\dot{C}_{31} + \dot{C}_{29} + \dot{Z}_{EŞJ-S} = \dot{C}_{30} + \dot{C}_{32}$	$c_{31} = c_{32}$ veya $\frac{\dot{C}_{31}}{\dot{E}x_{31}} = \frac{\dot{C}_{32}}{\dot{E}x_{32}}$
SP-S	$\dot{C}_{28} + \dot{C}_{WSP-S} + \dot{Z}_{SP-S} = \dot{C}_{29}$	$c_{WSP-S} = c_{WOT}$
GV-1	$\dot{C}_{32} + \dot{Z}_{GV-1} = \dot{C}_{33}$	-
GV-2	$\dot{C}_{25} + \dot{Z}_{GV-2} = \dot{C}_{26}$	-

3.3.5.5.6. Bölge Isıtma Sistemi

BIS'ta konutların ısıtma ihtiyacını karşılamak için KGS'den çıkan jeotermal akışkanın reenjektasyon kuyusuna gönderilmeden önce sıcaklığının belirli bir kısmı kullanılmaktadır. Şekil 3.12'de BIS'in proses akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.12: Bölge ısıtma sisteminin proses akış diyagramı.

BIS için kütle, enerji ve ekserji denge denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12} = \dot{m}_{jeo} \quad (3.113)$$

$$\dot{m}_{108} = \dot{m}_{109} = \dot{m}_{BIS} \quad (3.114)$$

$$\dot{m}_{jeo}(h_{11} - h_{12}) = \dot{m}_{BIS}(h_{109} - h_{108}) \quad (3.115)$$

$$\dot{E}x_{kay,BIS} = \dot{E}x_{11} + \dot{E}x_{108} - \dot{E}x_{12} - \dot{E}x_{109} \quad (3.116)$$

Burada $\dot{m}_{BIS}$ üretilen sıcak suyun kütle sel debisidir. BIS'tan elde edilen ısı aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir:

$$\dot{Q}_{BIS} = \dot{m}_{BIS}(h_{109} - h_{108}) \quad (3.117)$$

3.3.5.5.7. Sıcak Su Üretim Sistemi

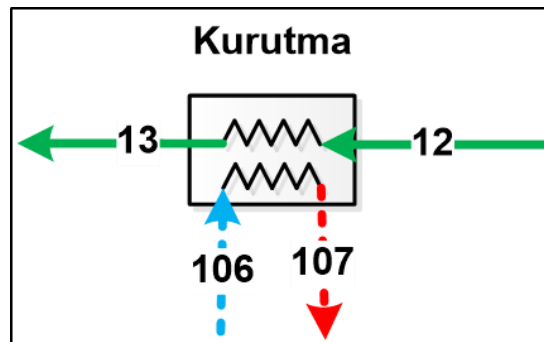
HÇÜS'ün atık ısı potansiyelinin değerlendirilmesi amacıyla sistemde bulunan KON-1 ve KON-2 ekipmanlarından sıcak su üretimi sağlanmaktadır. HÇÜS'te üretilen toplam sıcak su üretimi aşağıdaki denklemle belirlenmektedir.

$$\dot{Q}_{SÜS} = \dot{Q}_{KON-1} + \dot{Q}_{KON-2} \quad (3.118)$$

Burada $\dot{Q}_{KON-1}$ ve $\dot{Q}_{KON-2}$ sırasıyla KON-1 ve KON-2 ekipmanlarından elde edilen ısıdır.

3.3.5.5.8. Kurutma Sistemi

KUS meyve ve sebze gibi ürünlerin kurutulması için gerekli olan sıcak havanın üretilmesini sağlamaktadır. Şekil 3.13'te KUS'un proses akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.13: Kurutma sisteminin proses akış diyagramı.

KUS için kütle, enerji ve ekserji denge denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13} = \dot{m}_{jeo} \quad (3.119)$$

$$\dot{m}_{106} = \dot{m}_{107} = \dot{m}_{KUS} \quad (3.120)$$

$$\dot{m}_{jeo}(h_{12} - h_{13}) = \dot{m}_{KUS}(h_{107} - h_{106}) \quad (3.121)$$

$$\dot{E}x_{kay,KUS} = \dot{E}x_{12} + \dot{E}x_{106} - \dot{E}x_{13} - \dot{E}x_{107} \quad (3.122)$$

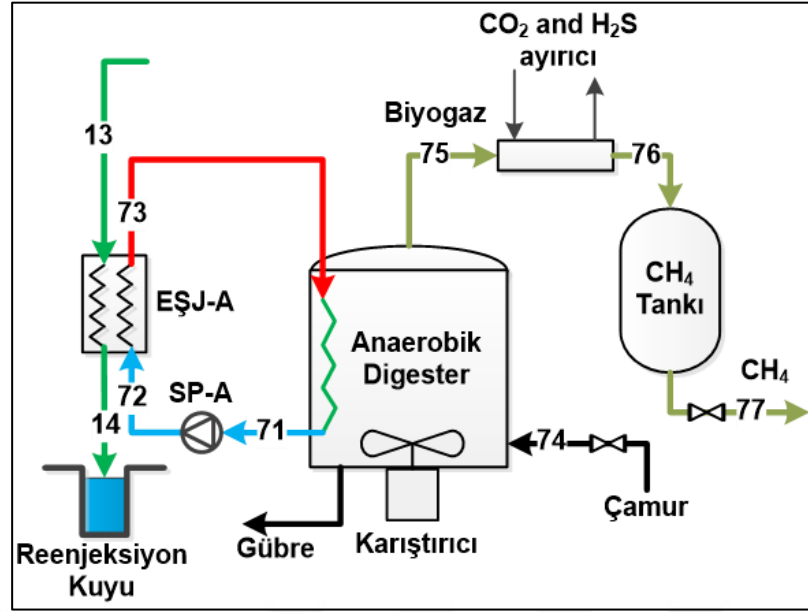
Burada $\dot{m}_{KUS}$ kurutma havasının kütleli debisidir. KUS'tan elde edilen ısı aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir:

$$\dot{Q}_{KUS} = \dot{m}_{KUS}(h_{107} - h_{106}) \quad (3.123)$$

3.3.5.5.9. Biyogaz Üretim Sistemi

Sürdürülebilir ve çevresel bir enerji kaynağı olan biyogaz, havasız bir ortamda çeşitli mikroorganizmaların içinde bulunmasını gerektiren karmaşık bir biyolojik işlemin sonucunda açığa çıkmaktadır. Diğer bir deyişle, biyogaz doğal organik madde döngüsünün hayati bir sürecini oluşturmakla birlikte kendiliğinden anaerobik sindirim veya organik maddenin fermantasyonu ile üretilmektedir [135]. Biyogaz genellikle kimyasal bileşimine göre karakterize edilmektedir. Biyogaz içeriğinde metan ve karbondioksit gazları, az miktarda hidrojen, hidrojen sülfür ve nem bulunabilir [136].

Günümüzde ticari olarak kullanılan AD sistemleri genellikle çalışma sıcaklıklarına ve içerdikleri bakteri türüne bağlı olarak termofilik ve mezofilik olarak sınıflandırılmaktadırlar. Genel olarak termofilik ve mezofilik fermantasyonun çalışma sıcaklıkları sırasıyla 55°C ve 35°C'dir [54]. Bu tez çalışmasında AD termofilik kabul edilmiştir. Bu çalışma parametreleri AD için gerekli olan işletme sıcaklığının muhafaza edilmesi ve biyogaz üretiminde kullanılan hammaddeyi işletme sıcaklığına getirmek için gerekli olan ısı talebinin belirlenmesinde kullanılmıştır. BÜS'ün proses akış diyagramı Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.14: Biyogaz üretim sisteminin proses akış diyagramı.

BÜS sisteminin çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilir; belediye katı atıkları belirli oranla su ile karıştırılarak çamur halinde AD'ye beslenir. Burada termofilik fermantasyon çalışma şartlarında biyogaz üretimi gerçekleştirilir. Elde edilen biyogaz gaz ayırıştırıcı kolan gönderilerek içindeki CO₂ ve H₂S bileşenlerinden ayırıştırılır ve metan gazı elde edilir. Elde edilen metan gazı elektrik üretimi için KOYP'ye veya evsel kullanıma gönderilmek üzere depolanmaktadır. Burada AD'yi çalışma şartlarına uygun hale getirmek ve işletme şartlarının devamlılığını sağlamak için gerekli olan ısı ihtiyacı jeotermal kaynaktan sağlanmaktadır. BÜS'ün ekipman listesi Tablo 3.23'te verilmiştir.

Tablo 3.23: BÜS ekipman listesi.

Ekipman adı	Kısaltma	Miktar	Birim
Anaerobik digester	AD	1	Adet
Isı eşanjörü	EŞJ-A	1	Adet
Sirkülasyon pompası	SP-A	1	Adet
Karıştırıcı	kar	1	Adet
CH ₄ Tankı	-	1	Adet
Gaz ayırıştırıcı kolon	-	1	Adet
Kesme vanası	-	2	Adet

- Anaerobik digester

Elde edilen biyogazın kütleli debisi aşağıdaki eşitlikle hesaplanır [137]:

$$\dot{m}_{bg} = \dot{m}_f \cdot KM \cdot OM \cdot UOM \cdot \eta_{r,AD} \quad (3.124)$$

Burada η_r reaksiyon verimi, $\dot{m}_f$ sisteme beslenen hammaddenin kütleli debisidir. KM , OM and UOM sırasıyla biyokütle içerisindeki kuru madde, organik madde ve uçucu organik maddelerin yüzdesel olarak miktarını ifade etmektedir. Bu tez çalışmasında, biyogaz üretimi için BÜS'e beslenen biyokütle belediye katı atıkları olarak kabul edilmiştir ve yaklaşık olarak içerik analizi Tablo 3.24'te verilmiştir. AD sisteminin reaksiyon verimi aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır [137].

$$\eta_{r,AD} = 100 - 160/t_b \quad (3.125)$$

Burada t_b termofilik hidrolik-bekleme süresidir.

Tablo 3.24: Belediye katı atıklarının yaklaşık içerik analizi.

İçerik	Değer
Kuru madde (%)	30
Su (%)	70
Organik madde (%)	80
Uçucu organik madde (%)	80

AD'den elde edilen biyogazın içerdiği metan gazının kütleli debisi aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir:

$$\dot{m}_{CH_4} = \dot{m}_{75} x_{CH_4,AD} \quad (3.126)$$

Burada $x_{CH_4,AD}$ elde edilen biyogazın içerdiği metan gazının kütle oranıdır. Tablo 3.25'te AD sisteminden elde edilen tipik bir biyogazın içeriği verilmiştir [137]:

Tablo 3.25: Tipik biyogaz içeriği.

Gaz türü	CH ₄	CO ₂	H ₂ S	N ₂	H ₂ O
Hacimsel oran (%)	59	40	1x10 ⁻⁶	5x10 ⁻¹	5x10 ⁻¹

AD'den çıkan sindirilmiş ürünün kütleli debisi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\dot{m}_{gub} = \dot{m}_{74} - \dot{m}_{75} \quad (3.127)$$

Belediye katı atıklarının alt ısı değeri hesaplanmasında BYS başlığı altında verilen denklemler kullanılmıştır. Diğer taraftan belediye katı atıkları için elemental analiz değerleri literatürden alınmıştır ve Tablo 3.26'da verilmiştir [84].

Tablo 3.26: Belediye katı atıklarının elemental analizi.

Elemental bileşim (%)	C	H	O	N	S	Kül
Belediye katı atıkları	47,6	6	32,9	1,2	0,3	12

AD'yi çalışma şartlarına uygun hale getirmek ve çalışma şartlarının devamlılığını sağlamak için gerekli ısı aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir [138]:

$$\dot{Q}_{AD} = \dot{m}_f c_{p,f} (T_{AD} - T_0) \quad (3.128)$$

Burada $\dot{m}_f$ ve $c_{p,f}$ AD'ye beslenen hammaddenin kütleli debisi ve özgül ısıdır. T_{AD} AD'nin çalışma sıcaklığıdır. BÜS'e beslenen hammaddenin en az %70'i su içermektedir ve yaklaşık $c_{p,f}$ suyun özgül ısı değeri olarak alınmıştır [138]. AD'nin hacmi aşağıdaki eşitlik ile belirlenir [137].

$$V_{AD} = \dot{m}_f t_b / \rho_f \quad (3.129)$$

AD'nin çalışma sıcaklığında sabit tutulması için gereken ısı aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir [138]:

$$\dot{Q}_{kay,AD} = A_{AD} U_{AD} (T_{AD} - T_0) \quad (3.130)$$

Burada $\dot{Q}_{kay,AD}$ AD'den çevreye olan ısı kaybı, A_{AD} AD'nin yüzey alanı ve U_{AD} ısı iletkenliktir. AD için gerekli olan toplam ısı aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{Q}_{top,AD} = \dot{Q}_{AD} + \dot{Q}_{kay,AD} \quad (3.131)$$

AD'nin kütle, enerji ve ekserji denge denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{m}_{74} = \dot{m}_{75} + \dot{m}_{güb} \quad (3.132)$$

$$\dot{m}_{73} = \dot{m}_{71} \quad (3.133)$$

$$\dot{Q}_{top,AD} + \dot{m}_{74}h_{74} + \dot{W}_{kar,AD} = \dot{m}_{75}h_{75} \quad (3.134)$$

$$\dot{E}x_{kay,AD} = \dot{E}x_{74} + \dot{E}x_{73} + \dot{E}x^{\dot{W}_{kar,AD}} - \dot{E}x_{75} - \dot{E}x_{71} \quad (3.135)$$

- Karıştırıcı

Karıştırıcı AD içindeki hammaddenin karıştırılması için kullanılmaktadır. Karıştırıcının elektrik gücü aşağıdaki denklem ile belirlenmektedir [137].

$$\dot{W}_{kar,AD} = \frac{V_{AD}HP}{\eta_{kar,AD}} \quad (3.136)$$

Burada HP, AD hacmi başına elektrik gücüdür ve bu çalışmada $0,01 \text{ kW/m}^3$ olarak alınmıştır [137]. BÜS'te bulunan ekipmanların kütle, enerji ve ekserji denge denklemleri Tablo 3.27'de ve Tablo 3.28'de ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

Tablo 3.27: BÜS ekipmanlarının kütle ve enerji denge denklemleri.

Ekipmanlar	Kütle Dengesi	Enerji Dengesi
AD	$\dot{m}_{74} = \dot{m}_{güb} + \dot{m}_{75}$ $\dot{m}_{73} = \dot{m}_{71}$	$\dot{Q}_{top,AD} + \dot{m}_{74}h_{74} + \dot{W}_{kar,AD} = \dot{m}_{75}h_{75}$
EŞJ-A	$\dot{m}_{13} = \dot{m}_{14} = \dot{m}_{jeo}$ $\dot{m}_{72} = \dot{m}_{73}$	$\dot{m}_{jeo}(h_{13} - h_{14}) = \dot{m}_{72}(h_{73} - h_{72})$
SP-A	$\dot{m}_{71} = \dot{m}_{72}$	$\dot{W}_{SP-A} = \dot{m}_{71}(h_{72} - h_{71})$

Tablo 3.28: BÜS ekipmanlarının ekserji denge denklemleri.

Ekipmanlar	Ekserji Giriş, $\dot{E}x_g$	Ekserji Çıkış, $\dot{E}x_{\dot{c}}$	Ekserji Kaybı, $\dot{E}x_{kay}$
AD	$\dot{E}x_{74} + \dot{W}_{kar,AD} + \dot{E}x_{73} - \dot{E}x_{71}$	$\dot{E}x_{75}$	$\dot{E}x_{g,AD} - \dot{E}x_{\dot{c},AD}$
SP-A	$\dot{W}_{SP-A}$	$\dot{E}x_{72} - \dot{E}x_{71}$	$\dot{E}x_{g,SP-A} - \dot{E}x_{\dot{c},SP-A}$
EŞJ-A	$\dot{E}x_{13} - \dot{E}x_{14}$	$\dot{E}x_{73} - \dot{E}x_{72}$	$\dot{E}x_{g,EŞJ-A} - \dot{E}x_{\dot{c},EŞJ-A}$

BÜS ekipmanları için yatırım maliyeti, maliyet denge ve yardımcı denklemleri Tablo 3.29’da ve Tablo 3.30’da verilmiştir.

Tablo 3.29: BÜS ekipmanlarının yatırım maliyeti denklemleri.

Ekipmanlar	Yatırım Maliyeti Fonksiyonu
AD [139]	$Z_{AD} = 840221,5 \left(\frac{V_{AD}}{3000} \right)^{0,8}$
SP-A [100]	$Z_{SP-A} = 2100 \left(\frac{\dot{W}_{SP-A}}{10} \right)^{0,26} \left(\frac{1 - \eta_{SP-A}}{\eta_{SP-A}} \right)^{0,5}$
EŞJ-A [96]	$Z_{EŞJ-A} = 309,14 (A_{EŞJ-A})^{0,88}$

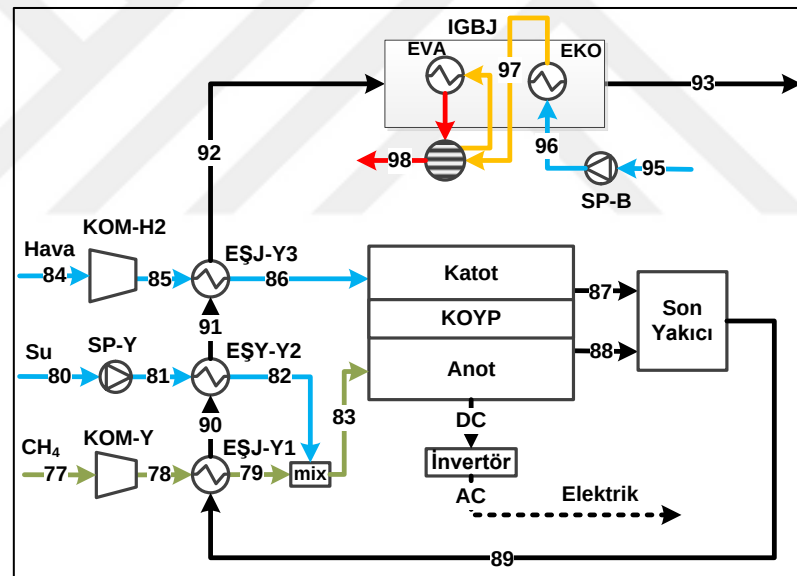
Tablo 3.30: BÜS ekipmanlarının maliyet denge ve yardımcı denklemleri.

Ekipmanlar	Maliyet denge denklemi	Yardımcı denklem
AD	$\dot{C}_{74} + \dot{C}_{73} + \dot{Z}_{AD} = \dot{C}_{75} + \dot{C}_{71}$	$c_{73} = c_{71}, \frac{\dot{C}_{73}}{\dot{E}x_{73}} = \frac{\dot{C}_{71}}{\dot{E}x_{71}}$ $c_{74} = 0$ [139]
SP-A	$\dot{C}_{71} + \dot{C}_{\dot{W}_{SP-A}} + \dot{Z}_{SP-A} = \dot{C}_{72}$	$c_{\dot{W}_{SP-A}} = c_{\dot{W}_{OT}}$
EŞJ-A	$\dot{C}_{13} + \dot{C}_{72} + \dot{Z}_{EŞJ-A} = \dot{C}_{14} + \dot{C}_{73}$	$c_{13} = c_{14}$ veya $\frac{\dot{C}_{13}}{\dot{E}x_{13}} = \frac{\dot{C}_{14}}{\dot{E}x_{14}}$

3.3.5.5.10. Katı Oksit Yakıt Pili Sistemi

Son yıllarda mevcut enerji üretimi ve dönüşüm teknolojilerinin neden olduğu çevresel sorunları azaltmak için yüksek verimliliğe ve düşük CO₂ emisyonuna sahip bir teknoloji olan KOYPS’ler geliştirilmektedir [140]. KOYP bir yakıtta depolanan kimyasal enerjinin elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla ısı ve elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayan en önde gelen enerji dönüşüm cihazları arasındadır. KOYP’ler hidrojenin yanı sıra doğal gaz, karbon monoksit, metanol ve etanol gibi yakıtların kimyasal bağlarında depolanan enerjiyi doğrudan elektrik ve ısıya dönüştüren cihazlar olarak uygulamada öne çıkmaktadır. KOYP’ler çalışma sırasında

Ticari olarak kullanılan KOYP iç ve dış reformer olmak üzere iki türden oluşmaktadır. Bu çalışmada iç reformer KOYP seçilmiştir. Çünkü iç reformer KOYP i) ayrı bir yakıt dönüştürücüsünü ortadan kaldırmak, ii) ayrı bir dış reformer maliyetini azaltmak, iii) yakıt hücresi ve reformer arasında iyi bir ısı transferi sağlamak ve iv) anot malzemesinde karbon birikmesini önlemek gibi bazı avantajlara sahiptir [146].



YPS'nin çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilir; BÜS'ten elde edilen saf su KOYP'nin çalışma şartlarına bağlı olarak sisteme beslenir. KOYP'de kimyasal reaksiyonlar vasıtasıyla elektrik üretimi gerçekleşir. Üretilen elektrik jeneratör vasıtasıyla alternatif güce dönüştürülür. Bununla birlikte, KOYP'nin katot çıkışındaki yüksek sıcaklıktaki gazlar son yakıcıya gönderilir. Son çıkan yüksek sıcaklıklı gaz karışımı, sırasıyla, EŞJ-Y1, EŞJ-Y2 ve EŞJ-Y3lerine gönderilerek KOYP'ye sağlanan yakıtın, suyun ve havanın sıcaklığının

çalışma şartlarına getirilmesini sağlar. En son olarak KOYPS'nin atık ısısının değerlendirilmesi için gaz karışımı IGBJ'ye gönderilerek buhar elde edilir. Tablo 3.31'de KOYPS'nin ekipman listesi verilmiştir.

Tablo 3.31: KOYPS ekipman listesi.

Ekipman adı	Kısaltma	Miktar	Birim
Katı oksit yakıt pili	KOYP	1	Adet
Hava kompresörü	KOM-H2	1	Adet
Isı eşanjörü	EŞJ-Y1	1	Adet
	EŞJ-Y2	1	Adet
	EŞJ-Y3	1	Adet
Sirkülasyon pompası	SP-Y	1	Adet
	SP-B	1	Adet
Son yakıcı	SY	1	Adet
İnvertör	İNV	1	Adet
Isı geri kazanım buhar jeneratörü	IGBJ	1	Adet

Anot ve katot hücrelerinde gerçekleşen toplam kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibi belirtilmektedir [54], [147].



Denklem (3.137) ve (3.138) sırasıyla buhar reformer ve su-gaz değiştirme reaksiyonlarıdır. Denklem (3.139) toplam elektrokimyasal reaksiyondur. KOYP'ye giren ve çıkan molar akış oranları aşağıdaki denklemler ile belirlenebilir:

$$\dot{n}_{86} = \dot{n}_{O_2,86} + \dot{n}_{N_2,86} \quad (3.140)$$

$$\dot{n}_{87} = \dot{n}_{O_2,87} + \dot{n}_{N_2,87} \quad (3.141)$$

$$\dot{n}_{83} = \dot{n}_{CH_4,83} + \dot{n}_{H_2O,83} \quad (3.142)$$

$$\dot{n}_{88} = \dot{n}_{H_2,88} + \dot{n}_{CO,88} + \dot{n}_{CO_2,88} + \dot{n}_{H_2O,88} \quad (3.143)$$

Kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyon denklemlerinde bulunan gazların molar akış oranları aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\dot{n}_{CH_4,83} = a_{dr} \quad (3.144)$$

$$\dot{n}_{H_2O,83} = 2,5a_{dr} \quad (3.145)$$

$$\dot{n}_{H_2,88} = 3a_{dr} + b_{dr} - c_{dr} \quad (3.146)$$

$$\dot{n}_{CO,88} = a_{dr} - b_{dr} \quad (3.147)$$

$$\dot{n}_{CO_2,88} = b_{dr} \quad (3.148)$$

$$\dot{n}_{H_2O,88} = 1,5a_{dr} - b_{dr} + c_{dr} \quad (3.149)$$

$$\dot{n}_{O_2,86} = \frac{c_{dr}/2}{U_h} \quad (3.150)$$

$$\dot{n}_{O_2,87} = \dot{n}_{O_2,86} - c_{dr}/2 \quad (3.151)$$

$$\dot{n}_{N_2,86} = \frac{79}{21} \dot{n}_{O_2,86} \quad (3.152)$$

$$\dot{n}_{N_2,86} = \dot{n}_{N_2,87} \quad (3.153)$$

Burada a_{dr} , b_{dr} ve c_{dr} kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyon denklemlerinin molar dönüşüm oranlarıdır. Bu değerler değişim reaksiyonu için denge sabiti yazılarak elde edilmektedir. Değişim reaksiyonu için denge sabiti aşağıdaki gibi yazılabilir [49]:

$$K_{ds} = \exp\left(-\frac{\Delta\bar{g}_s^0}{\bar{R}T_{KOYP,\zeta}}\right) = \frac{b_{dr}(3a_{dr} + b_{dr} - c_{dr})}{(a_{dr} - b_{dr})(1,5a_{dr} - b_{dr} + c_{dr})} \quad (3.154)$$

Burada $T_{KOYP,\zeta}$ KOYP çıkış sıcaklığıdır. Molar standart hal Gibbs serbest enerji değişimi aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır [49].

$$\Delta\bar{g}_s^0 = \bar{g}_{s,CO_2}^0 + \bar{g}_{s,H_2}^0 - \bar{g}_{s,H_2O}^0 - \bar{g}_{s,CO}^0 \quad (3.155)$$

Burada $\bar{g}_{s,CO_2}^0$, $\bar{g}_{s,H_2}^0$, $\bar{g}_{s,H_2O}^0$ ve $\bar{g}_{s,CO}^0$ sırasıyla karbondioksit, su, hidrojen ve karbon monoksitin molar standart hal Gibbs oluşum serbest enerjisidir. En genel ifadeyle aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır [54].

$$\bar{g}_s^0 = \bar{h} - T_{KOYP,\zeta} \bar{s}^0 \quad (3.156)$$

Burada $\bar{h}$ ve $\bar{s}^0$ sırasıyla gazların sıcaklık ve basınca (101,3 kPa) bağlı molar entalpi ve standart entropi değerleridir. KOYP için yakıt ve hava kullanım oranları aşağıdaki denklemler ile elde edilebilir [49]:

$$U_{yakıt} = \frac{Yakıt_{tüketilen}}{Yakıt_{giren}} = \frac{H_{2tüketilen}}{H_{2giren}} = \frac{c_{dr}}{3a_{dr} + b_{dr}} \quad (3.157)$$

$$U_{hava} = \frac{Hava_{tüketilen}}{Hava_{giren}} = \frac{O_{2tüketilen}}{O_{2giren}} = \frac{c_{dr}/2}{n_{O_2,86}} \quad (3.158)$$

Hücre voltajı aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir [141].

$$V_C = V_N - V_{kay} \quad (3.159)$$

Burada V_N ve V_{kay} Nerst voltajı ve voltaj kaybıdır. Nernst voltajı aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır [6].

$$V_N = -\frac{\Delta \bar{g}_s^0}{2F} - \frac{\bar{R}}{2F} T_{KOYP,\zeta} \ln \left(\frac{x_{H_2O,88}}{x_{H_2,88} \sqrt{x_{O_2,87}}} \right) \quad (3.160)$$

Burada F Faraday sabiti (96485 coulomb/mol) ve $\bar{R}$ evrensel gaz sabitidir (8,314 J/molK). Molar Gibbs serbest enerji değişimi aşağıdaki gibi yazılabilir [148]:

$$\Delta \bar{g}_s^0 = \bar{g}_{H_2O}^0 - \bar{g}_{H_2}^0 - \frac{1}{2} \bar{g}_{O_2}^0 \quad (3.161)$$

Toplam voltaj kaybı aşağıdaki denklem ile belirlenmektedir [141].

$$V_{kay} = V_{ohm} + V_{akt} + V_{kons} \quad (3.162)$$

Burada V_{akt} , V_{ohm} ve V_{kons} sırasıyla aktivasyon polarizasyon, ohmik ve konsantrasyon kayıplarıdır. Ohmik voltaj kaybı aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir [100]:

$$V_{ohm} = (R_{kont} + \rho_a l_a + \rho_k l_k + \rho_e l_e + \rho_i l_i) j \quad (3.163)$$

Burada R_{kont} direnç kontağıdır ve bu çalışmada ihmal edilmiştir. ρ_a , ρ_k , ρ_e ve ρ_i anot, katot, elektrolit ve ara bağlantı elektrik dirençleridir. Söz konusu bu ifadelerin hesaplanmasında aşağıdaki denklemlerden faydalanılmaktadır [100].

$$\rho_a = \left(\frac{95 \times 10^6}{T_{KOYP,\zeta}} \exp \left(\frac{-1150}{T_{KOYP,\zeta}} \right) \right)^{-1} \quad (3.164)$$

$$\rho_k = \left(\frac{42 \times 10^6}{T_{KOYP,\zeta}} \exp \left(\frac{-1200}{T_{KOYP,\zeta}} \right) \right)^{-1} \quad (3.165)$$

$$\rho_e = \left(\frac{3,34 \times 10^4}{T_{KOYP,\zeta}} \exp \left(\frac{-10300}{T_{KOYP,\zeta}} \right) \right)^{-1} \quad (3.166)$$

$$\rho_i = \left(\frac{9,3 \times 10^6}{T_{KOYP,\zeta}} \exp \left(\frac{-1100}{T_{KOYP,\zeta}} \right) \right)^{-1} \quad (3.167)$$

Aktivasyon polarizasyon kaybı aşağıdaki denklem ile belirlenmektedir [140].

$$V_{akt} = V_{akt,a} + V_{akt,k} \quad (3.168)$$

Burada $V_{akt,a}$, $V_{akt,k}$ anot ve katot aktivasyon polarizasyon kayıplarıdır ve bu ifadelerin belirlenmesinde aşağıdaki denklemler kullanılmaktadır [140].

$$V_{akt,a} = \frac{\overline{RT}_{KOYP,\zeta}}{F} \left(\sinh^{-1} \frac{j}{2j_{da}} \right) \quad (3.169)$$

$$V_{akt,k} = \frac{\overline{RT}_{KOYP,\zeta}}{F} \left(\sinh^{-1} \frac{j}{2j_{dc}} \right) \quad (3.170)$$

Burada j_{da} ve j_{dc} sırasıyla, anot ve katot değişim akım yoğunluklarıdır. Konsantrasyon kaybı aşağıdaki denklem ile belirlenmektedir [141].

$$V_{kons} = V_{kons,a} + V_{kons,k} \quad (3.171)$$

Burada $V_{kons,a}$ ve $V_{kons,k}$ anot ve katot konsantrasyon kayıpları aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır [149].

$$V_{kons,a} = \frac{\overline{RT}_{KOYP,\zeta}}{2F} \left(\ln \left(1 + \frac{P_{H_2,88}j}{P_{H_2,88}j_{as}} \right) - \ln \left(1 - \frac{j}{j_{as}} \right) \right) \quad (3.172)$$

$$V_{kons,k} = -\frac{\overline{RT}_{KOYP,\zeta}}{4F} \ln \left(1 - \frac{j}{j_{ks}} \right) \quad (3.173)$$

Burada j_{as} ve j_{ks} sırasıyla, anot ve katot sınırlayıcı akım yoğunluğu aşağıdaki denklemler ile belirlenmektedir [141].

$$j_{as} = \frac{2FP_{H_2,88}D_{aegd}}{\bar{R}T_{KOYP,\zeta}l_a} \quad (3.174)$$

$$j_{ks} = \frac{4FP_{O_2,87}D_{kegd}}{\left(\frac{P_0 - P_{O_2,87}}{P_0}\right)\bar{R}T_{KOYP,\zeta}l_c} \quad (3.175)$$

Burada D_{aegd} ve D_{kegd} anot ve katot boyunca etkin gaz difüzyonu değeridir. Yukarıdaki denklemler vasıtasıyla yakıt pili hücresi tarafından üretilen akım yoğunluğu ve güç değerleri aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır [88].

$$j = \frac{2Fc_{dr}}{N_{yh}A_a} \quad (3.176)$$

$$\dot{W}_{KOYP,dc} = N_{yh}A_a j V_C \quad (3.177)$$

$$\dot{W}_{KOYP,ac} = \dot{W}_{KOYP,dc} \eta_{INV} \quad (3.178)$$

Burada N_{yh} ve A_a sırasıyla KOYP'nin toplam hücre sayısı ve aktif yüzey alanıdır.

- Son yakıcı

Son yakıcı için molar, enerji ve ekserji denge denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\dot{n}_{89} = \dot{n}_{89,CO_2} + \dot{n}_{89,H_2O} + \dot{n}_{89,O_2} + \dot{n}_{89,N_2} \quad (3.179)$$

$$\dot{n}_{89,CO_2} = \dot{n}_{88,CO} + \dot{n}_{88,CO_2} \quad (3.180)$$

$$\dot{n}_{89,H_2O} = \dot{n}_{88,H_2} + \dot{n}_{88,H_2O} \quad (3.181)$$

$$\dot{n}_{89,H_2O} + 2\dot{n}_{89,CO_2} + 2\dot{n}_{89,O_2} = \dot{n}_{88,CO} + 2\dot{n}_{88,CO_2} + \dot{n}_{88,H_2O} + 2\dot{n}_{87,O_2} \quad (3.182)$$

$$\dot{n}_{89,N_2} = \dot{n}_{87,O_2} \quad (3.183)$$

$$\dot{n}_{89}\bar{h}_{89} = \dot{n}_{87}\bar{h}_{87} + \dot{n}_{88}\bar{h}_{88} \quad (3.184)$$

Burada sırasıyla $\bar{h}_{87}$, $\bar{h}_{88}$ ve $\bar{h}_{89}$ son yakıcıya giren ve çıkan gaz karışımlarının molar entalpi değerleridir ve aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanabilir:

$$\bar{h}_{87} = x_{87,N_2}\bar{h}_{87,N_2} + x_{87,O_2}\bar{h}_{87,O_2} \quad (3.185)$$

$$\bar{h}_{88} = x_{88,CO}\bar{h}_{88,CO} + x_{88,CO_2}\bar{h}_{88,CO_2} + x_{88,H_2O}\bar{h}_{88,H_2O} + x_{88,H_2}\bar{h}_{88,H_2} \quad (3.186)$$

$$\bar{h}_{89} = x_{89,H_2O}\bar{h}_{89,H_2O} + x_{89,CO_2}\bar{h}_{89,CO_2} + x_{89,O_2}\bar{h}_{89,O_2} + x_{89,N_2}\bar{h}_{89,N_2} \quad (3.187)$$

Burada x gaz karışımındaki her bir bileşenin mol oranıdır ve bu değerler Tablo 3.26'da verilmiştir.

- Isı geri kazanım buhar jeneratörü

Isı geri kazanım buhar jeneratörü KOYP'den çıkan atık ısıdan ihtiyaç doğrultusunda farklı amaçlarda kullanılmak üzere buhar üretimi gerçekleştiren bir sistemdir. IGBJ için molar, enerji ve ekserji denge denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\dot{n}_{95} = \dot{n}_{98} = \dot{n}_{buh} \quad (3.188)$$

$$\dot{n}_{92} = \dot{n}_{93} \quad (3.189)$$

$$\dot{Q}_{IGBJ} = \dot{n}_{96}(\bar{h}_{98} - \bar{h}_{96}) \quad (3.190)$$

$$\dot{E}x_{kay,IGBJ} = \dot{E}x_{96} + \dot{E}x_{92} - \dot{E}x_{98} - \dot{E}x_{93} \quad (3.191)$$

Burada $\dot{n}_{buh}$ IGBJ'den elde edilen buharın molar debisidir.

Tablo 3.32: KOYP giriş ve çıkış bileşenlerinin mol oranları.

Anot giriş	$x_{83,CH_4} = \frac{\dot{n}_{83,CH_4}}{\dot{n}_{83}}$
	$x_{83,H_2O} = \frac{\dot{n}_{83,H_2O}}{\dot{n}_{83}}$
Anot çıkış	$x_{88,CO} = \frac{\dot{n}_{88,CO}}{\dot{n}_{88}}$
	$x_{88,CO_2} = \frac{\dot{n}_{88,CO_2}}{\dot{n}_{88}}$
	$x_{88,H_2} = \frac{\dot{n}_{88,H_2}}{\dot{n}_{88}}$
	$x_{88,H_2O} = \frac{\dot{n}_{88,H_2O}}{\dot{n}_{88}}$
Katot giriş	$x_{86,O_2} = \frac{\dot{n}_{86,O_2}}{\dot{n}_{86}}$
	$x_{86,N_2} = \frac{\dot{n}_{86,N_2}}{\dot{n}_{86}}$
Katot çıkış	$x_{87,O_2} = \frac{\dot{n}_{87,O_2}}{\dot{n}_{87}}$
	$x_{87,N_2} = \frac{\dot{n}_{87,N_2}}{\dot{n}_{87}}$
Son yakıcı çıkış	$x_{89,H_2O} = \frac{\dot{n}_{89,H_2O}}{\dot{n}_{89}}$
	$x_{89,CO_2} = \frac{\dot{n}_{89,CO_2}}{\dot{n}_{89}}$
	$x_{89,O_2} = \frac{\dot{n}_{89,O_2}}{\dot{n}_{89}}$
	$x_{89,N_2} = \frac{\dot{n}_{89,N_2}}{\dot{n}_{89}}$

KOYPS ekipmanlarının molar, enerji ve ekserji denge denklemleri Tablo 3.33’de ve Tablo 3.34’te verilmiştir.

Tablo 3.33: KOYPS ekipmanlarının molar ve enerji denge denklemleri.

Ekipmanlar	Kütle Dengesi	Enerji Dengesi
KOYP	$\dot{n}_{86} + \dot{n}_{83} = \dot{n}_{87} + \dot{n}_{88}$	$\dot{n}_{86}\bar{h}_{86} + \dot{n}_{83}\bar{h}_{83} = \dot{n}_{87}\bar{h}_{87} + \dot{n}_{88}\bar{h}_{88} + \dot{W}_{KOYP,ac}$
KOM-Y	$\dot{n}_{77} = \dot{n}_{78} = \dot{n}_{CH_4}$	$\dot{W}_{KOM-Y} = \dot{n}_{77}(\bar{h}_{78} - \bar{h}_{77})$
KOM-H2	$\dot{n}_{84} = \dot{n}_{85} = \dot{n}_{hava}$	$\dot{W}_{KOM-H2} = \dot{n}_{84}(\bar{h}_{85} - \bar{h}_{84})$
SP-Y	$\dot{n}_{80} = \dot{n}_{81} = \dot{n}_{H_2O}$	$\dot{W}_{SP-Y} = \dot{n}_{80}(\bar{h}_{81} - \bar{h}_{80})$
EŞJ-Y1	$\dot{n}_{78} = \dot{n}_{79}, \dot{n}_{89} = \dot{n}_{90}$	$\dot{n}_{78}(\bar{h}_{79} - \bar{h}_{78}) = \dot{n}_{89}(\bar{h}_{89} - \bar{h}_{90})$
EŞJ-Y2	$\dot{n}_{81} = \dot{n}_{82}, \dot{n}_{90} = \dot{n}_{91}$	$\dot{n}_{81}(\bar{h}_{82} - \bar{h}_{81}) = \dot{n}_{90}(\bar{h}_{90} - \bar{h}_{91})$
EŞJ-Y3	$\dot{n}_{85} = \dot{n}_{86}, \dot{n}_{91} = \dot{n}_{92}$	$\dot{n}_{85}(\bar{h}_{86} - \bar{h}_{85}) = \dot{n}_{91}(\bar{h}_{91} - \bar{h}_{92})$
SY	$\dot{n}_{89} = \dot{n}_{87} + \dot{n}_{88}$	$\dot{n}_{89}\bar{h}_{89} = \dot{n}_{87}\bar{h}_{87} + \dot{n}_{88}\bar{h}_{88}$
IGBJ	$\dot{n}_{95} = \dot{n}_{98}, \dot{n}_{92} = \dot{n}_{93}$	$\dot{Q}_{IGBJ} = \dot{n}_{96}(\bar{h}_{98} - \bar{h}_{96})$
SP-B	$\dot{n}_{95} = \dot{n}_{96}$	$\dot{W}_{SP-B} = \dot{n}_{95}(\bar{h}_{96} - \bar{h}_{85})$

Tablo 3.34: KOYPS ekipmanlarının ekserji denge denklemleri.

Ekipmanlar	Ekserji Giriş, $\dot{E}x_g$	Ekserji Çıkış, $\dot{E}x_{\zeta}$	Ekserji Kaybı, $\dot{E}x_{kay}$
KOYP	$\dot{E}x_{86} + \dot{E}x_{83}$	$\dot{E}x_{87} + \dot{E}x_{88} + \dot{W}_{KOYP,dc}$	$\dot{E}x_{g,KOYP} - \dot{E}x_{\zeta,KOYP}$
KOM-Y	$\dot{W}_{KOM-Y}$	$\dot{E}x_{78} - \dot{E}x_{77}$	$\dot{E}x_{g,KOM-Y} - \dot{E}x_{\zeta,KOM-Y}$
KOM-H2	$\dot{W}_{KOM-h2}$	$\dot{E}x_{85} - \dot{E}x_{84}$	$\dot{E}x_{g,KOM-H2} - \dot{E}x_{\zeta,KOM-H2}$
SP-Y	$\dot{W}_{SP-Y}$	$\dot{E}x_{81} - \dot{E}x_{80}$	$\dot{E}x_{g,SP-Y} - \dot{E}x_{\zeta,SP-Y}$
EŞJ-Y1	$\dot{E}x_{89} - \dot{E}x_{90}$	$\dot{E}x_{79} - \dot{E}x_{78}$	$\dot{E}x_{g,EŞJ-Y1} - \dot{E}x_{\zeta,EŞJ-Y1}$
EŞJ-Y2	$\dot{E}x_{90} - \dot{E}x_{91}$	$\dot{E}x_{82} - \dot{E}x_{81}$	$\dot{E}x_{g,EŞJ-Y2} - \dot{E}x_{\zeta,EŞJ-Y2}$
EŞJ-Y3	$\dot{E}x_{91} - \dot{E}x_{92}$	$\dot{E}x_{86} - \dot{E}x_{85}$	$\dot{E}x_{g,EŞJ-Y3} - \dot{E}x_{\zeta,EŞJ-Y3}$
SY	$\dot{E}x_{87} + \dot{E}x_{88}$	$\dot{E}x_{89}$	$\dot{E}x_{g,SY} - \dot{E}x_{\zeta,SY}$
İNV	$\dot{W}_{KOYP,dc}$	$\dot{W}_{KOYP,ac}$	$\dot{E}x_{g,INV} - \dot{E}x_{\zeta,INV}$
IGBJ	$\dot{E}x_{92} - \dot{E}x_{93}$	$\dot{E}x_{98} - \dot{E}x_{96}$	$\dot{E}x_{g,IGBJ} - \dot{E}x_{\zeta,IGBJ}$
SP-B	$\dot{W}_{SP-B}$	$\dot{E}x_{96} - \dot{E}x_{95}$	$\dot{E}x_{g,SP-B} - \dot{E}x_{\zeta,SP-B}$

KOYPS ekipmanlarının yatırım maliyeti, maliyet denge ve yardımcı denklemleri

Tablo 3.35'te ve Tablo 3.36'da verilmiştir [94], [100].

Tablo 3.35: KOYPS ekipmanlarının yatırım maliyeti denklemleri.

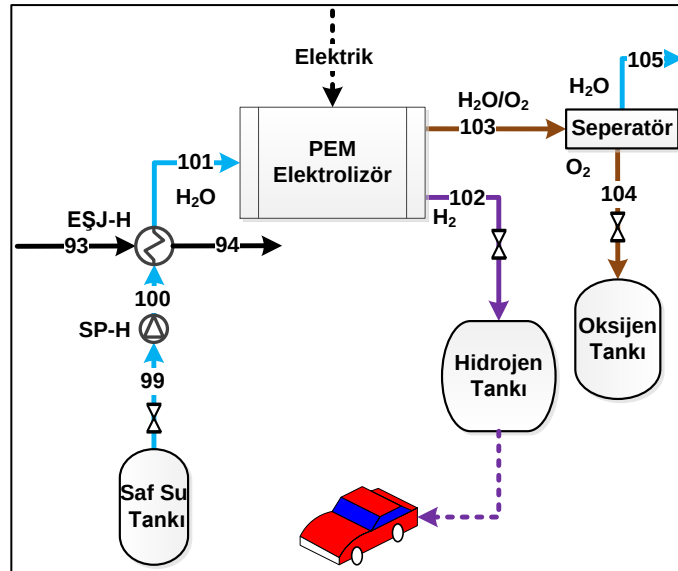
Ekipmanlar	Yatırım Maliyeti Fonksiyonu
KOYP	$Z_{KOYP} = A_{KOYP} N_{yh} (2,96 T_{KOYP,\zeta} - 1907)$
İNV	$Z_{INV} = 10^5 \left(\frac{\dot{W}_{KOYP,dc}}{500} \right)^{0,7}$
SY	$Z_{SY} = \frac{46,08 \dot{m}_{87}}{0,995 - \frac{P_{89}}{P_{87}}} [1 + \exp (0,018 T_{89} - 26,4)]$
IGBJ	$Z_{IGBJ} = 6570 \left[\left(\frac{\dot{Q}_{EKO}}{\Delta T_{LOSF,EKO}} \right)^{0,8} + \left(\frac{\dot{Q}_{EVA}}{\Delta T_{LOSF,EVA}} \right)^{0,8} \right] + 21276 \dot{m}_{98} + 1184,4 \dot{m}_{92}$
SP-B	$Z_{SP-B} = 2100 \left(\frac{\dot{W}_{SP-B}}{10} \right)^{0,26} \left(\frac{1 - \eta_{SP-B}}{\eta_{SP-B}} \right)^{0,5}$
KOM-H2	$Z_{KOM-H2} = 91562 \left(\frac{\dot{W}_{KOM-H2}}{455} \right)^{0,67}$
KOM-Y	$Z_{KOM-Y} = 91562 \left(\frac{\dot{W}_{KOM-Y}}{455} \right)^{0,67}$
SP-Y	$Z_{SP-Y} = 2100 \left(\frac{\dot{W}_{SP-Y}}{10} \right)^{0,26} \left(\frac{1 - \eta_{SP-Y}}{\eta_{SP-Y}} \right)^{0,5}$
EŞJ-Y1	$Z_{EŞJ-Y1} = 130 \left(\frac{A_{EŞJ-Y1}}{0,093} \right)^{0,78}$
EŞJ-Y2	$Z_{EŞJ-Y2} = 130 \left(\frac{A_{EŞJ-Y2}}{0,093} \right)^{0,78}$
EŞJ-Y3	$Z_{EŞJ-Y3} = 3 \left[130 \left(\frac{A_{EŞJ-Y3}}{0,093} \right)^{0,78} \right]$

Tablo 3.36: KOYPS ekipmanlarının maliyet denge ve yardımcı denklemleri.

Ekipmanlar	Maliyet denge denklemi	Yardımcı denklem
KOYP	$\dot{C}_{86} + \dot{C}_{83} + \dot{Z}_{KOYP} = \dot{C}_{87} + \dot{C}_{88} + \dot{C}_{KOYP,dc}$	$c_{87} = c_{KOYP,dc}, \frac{\dot{C}_{87}}{\dot{E}x_{87}} = \frac{\dot{C}_{KOYP,dc}}{\dot{E}x_{KOYP,dc}}$ $c_{88} = c_{KOYP,dc}, \frac{\dot{C}_{88}}{\dot{E}x_{88}} = \frac{\dot{C}_{KOYP,dc}}{\dot{E}x_{KOYP,dc}}$
KOM-Y	$\dot{C}_{77} + \dot{C}_{\dot{W}_{KOM-Y}} + \dot{Z}_{KOM-Y} = \dot{C}_{78}$	$c_{\dot{W}_{KOM-Y}} = c_{\dot{W}_{OT}}$
KOM-H2	$\dot{C}_{84} + \dot{C}_{\dot{W}_{KOM-H2}} + \dot{Z}_{KOM-H2} = \dot{C}_{85}$	$c_{84} = 0, c_{\dot{W}_{KOM-H2}} = c_{\dot{W}_{OT}}$
SP-Y	$\dot{C}_{80} + \dot{C}_{\dot{W}_{SP-Y}} + \dot{Z}_{SP-Y} = \dot{C}_{81}$	$c_{80} = 0, c_{\dot{W}_{SP-Y}} = c_{\dot{W}_{OT}}$
EŞJ-Y1	$\dot{C}_{89} + \dot{C}_{78} + \dot{Z}_{EŞJ-Y1} = \dot{C}_{90} + \dot{C}_{79}$	$c_{89} = c_{90}$ veya $\frac{\dot{C}_{89}}{\dot{E}x_{89}} = \frac{\dot{C}_{90}}{\dot{E}x_{90}}$
EŞJ-Y2	$\dot{C}_{90} + \dot{C}_{81} + \dot{Z}_{EŞJ-Y2} = \dot{C}_{91} + \dot{C}_{82}$	$c_{90} = c_{91}$ veya $\frac{\dot{C}_{90}}{\dot{E}x_{90}} = \frac{\dot{C}_{91}}{\dot{E}x_{91}}$
EŞJ-Y3	$\dot{C}_{91} + \dot{C}_{85} + \dot{Z}_{EŞJ-Y3} = \dot{C}_{92} + \dot{C}_{86}$	$c_{91} = c_{92}$ veya $\frac{\dot{C}_{91}}{\dot{E}x_{91}} = \frac{\dot{C}_{92}}{\dot{E}x_{92}}$
İNV	$\dot{C}_{KOYP,dc} + \dot{Z}_{INV} = \dot{C}_{KOYP,ac}$	-
SY	$\dot{C}_{87} + \dot{C}_{88} + \dot{Z}_{SY} = \dot{C}_{89}$	-
IGBJ	$\dot{C}_{96} + \dot{C}_{92} + \dot{Z}_{IGBJ} = \dot{C}_{98} + \dot{C}_{93}$	$c_{92} = c_{93}$ veya $\frac{\dot{C}_{92}}{\dot{E}x_{92}} = \frac{\dot{C}_{93}}{\dot{E}x_{93}}$
SP-B	$\dot{C}_{95} + \dot{C}_{\dot{W}_{SP-B}} + \dot{Z}_{SP-B} = \dot{C}_{96}$	$c_{95} = 0, c_{\dot{W}_{SP-B}} = c_{\dot{W}_{OT}}$

3.3.5.5.11. PEM Elektrolizör Sistemi

Günümüzde hidrojen çeşitli kimyasal, biyolojik ve fotolitik yöntemlerle üretilir. Suyun elektrolizi yoluyla hidrojen üretimi, konvansiyonel hidrojen üretim tekniklerine yani doğal gaz reformuna ve kömür gazlaştırma işlemine alternatif olarak düşünülebilir. Suyun elektrolizi ile hidrojen üretim teknolojilerinden biri olan polimer elektrolit membran destekli elektroliz teknolojileri herhangi bir elektrolit geri dönüşümü veya elektrolit korozyonu olmayan tamamen katı halde olan sistemlerdir. Bu sistemler sadece bir elektrik ve su girdisi ile çok yüksek saflıkta H_2 (>% 99,999) üretebilmektedirler. Bünyesinde bulunan membran yapısının özelliği sayesinde yüksek basınçlarda H_2 gazı elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yüzden yüksek basınçlı PEMES hidrojen üretimi için etkili bir sistemdir. Çünkü hidrojen depolamak için gerekli olan sıkıştırma işlemini tamamen ortadan kaldırır veya azaltır böylece yüksek basınçlarda hidrojen depolama işleminde gerek duyulan enerji sarfıyatını azaltır. PEME'ler büyük güç değişimlerinde uyum gösterebilme yeteneğine sahiptir, bu yüzden güneş, rüzgâr, jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile doğrudan entegre bir şekilde çalışabilmektedir [71], [150]. HÇÜS'ün önemli bir faydalı çıktısı olan hidrojen üretimi için PEMES dizayn edilmiştir ve Şekil 3.16'da proses akış diyagramı verilmiştir.



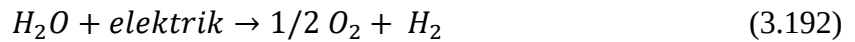
Şekil 3.16: Yüksek basınçlı PEM elektrolizör sisteminin proses akış diyagramı.

PEMES'in çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilir; sirkülasyon pompası vasıtasıyla saf suyun basıncı istenilen basınçta hidrojen elde edilmesi için arttırılır. Basıncı arttırılmış saf su PEME'nin çalışma sıcaklığına getirilmesi için EŞJ-H ekipmanına gönderilir. Basıncı ve sıcaklığı arttırılmış saf su daha sonra PEME'ye beslenir ve burada elektrokimyasal reaksiyonlar vasıtasıyla yüksek basınçlı hidrojen gazı elde edilir. Elde edilen hidrojen gazı kullanım amacına uygun olarak depolanır. Bununla birlikte, PEMES'ten elde edilen O₂/H₂O karışımı seperatör ünitesine gönderilerek ayrıştırılır ve elde edilen O₂ kullanım amacına uygun bir şekilde depolanır. Bu çalışmada, PEME için gerekli olan elektrik ihtiyacı ORC'de bulunan türbinden sağlanmaktadır. PEMES'in ekipman listesi Tablo 3.37'de verilmiştir.

Tablo 3.37: PEMES ekipman listesi.

Ekipman adı	Kısaltma	Miktar	Birim
PEM elektrolizör	PEME	1	Adet
Isı eşanjörü	EŞJ-H	1	Adet
Sirkülasyon pompası	SP-H	1	Adet
Seperatör	SEP-H	1	Adet
Hidrojen tankı	-	1	Adet
Oksijen tankı	-	1	Adet
Kesme vanası	-	3	Adet

PEME'de hidrojen üretimi için gerçekleşen toplam elektro-kimyasal reaksiyon aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.



PEME için molar, enerji ve ekserji denge denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{n}_{101} = \dot{n}_{102} + \dot{n}_{103} \quad (3.193)$$

$$\dot{n}_{101}\bar{h}_{101} + \dot{W}_{PEME} = \dot{n}_{102}\bar{h}_{102} + \dot{n}_{103}\bar{h}_{103} \quad (3.194)$$

$$\dot{E}x_{kay,PEME} = \dot{E}x_{101} + \dot{E}x^{W_{PEME}} - \dot{E}x_{102} - \dot{E}x_{103} \quad (3.195)$$

Yüksek basınçlı hidrojen üretimi için PEME'nin elektrik gücü aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenmektedir [71].

$$\begin{aligned} \dot{W}_{PEME} = & \dot{n}_{H_2} \left[T_{H_2} \left(\bar{s}_{H_2}^o + \bar{c}_{p_{H_2}} \ln \left(\frac{T_{H_2}}{T_0} \right) - Z_{H_2} \bar{R} \ln \left(\frac{P_{H_2}}{P_0} \right) \right) - \bar{c}_{p_{H_2}} (T_{H_2} - T_0) \right] \\ & + \dot{n}_{O_2} \left[T_{O_2} \left(\bar{s}_{O_2}^o + \bar{c}_{p_{O_2}} \ln \left(\frac{T_{O_2}}{T_0} \right) - Z_{O_2} \bar{R} \ln \left(\frac{P_{O_2}}{P_0} \right) \right) - \bar{c}_{p_{O_2}} (T_{O_2} - T_0) \right] \\ & - \dot{n}_{H_2O} \left[T_{H_2O} \left(\bar{s}_{H_2O}^o + \bar{c}_{p_{H_2O}} \ln \left(\frac{T_{H_2O}}{T_0} \right) \right) - (\bar{h}_{H_2O}^o + \bar{c}_{p_{H_2O}} (T_{H_2O} - T_0)) \right] \end{aligned} \quad (3.196)$$

Burada $\bar{c}_{p_{H_2}}$, $\bar{c}_{p_{O_2}}$ ve $\bar{c}_{p_{H_2O}}$ PEME çalışma sıcaklığı ve basıncına göre hidrojen, oksijen ve suyun molar özgül ısı değerleridir. $\bar{s}_{H_2}^o$, $\bar{s}_{O_2}^o$ ve $\bar{s}_{H_2O}^o$ hidrojen, oksijen ve suyun molar entropi değerleridir. Z_{H_2} ve Z_{O_2} hidrojen ve oksijenin sıkıştırılabilirlik faktörüdür. Sistemden elde edilen hidrojen ve oksijen gazları gerçek gaz özellikleri göstermektedir. Dolayısıyla bu gazların hesabı yapılırken sıkıştırılabilirlik faktörü dikkate alınmalıdır [69]. PEMES ekipmanlarının molar, enerji ve ekserji denge denklemleri Tablo 3.38'de ve Tablo 3.39'da verilmiştir.

Tablo 3.38: PEMES ekipmanlarının molar ve enerji denge denklemleri.

Ekipmanlar	Kütle Dengesi	Enerji Dengesi
PEME	$\dot{n}_{101} = \dot{n}_{102} + \dot{n}_{103}$	$\dot{n}_{101} \bar{h}_{101} + \dot{W}_{PEME} = \dot{n}_{102} \bar{h}_{102} + \dot{n}_{103} \bar{h}_{103}$
SP-H	$\dot{n}_{99} = \dot{n}_{100}$	$\dot{W}_{SP-H} = \dot{n}_{99} (\bar{h}_{100} - \bar{h}_{99})$
EŞJ-H	$\dot{n}_{93} = \dot{n}_{94}$ $\dot{n}_{100} = \dot{n}_{101}$	$\dot{n}_{93} (\bar{h}_{93} - \bar{h}_{94}) = \dot{n}_{100} (\bar{h}_{101} - \bar{h}_{100})$

Tablo 3.39: PEMES ekipmanlarının ekserji denge denklemleri.

Ekipmanları	Ekserji Giriş, $\dot{E}x_g$	Ekserji Çıkış, $\dot{E}x_c$	Ekserji Kaybı, $\dot{E}x_{kay}$
PEME	$\dot{E}x_{101} + \dot{W}_{PEME}$	$\dot{E}x_{102} + \dot{E}x_{103}$	$\dot{E}x_{c,PEME} - \dot{E}x_{g,PEME}$
SP-H	$\dot{W}_{SP-H}$	$\dot{E}x_{100} - \dot{E}x_{99}$	$\dot{E}x_{c,SP-H} - \dot{E}x_{g,SP-H}$
EŞJ-H	$\dot{E}x_{93} - \dot{E}x_{94}$	$\dot{E}x_{101} - \dot{E}x_{100}$	$\dot{E}x_{c,EŞJ-H} - \dot{E}x_{g,EŞJ-H}$

PEMES ekipmanlarının yatırım maliyeti, maliyet denge ve yardımcı denklemleri Tablo 3.40'da ve Tablo 3.41'de verilmiştir.

Tablo 3.40: PEMES ekipmanlarının yatırım maliyeti denklemleri.

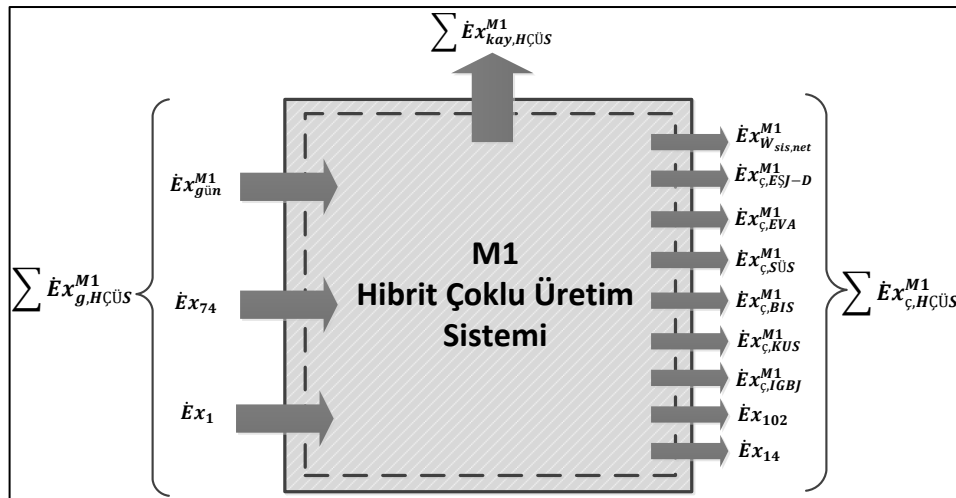
Ekipmanlar	Yatırım Maliyeti Fonksiyonu
PEME [151]	$Z_{PEME} = 1000\dot{W}_{PEME}$
SP-H [100]	$Z_{SP-H} = 2100 \left(\frac{\dot{W}_{SP-H}}{10} \right)^{0,26} \left(\frac{1-\eta_{SP-H}}{\eta_{SP-H}} \right)^{0,5}$
EŞJ-H [100]	$Z_{EŞJ-H} = 130 \left(\frac{A_{EŞJ-H}}{0,093} \right)^{0,78}$

Tablo 3.41: PEMES ekipmanlarının maliyet denge ve yardımcı denklemleri.

Ekipmanlar	Maliyet denge denklemi	Yardımcı denklem
PEME	$\dot{C}_{101} + \dot{C}_{\dot{W}_{PEME}} + \dot{Z}_{PEME} = \dot{C}_{102} + \dot{C}_{103}$	$C_{\dot{W}_{PEME}} = C_{\dot{W}_{OT}}$
SP-H	$\dot{C}_{99} + \dot{C}_{\dot{W}_{SP-H}} + \dot{Z}_{SP-H} = \dot{C}_{100}$	$C_{\dot{W}_{SP-H}} = C_{\dot{W}_{OT}}$
EŞJ-H	$\dot{C}_{100} + \dot{C}_{93} + \dot{Z}_{EŞJ-H} = \dot{C}_{101} + \dot{C}_{94}$	$C_{93} = C_{94}$ veya $\frac{\dot{C}_{93}}{\dot{E}x_{93}} = \frac{\dot{C}_{94}}{\dot{E}x_{94}}$

3.3.5.5.12. Hibrit Çoklu Üretim Sistemi

Bu bölümde, HÇÜS'ü oluşturan tüm alt sistemler için yapılan termodinamik modelleme çalışmalarından sonra tüm sistemin performans, çevresel, ekonomik ve ekserjetik sürdürülebilirlik göstergeleri için gerekli olan denklemler her bir çalışma modu için ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. HÇÜS'ün sürdürülebilirlik analiz çalışmalarına başlamadan önce tüm çalışma modları için ekserji akış diyagramları çizilmiştir. M1 çalışma modu için ekserji akış diyagramı Şekil 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3.17: M1 çalışma modunun ekserji akış diyagramı.

M1 çalışma modu için HÇÜS'ün toplam enerji giriş ve çıkış denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\sum \dot{E}_{g,HÇÜS}^{M1} = \dot{Q}_{gün}^{M1} + \dot{m}_{74}AID_{bka} + \dot{E}_1 - \dot{E}_{14} \quad (3.197)$$

$$\begin{aligned} \sum \dot{E}_{ç,HÇÜS}^{M1} = & \dot{W}_{sis,net}^{M1} + \dot{Q}_{IDS}^{M1} + \dot{Q}_{EVA}^{M1} + \dot{Q}_{SÜS}^{M1} + \dot{Q}_{BIS}^{M1} + \dot{Q}_{KUS}^{M1} + \dot{Q}_{IGBJ}^{M1} \\ & + \dot{m}_{102}AID_{H_2} \end{aligned} \quad (3.198)$$

M1 çalışma modunda HÇÜS'ün net elektrik gücü aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenmektedir.

$$\dot{W}_{net,HÇÜS}^{M1} = \dot{W}_{BT}^{M1} + \dot{W}_{OT}^{M1} + \dot{W}_{KOYP}^{M1} - \dot{W}_{top,SP}^{M1} - \dot{W}_{top,KOM}^{M1} - \dot{W}_{PEME}^{M1} \quad (3.199)$$

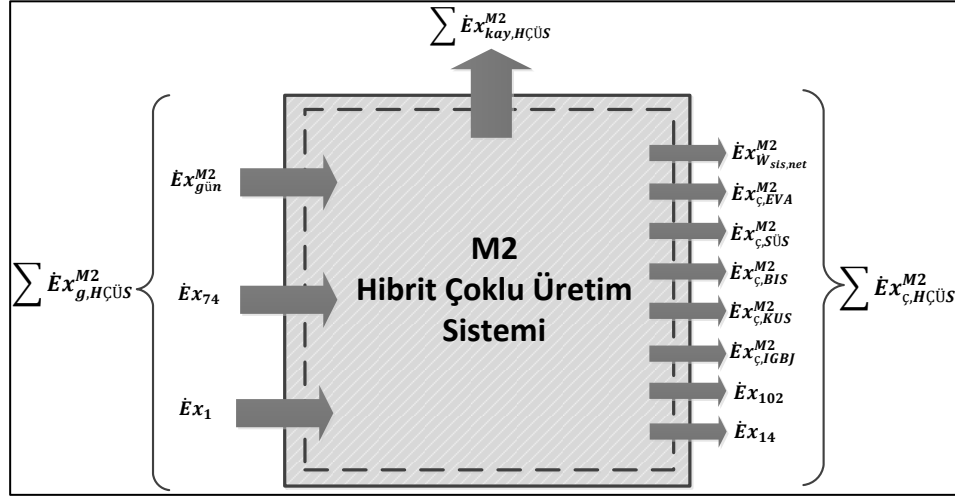
Burada $\dot{W}_{top,SP}^{M1}$ ve $\dot{W}_{top,KOM}^{M1}$ sırasıyla sistemdeki sirkülasyon pompalarının ve kompresörlerin toplam elektrik gücüdür. M1 çalışma modu için HÇÜS'ün toplam ekserji giriş ve çıkış denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\sum \dot{E}x_{g,HÇÜS}^{M1} = \dot{E}x_{gün}^{M1} + \dot{E}x_{74} + \dot{E}x_1 - \dot{E}x_{14} \quad (3.200)$$

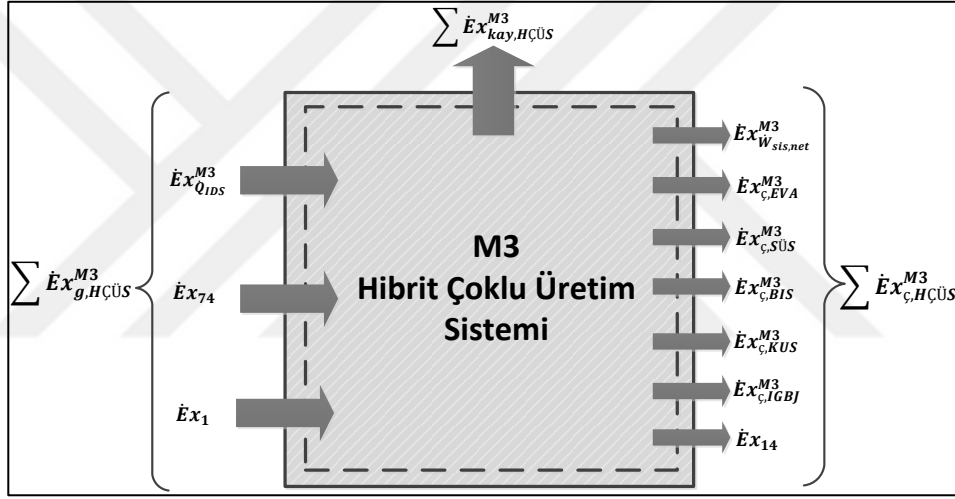
$$\begin{aligned} \sum \dot{E}x_{ç,HÇÜS}^{M1} = & \dot{W}_{sis,net}^{M1} + \dot{E}x_{ç,ESJ-D}^{M1} + \dot{E}x_{ç,EVA}^{M1} + \dot{E}x_{ç,KON-1}^{M1} \\ & + \dot{E}x_{ç,KON-2}^{M1} + \dot{E}x_{ç,BIS}^{M1} + \dot{E}x_{ç,KUS}^{M1} + \dot{E}x_{ç,IGBJ}^{M1} + \dot{E}x_{102}^{M1} \end{aligned} \quad (3.201)$$

Diğer çalışma modları için ekserji akış diyagramları Şekil 3.18-3.20'de verilmiştir. M1 çalışma modunda HÇÜS'ün toplam ekserji kaybı aşağıdaki denklem ile belirlenmektedir. Burada meydana gelen ekserji kayıpları ekserji yıkımı ile oluşan kayıpları içermektedir.

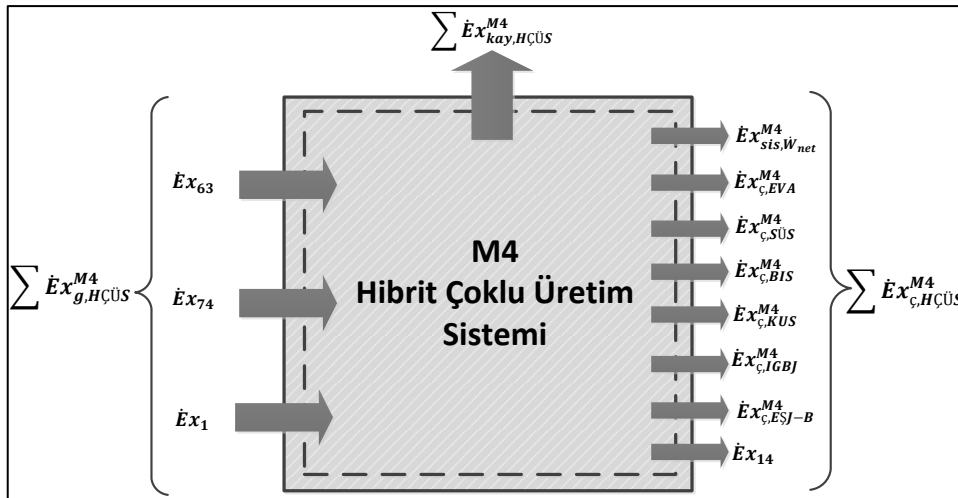
$$\begin{aligned} \sum \dot{E}x_{kay,HÇÜS}^{M1} = & \dot{E}x_{kay,ID-PGKS}^{M1} + \dot{E}x_{kay,KGS}^{M1} + \dot{E}x_{kay,ASS}^{M1} + \dot{E}x_{kay,BIS}^{M1} \\ & + \dot{E}x_{kay,SÜS}^{M1} + \dot{E}x_{kay,KUS}^{M1} + \dot{E}x_{kay,BÜS}^{M1} + \dot{E}x_{kay,KOYPS}^{M1} \\ & + \dot{E}x_{kay,PEMES}^{M1} \end{aligned} \quad (3.202)$$



Şekil 3.18: M2 çalışma modunun ekserji akış diyagramı.



Şekil 3.19: M3 çalışma modunun ekserji akış diyagramı.



Şekil 3.20: M4 çalışma modunun ekserji akış diyagramı.

Tablo 3.42: Performans alt gösterge denklemleri.

M1 Çalışma Modu	
$\eta_{el,H\check{C}\ddot{U}S}^{M1} = \frac{\dot{W}_{net,H\check{C}\ddot{U}S}^{M1}}{\dot{Q}_{g\ddot{u}n}^{M1} + \dot{m}_{74}AID_{bka} + \dot{E}_1 - \dot{E}_{14}} = \frac{\dot{W}_{BT}^{M1} + \dot{W}_{OT}^{M1} + \dot{W}_{KOYP}^{M1} - \dot{W}_{top,SP}^{M1} - \dot{W}_{top,KOM}^{M1} - \dot{W}_{PEME}^{M1}}{\dot{Q}_{g\ddot{u}n}^{M1} + \dot{m}_{74}AID_{bka} + \dot{E}_1 - \dot{E}_{14}}$	
$\eta_{H\check{C}\ddot{U}S}^{M1} = \frac{\dot{W}_{sis,net}^{M1} + \dot{Q}_{IDS}^{M1} + \dot{Q}_{EVA}^{M1} + \dot{Q}_{S\ddot{U}S}^{M1} + \dot{Q}_{BIS}^{M1} + \dot{Q}_{KUS}^{M1} + \dot{Q}_{IGBJ}^{M1} + \dot{m}_{102}AID_{H_2}}{\dot{Q}_{g\ddot{u}n}^{M1} + \dot{m}_{74}AID_{bka} + \dot{E}_1 - \dot{E}_{14}}$	
$\psi_{H\check{C}\ddot{U}S}^{M1} = \frac{\dot{W}_{sis,net}^{M1} + \dot{E}x_{\check{c},ESJ-D}^{M1} + \dot{E}x_{\check{c},EVA}^{M1} + \dot{E}x_{\check{c},KON-1}^{M1} + \dot{E}x_{\check{c},KON-2}^{M1} + \dot{E}x_{\check{c},BIS}^{M1} + \dot{E}x_{\check{c},KUS}^{M1} + \dot{E}x_{\check{c},IGBJ}^{M1} + \dot{E}x_{102}^{M1}}{\dot{E}x_{g\ddot{u}n}^{M1} + \dot{E}x_{74} + \dot{E}x_1 - \dot{E}x_{14}}$	
$\sum \dot{E}x_{kay,H\check{C}\ddot{U}S}^{M1} = \dot{E}x_{kay,ID-PGKS}^{M1} + \dot{E}x_{kay,KGS}^{M1} + \dot{E}x_{kay,ASS}^{M1} + \dot{E}x_{kay,BIS}^{M1} + \dot{E}x_{kay,S\ddot{U}S}^{M1} + \dot{E}x_{kay,KUS}^{M1} + \dot{E}x_{kay,B\ddot{U}S}^{M1} + \dot{E}x_{kay,KOYPS}^{M1} + \dot{E}x_{kay,PEMES}^{M1}$	
M2 Çalışma Modu	
$\eta_{el,H\check{C}\ddot{U}S}^{M2} = \frac{\dot{W}_{net,H\check{C}\ddot{U}S}^{M2}}{\dot{Q}_{g\ddot{u}n}^{M2} + \dot{m}_{74}AID_{bka} + \dot{E}_1 - \dot{E}_{14}} = \frac{\dot{W}_{BT}^{M2} + \dot{W}_{OT}^{M2} + \dot{W}_{KOYP}^{M2} - \dot{W}_{top,SP}^{M2} - \dot{W}_{top,KOM}^{M2} - \dot{W}_{PEME}^{M2}}{\dot{Q}_{g\ddot{u}n}^{M2} + \dot{m}_{74}AID_{bka} + \dot{E}_1 - \dot{E}_{14}}$	
$\eta_{H\check{C}\ddot{U}S}^{M2} = \frac{\dot{W}_{sis,net}^{M2} + \dot{Q}_{EVA}^{M2} + \dot{Q}_{S\ddot{U}S}^{M2} + \dot{Q}_{BIS}^{M2} + \dot{Q}_{KUS}^{M2} + \dot{Q}_{IGBJ}^{M2} + \dot{m}_{102}AID_{H_2}}{\dot{Q}_{g\ddot{u}n}^{M2} + \dot{m}_{74}AID_{bka} + \dot{E}_1 - \dot{E}_{14}}$	
$\psi_{H\check{C}\ddot{U}S}^{M2} = \frac{\dot{W}_{sis,net}^{M2} + \dot{E}x_{\check{c},EVA}^{M2} + \dot{E}x_{\check{c},KON-1}^{M2} + \dot{E}x_{\check{c},KON-2}^{M2} + \dot{E}x_{\check{c},BIS}^{M2} + \dot{E}x_{\check{c},KUS}^{M2} + \dot{E}x_{\check{c},IGBJ}^{M2} + \dot{E}x_{102}^{M2}}{\dot{E}x_{g\ddot{u}n}^{M2} + \dot{E}x_{74} + \dot{E}x_1 - \dot{E}x_{14}}$	
$\sum \dot{E}x_{kay,H\check{C}\ddot{U}S}^{M2} = \dot{E}x_{kay,ID-PGKS}^{M2} + \dot{E}x_{kay,KGS}^{M2} + \dot{E}x_{kay,ASS}^{M2} + \dot{E}x_{kay,BIS}^{M2} + \dot{E}x_{kay,S\ddot{U}S}^{M2} + \dot{E}x_{kay,KUS}^{M2} + \dot{E}x_{kay,B\ddot{U}S}^{M2} + \dot{E}x_{kay,KOYPS}^{M2} + \dot{E}x_{kay,PEMES}^{M2}$	
M3 Çalışma Modu	
$\eta_{el,H\check{C}\ddot{U}S}^{M3} = \frac{\dot{W}_{net,H\check{C}\ddot{U}S}^{M3}}{\dot{Q}_{IDS}^{M3} + \dot{m}_{74}AID_{bka} + \dot{E}_1 - \dot{E}_{14}} = \frac{\dot{W}_{BT}^{M3} + \dot{W}_{OT}^{M3} + \dot{W}_{KOYP}^{M3} - \dot{W}_{top,SP}^{M3} - \dot{W}_{top,KOM}^{M3}}{\dot{Q}_{IDS}^{M3} + \dot{m}_{74}AID_{bka} + \dot{E}_1 - \dot{E}_{14}}$	
$\eta_{H\check{C}\ddot{U}S}^{M3} = \frac{\dot{W}_{sis,net}^{M3} + \dot{Q}_{EVA}^{M3} + \dot{Q}_{S\ddot{U}S}^{M3} + \dot{Q}_{BIS}^{M3} + \dot{Q}_{KUS}^{M3} + \dot{Q}_{IGBJ}^{M3}}{\dot{Q}_{IDS}^{M3} + \dot{m}_{74}AID_{bka} + \dot{E}_1 - \dot{E}_{14}}$	
$\psi_{H\check{C}\ddot{U}S}^{M3} = \frac{\dot{W}_{sis,net}^{M3} + \dot{E}x_{\check{c},EVA}^{M3} + \dot{E}x_{\check{c},KON-1}^{M3} + \dot{E}x_{\check{c},KON-2}^{M3} + \dot{E}x_{\check{c},BIS}^{M3} + \dot{E}x_{\check{c},KUS}^{M3} + \dot{E}x_{\check{c},IGBJ}^{M3}}{\dot{E}x_{IDS}^{M3} + \dot{E}x_{74} + \dot{E}x_1 - \dot{E}x_{14}}$	
$\sum \dot{E}x_{kay,H\check{C}\ddot{U}S}^{M3} = \dot{E}x_{kay,IDS}^{M3} + \dot{E}x_{kay,KGS}^{M3} + \dot{E}x_{kay,ASS}^{M3} + \dot{E}x_{kay,BIS}^{M3} + \dot{E}x_{kay,S\ddot{U}S}^{M3} + \dot{E}x_{kay,KUS}^{M3} + \dot{E}x_{kay,B\ddot{U}S}^{M3} + \dot{E}x_{kay,KOYPS}^{M3}$	
M4 Çalışma Modu	
$\eta_{el,H\check{C}\ddot{U}S}^{M4} = \frac{\dot{W}_{net,H\check{C}\ddot{U}S}^{M4}}{\dot{m}_{63}AID_{tal} + \dot{m}_{74}AID_{bka} + \dot{E}_1 - \dot{E}_{14}} = \frac{\dot{W}_{BT}^{M4} + \dot{W}_{OT}^{M4} + \dot{W}_{KOYP}^{M4} - \dot{W}_{top,SP}^{M4} - \dot{W}_{top,KOM}^{M4}}{\dot{m}_{63}AID_{tal} + \dot{m}_{74}AID_{bka} + \dot{E}_1 - \dot{E}_{14}}$	
$\eta_{H\check{C}\ddot{U}S}^{M4} = \frac{\dot{W}_{sis,net}^{M4} + \dot{Q}_{EVA}^{M4} + \dot{Q}_{S\ddot{U}S}^{M4} + \dot{Q}_{BIS}^{M4} + \dot{Q}_{KUS}^{M4} + \dot{Q}_{IGBJ}^{M4} + \dot{Q}_{ESJ-B}^{M4}}{\dot{m}_{63}AID_{tal} + \dot{m}_{74}AID_{bka} + \dot{E}_1 - \dot{E}_{14}}$	
$\psi_{H\check{C}\ddot{U}S}^{M4} = \frac{\dot{W}_{sis,net}^{M4} + \dot{E}x_{\check{c},EVA}^{M4} + \dot{E}x_{\check{c},KON-1}^{M4} + \dot{E}x_{\check{c},KON-2}^{M4} + \dot{E}x_{\check{c},BIS}^{M4} + \dot{E}x_{\check{c},KUS}^{M4} + \dot{E}x_{\check{c},IGBJ}^{M4} + \dot{E}x_{\check{c},ESJ-B}^{M4}}{\dot{E}x_{63} + \dot{E}x_{74} + \dot{E}x_1 - \dot{E}x_{14}}$	
$\sum \dot{E}x_{kay,H\check{C}\ddot{U}S}^{M4} = \dot{E}x_{kay,BYS}^{M4} + \dot{E}x_{kay,KGS}^{M4} + \dot{E}x_{kay,ASS}^{M4} + \dot{E}x_{kay,BIS}^{M4} + \dot{E}x_{kay,S\ddot{U}S}^{M4} + \dot{E}x_{kay,KUS}^{M4} + \dot{E}x_{kay,B\ddot{U}S}^{M4} + \dot{E}x_{kay,KOYPS}^{M4}$	

HÇÜS'ün çalışma modlarına göre çevresel alt göstergelerinin belirlenmesinde kullanılan denklemler Tablo 3.43'te ve Tablo 3.44'te verilmiştir.

Tablo 3.43: Küresel ısınma potansiyeli denklemleri.

M1	$emi_{CO_2, H\check{C}\ddot{U}S}^{M1} = \frac{\dot{m}_{94, CO_2}^{M1} + \dot{m}_{75, CO_2}^{M1}}{\sum \dot{E}_{\check{C}, H\check{C}\ddot{U}S}^{M1}} \times 3600$
M2	$emi_{CO_2, H\check{C}\ddot{U}S}^{M2} = \frac{\dot{m}_{94, CO_2}^{M2} + \dot{m}_{75, CO_2}^{M2}}{\sum \dot{E}_{\check{C}, H\check{C}\ddot{U}S}^{M2}} \times 3600$
M3	$emi_{CO_2, H\check{C}\ddot{U}S}^{M3} = \frac{\dot{m}_{94, CO_2}^{M3} + \dot{m}_{75, CO_2}^{M3}}{\sum \dot{E}_{\check{C}, H\check{C}\ddot{U}S}^{M3}} \times 3600$
M4	$emi_{CO_2, H\check{C}\ddot{U}S}^{M4} = \frac{\dot{m}_{94, CO_2}^{M4} + \dot{m}_{75, CO_2}^{M4} + \dot{m}_{68, CO_2}^{M4}}{\sum \dot{E}_{\check{C}, H\check{C}\ddot{U}S}^{M4}} \times 3600$

Tablo 3.44: CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli denklemleri.

M1	$FYT_{top, H\check{C}\ddot{U}S}^{M1} EF_{dg}$	$FYT_{top, H\check{C}\ddot{U}S}^{M1} EF_{fo}$	$FYT_{top, H\check{C}\ddot{U}S}^{M1} EF_{k\ddot{o}m}$
M2	$FYT_{top, H\check{C}\ddot{U}S}^{M2} EF_{dg}$	$FYT_{top, H\check{C}\ddot{U}S}^{M2} EF_{fo}$	$FYT_{top, H\check{C}\ddot{U}S}^{M2} EF_{k\ddot{o}m}$
M3	$FYT_{top, H\check{C}\ddot{U}S}^{M3} EF_{dg}$	$FYT_{top, H\check{C}\ddot{U}S}^{M3} EF_{fo}$	$FYT_{top, H\check{C}\ddot{U}S}^{M3} EF_{k\ddot{o}m}$
M4	$FYT_{top, H\check{C}\ddot{U}S}^{M4} EF_{dg}$	$FYT_{top, H\check{C}\ddot{U}S}^{M4} EF_{fo}$	$FYT_{top, H\check{C}\ddot{U}S}^{M4} EF_{k\ddot{o}m}$

Tablo 3.45'te çalışma modları için HÇÜS'ün toplam ürün birim maliyetlerinin belirlenmesinde kullanılan denklemler ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

Tablo 3.45: Toplam ürün birim maliyeti denklemleri.

M1	$c_{\ddot{u}bm}^{M1} = \frac{\dot{C}_{net, el}^{M1} + \dot{C}_{35}^{M1} + \dot{C}_{58}^{M1} - \dot{C}_{57}^{M1} + \dot{C}_{109}^{M1} + \dot{C}_{107}^{M1} + \dot{C}_{102}^{M1} + \dot{C}_{23}^{M1} + \dot{C}_{21}^{M1} + \dot{C}_{98}^{M1}}{\dot{W}_{net, el}^{M1} + \dot{E}x_{35} + \dot{E}x_{58} - \dot{E}x_{57} + \dot{E}x_{109} + \dot{E}x_{107} + \dot{E}x_{102} + \dot{E}x_{23} + \dot{E}x_{21} + \dot{E}x_{98}}$
M2	$c_{\ddot{u}bm}^{M2} = \frac{\dot{C}_{net, el}^{M2} + \dot{C}_{35}^{M2} + \dot{C}_{109}^{M2} + \dot{C}_{107}^{M2} + \dot{C}_{102}^{M2} + \dot{C}_{23}^{M2} + \dot{C}_{21}^{M2} + \dot{C}_{98}^{M2}}{\dot{W}_{net, el}^{M2} + \dot{E}x_{35} + \dot{E}x_{109} + \dot{E}x_{107} + \dot{E}x_{102} + \dot{E}x_{23} + \dot{E}x_{21} + \dot{E}x_{98}}$
M3	$c_{\ddot{u}bm}^{M3} = \frac{\dot{C}_{net, el}^{M3} + \dot{C}_{35}^{M3} + \dot{C}_{109}^{M3} + \dot{C}_{107}^{M3} + \dot{C}_{23}^{M3} + \dot{C}_{21}^{M3} + \dot{C}_{98}^{M3}}{\dot{W}_{net, el}^{M3} + \dot{E}x_{35} + \dot{E}x_{109} + \dot{E}x_{107} + \dot{E}x_{23} + \dot{E}x_{21} + \dot{E}x_{98}}$
M4	$c_{\ddot{u}bm}^{M4} = \frac{\dot{C}_{net, el}^{M4} + \dot{C}_{35}^{M4} + \dot{C}_{109}^{M4} + \dot{C}_{107}^{M4} + \dot{C}_{23}^{M4} + \dot{C}_{21}^{M4} + \dot{C}_{98}^{M4} + \dot{C}_{70}^{M4}}{\dot{W}_{net, el}^{M4} + \dot{E}x_{35} + \dot{E}x_{109} + \dot{E}x_{107} + \dot{E}x_{23} + \dot{E}x_{21} + \dot{E}x_{98} + \dot{E}x_{70}}$

HÇÜS'ün çalışma modlarına göre ekserjetik sürdürülebilirlik alt göstergelerinin hesaplamalarında kullanılan denklemler Tablo 3.46'da verilmiştir.

Tablo 3.46: Ekserjetik sürdürülebilirlik alt göstergelerinin denklemleri.

M1 Çalışma Modu	
$a_{aéo}^{M1} = \frac{\dot{E}x_{14} + \dot{E}x_{104} + \dot{E}x_{94} + \sum \dot{E}x_{kay,H\check{C}\ddot{U}S}^{M1}}{\dot{E}x_{gün}^{M1} + \dot{E}x_{74} + \dot{E}x_1 - \dot{E}x_{14}}$	
$g_{gko}^{M1} = \frac{\dot{E}x_{14} + \dot{E}x_{104} + \dot{E}x_{94}}{\dot{E}x_{gün}^{M1} + \dot{E}x_{74} + \dot{E}x_1 - \dot{E}x_{14}}$	
$y_{eyo}^{M1} = \frac{\sum \dot{E}x_{kay,H\check{C}\ddot{U}S}^{M1}}{\dot{E}x_{gün}^{M1} + \dot{E}x_{74} + \dot{E}x_1 - \dot{E}x_{14}}$	
$e_{cef}^{M1} = \frac{\dot{E}x_{14} + \dot{E}x_{104} + \dot{E}x_{94} + \sum \dot{E}x_{kay,H\check{C}\ddot{U}S}^{M1}}{\dot{W}_{sis,net}^{M1} + \dot{E}x_{c,ESJ-d}^{M1} + \dot{E}x_{c,EVA}^{M1} + \dot{E}x_{c,KON-1}^{M1} + \dot{E}x_{c,KON-2}^{M1} + \dot{E}x_{c,BIS}^{M1} + \dot{E}x_{c,KUS}^{M1} + \dot{E}x_{c,IGBJ}^{M1} + \dot{E}x_{102}^{M1}}$	
$s_{esi}^{M1} = \frac{\dot{W}_{sis,net}^{M1} + \dot{E}x_{c,ESJ-d}^{M1} + \dot{E}x_{c,EVA}^{M1} + \dot{E}x_{c,KON-1}^{M1} + \dot{E}x_{c,KON-2}^{M1} + \dot{E}x_{c,BIS}^{M1} + \dot{E}x_{c,KUS}^{M1} + \dot{E}x_{c,IGBJ}^{M1} + \dot{E}x_{102}^{M1}}{\dot{E}x_{14} + \dot{E}x_{104} + \dot{E}x_{94} + \sum \dot{E}x_{kay,H\check{C}\ddot{U}S}^{M1}}$	
M2 Çalışma Modu	
$a_{aéo}^{M2} = \frac{\dot{E}x_{14} + \dot{E}x_{104} + \dot{E}x_{94} + \sum \dot{E}x_{kay,H\check{C}\ddot{U}S}^{M2}}{\dot{E}x_{gün}^{M2} + \dot{E}x_{74} + \dot{E}x_1 - \dot{E}x_{14}}$	
$g_{gko}^{M2} = \frac{\dot{E}x_{14} + \dot{E}x_{104} + \dot{E}x_{94}}{\dot{E}x_{gün}^{M2} + \dot{E}x_{74} + \dot{E}x_1 - \dot{E}x_{14}}$	
$y_{eyo}^{M2} = \frac{\sum \dot{E}x_{kay,H\check{C}\ddot{U}S}^{M2}}{\dot{E}x_{gün}^{M2} + \dot{E}x_{74} + \dot{E}x_1 - \dot{E}x_{14}}$	
$e_{cef}^{M2} = \frac{\dot{E}x_{14} + \dot{E}x_{104} + \dot{E}x_{94} + \sum \dot{E}x_{kay,H\check{C}\ddot{U}S}^{M2}}{\dot{W}_{sis,net}^{M2} + \dot{E}x_{c,EVA}^{M2} + \dot{E}x_{c,KON-1}^{M2} + \dot{E}x_{c,KON-2}^{M2} + \dot{E}x_{c,BIS}^{M2} + \dot{E}x_{c,KUS}^{M2} + \dot{E}x_{c,IGBJ}^{M2} + \dot{E}x_{102}^{M2}}$	
$s_{esi}^{M2} = \frac{\dot{W}_{sis,net}^{M2} + \dot{E}x_{c,EVA}^{M2} + \dot{E}x_{c,KON-1}^{M2} + \dot{E}x_{c,KON-2}^{M2} + \dot{E}x_{c,BIS}^{M2} + \dot{E}x_{c,KUS}^{M2} + \dot{E}x_{c,IGBJ}^{M2} + \dot{E}x_{102}^{M2}}{\dot{E}x_{14} + \dot{E}x_{104} + \dot{E}x_{94} + \sum \dot{E}x_{kay,H\check{C}\ddot{U}S}^{M2}}$	
M3 Çalışma Modu	
$a_{aéo}^{M3} = \frac{\dot{E}x_{14} + \dot{E}x_{104} + \dot{E}x_{94} + \sum \dot{E}x_{kay,H\check{C}\ddot{U}S}^{M3}}{\dot{E}x_{QIDS}^{M3} + \dot{E}x_{74} + \dot{E}x_1 - \dot{E}x_{14}}$	
$g_{gko}^{M3} = \frac{\dot{E}x_{14} + \dot{E}x_{104} + \dot{E}x_{94}}{\dot{E}x_{QIDS}^{M3} + \dot{E}x_{74} + \dot{E}x_1 - \dot{E}x_{14}}$	
$y_{eyo}^{M3} = \frac{\sum \dot{E}x_{kay,H\check{C}\ddot{U}S}^{M3}}{\dot{E}x_{QIDS}^{M3} + \dot{E}x_{74} + \dot{E}x_1 - \dot{E}x_{14}}$	
$e_{cef}^{M3} = \frac{\dot{E}x_{14} + \dot{E}x_{104} + \dot{E}x_{94} + \sum \dot{E}x_{kay,H\check{C}\ddot{U}S}^{M3}}{\dot{W}_{sis,net}^{M3} + \dot{E}x_{c,EVA}^{M3} + \dot{E}x_{c,KON-1}^{M3} + \dot{E}x_{c,KON-2}^{M3} + \dot{E}x_{c,BIS}^{M3} + \dot{E}x_{c,KUS}^{M3} + \dot{E}x_{c,IGBJ}^{M3}}$	
$s_{esi}^{M3} = \frac{\dot{W}_{sis,net}^{M3} + \dot{E}x_{c,EVA}^{M3} + \dot{E}x_{c,KON-1}^{M3} + \dot{E}x_{c,KON-2}^{M3} + \dot{E}x_{c,BIS}^{M3} + \dot{E}x_{c,KUS}^{M3} + \dot{E}x_{c,IGBJ}^{M3}}{\dot{E}x_{14} + \dot{E}x_{104} + \dot{E}x_{94} + \sum \dot{E}x_{kay,H\check{C}\ddot{U}S}^{M3}}$	
M4 Çalışma Modu	
$a_{aéo}^{M4} = \frac{\dot{E}x_{14} + \dot{E}x_{104} + \dot{E}x_{94} + \dot{E}x_{68} + \sum \dot{E}x_{kay,H\check{C}\ddot{U}S}^{M4}}{\dot{E}x_{63} + \dot{E}x_{74} + \dot{E}x_1 - \dot{E}x_{14}}$	
$g_{gko}^{M4} = \frac{\dot{E}x_{14} + \dot{E}x_{104} + \dot{E}x_{94} + \dot{E}x_{68}}{\dot{E}x_{63} + \dot{E}x_{74} + \dot{E}x_1 - \dot{E}x_{14}}$	
$y_{eyo}^{M4} = \frac{\sum \dot{E}x_{kay,H\check{C}\ddot{U}S}^{M4}}{\dot{E}x_{63} + \dot{E}x_{74} + \dot{E}x_1 - \dot{E}x_{14}}$	
$e_{cef}^{M4} = \frac{\dot{E}x_{14} + \dot{E}x_{104} + \dot{E}x_{94} + \dot{E}x_{68} + \sum \dot{E}x_{kay,H\check{C}\ddot{U}S}^{M4}}{\dot{W}_{sis,net}^{M4} + \dot{E}x_{c,EVA}^{M4} + \dot{E}x_{c,KON-1}^{M4} + \dot{E}x_{c,KON-2}^{M4} + \dot{E}x_{c,BIS}^{M4} + \dot{E}x_{c,KUS}^{M4} + \dot{E}x_{c,IGBJ}^{M4} + \dot{E}x_{c,ESJ-B}^{M4}}$	
$s_{esi}^{M4} = \frac{\dot{W}_{sis,net}^{M4} + \dot{E}x_{c,EVA}^{M4} + \dot{E}x_{c,KON-1}^{M4} + \dot{E}x_{c,KON-2}^{M4} + \dot{E}x_{c,BIS}^{M4} + \dot{E}x_{c,KUS}^{M4} + \dot{E}x_{c,IGBJ}^{M4} + \dot{E}x_{c,ESJ-B}^{M4}}{\dot{E}x_{14} + \dot{E}x_{104} + \dot{E}x_{94} + \dot{E}x_{68} + \sum \dot{E}x_{kay,H\check{C}\ddot{U}S}^{M4}}$	

4. BULGULAR ve TARTIŞMALAR

4.1. Giriş

Bu bölümde, HÇÜS'ün sürdürülebilirlik analiz çalışmalarından elde edilen bulgular sunulmuş ve detaylıca tartışılmıştır. HÇÜS'ün sürdürülebilirlik analiz sonuçlarını daha iyi anlayabilmek için sistem temel işletim parametrelerine göre sürdürülebilirlik göstergelerinin nasıl değiştiğini irdelemek son derece önemlidir. Bu tez çalışmasında, sürdürülebilirlik analizlerine başlamadan önce, ilk olarak HÇÜS'te bulunan alt sistemlerin doğrulama çalışmaları detaylı bir şekilde yapılmıştır. Bununla birlikte, HÇÜS'ün temel işletim parametrelerine ve çevre şartlarına bağlı olarak örnek bir bölge için durum analiz çalışmasından elde edilen sonuçlar bu başlık altında sunulmuştur. HÇÜS'ün sürdürülebilirlik analizi kapsamında sistem temel işletim parametreleri olarak; jeotermal kaynak sıcaklığı, jeotermal kaynak debisi, kuyu pompası çıkış basıncı, eşanjör-p çıkış sıcaklığı, flaşlama basıncı ve ORC türbin giriş basıncı değerleri dikkate alınmıştır. HÇÜS'ün temel işletim parametreleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1: Sistem temel işletim parametreleri.

Parametreler	Birim	Değişken	Referans
Jeotermal kaynak sıcaklığı, T_{jeo}	°C	$100 \leq T_{jeo} \leq 150$	[152], [153]
Jeotermal kaynak debisi, m_{jeo}	kg/s	$50 \leq m_{jeo} \leq 100$	[152], [153]
Kuyu pompası çıkış basıncı, P_2	bar	$15 \leq P_2 \leq 50$	Kabul
Eşanjör-p çıkış sıcaklığı, T_3	°C	$175 \leq T_3 \leq 250$	Kabul
Flaşlama basıncı, P_4	bar	$3 \leq P_4 \leq 8$	[124]
ORC türbin giriş basıncı, P_{19}	kPa	$1000 \leq P_{19} \leq 2000$	[154]

HÇÜS'ün sürdürülebilirlik analizlerinin parametrik olarak yapılması ve alt sistemlerin doğrulama çalışmalarının gerçekleştirilmesi için dikkate alınan tasarım ve işletim büyüklükleri mevcut literatürde gerçekleştirilen farklı çalışmalardan alınmıştır ve bu değerler Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2: Tasarım ve işletim büyüklükleri.

Parametreler	Sembol	Değer	Birim	Referans
PGK				
Kollektör genişliği	w_{kol}	5,76	m	[104]
Kollektör uzunluğu	L_{kol}	12,27	m	[104]
Kaplayıcı dış çapı	$D_{kp,d}$	0,121	m	[104]
Alıcı dış çapı	$D_{al,d}$	0,07	m	[104]
Alıcı iç çapı	$D_{al,i}$	0,066	m	[104]
Bir serideki kollektör sayısı	-	10	adet	[104]
Kollektör verimi	η_{al}	0,765	-	[116]
Alıcı emisivite	ε_{al}	0,92	-	[116]
Alıcı termal iletkenliği	k_{al}	15	W/mK	[108]
Kaplayıcı emisivite	ε_{kp}	0,86	-	[104]
Güneş sıcaklığı	$T_{gün}$	5778	K	[54]
KGS				
KIZ-1 Pinch noktası sıcaklık farkı	ΔT_{pn}	5	°C	[130]
Buhar türbini çıkış basıncı	P_6	10	kPa	[130]
ORC türbin çıkış basıncı	P_{15}	400	kPa	[130]
ASS				
Evaporatör sıcaklığı	T_{EVA}	1,5	°C	[26]
Kondenser sıcaklığı	T_{KON}	40,11	°C	[26]
Absorber sıcaklığı	T_{ABS}	34,6	°C	[26]
Jeneratör sıcaklığı	T_{JEN}	80	°C	[26]
BÜS				
Çalışma sıcaklığı	T_{AD}	55	°C	[137]
Bekleme süresi	t_b	3-10	gün	[137]
PEMES				
Çalışma sıcaklığı	T_{PEME}	75	°C	[54]
Çalışma basıncı	P_{PEME}	101,3	kPa	[54]
Hidrojen alt ısı değeri	LHV_{H_2}	120000	kJ/kg	[54]
KOYPS				
Çalışma sıcaklığı	T_{KOYP}	1000	K	[49]
KOYP giriş ve çıkış sıcaklık farkı	ΔT_{KOYP}	100	°C	[49]
Aktif yüzey alanı	A_a	0,01	m ²	[49]
İnvertör verimi	η_{INV}	0,97	-	[49]
Yakıt kullanım oranı	$U_{yakıt}$	0,85	-	[49]
Hücre sayısı	N_{yh}	11000	adet	[49]
Temel akım yoğunluğu	j	8000	A/m ²	[49]
Anot akım yoğunluğu	j_{da}	6500	A/m ²	[141]
Katot akım yoğunluğu	j_{dc}	2500	A/m ²	[141]
Anot boyunca etkin gaz difüzyonu	D_{aegd}	0,2x10 ⁻⁴	m ² /s	[141]
Katot boyunca etkin gaz difüzyonu	D_{kegd}	0,05x10 ⁻⁴	m ² /s	[141]
Anot kalınlığı	l_a	0,05x10 ⁻²	m	[141]
Katot kalınlığı	l_k	0,005x10 ⁻²	m	[141]
Elektrolit kalınlığı	l_e	0,001x10 ⁻²	m	[141]
Ara bağlantı kalınlığı	l_i	0,3x10 ⁻²	m	[141]
Son yakıcı basınç kaybı	-	3	%	[49]

Tablo 4.2: Devam.

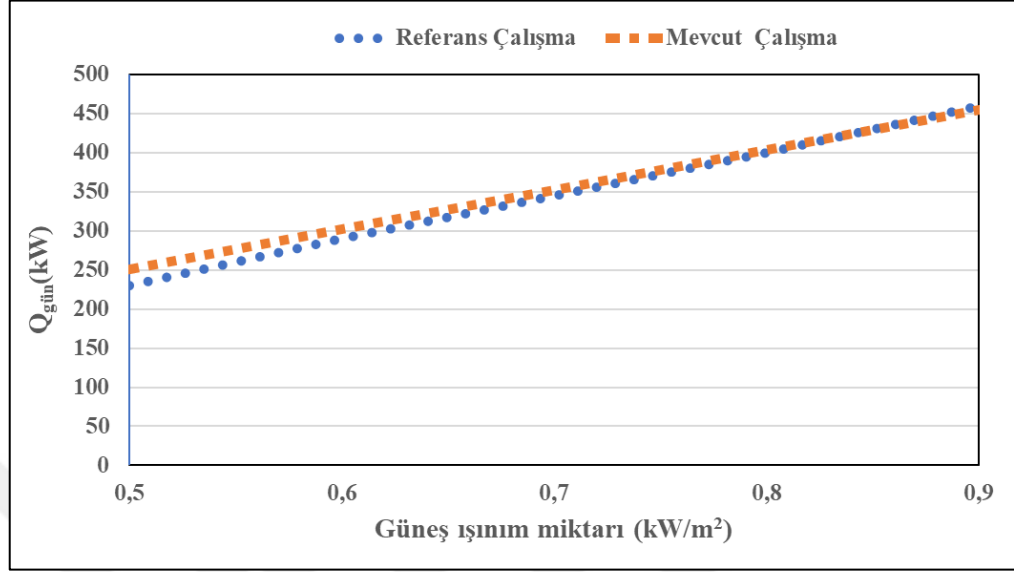
Parametreler	Sembol	Değer	Birim	Referans
IGBJ				
Pinch noktası sıcaklık farkı	$\Delta T_{pn,IGBJ}$	15	°C	[84]
Basınç kaybı	ΔP_{IGBJ}	5	%	[84]
Buhar çıkış basıncı	P_{98}	10	bar	[84]
IDS				
Sıcak depolama tankı sıcaklığı	T_{SDT}	386	°C	[114]
Soğuk depolama tankı sıcaklığı	T_{SODT}	292	°C	[114]
BYS				
Biyokütle kazanı çıkış sıcaklığı	T_{53}	1800	°C	[23]
Biyokütle giriş sıcaklığı	T_{63}	25	°C	[23]
Biyokütle giriş basıncı	P_{63}	101,3	kPa	[23]
Standart kimyasal ekserji değerleri				
Metan kimyasal ekserji	$\overline{ex}_{CH_4}^{kim}$	831,6	kJ/mol	[83]
Karbondiyoksit kimyasal ekserji	$\overline{ex}_{CO_2}^{kim}$	19,87	kJ/mol	[83]
Karbon monoksit kimyasal ekserji	$\overline{ex}_{CO}^{kim}$	275,1	kJ/mol	[83]
Azot kimyasal ekserji	$\overline{ex}_{N_2}^{kim}$	0,72	kJ/mol	[83]
Oksijen kimyasal ekserji	$\overline{ex}_{O_2}^{kim}$	3,97	kJ/mol	[83]
Hidrojen kimyasal ekserji	$\overline{ex}_{H_2}^{kim}$	236,1	kJ/mol	[83]
Su kimyasal ekserji (g)	$\overline{ex}_{H_2O,g}^{kim}$	9,5	kJ/mol	[83]
Su kimyasal ekserji (s)	$\overline{ex}_{H_2O,s}^{kim}$	0,9	kJ/mol	[83]

4.2. Doğrulama Çalışmaları

Bu bölümde, sürdürülebilirlik analizine başlamadan önce HÇÜS'ü oluşturan alt sistemlerin doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Doğrulama çalışmaları alt sistemler için kurulan matematiksel ve termodinamik modellemelerin doğruluğunun ispatlanması için oldukça önemlidir. Doğrulama çalışmalarında HÇÜS'te bulunan kritik alt sistemlerin termodinamik analizlerinden ve literatürde aynı çalışma şartlarına sahip benzer çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır. Bu bağlamda, HÇÜS'ün kritik alt sistemleri olan PGK, BYS, KGS, ASS, KOYP ve PEME için doğrulama çalışmaları yapılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

PGK için değişen güneş ışıyım miktarına bağlı olarak tek bir kollektör serisinden elde edilen ısı miktarı değişiminin mevcut literatürdeki aynı çalışma şartlarına sahip bir çalışma ile karşılaştırmalı doğrulama sonuçları Şekil 4.1'de verilmiştir [104]. Yapılan doğrulama çalışmasında, PGK için kurulan matematiksel model ile mevcut literatürde gerçekleştirilen çalışma arasında nerdeyse benzer

sonuçlar elde edilmiştir. İki alışma arasındaki en yüksek farkın 0,5 kW/m² güneş işınım miktarında yaklaşık %8,11 olduğu grlmştir.



şekil 4.1: PGK doğrulama sonuçları.

BYS'nin doğrulama çalışmasının sonuçları Tablo 4.3'te verilmiştir. YYS'nin termodinamik analizlerinden ve mevcut literatürde bulunan aynı sıcaklık ve basınç değerlerine sahip çalışmalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Doğrulama alışması YYS için giren hava, biyokütle ve çıkan baca gazı entalpi ve ekserji değerleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. YYS için gerçekleştirilen doğrulama çalışmasında iki çalışma arasında en yüksek fark %9 olarak bulunmuştur.

Tablo 4.3: YYS doğrulama sonuçları.

Nokta	Sıcaklık (°C)		Basınç (kPa)		Entalpi (kJ/kg)		Ekserji (kJ/kg)		
	Tez	Ref.	Tez	Ref.	Tez	Ref.	Tez	Ref.	Ref.
Biyokütle girişi	25	25	100	100	18684	18588	22642	24747	[82]
Hava girişi	25	25	100	100	298,4	298,4	0	0	[82]
Baca gazı çıkışı	1800	1800	100	100	2260	2078	1224	1145	[23]

HS'n önemli bir alt sistemi olan KGS için gerçekleştirilen doğrulama çalışmasının sonuçları Tablo 4.4'te verilmiştir. KGS için yapılan termodinamik analizler ile mevcut literatürdeki çalışma arasında nerdeyse benzer sonuçlara ulaşılmıştır. KGS doğrulama çalışması sistem ekipmanlarına giren ve çıkan akışkanın

entalpi, entropi ve debi değerleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. İki alışma arasındaki en yüksek fark %1,06 olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.4: KGS doğrulama sonuçları.

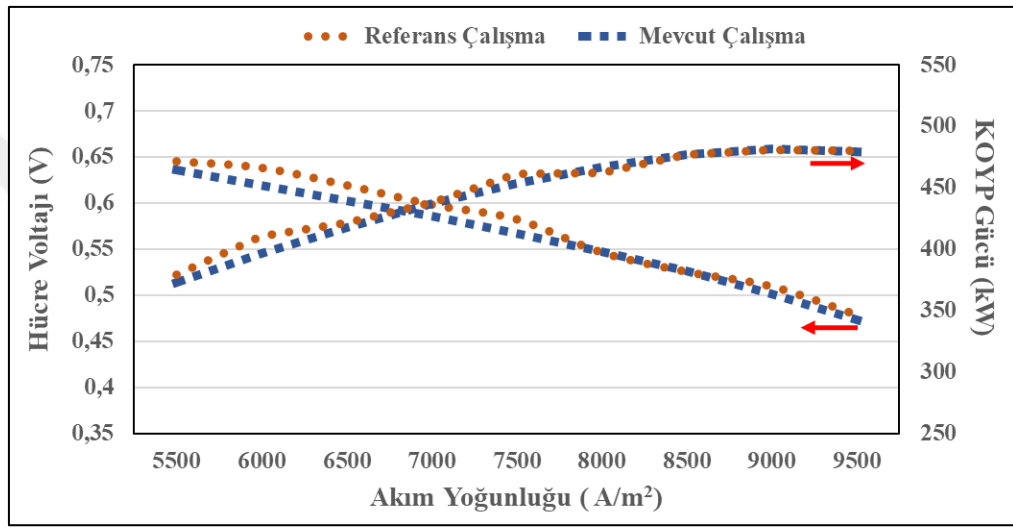
Nokta	Sıcaklık (°C)		Basınç (kPa)		Entalpi (kJ/kg)		Entropi (kJ/kgK)		Debi (kg/s)	
	Tez	Ref. [154]	Tez	Ref. [154]	Tez	Ref. [154]	Tez	Ref. [154]	Tez	Ref. [154]
3	162	162	650,3	650,3	684,4	684,2	1,96	1,96	100	100
4	129,6	129,6	266,7	266,7	2720	2720	7,03	7,03	6,4	6,4
5	45,8	45,8	10	10	2301	2301	7,26	7,26	6,4	6,4
6	45,8	45,8	10	10	191,8	191,8	0,65	0,65	6,4	6,4
17	29,6	29,6	400	400	270,3	270,3	1,24	1,24	49,8	49,8
18	30,28	30,03	1400	1400	273	270,3	1,24	1,24	49,8	49,8
19	119,6	119,6	1400	1400	749,4	749,4	2,63	2,63	49,8	49,8
16	83,94	84	400	400	698,9	698,8	2,63	2,63	49,8	49,8
8	129,6	129,6	266,7	266,7	544,6	544,5	1,63	1,63	93,5	93,6
9	69,36	69,5	266,7	266,7	290,5	290,8	0,95	0,94	93,5	93,6

Tablo 4.5'te ASS için yapılan doğrulama çalışmalarının sonuçları verilmiştir. ASS'nin doğrulama çalışmasında KGS için yapılan doğrulama çalışmasına benzer bir yöntem izlenmiştir. ASS'de bulunan tüm ekipmanlara giren ve çıkan akışkanların debi, sıcaklık, basınç, entalpi ve entropi değerleri literatürde yer alan benzer bir çalışma ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre her iki çalışma arasında en yüksek farkın %8,4 olduğu belirlenmiştir.

Tablo 4.5: ASS doğrulama sonuçları.

Nokta	Debi (kg/s)		Basınç (kPa)		Sıcaklık (°C)		Entalpi (kJ/kg)		Entropi (kJ/kgK)	
	Tez	Ref. [26]	Tez	Ref. [26]	Tez	Ref. [26]	Tez	Ref. [26]	Tez	Ref. [26]
24	0,24	0,262	7,381	7,424	80	80	2643,1	2649	8,483	8,481
25	0,24	0,262	7,381	7,424	40,11	40,11	167,5	168	0,5723	0,5737
26	0,24	0,262	0,6812	0,6812	1,5	1,5	167,5	168	0,6099	0,6116
27	0,24	0,262	0,6812	0,6812	1,5	1,5	2503,3	2503	9,114	9,114
28	27,99	28,73	0,6812	0,6812	34,6	34,6	92,3	93,07	0,1996	0,1977
29	27,99	28,73	7,381	7,424	34,6	34,6	92,3	97,16	0,1996	0,1977
30	27,99	28,73	7,381	7,424	66,38	67,6	155,4	159	0,395	0,3949
31	27,75	28,47	7,381	7,424	80	80	184,7	185,6	0,4705	0,4665
32	27,75	28,47	7,381	7,424	48,22	45,62	121,3	123,2	0,2824	0,264
33	27,75	28,47	0,6812	0,6812	35,59	35,62	121,3	123,2	0,2038	0,202

Şekil 4.2’de KOYP için gerçekleştirilen doğrulama çalışmalarından elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. KOYP doğrulama çalışmaları kapsamında, akım yoğunluğuna göre KOYP hücre voltajı ve gücü değişimi literatürde yer alan aynı çalışma koşullarındaki bir KOYP verileri ile karşılaştırılmıştır [49]. Söz konusu iki çalışma arasında elde edilen KOYP hücre voltajı ve güç değerleri için en yüksek farkın 6000 W/m^2 akım yoğunluğunda %3,61 oranında olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 4.2’de gösterildiği gibi diğer akım yoğunluğu değerlerinde her iki çalışmada elde edilen sonuçların neredeyse birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.2: KOYP doğrulama sonuçları.

Tablo 4.6’da yüksek basınçlı PEME için gerçekleştirilen doğrulama çalışmalarının sonuçları verilmiştir. Bu doğrulama çalışmasında yüksek basınçlı PEME için gerekli olan elektrik ihtiyacının çalışma basıncına göre değişimi literatürdeki bir çalışma ile karşılaştırılmıştır [155]. Tablo 4.6’da gösterildiği gibi gerçekleştirilen doğrulama çalışmalarında iki çalışma arasında çok küçük farkların olduğu belirlenmiştir. Örneğin, her iki çalışma arasında en yüksek fark 1 bar PEME çalışma basıncında %1,04 olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.6: PEME doğrulama sonuçları.

Çalışma Basıncı (bar)	PEME elektrik ihtiyacı (kWh/kg H ₂)				
	1	50	100	500	700
Mevcut çalışma	43,38	46,27	46,78	47,97	48,22
Referans çalışma Ref. [155]	42,93	45,83	46,38	47,8	48,13

Söz konusu alt sistemler için yapılan doğrulama çalışmaları sürdürülebilirlik analizlerinde doğru sonuçların elde edilmesi ve elde edilen sonuçların doğru bir şekilde yorumlanması için tez bütünlüğü açısından oldukça önemlidir. Sonuç olarak gerçekleştirilen doğrulama çalışmalarında, mevcut çalışma ile literatürdeki deneysel ve teorik çalışma bulgularının küçük farklarla örtüştüğü sonucuna ulaşılmıştır. Doğrulama çalışmalarında elde edilen bu sonuçlar doğrultusunda HÇÜS'ün sürdürülebilirlik analizinden elde edilen sonuçlar aşağıda detaylı bir şekilde verilmiştir.

4.3. Sürdürülebilirlik Analiz Sonuçları

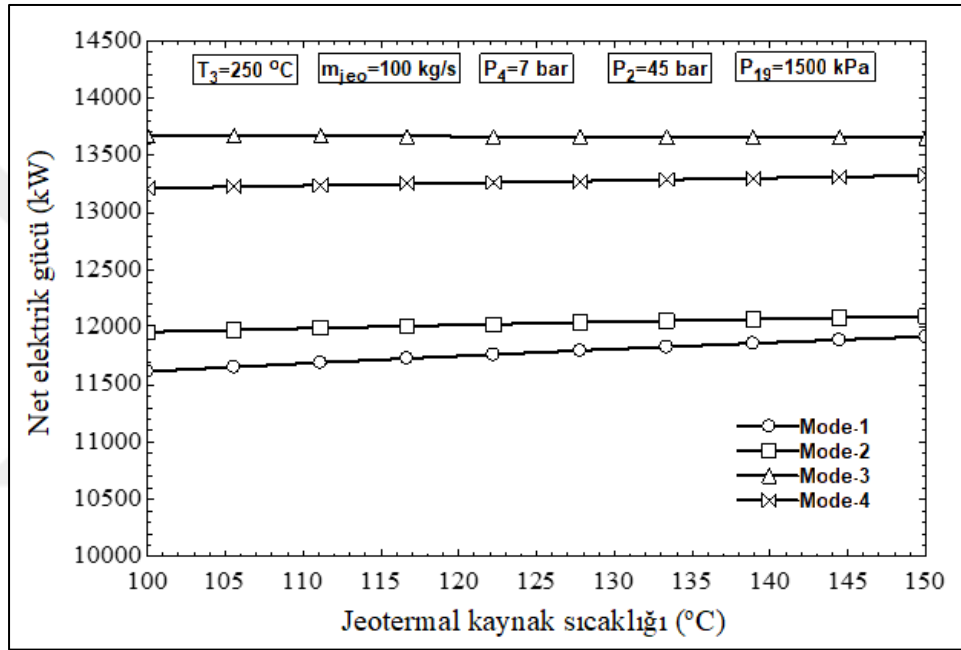
Bu bölümde, HÇÜS'ün dört çalışma modu için performans, çevresel, ekonomik ve ekserjetik sürdürülebilirlik göstergelerinin analizlerinden elde edilen sonuçlar ayrıntılı bir şekilde verilmiş ve tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlar performans gösterge; sistem net elektrik gücü, sistem elektrik, enerji ve ekserji verimi, çevresel gösterge; küresel ısınma potansiyeli ve CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli, ekonomik gösterge; eksergoekonomik gösterge, ekserjetik sürdürülebilirlik gösterge; atık ekserji oranı, ekserji geri kazanılabilirlik oranı, ekserji yıkım oranı, çevresel etki faktörü ve ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi olmak üzere on altı sürdürülebilirlik göstergesi altında sistem temel işletim parametreleri dikkate alınarak verilmiştir.

4.3.1. Performans Göstergesi Sonuçları

Bu bölümde, HÇÜS'ün performans göstergelerinin daha iyi anlaşılması ve sonuçların daha etkin bir şekilde yorumlanması için tüm çalışma modları için sistem temel işletim parametrelerine bağlı olarak sistem net elektrik gücü, sistem elektrik, enerji ve ekserji verimi ve toplam ekserji kaybı sonuçları detaylı bir şekilde verilmiş ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

Şekil 4.3'te çalışma modlarına göre sistem net elektrik gücünün jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.3'te jeotermal kaynak sıcaklığı arttığında sistem net elektrik gücü M1, M2 ve M4 çalışma modunda artarken M3 çalışma modunda sistem net elektrik gücünün çok değişmediği görülmektedir. Jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak en yüksek sistem net elektrik gücü M3

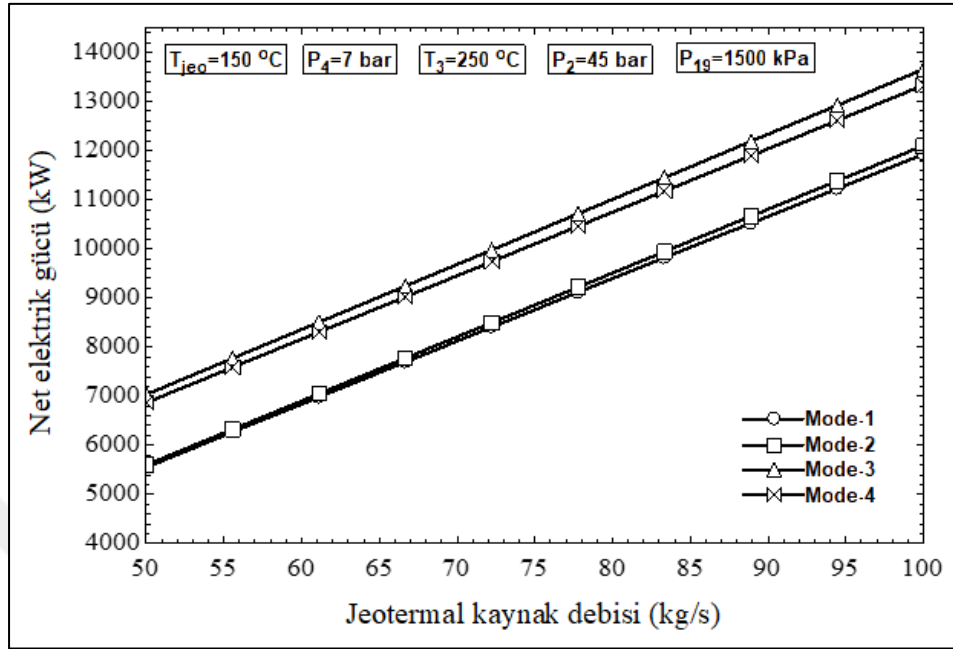
Çalışma modunda iken bu çalışma modunu sırasıyla M4, M2 ve M1 alışma modları takip etmektedir. Jeotermal kaynak sıcaklığının 150 °C olduğu durumda en ysek sistem net elektrik gücü M3 alışma modunda 13653 kW olarak elde edilmiştir. Bu alışma modunu aynı sıcaklık değerinde sırasıyla 13325 kW, 12096 kW ve 11920 kW net elektrik gücü ile M4, M2 ve M1 alışma modları takip etmektedir. Bu parametrik analizde M1, M2, M3 ve M4 alışma modları için en düşük sistem net elektrik gücü 100 °C jeotermal kaynak sıcaklığında sırasıyla 11615 kW, 11960 kW, 13653 kW ve 13213 kW olarak bulunmuştur.



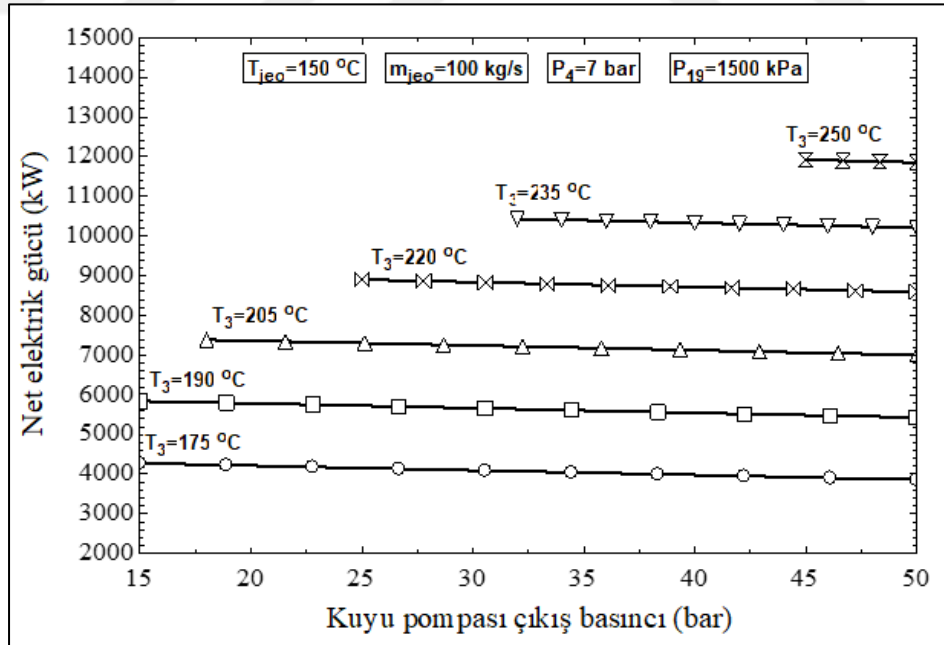
şekil 4.3: Çalışma modlarına göre sistem net elektrik gücünün jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi.

Çalışma modlarına göre jeotermal kaynak debisine bağlı olarak sistem net elektrik gücünün değişimi şekil 4.4'te verilmiştir. şekil 4.4'te jeotermal kaynak debisinin artmasıyla tüm çalışma modlarında sistem net elektrik gücünün arttığı görülmektedir. Örneğin, M1 alışma modunda 50 kg/s jeotermal kaynak debisinde sistem net elektrik gücü 5552 kW iken 100 kg/s jeotermal kaynak debisinde bu değer 11920 kW olarak elde edilmiştir. En ysek sistem net elektrik gücü M3 alışma modunda 100 kg/s jeotermal kaynak debisinde 13653 kW olarak elde edilirken bu çalışma modunu sırasıyla M4, M2 ve M1 alışma modları 13325 kW, 12096 kW ve 11920 kW net elektrik gücü değerleri ile takip etmektedir. M1, M2, M3 ve M4 alışma

modlarında en düşük sistem net elektrik gücü 50 kg/s jeotermal kaynak debisinde sırasıyla 5552 kW, 5596 kW, 7032 kW ve 6868 kW olarak belirlenmiştir.



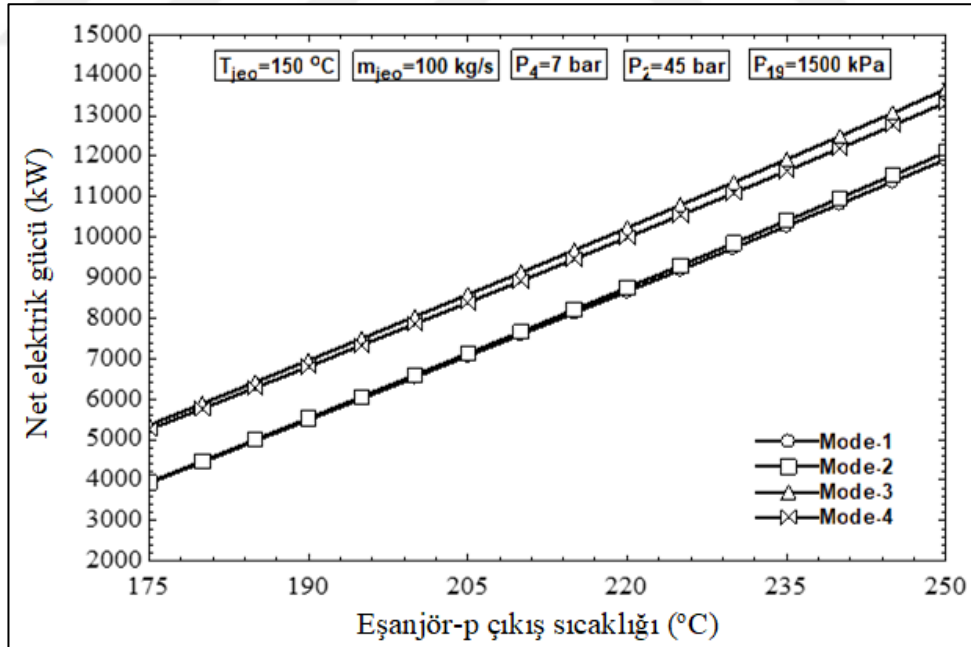
Şekil 4.4: Çalışma modlarına göre sistem net elektrik gücünün jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi.



Şekil 4.5: M1 çalışma modunda sistem net elektrik gücünün eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi.

Şekil 4.5'te M1 çalışma modunda eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı olarak sistem net elektrik gücünün değişimi gösterilmektedir.

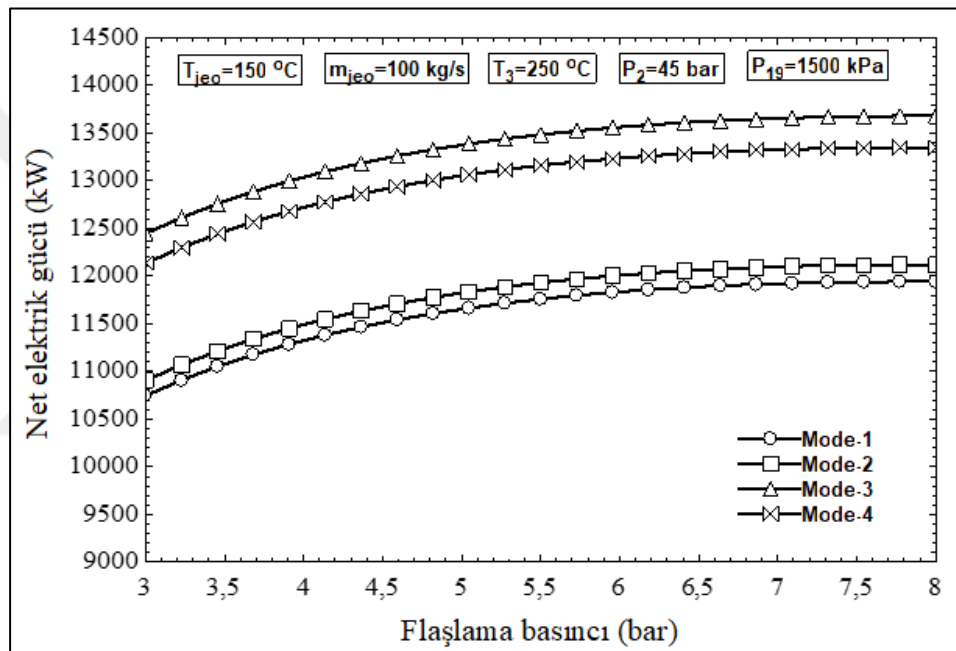
Şekil 4.5'te gösterildiği gibi kuyu pompası çıkış basıncı arttığında tüm eşanjör-p çıkış sıcaklığı değerlerinde sistem net elektrik gücünün azaldığı, eşanjör-p çıkış sıcaklığının artmasıyla sistem net elektrik gücünün arttığı görülmektedir. Bu tez çalışmasında tasarım kriterlerine bağlı olarak HÇÜS'ün eşanjör-p çıkış sıcaklığı değerlerine göre kuyu pompası çıkış basıncı aralıkları değişmektedir. Örneğin, 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında uygun flaşlama işlemine olanak sağlayacak kuyu pompası çıkış basıncı aralıkları 45 bar ve 50 bar olarak belirlenmiştir. Bu sıcaklıkta, HÇÜS'ün net elektrik gücü 45 bar kuyu pompası çıkış basıncında 11920 kW iken 50 bar kuyu pompası çıkış basıncında 11856 kW olarak elde edilmiştir. Eşanjör-p çıkış sıcaklığının 175 °C olduğu durumda kuyu pompası çıkış basıncı çalışma aralıkları olan 15 bar ve 50 bar basınç değerlerinde sistem net elektrik gücü sırasıyla 4275 kW ve 3865 kW olarak bulunmuştur. Bu tez çalışmasında 175 °C, 190 °C, 205 °C, 220 °C, 235 °C, ve 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığı değerlerinde kuyu pompası çıkış basıncı aralıkları sırasıyla 15-50 bar, 15-50 bar, 18-50 bar, 25-50 bar, 32-50 bar ve 45-50 bar olarak belirlenmiştir ve sürdürülebilirlik analiz çalışmaları bu basınç aralıkları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.6: Çalışma modlarına göre sistem net elektrik gücünün eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı değişimi.

Şekil 4.6'da eşanjör-p çıkış sıcaklığı arttığında tüm çalışma modları için sistem net elektrik gücünün arttığı görülmektedir. Örneğin, M1 çalışma modunda 175 °C

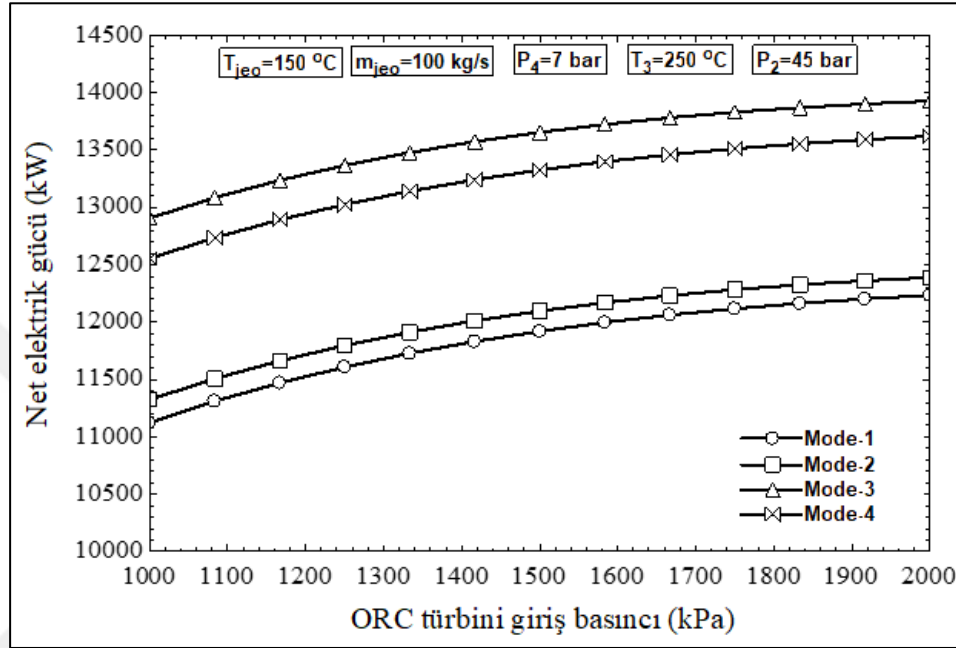
eşanjör-p çıkış sıcaklığında sistem net elektrik gücü 3924 kW iken 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında bu değer 11920 kW'a kadar çıkmaktadır. En yüksek sistem net elektrik gücü 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında 13653 kW olarak M3 çalışma modunda elde edilirken en düşük sistem net elektrik gücü 175 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında 3924 kW olarak M1 çalışma modunda olduğu belirlenmiştir. M2 ve M4 çalışma modları için en yüksek sistem net elektrik gücü 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında sırasıyla 12096 kW ve 13325 kW iken en düşük sistem net elektrik gücü 175 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında sırasıyla 3944 kW ve 5247 kW olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.7: Çalışma modlarına göre sistem net elektrik gücünün flaşlama basıncına bağlı değişimi.

Çalışma modlarına göre HÇÜS'ün önemli temel işletim parametrelerinden biri olan flaşlama basıncına bağlı olarak sistem net elektrik gücünün değişimi Şekil 4.7'de verilmiştir. Şekil 4.7'de flaşlama basıncı arttığında tüm çalışma modlarında sistem net elektrik gücü belirli bir flaşlama basıncına kadar arttığı ve daha sonra çok az miktarda azaldığı görülmektedir. Flaşlama basıncına bağlı olarak en yüksek sistem net elektrik gücü M3 çalışma modunda iken bu çalışma modunu sırasıyla M4, M2 ve M1 çalışma modları takip etmektedir. M3 çalışma modunda 3 bar flaşlama basıncında sistem net elektrik gücü 12446 kW iken 8 bar flaşlama basıncında bu değer 13675 kW olarak elde edilmiştir. M3 çalışma modunda en yüksek sistem net elektrik gücü yaklaşık

olarak 7,6 bar flaşlama basıncında 13678 kW olarak hesaplanmıştır. Ayrıca M1, M2 ve M4 çalışma modları için en yüksek sistem net elektrik gücü 7,6 bar flaşlama basıncında sırasıyla 11940 kW, 12116 kW ve 13675 kW iken en düşük sistem net elektrik gücü 3 bar flaşlama basıncında sırasıyla 10746 kW, 10905 kW ve 12134 kW olarak belirlenmiştir.

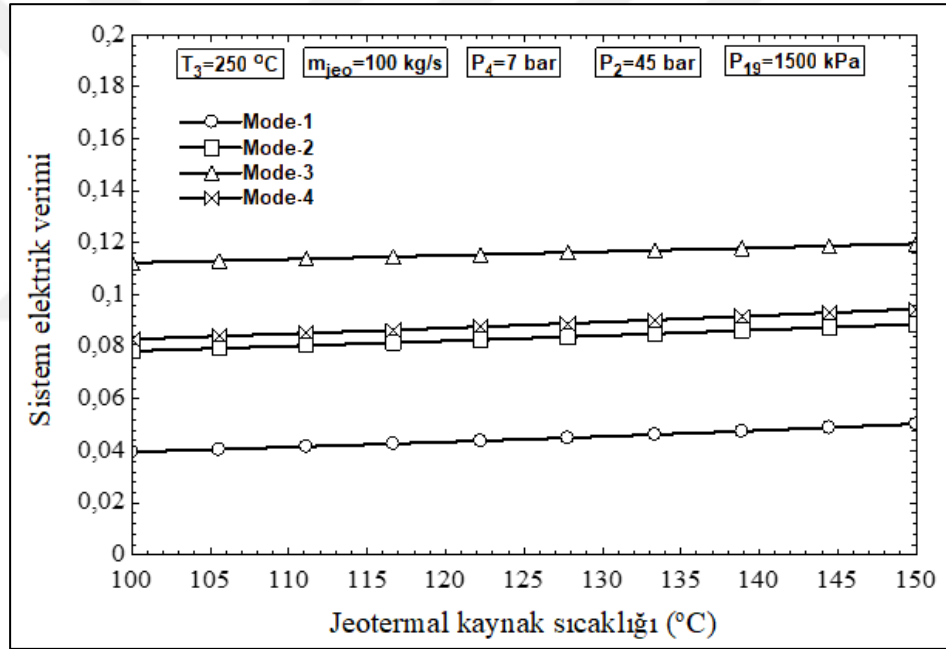


Şekil 4.8: Çalışma modlarına göre sistem net elektrik gücünün ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi.

ORC türbin giriş basıncının artmasıyla sistem net elektrik gücünün tüm çalışma modlarında arttığı Şekil 4.8'de görülmektedir. Örneğin; M2 çalışma modu için 1000 kPa ve 2000 kPa ORC türbin giriş basıncında sistem net elektrik gücü sırasıyla 11324 kW ve 12389 kW olarak belirlenmiştir. ORC türbin giriş basıncına bağlı olarak en yüksek sistem net elektrik gücü M3 çalışma modunda açığa çıkmıştır. Bu çalışma modunu sırasıyla M4, M2 ve M1 çalışma modları takip etmektedir. M1, M3 ve M4 çalışma modları için en yüksek sistem net elektrik gücü ORC türbin giriş basıncının 2000 kPa olduğu durumda sırasıyla 12233 kW, 13926 kW ve 13618 kW iken en düşük sistem net elektrik gücünün olduğunun 1000 kPa ORC türbin giriş basıncında bu değerler sırasıyla 11122 kW, 12905 kW ve 12553 kW olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.9'da çalışma modlarına göre jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak sistem elektrik veriminin değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.9'da jeotermal kaynak sıcaklığı arttığında tüm çalışma modlarında sistem elektrik veriminin arttığı

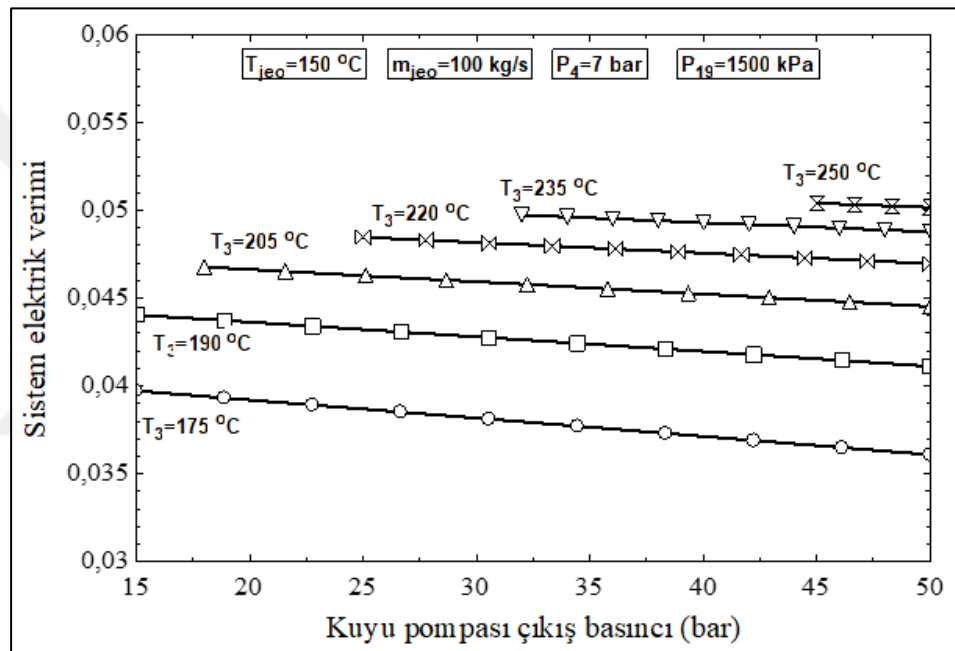
görülmektedir. Tüm çalışma modlarında sistem elektrik verimindeki bu artış sistem tasarım şartları gereği jeotermal kaynak sıcaklığının artmasıyla ID-PGKS'den sisteme sağlanan toplam enerji girişinin azalmasından ve sistemin net elektrik gücünün artmasından kaynaklanmaktadır. Jeotermal kaynak sıcaklığına göre en yüksek ve en düşük sistem elektrik verimi sırasıyla M3 ve M1 çalışma modlarında açığa çıkmıştır. Örneğin; jeotermal kaynak sıcaklığının 100 °C olduğu durumda M3 ve M1 çalışma modlarında sistem elektrik verimi sırasıyla %11,2 ve %4 iken 150 °C jeotermal kaynak sıcaklığında bu değerler sırasıyla %12 ve %5 olarak belirlenmiştir. M2 ve M4 çalışma modları için 100 °C jeotermal kaynak sıcaklığında sistem elektrik verimi sırasıyla %7,8 ve %8,2 iken 150 °C jeotermal kaynak sıcaklığında sırasıyla %8,8 ve %9,4 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.9: Çalışma modlarına göre sistem elektrik veriminin jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi.

Şekil 4.10'da M1 çalışma modunda sistem elektrik veriminin eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi verilmiştir. Şekil 4.10'da eşanjör-p çıkış sıcaklığı arttığında sistem elektrik verimi artarken kuyu pompası çıkış basıncı arttığında sistem elektrik veriminin azaldığı görülmektedir. Kuyu pompası çıkış basıncının artmasıyla sistem elektrik veriminin azalmasının sebebi; HÇÜS'te jeotermal akışkanı uygun flaşlama basıncına getirebilmek için kuyu pompasına verilmesi gereken gücün artmasıdır. Örneğin, kuyu pompası çıkış basıncının 45 bar ve

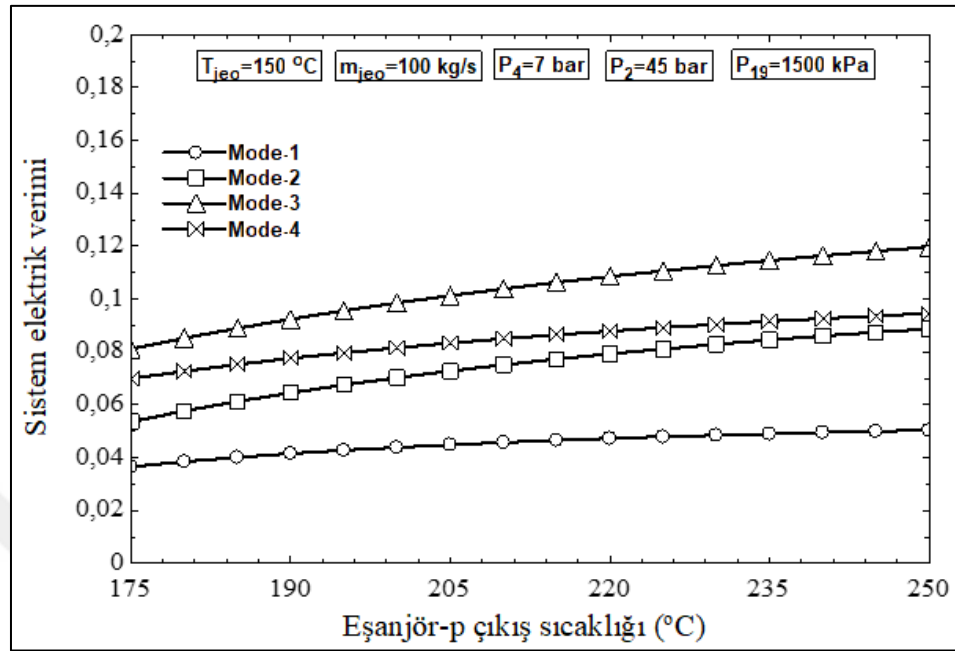
eşanjör-p çıkış sıcaklığının 175 °C olduğu durumda sistem elektrik verimi %3,7 iken aynı kuyu pompası çıkış basıncında eşanjör-p çıkış sıcaklığının 250 °C olduğu durumda sistem elektrik verimi %5 olarak belirlenmiştir. M1 çalışma modu için 190 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında kuyu pompası çıkış basıncının 15 bar olduğu durumda sistem elektrik verimi %4,4 iken 45 bar basınçta sistem elektrik verimi %4,1 olarak elde edilmiştir. Bu çalışmada, en yüksek sistem elektrik verimi 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında ve 45 bar kuyu pompası çıkış basıncında %5,1 iken en düşük sistem elektrik veriminin 175 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında ve 50 bar kuyu pompası çıkış basıncında %3,6 olduğu belirlenmiştir.



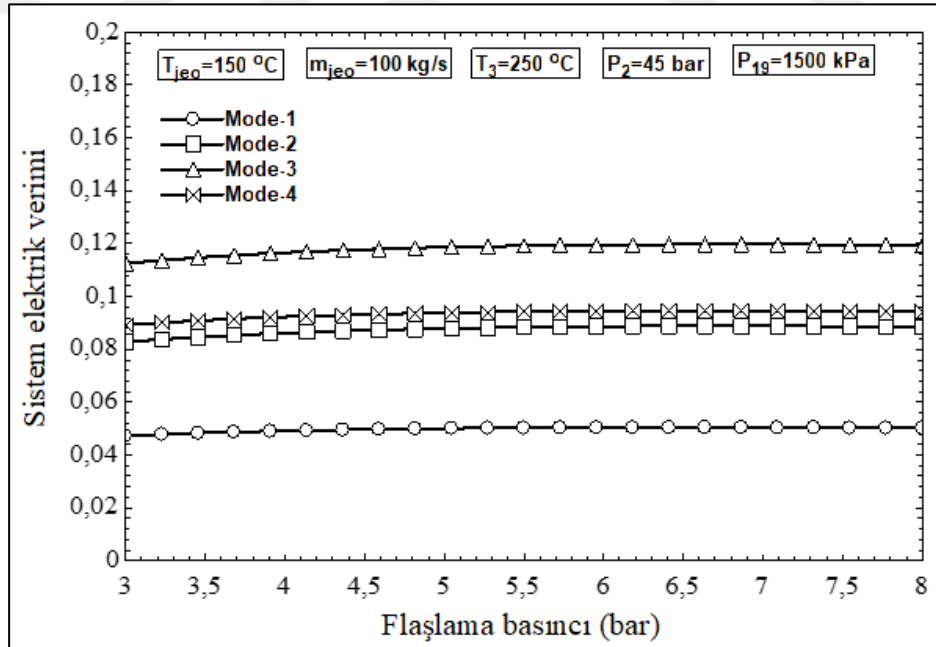
Şekil 4.10: M1 çalışma modunda sistem elektrik veriminin eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi.

Şekil 4.11’de çalışma modlarına göre sistem elektrik veriminin eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.11’de eşanjör-p çıkış sıcaklığı arttığında sistem elektrik veriminin tüm çalışma modlarında arttığı görülmektedir. Örneğin; M1 çalışma modunda 175 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında sistem elektrik verimi %3,6 iken 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında %5 olarak elde edilmiştir. Eşanjör-p çıkış sıcaklığına göre çalışma modları arasında en yüksek sistem elektrik verimi M3 çalışma modunda 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında %11,9 iken en düşük sistem elektrik verimi M1 çalışma modunda 175 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında %3,6 olarak hesaplanmıştır. Eşanjör-p çıkış sıcaklığının 175 °C olduğu durumda M3 çalışma

modunu sırasıyla %6,9, %5,3 ve %3,6 elektrik verimi değerleri ile M4, M2 ve M1 çalışma modları takip etmektedir.



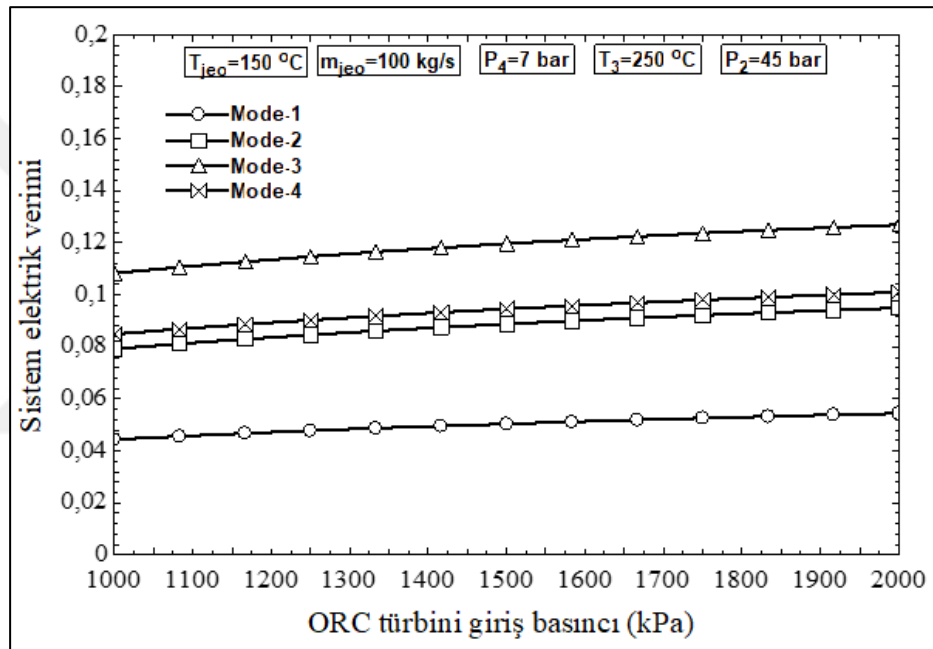
Şekil 4.11: Çalışma modlarına göre sistem elektrik veriminin eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı değişimi.



Şekil 4.12: Çalışma modlarına göre sistem elektrik veriminin flaşlama basıncına bağlı değişimi.

Çalışma modlarına göre sistem elektrik veriminin flaşlama basıncına bağlı değişimi Şekil 4.12’de verilmiştir. Şekil 4.12’de gösterildiği gibi flaşlama basıncı

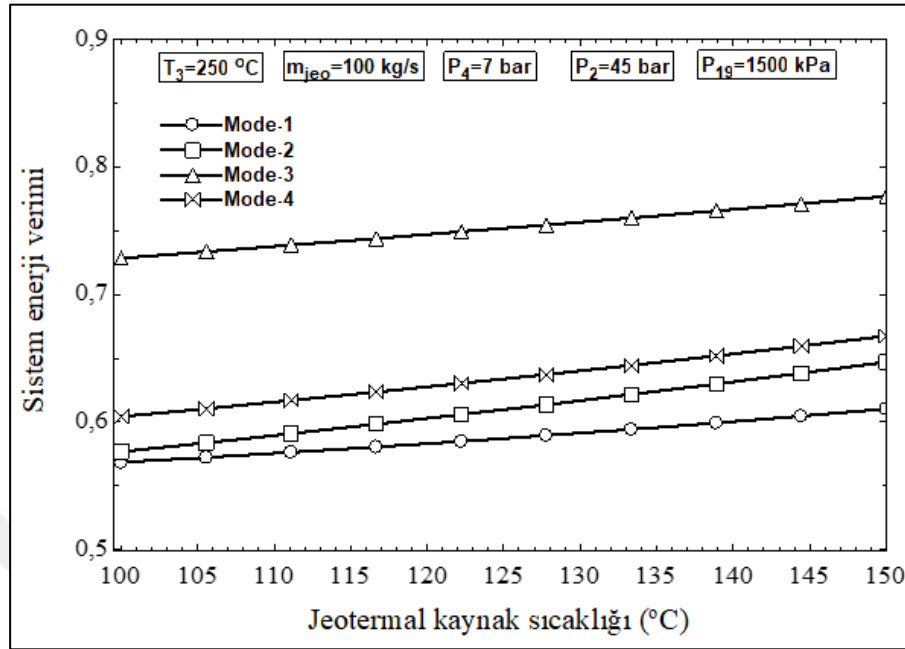
arttığında tüm çalışma modlarında sistem elektrik verimi belirli bir basınç değerine kadar artmakta ve daha sonra biraz düşmektedir. Flaşlama basıncına bağlı olarak en yüksek ve en düşük sistem elektrik verimi sırasıyla M3 ve M1 çalışma modlarında açığa çıkmıştır. M3 ve M1 çalışma modlarında 3 bar flaşlama basıncında sistem elektrik verimi sırasıyla %11,2 ve %4,7 iken 8 bar basınçta sırasıyla %11,9 ve %5 olarak elde edilmiştir. Bu parametrik analizde, M2 ve M4 çalışma modlarında en yüksek sistem elektrik verimi yaklaşık 7 bar flaşlama basıncında sırasıyla %8,8 ve %9,4 olarak hesaplanmıştır ve diğer çalışma modları için de en yüksek sistem elektrik veriminin aynı flaşlama basıncında olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.13: Çalışma modlarına göre sistem elektrik veriminin ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi.

Şekil 4.13'te gösterildiği gibi ORC türbin giriş basıncı arttığında tüm çalışma modlarında sistem elektrik verimi artmaktadır. ORC türbin giriş basıncına bağlı olarak en yüksek ve en düşük sistem elektrik verim değerleri diğer analizlerde elde edilen sonuçlara benzer şekilde sırasıyla M3 ve M1 çalışma modlarında elde edilmiştir. Örneğin, M3 ve M1 çalışma modlarında ORC türbin giriş basıncı 1000 kPa olduğu durumda sistem elektrik verimi sırasıyla %10,8 ve %4,4 iken 2000 kPa basınçta sistem elektrik verimi sırasıyla %12,7 ve %5,4 olarak belirlenmiştir. M2 ve M4 çalışma modları için 1000 ORC türbin giriş basıncında sistem elektrik verimi sırasıyla %7,9

ve %8,4 iken 2000 kPa basınçta sistem elektrik verimi sırasıyla %9,4 ve %10,1 olarak hesaplanmıştır.

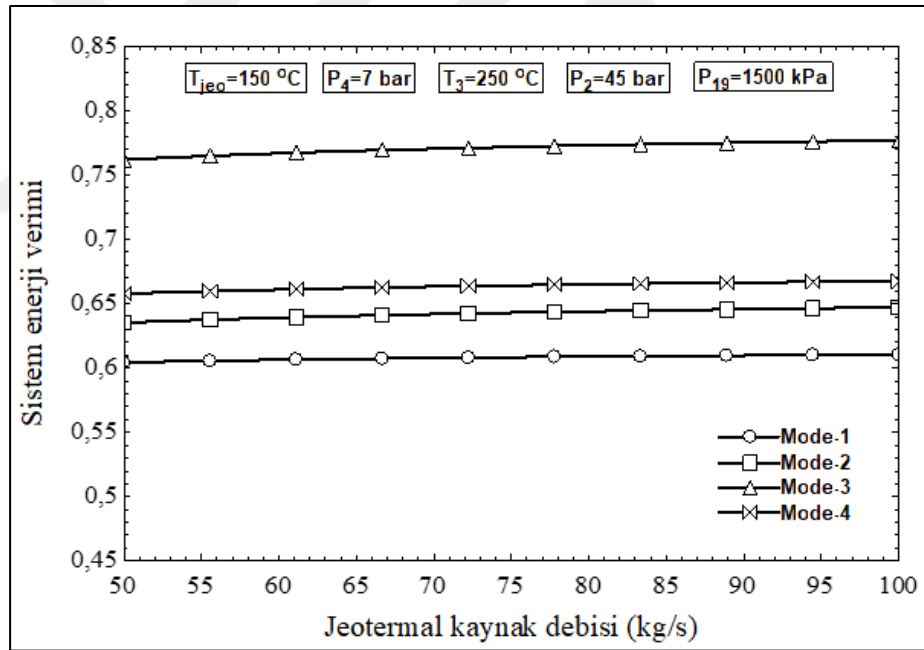


Şekil 4.14: Çalışma modlarına göre sistem enerji veriminin jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi.

Çalışma modlarına göre jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak sistem enerji veriminin değişimi Şekil 4.14'te verilmiştir. Jeotermal kaynak sıcaklığı arttığında sistem enerji veriminin tüm çalışma modlarında arttığı görülmektedir. Şekil 4.14'te gösterildiği gibi en yüksek sistem enerji verimi M3 çalışma modunda açığa çıkmıştır. M3 çalışma modunda 100 °C ve 150 °C jeotermal kaynak sıcaklığında sistem enerji verimi sırasıyla %72,8 ve %77,6 olarak hesaplanmıştır. En düşük sistem enerji verimine sahip M1 çalışma modunda aynı çalışma şartlarında bu değerler sırasıyla %56,8 ve %61 olarak hesaplanmıştır. M2 ve M4 çalışma modlarında ise 100 °C jeotermal kaynak sıcaklığında sistem enerji verimi sırasıyla %57,6 ve %60,4 iken 150 °C sıcaklıkta %64,7 ve %66,7 olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.15'te çalışma modlarına göre sistem enerji veriminin jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi gösterilmektedir. Jeotermal kaynak debisi arttığında tüm çalışma modlarında sistem enerji veriminin arttığı görülmektedir. M3 çalışma modunda jeotermal kaynak debisinin 50 kg/s olduğu durumda sistem enerji verimi %76,1 iken jeotermal kaynak debisinin 100 kg/s olduğu durumda sistem enerji verimi yaklaşık %77,6 olarak belirlenmiştir. Diğer çalışma modlarında ise sistem enerji

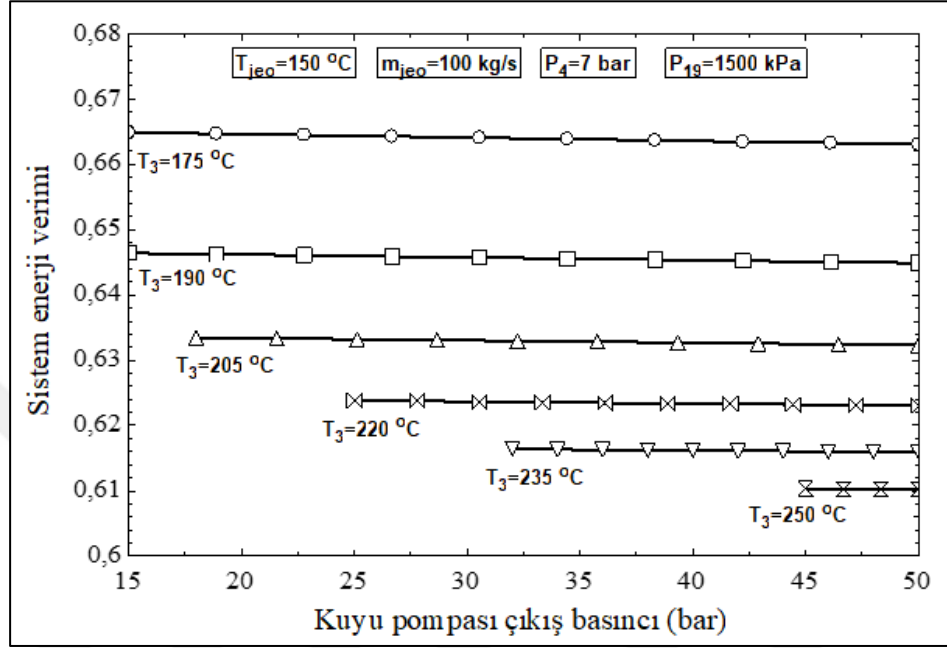
verimindeki değişimler benzer artışlar göstermiştir. Çalışma modları arasında en düşük sistem enerji verimine sahip olan M1 çalışma modunda bu değerler aynı çalışma şartlarında yaklaşık %60,4 ve %61 olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde, M2 ve M4 çalışma modlarında en yüksek sistem enerji verimi 100 kg/s debide sırasıyla yaklaşık %64,7 ve %66,7 olarak elde edilmiştir. Sistem enerji verimindeki söz konusu bu artış, jeotermal kaynak debisinin artmasıyla HÇÜS'ün tüm çalışma modlarında elde edilen faydalı çıktılarının artmasından kaynaklanmaktadır. Örneğin, M2 çalışma modunda jeotermal kaynak debisinin 50 kg/s olduğu durumda HÇÜS'ten 5596 kW net elektrik gücü, 3142 kW ısıtma, 1131 kW soğutma, 31990 kW sıcak su, 1047 kW kurutma havası ve 342,8 kW buhar olmak üzere toplam 44352 kW faydalı ürün elde edilirken 100 kg/s jeotermal kaynak debisinden bu değerler sırasıyla 12096 kW, 6284 kW, 2263 kW, 63973 kW, 2094 kW ve 342,8 kW olmak üzere toplam faydalı ürün 88161 kW olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.15: Çalışma modlarına göre sistem enerji veriminin jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi.

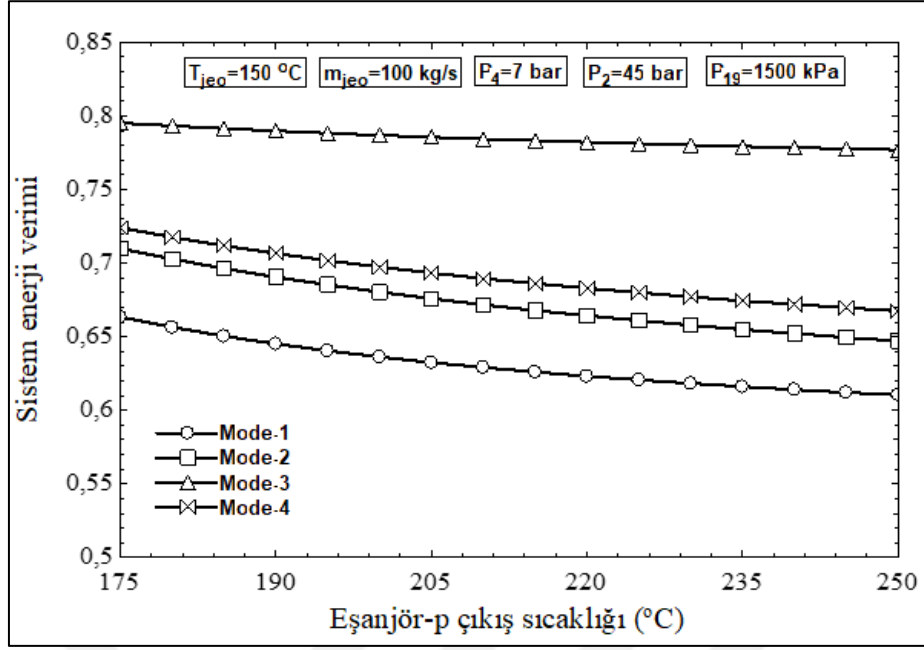
Şekil 4.16'da M1 çalışma modunda sistem enerji veriminin eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi verilmiştir. Şekil 4.16'da eşanjör-p çıkış sıcaklığı ve kuyu pompası çıkış basıncı arttığında sistem enerji veriminin azaldığı görülmektedir. Eşanjör-p çıkış sıcaklığı ve kuyu pompası çıkış basıncının 175 °C -15 bar, 190 °C-15 bar, 205 °C-18 bar, 220 °C-25 bar, 235 °C-32 bar

ve 250 °C-45 bar olduğu durumlarda sistem enerji verimi sırasıyla %66,4, %64,6, %63,3, %62,3, %61,6 ve %61 olarak elde edilmiştir. Bu parametrik analizde, aynı eşanjör-p çıkış sıcaklığı değerlerinde, 50 bar kuyu pompası çıkış basıncında yukarıdaki değerlere yakın sistem enerji verimleri elde edilmiştir.

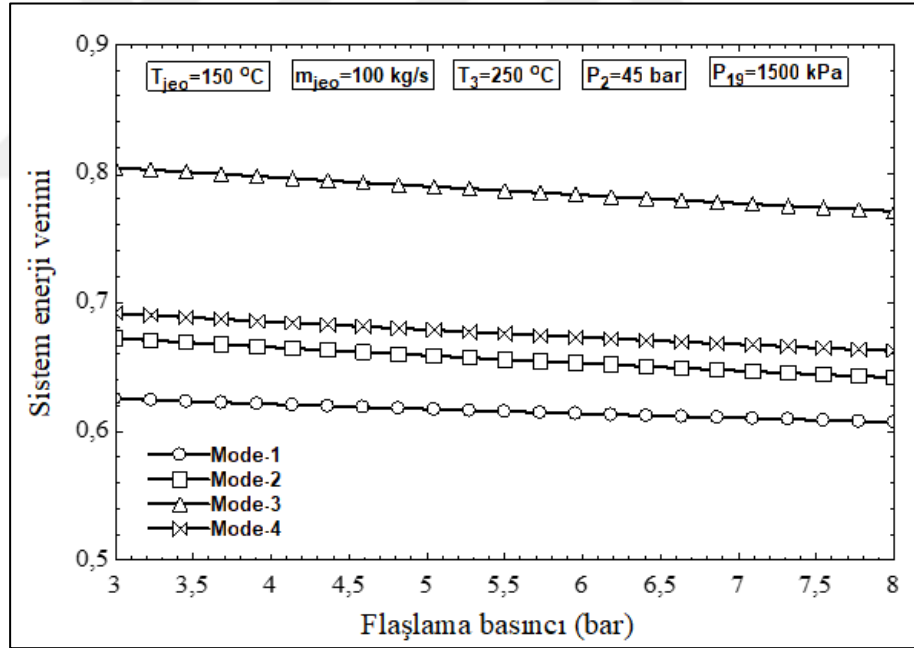


Şekil 4.16: M1 çalışma modunda sistem enerji veriminin eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi.

HÇÜS'ün tüm çalışma modlarına göre sistem enerji veriminin eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı değişimi Şekil 4.17'de verilmiştir. Şekil 4.17'de gösterildiği gibi eşanjör-p sıcaklığı arttığında tüm çalışma modlarında sistem enerji verimi azalmaktadır. Bu çalışmada, tüm çalışma modlarında sistem enerji verimindeki söz konusu bu azalmanın nedeni eşanjör-p çıkış sıcaklığının artmasıyla sisteme sağlanan toplam enerji girişinin artmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Çalışma modları arasında en yüksek sistem enerji verimi 175 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında %79 olarak M3 çalışma modunda elde edilmiştir. En düşük sistem enerji verimi ise 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında %61 olarak M1 çalışma modunda olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, M2 çalışma modu için en yüksek ve en düşük sistem enerji verimi 175 °C ve 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığı değerlerinde sırasıyla yaklaşık olarak %71 ve %64 iken aynı çalışma şartlarında M4 çalışma modu için bu değerler %72 ve %67 olarak hesaplanmıştır.



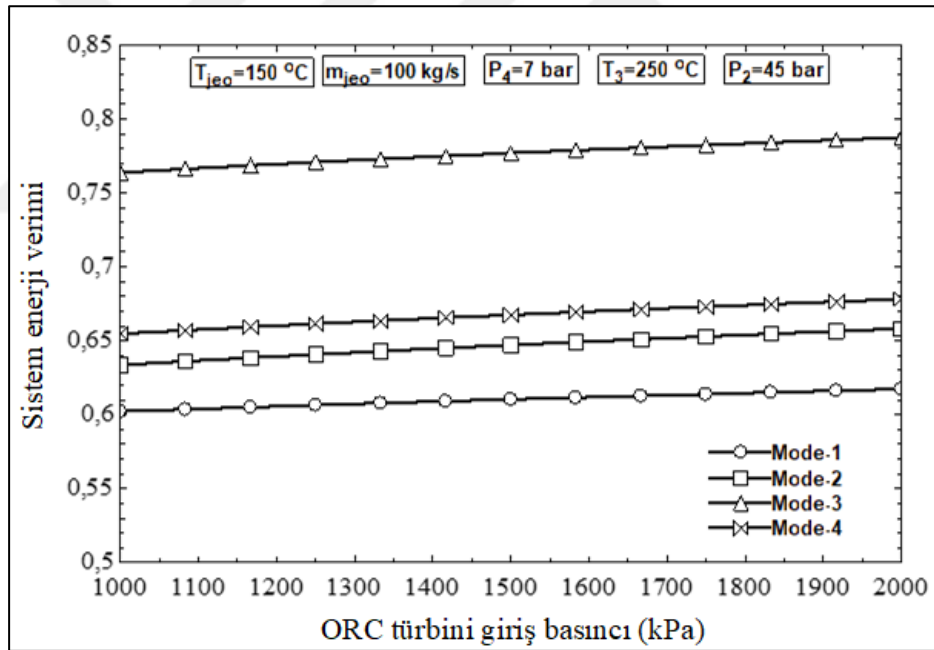
Şekil 4.17: Çalışma modlarına göre sistem enerji veriminin eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı değişimi.



Şekil 4.18: Çalışma modlarına göre sistem enerji veriminin flaşlama basıncına bağlı değişimi.

Tüm çalışma modları için flaşlama basıncına bağlı olarak sistem enerji verimindeki değişimler Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Flaşlama basıncı arttığında tüm çalışma modlarında sistem enerji veriminin azaldığı görülmektedir. Çalışma modları arasında en yüksek sistem enerji verimi değerine sahip olan M3 çalışma modunda, 3 bar ve 8 bar flaşlama basınçlarında bu değerler sırasıyla %80 ve %77 iken en düşük

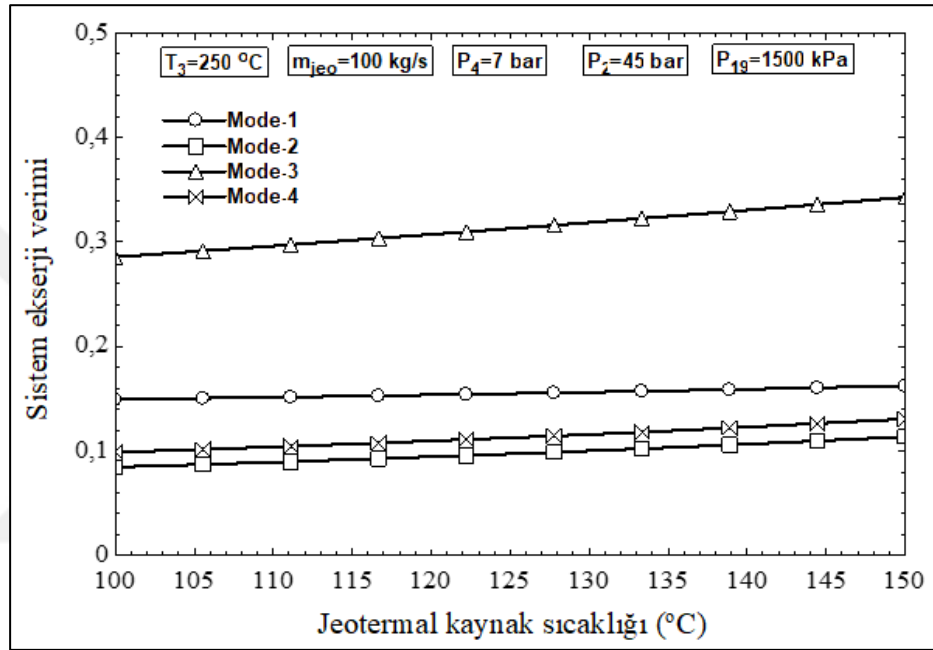
sistem enerji verimine sahip M1 çalışma modunda bu değerler sırasıyla %62 ve %60 olarak belirlenmiştir. M2 ve M4 çalışma modlarında flaşlama basıncına bağlı olarak en yüksek sistem enerji verimi benzer şekilde 3 bar flaşlama basıncında sırasıyla %67 ve %69 iken 8 bar flaşlama basıncında bu değerler yaklaşık %64 ve %66 olarak hesaplanmıştır. Flaşlama basıncının artmasıyla sistem enerji veriminin düşmesi, HÇÜS'ten elde edilen faydalı ürünlerin azalmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle KGS atık ısısından sıcak su elde edilmesini sağlayan KON-1 ve KON-2 ünitelerinden 3 bar flaşlama basıncında sırasıyla 16862 kW ve 50572 kW olmak üzere toplam 67434 kW sıcak su elde edilirken 8 bar basınçta bu değerler sırasıyla 27265 kW ve 35570 kW olmak üzere toplam 63195 kW'a kadar düşmektedir. Bu çalışmada, sıcak su üretiminin KON-2 ünitesinde azalırken KON-1 ünitesinden artması, flaşlama basıncı arttığında buhar faza ayrılan jeotermal kaynak debisinin azalmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.19: Çalışma modlarına göre sistem enerji veriminin ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi.

Çalışma modlarına göre ORC türbin giriş basıncına bağlı olarak sistem enerji veriminin değişimi Şekil 4.19'da verilmiştir. ORC türbin giriş basıncının artmasıyla sistem enerji veriminin tüm çalışma modlarında arttığı görülmektedir. Bu artışın en önemli nedeni ORC türbin giriş basıncının artmasıyla HÇÜS'ten elde edilen net elektrik gücünün artmasıdır. Sistem enerji verimi üzerine ORC türbin giriş basıncının

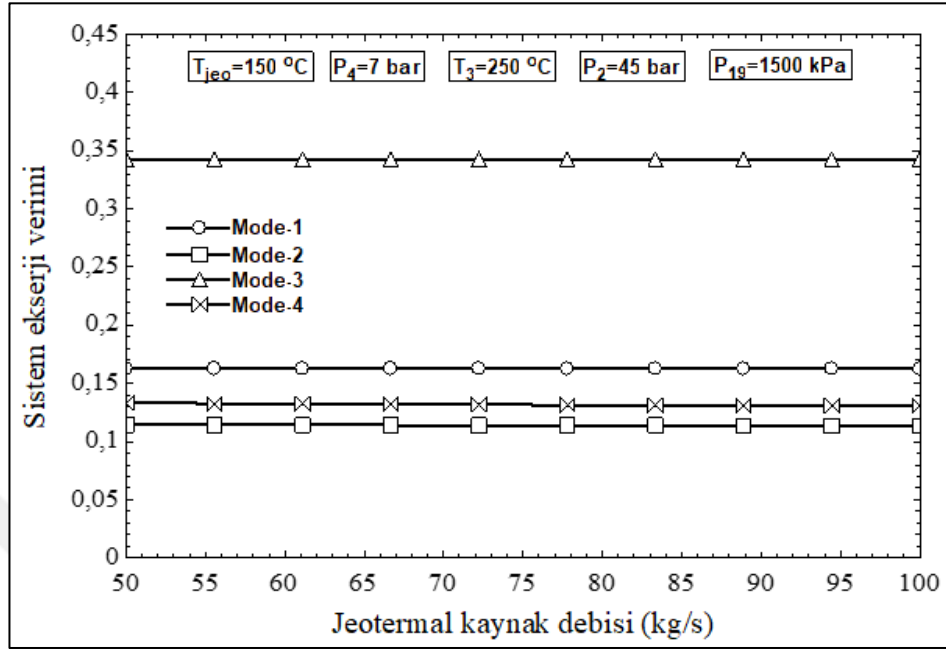
etkisi sistem elektrik verimi üzerine etkisine benzerlik göstermektedir. En yüksek sistem enerji verimine sahip olan M3 çalışma modunda 2000 kPa ORC türbin giriş basıncında sistem enerji verimi %78,7 iken bu çalışma modunu sırasıyla %67,8, %65,8 ve %61,7 sistem enerji verimi değeriyle M4, M2 ve M1 çalışma modları takip etmektedir. Diğer taraftan, 1000 kPa ORC türbin giriş basıncında M1, M2, M3 ve M4 çalışma modları için sistem enerji verimi sırasıyla yaklaşık %60,2, %63,3, %76,3 ve %65,4 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.20: Çalışma modlarına göre sistem ekserji veriminin jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi.

Şekil 4.20'de çalışma modlarına göre sistem ekserji veriminin jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi verilmiştir. Şekil 4.20'de gösterildiği gibi jeotermal kaynak sıcaklığı arttığında tüm çalışma modlarında sistem ekserji veriminin arttığı görülmektedir. Örneğin; M4 çalışma modu için 100 °C jeotermal kaynak sıcaklığında sistem ekserji verimi %9,8 iken 150 °C sıcaklıkta sistem ekserji verimi yaklaşık %13 olarak belirlenmiştir. Bu parametrik analizde, çalışma modları arasında en düşük sistem ekserji verimi M2 çalışma modunda 100 °C jeotermal kaynak sıcaklığında %8,4 olarak hesaplanmıştır. Çalışma modları arasında jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak en yüksek sistem ekserji verimi M3 çalışma modunda %34,2 olarak 150 °C jeotermal kaynak sıcaklığında olduğu belirlenmiştir. M3 çalışma modunu aynı

jeotermal kaynak sıcaklığında sırasıyla %16,2, %13 ve %11,3 sistem ekserji verimi değerleriyle M1, M4 ve M2 çalışma modları takip etmektedir.

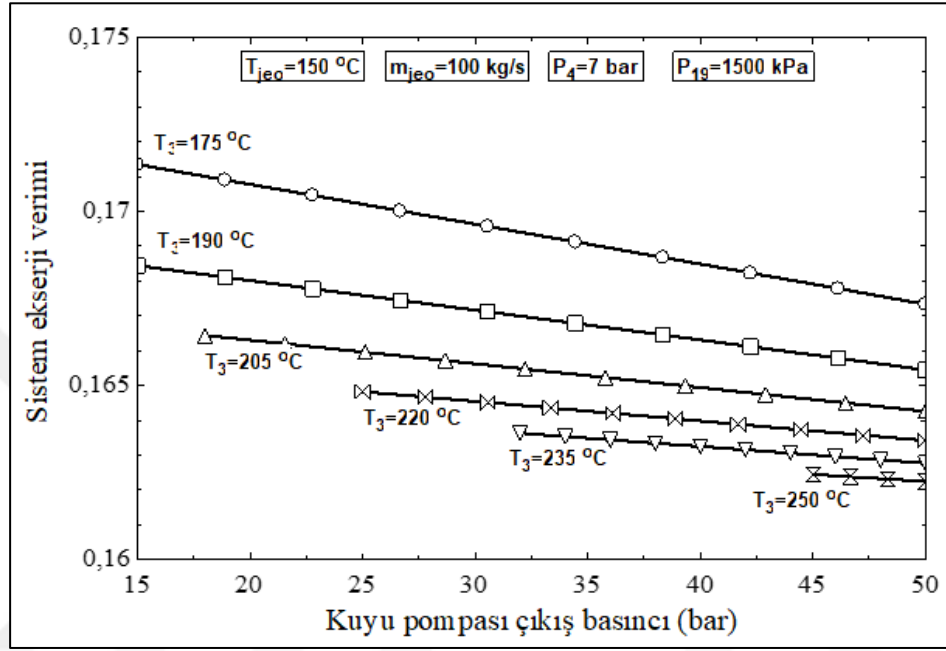


Şekil 4.21: Çalışma modlarına göre sistem ekserji veriminin jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi.

Çalışma modlarına göre jeotermal kaynak debisine bağlı olarak sistem ekserji veriminin değişimi Şekil 4.21'de verilmiştir. Şekil 4.21'de jeotermal kaynak debisi arttığında sistem ekserji veriminin tüm çalışma modlarında çok az değişiklik gösterdiği görülmektedir. En yüksek ve en düşük sistem ekserji verimi M3 ve M2 çalışma modlarında sırasıyla yaklaşık %34,2 ve %11,4 olarak hesaplanmıştır. Diğer taraftan, M1 ve M4 çalışma modlarında ise 50 kg/s ve 100 kg/s jeotermal kaynak debileri için sistem ekserji verimi sırasıyla yaklaşık %16,2 ve %13,3 olarak belirlenmiştir.

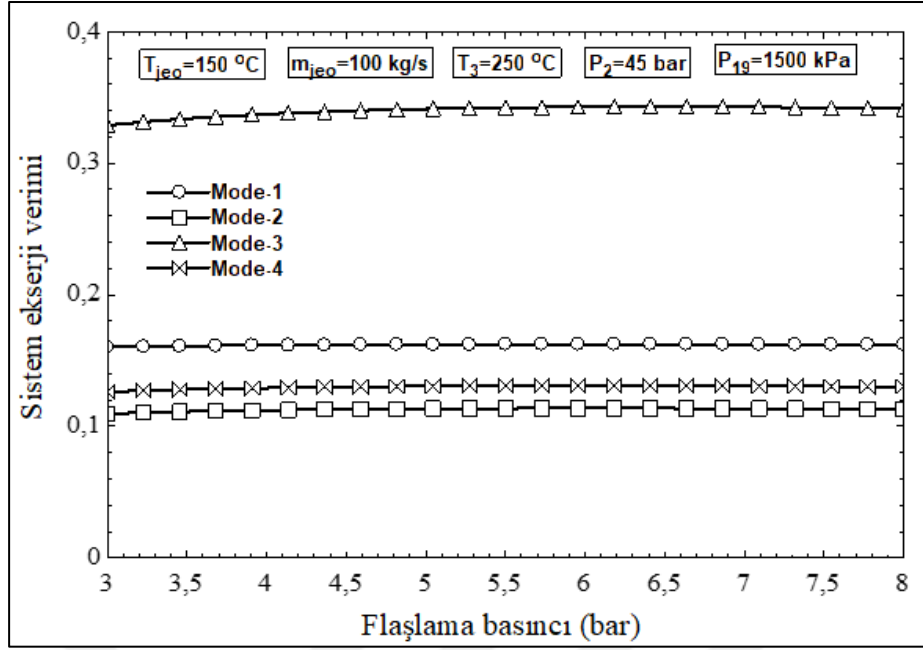
M1 çalışma modunda sistem ekserji veriminin eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi Şekil 4.22'de gösterilmektedir. Şekil 4.22'de eşanjör-p çıkış sıcaklığı ve kuyu pompası çıkış basıncı arttığında sistem ekserji veriminin, sistem enerji verimine benzer şekilde azaldığı görülmektedir. Örneğin, kuyu pompası çıkış basıncının 45 bar ve eşanjör-p çıkış sıcaklığının 175 °C olduğu durumda sistem ekserji verimi %16,7 iken aynı kuyu pompası çıkış basıncında 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığı için sistem ekserji verimi %16,2 olarak belirlenmiştir. M1 çalışma modu için 205 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında kuyu pompası çıkış basıncının

18 bar olduğu durumda sistem ekserji verimi %16,6 iken 50 bar kuyu pompası çıkış basıncında sistem ekserji verimi %16,4 olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, en yüksek sistem ekserji verimi 175 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında ve 15 bar kuyu pompası çıkış basıncında %17,1 iken en düşük sistem ekserji verimi 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında ve 50 bar kuyu pompası çıkış basıncında %16,2 olarak bulunmuştur.

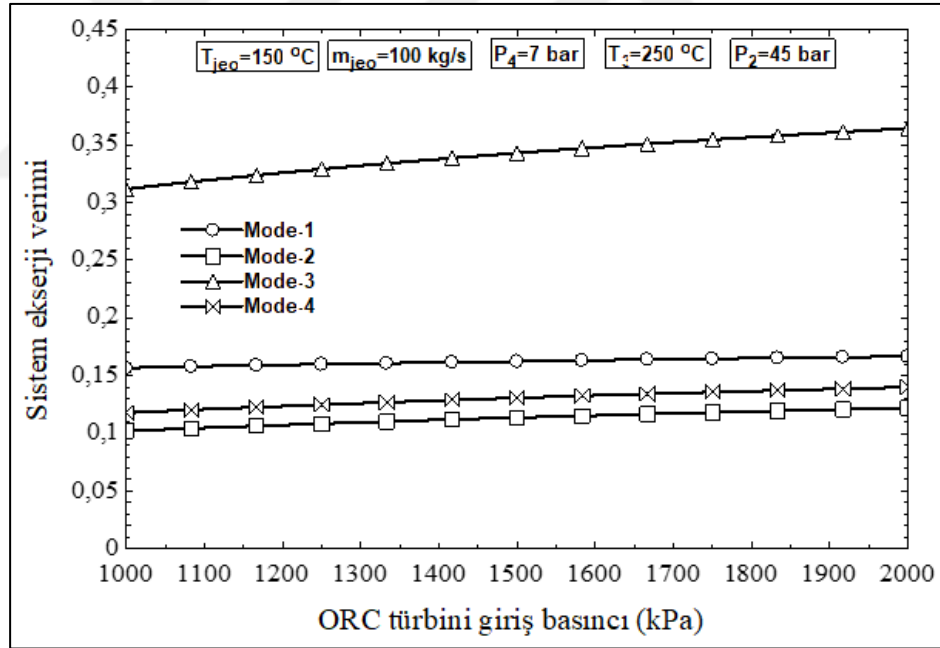


Şekil 4.22: M1 çalışma modunda sistem ekserji veriminin eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi.

Tüm çalışma modları için sistem ekserji veriminin flaşlama basıncına bağlı değişimi Şekil 4.23'te verilmiştir. Şekil 4.23'te elde edilen sonuçlara göre flaşlama basıncı arttığında sistem ekserji verimindeki değişimlerin sistem elektrik verimindeki değişimlere benzerlik gösterdiği ve sistem ekserji verimi değerlerinin çok az değiştiği sonucuna ulaşılmıştır. Örneğin, M1 ve M2 çalışma modlarında 3 bar flaşlama basıncında sistem ekserji verimi sırasıyla %16 ve %10 iken bu değerler 8 bar basınçta sırasıyla yaklaşık %16,2 ve %11 olarak elde edilmiştir. M3 çalışma modu için 3 bar ve 8 bar flaşlama basınçlarında sistem ekserji verimi sırasıyla yaklaşık olarak %32 ve %34 iken aynı çalışma şartlarında M4 çalışma modu için bu değerler %12,6 ve %13 olarak hesaplanmıştır.



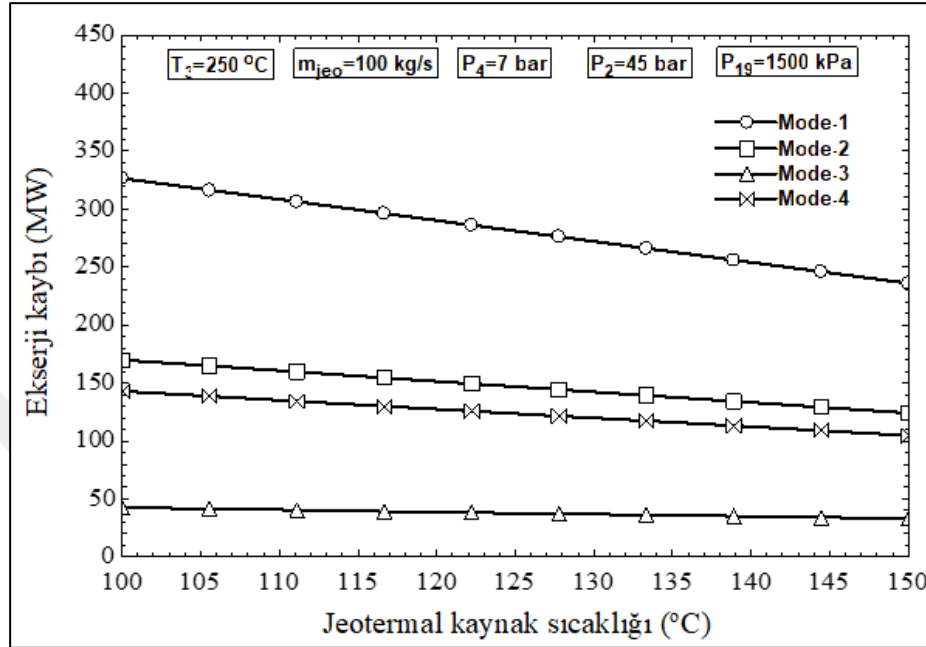
Şekil 4.23: Çalışma modlarına göre sistem ekserji veriminin flaşlama basıncına bağlı değişimi.



Şekil 4.24: Çalışma modlarına göre sistem ekserji veriminin ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi.

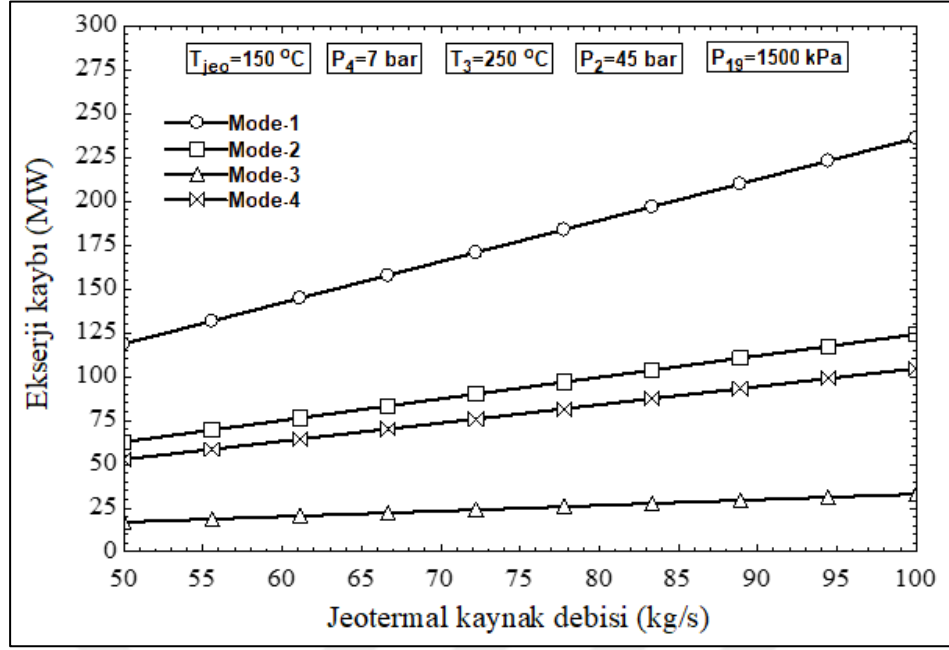
Şekil 4.24'te çalışma modlarına göre sistem ekserji veriminin ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi verilmiştir. Şekil 4.24'te gösterildiği gibi ORC türbin giriş basıncı arttığında tüm çalışma modları için sistem ekserji veriminin arttığı görülmektedir. Sistem ekserji veriminin en yüksek ve en düşük olduğu M3 ve M2 çalışma modlarında 1000 kPa ORC türbin giriş basıncında sistem ekserji verimi

sırasıyla %31,1 ve %10,2 iken 2000 kPa basınçta sırasıyla %36,4 ve %12,2 olarak elde edilmiştir. ORC türbin giriş basıncının 1000 kPa olduğu durumda M1 ve M4 çalışma modlarında sistem ekserji verimi sırasıyla %15,6 ve %11 iken 2000 kPa basınçta sırasıyla %16,6 ve %14 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.25: Çalışma modlarına göre sistem ekserji kaybının jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi.

Çalışma modlarına göre jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak sistem ekserji kaybının değişimi Şekil 4.25'te verilmiştir. Şekil 4.25'te jeotermal kaynak sıcaklığı arttığında tüm çalışma modlarında sistem ekserji kayıplarının azaldığı görülmektedir. Çalışma modları arasında en yüksek ekserji kaybı M1 çalışma modunda iken en düşük ekserji kaybı M3 çalışma modunda açığa çıkmıştır. Jeotermal kaynak sıcaklığının 100 °C olduğu durumda M1 çalışma modunda sistem ekserji kaybı 326595 kW iken 150 °C sıcaklıkta 235591 kW olarak belirlenmiştir. M3 çalışma modunda aynı jeotermal kaynak sıcaklığı değerlerinde sistem ekserji kaybı sırasıyla 42550 kW ve 32998 kW olarak elde edilmiştir. Bu parametrik analizde, 100 °C ve 150 °C jeotermal kaynak sıcaklığında sistem ekserji kaybı M2 çalışma modu için sırasıyla 169924 kW ve 124135 kW iken M4 çalışma modunda sırasıyla 142869 kW ve 104605 kW olarak hesaplanmıştır.

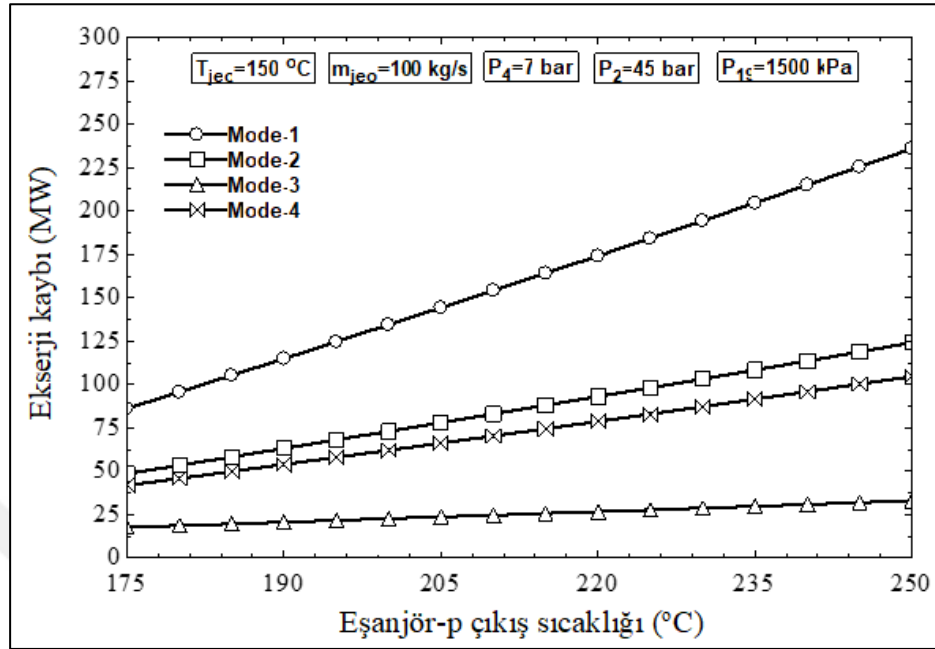


Şekil 4.26: Çalışma modlarına göre sistem ekserji kaybının jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi.

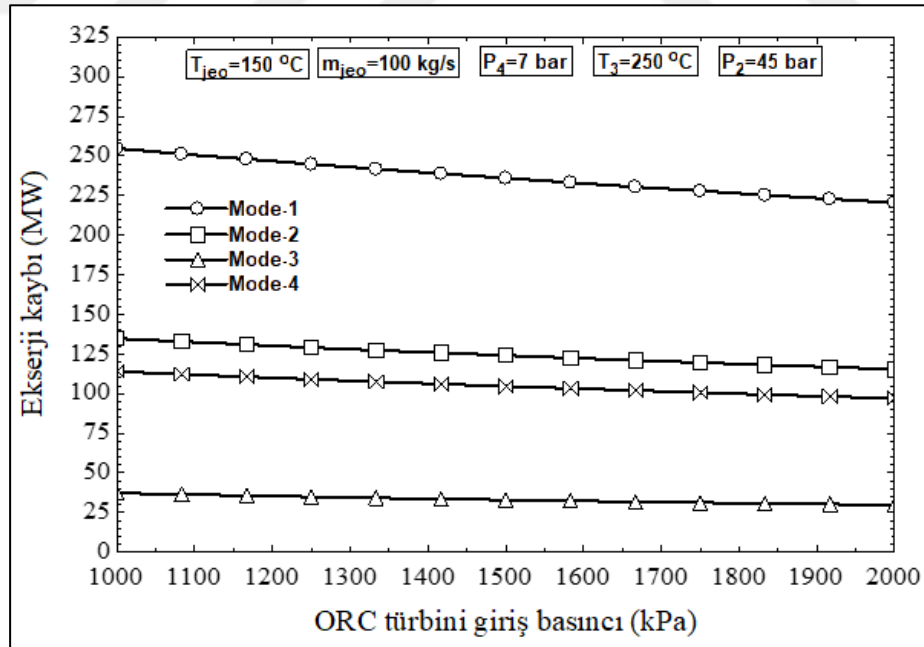
Şekil 4.26’da çalışma modlarına göre sistem ekserji kaybının jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.26’da gösterildiği gibi jeotermal kaynak debisi arttığında tüm çalışma modlarında sistem ekserji kaybı artmaktadır. Çalışma modları arasında jeotermal kaynak debisine bağlı olarak en yüksek ve en düşük sistem ekserji kaybı sırasıyla M1 ve M3 çalışma modlarında açığa çıkmıştır. Örneğin, M1 çalışma modunda jeotermal kaynak debisi 50 kg/s ve 100 kg/s olduğu durumda sistem ekserji kaybı sırasıyla 118616 kW ve 235951 kW iken M3 çalışma modunda bu değerler sırasıyla 16973 kW ve 32988 kW olarak bulunmuştur. Aynı jeotermal kaynak debilerinde M2 çalışma modu için sistem ekserji kaybı sırasıyla 62756 kW ve 124135 kW iken M4 çalışma modu için yaklaşık 52801 kW ve 104655 kW olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.27’de eşanjör-p çıkış sıcaklığının artmasıyla sistem ekserji kaybının tüm çalışma modlarında arttığı görülmektedir. Eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı olarak en yüksek ve en düşük sistem ekserji kayıpları M1 ve M3 çalışma modlarında olduğu belirlenmiştir. Örneğin, M1 çalışma modunda 175 °C ve 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında sistem ekserji kaybı sırasıyla 86029 kW ve 235951 kW iken M3 çalışma modunda aynı sıcaklık değerlerinde sistem ekserji kaybı sırasıyla 17716 kW ve 32988 kW olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada, aynı eşanjör-p çıkış sıcaklıklarında M2

Çalışma modu için sistem ekserji kaybı sırasıyla 48578 kW ve 124135 kW iken M4 alışma modu için yaklaşık 41776 kW ve 104655 kW olarak hesaplanmıştır.



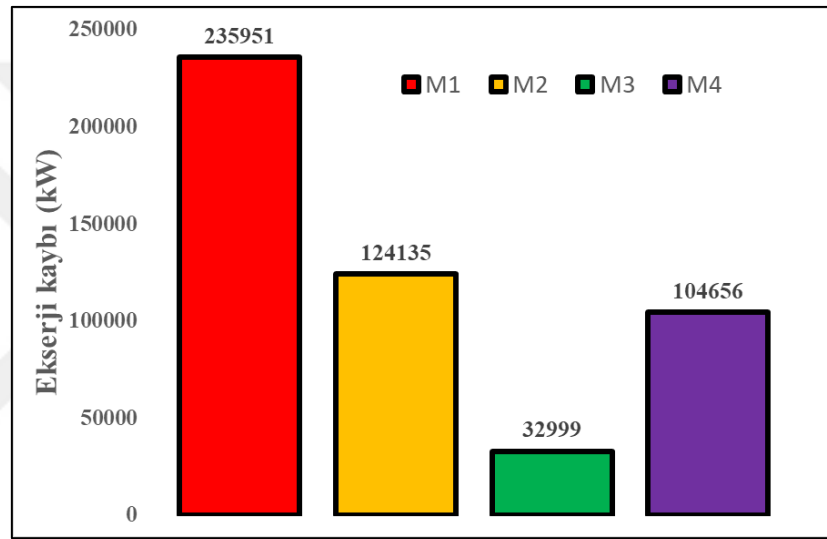
Şekil 4.27: Çalışma modlarına göre sistem ekserji kaybının eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı değişimi.



Şekil 4.28: Çalışma modlarına göre sistem ekserji kaybının ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi.

Şekil 4.28'de çalışma modlarına göre sistem ekserji kaybının ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.28'de ORC türbin giriş basıncı

arttığında tüm çalışma modlarında sistem ekserji kaybının azaldığı görülmektedir. Sistem çalışma modları arasında ORC türbin giriş basıncına bağlı olarak en yüksek ve en düşük sistem ekserji kaybı sırasıyla M1 ve M3 çalışma modlarında açığa çıkmıştır. Örneğin, M1 çalışma modunda ORC türbin giriş basıncının 1000 kPa ve 2000 kPa olduğu durumda sistem ekserji kaybı sırasıyla 254680 kW ve 220420 kW iken M3 çalışma modunda 37263 kW ve 29802 kW olarak elde edilmiştir. ORC türbin giriş basıncının 1000 kPa olduğu durumda M2 ve M4 çalışma modlarında sistem ekserji kaybı sırasıyla 134896 kW ve 114067 kW iken 2000 kPa basınçta sırasıyla 115416 kW ve 97091 kW olarak hesaplanmıştır.

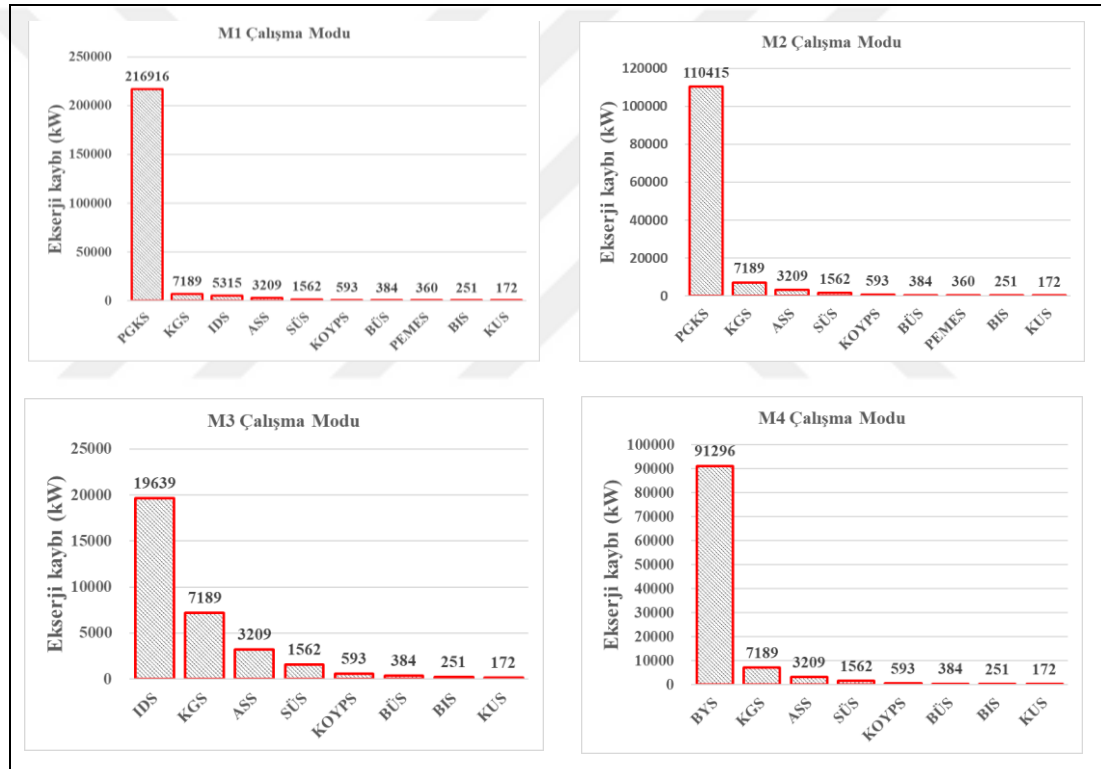


Şekil 4.29: Çalışma modlarına göre sistem toplam ekserji kayıpları.

Şekil 4.29’da jeotermal kaynak sıcaklığının 150 °C, jeotermal kaynak debisinin 100 kg/s, kuyu pompası çıkış basıncının 45 bar, eşanjör-p çıkış sıcaklığının 250 °C, flaşlama basıncının 7 bar ve ORC türbini giriş basıncının 1500 kPa olduğu çalışma şartlarında HÇÜS’ün çalışma modlarına göre toplam ekserji kayıpları gösterilmektedir. Şekil 4.29’da gösterildiği gibi çalışma modları arasında en yüksek ekserji kaybı M1 çalışma modunda açığa çıkmıştır. M1 çalışma modunda toplam ekserji kaybı 235951 kW iken bu çalışma modunu sırasıyla 124135 kW, 104655 kW ve 32998 kW ekserji kaybı değerleriyle M2, M4 ve M3 çalışma modları takip etmektedir. M1 çalışma modunda ekserji kaybının diğer çalışma modlarına göre yüksek çıkması bu çalışma modunda bulunan ID-PGKS’den kaynaklanmaktadır. Bu çalışma modunda ID-PGKS toplam 216916 kW ekserji kaybına sahiptir. En düşük

ekserji kaybının KUS'ta olduğu görülmektedir. KUS'ta toplam 172,2 kW ekserji kaybı açığa çıkmıştır.

Şekil 4.30'da HÇÜS çalışma modlarına göre tüm alt sistemlerin ekserji kayıpları gösterilmiştir. Çalışma modları arasında en düşük ekserji kaybının M3 çalışma modunda olduğu belirlenmiştir. M3 çalışma modunda en yüksek ekserji kaybı ise IDS'de açığa çıkmıştır. IDS'de toplam 19639 kW'lık bir ekserji kaybı söz konusu iken IDS'yi sırasıyla toplam 7189 kW ve 3209 kW'lık ekserji kayıplarıyla KGS ve ASS izlemektedir. Diğer bir çalışma modu olan M4 çalışma modunda ise en yüksek ve en düşük ekserji kayıpları sırasıyla 91216 kW ve 172,2 kW olarak BYS'de ve KUS'ta açığa çıkmıştır.



Şekil 4.30: Çalışma modlarına göre alt sistemlerin toplam ekserji kayıpları.

HÇÜS'ün performans göstergelerinin daha iyi anlaşılması için sistemden elde edilen net faydalı çıktıların ortaya konulması gerekmektedir. Faydalı çıktıları olarak sistem net elektrik gücü, sıcak su, kurutma havası, buhar, biyogaz ve hidrojen üretimi, ısıtma, soğutma ve ısı depolama kapasiteleri dikkate alınmıştır. Söz konusu bu değerlerin hesaplanmasında sistem temel işletim parametreleri olarak sistem ekserji kaybı değerlerinin hesaplanmasında kullanılan çalışma şartları dikkate alınmıştır. Bu faydalı çıktı değerleri HÇÜS'ün dört çalışma modu için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Tablo

4.7’de HÇÜS’ten elde edilen faydalı çıktılar dört çalışma moduna göre verilmiştir. Dört çalışma modu dikkate alındığında sistem net elektrik gücü dışındaki diğer faydalı çıktılarının tüm çalışma modlarında aynı kapasitede oldukları kabul edilmiştir ve HÇÜS bu doğrultuda dizayn edildiği için aynı değerlerin olduğu görülmektedir.

Tablo 4.7: Performans göstergelerinin sonuçları.

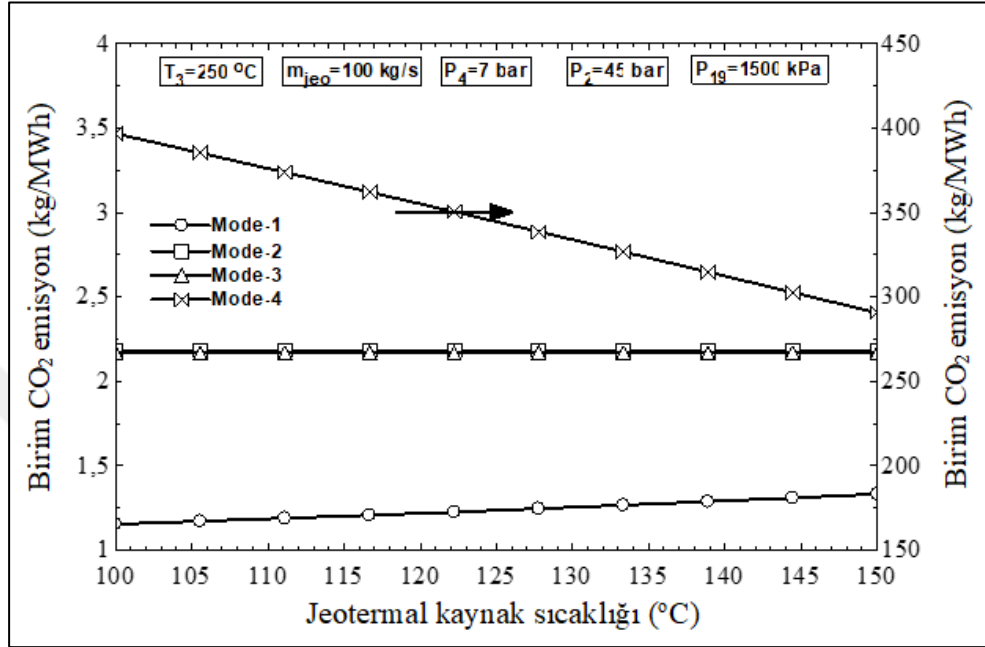
Faydalı çıktılar	Mode-1	Mode-2	Mode-3	Mode-4
Net elektrik gücü (kW)	11920	12096	13653	13325
Isıtma (kW)	6284	6284	6284	6284
Soğutma (kW)	2263	2263	2263	2263
Sıcak su üretimi (kW)	63979	63979	63979	69734
Kurutma havası (kW)	2094	2094	2094	2094
Isı depolama (MWh)	419,25	-	-	-
Buhar üretimi (kW)	342,9	342,9	342,9	342,9
Biyogaz üretimi (kg/h)	135,72	135,72	135,72	135,72
Hidrojen üretimi (kg/h)	33,09	33,09	-	-
Sistem net elektrik verimi (%)	5,04	8,87	11,9	9,45
Sistem enerji verimi (%)	61,03	64,7	77,68	66,75
Sistem ekserji verimi (%)	16,24	11,37	34,27	13,07

4.3.2. Çevresel Gösterge Sonuçları

Bu bölümde, HÇÜS’ün diğer bir sürdürülebilirlik göstergesi olan çevresel gösterge analizinden elde edilen sonuçlar küresel ısınma potansiyeli ve CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli olmak üzere iki alt gösterge altında sunulmuştur.

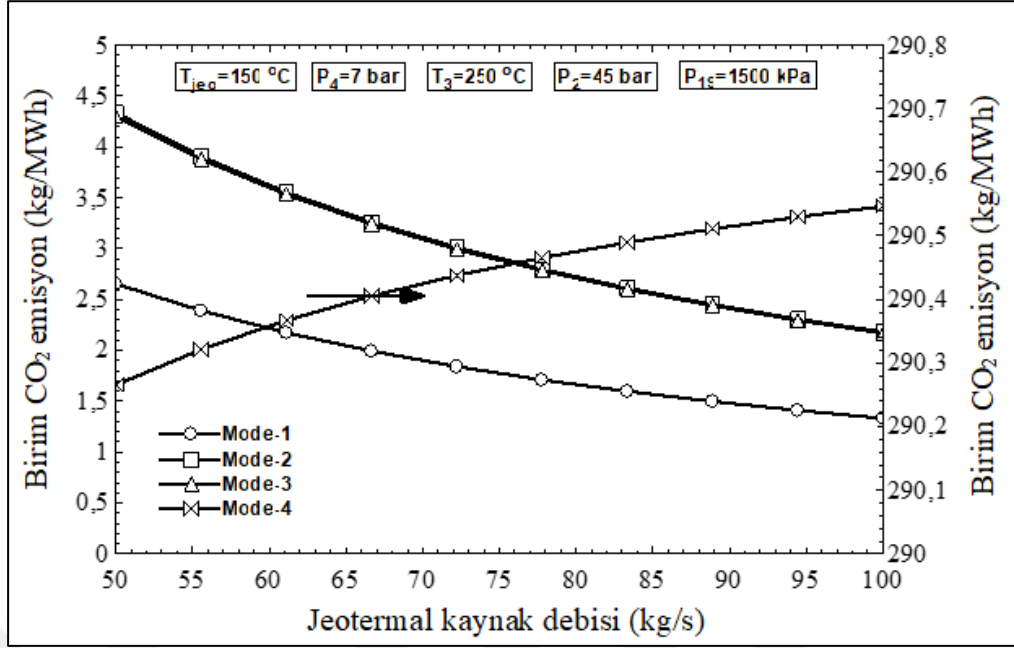
Çalışma modlarına göre jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak birim CO₂ emisyon miktarının değişimi Şekil 4.31’de verilmiştir. Şekil 4.31’de jeotermal kaynak sıcaklığı arttığında M1, M2 ve M3 çalışma modlarında birim CO₂ emisyon miktarı çok fazla değişmezken M4 çalışma modunda azaldığı görülmektedir. Çalışma modları arasında en yüksek ve en düşük birim CO₂ emisyon miktarı sırasıyla M4 ve M1 çalışma modlarında olduğu belirlenmiştir. M4 çalışma modunda jeotermal kaynak sıcaklığının 100 °C ve 150 °C olduğu durumda birim CO₂ emisyon miktarı sırasıyla 396,8 kg/MWh ve 290,5 kg/MWh iken aynı jeotermal kaynak sıcaklığı değerlerinde

M1 çalışma modunda birim CO₂ emisyon miktarı sırasıyla 1,154 kg/MWh ve 1,332 kg/MWh olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte, M2 ve M3 çalışma modlarında 100 °C ve 150 °C jeotermal kaynak sıcaklığında birim CO₂ emisyon miktarı sırasıyla yaklaşık 2,181 kg/MWh ve 2,169 kg/MWh olarak belirlenmiştir.



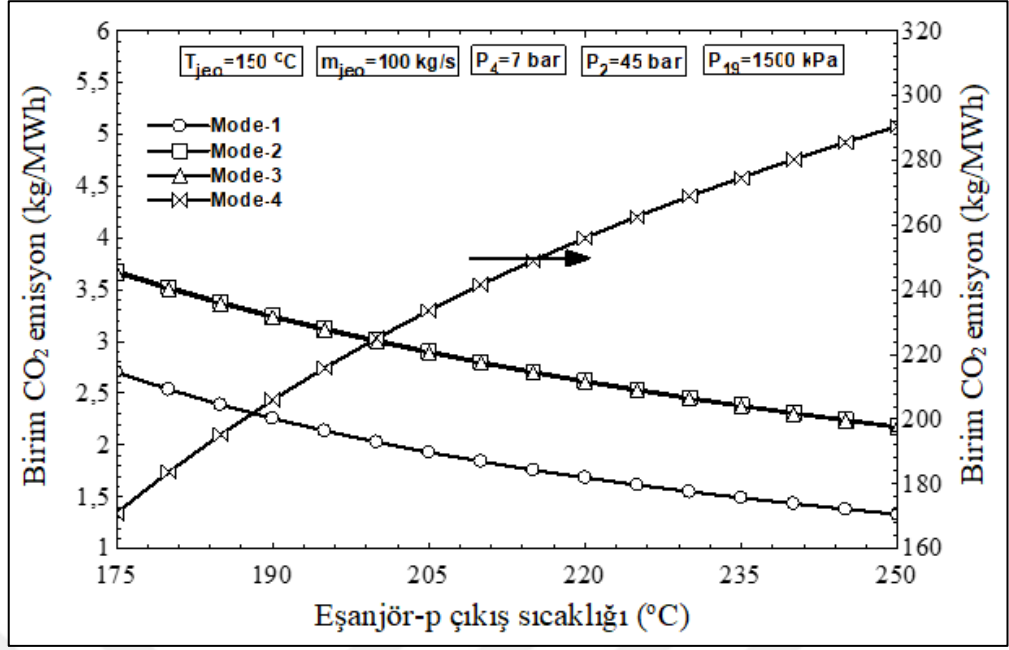
Şekil 4.31: Çalışma modlarına göre birim CO₂ emisyon miktarının jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi.

Şekil 4.32'de çalışma modlarına göre birim CO₂ emisyon miktarının jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi verilmiştir. Jeotermal kaynak debisi arttığında M1, M2 ve M3 çalışma modlarında birim CO₂ emisyon miktarı azalırken M4 çalışma modunda birim CO₂ emisyon miktarının çok az arttığı görülmektedir. Çalışma modları içinde jeotermal kaynak debisine bağlı olarak en yüksek birim CO₂ emisyon miktarı M4 çalışma modunda iken bu çalışma modunu sırasıyla M2, M3 ve M1 çalışma modları takip etmektedir. Bu parametrik analizde, M1 çalışma modunda 50 kg/s ve 100 kg/s jeotermal kaynak debi değerlerinde birim CO₂ emisyon miktarı sırasıyla 2,65 kg/MWh ve 1,33 kg/MWh iken M4 çalışma modunda birim CO₂ emisyon miktarı yaklaşık 290 kg/MWh olarak belirlenmiştir. M2 ve M3 çalışma modları için jeotermal kaynak debisinin 50 kg/s olduğu durumda birim CO₂ emisyon miktarı sırasıyla 4,33 kg/MWh ve 4,30 kg/MWh iken 100 kg/s jeotermal kaynak debisinde bu değerler sırasıyla 2,18 kg/MWh ve 2,17 kg/MWh olarak bulunmuştur.

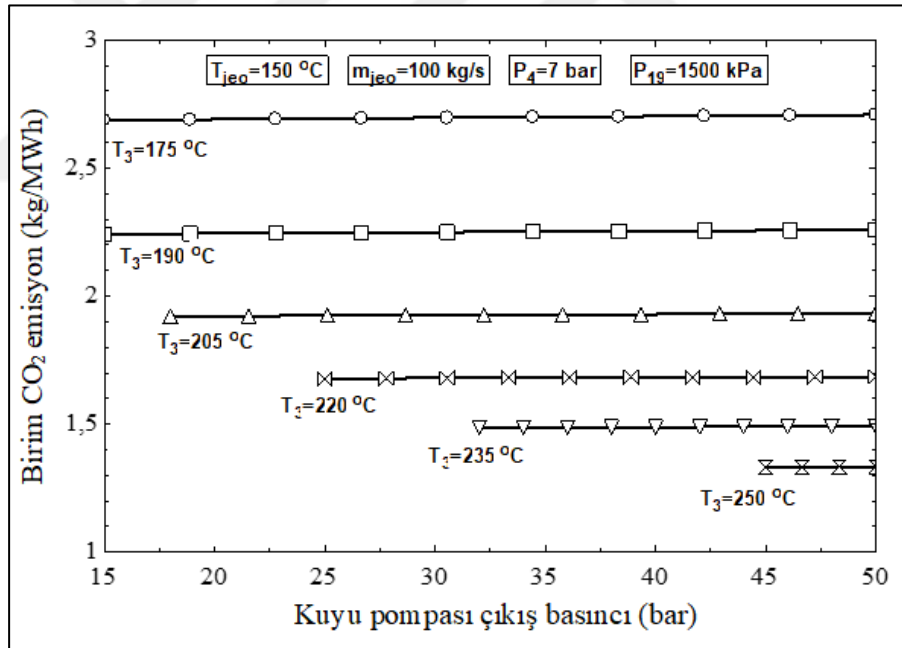


Şekil 4.32: Çalışma modlarına göre birim CO₂ emisyon miktarının jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi.

Şekil 4.33'te çalışma modlarına göre birim CO₂ emisyon miktarının eşanjör-p sıcaklığına bağlı değişimi verilmiştir. Şekil 4.33'te gösterildiği gibi eşanjör-p çıkış sıcaklığı arttığında M1, M2 ve M3 çalışma modlarında birim CO₂ emisyon miktarı azalırken M4 çalışma modunda birim CO₂ emisyon miktarı artmaktadır. Çalışma modları içinde en yüksek ve en düşük birim CO₂ emisyon miktarı sırasıyla M4 ve M1 çalışma modlarında açığa çıkmıştır. Örneğin, M1 çalışma modunda eşanjör-p çıkış sıcaklıklarının 175 °C ve 250 °C olduğu durumda birim CO₂ emisyon miktarı sırasıyla 2,705 kg/MWh ve 1,332 kg/MWh iken aynı çalışma şartlarında M4 çalışma modunda birim CO₂ emisyon miktarı sırasıyla 171 kg/MWh ve 290,05 kg/MWh olarak belirlenmiştir. M2 ve M3 çalışma modları için 175 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında birim CO₂ emisyon miktarı sırasıyla 3,683 kg/MWh ve 3,662 kg/MWh iken 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında bu değerler sırasıyla 2,181 kg/MWh ve 2,17 kg/MWh olarak bulunmuştur. Ayrıca M4 çalışma modunda birim CO₂ emisyon miktarının diğer çalışma modlarına göre yüksek çıkmasının ana nedeni biyokütle kazanında açığa çıkan CO₂ miktarının yüksek olmasıdır. Diğer çalışma modlarında BÜS ve KOYPS'de açığa çıkan CO₂ miktarı temel işletim parametrelerine göre değişmemektedir.



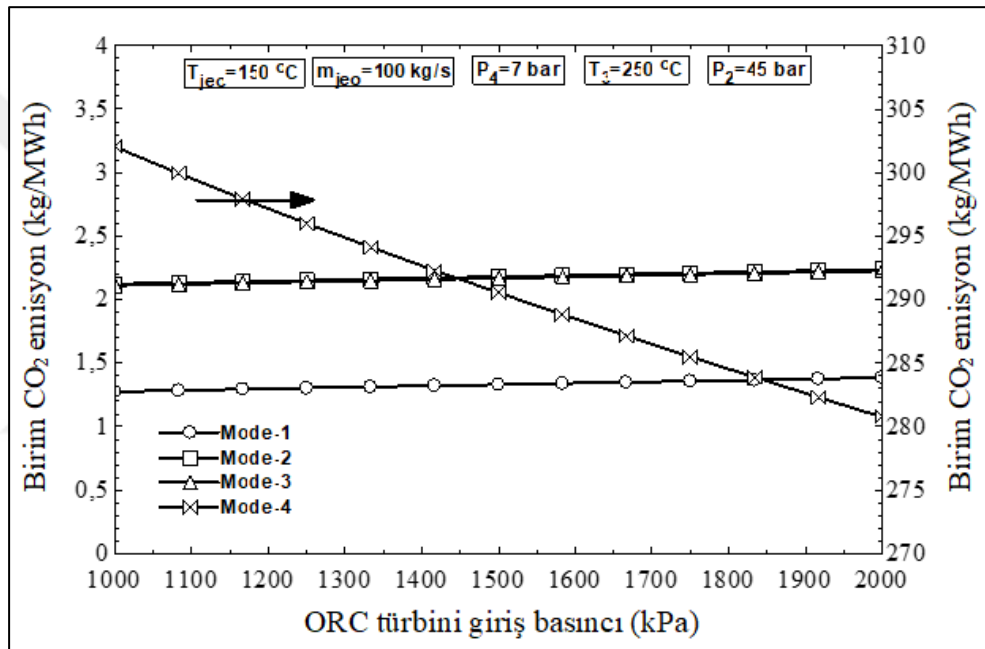
Şekil 4.33: Çalışma modlarına göre birim CO₂ emisyon miktarının eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı değişimi.



Şekil 4.34: M1 çalışma modunda birim CO₂ emisyon miktarının eşanjör-p çıkış sıcaklığı ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi.

Şekil 4.34'te M1 çalışma modunda birim CO₂ emisyon miktarının eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi verilmiştir. Eşanjör-p çıkış sıcaklığı arttığında birim CO₂ emisyon miktarı azalırken kuyu pompası çıkış basıncı arttığında birim CO₂ emisyon miktarının çok az arttığı görülmektedir. En yüksek birim CO₂ emisyon miktarı 175 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında ve 50 bar kuyu

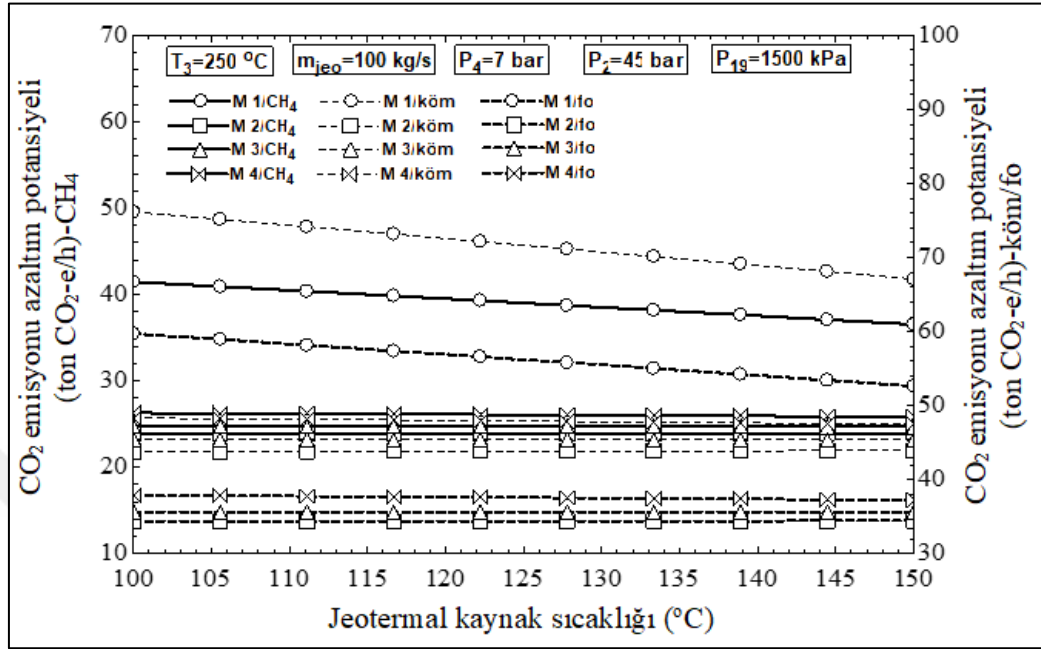
pompası çıkış basıncında iken en düşük birim CO₂ emisyon miktarı 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında ve 45 bar kuyu pompası çıkış basıncında elde edilmiştir. Kuyu pompası çıkış basıncının 50 bar ve eşanjör-p çıkış sıcaklığı 175 °C olduğu durumda birim CO₂ emisyon miktarı 2,708 kg/MWh iken aynı kuyu pompası çıkış basıncında eşanjör-p çıkış sıcaklığının 250 °C olduğu durumda birim CO₂ emisyon miktarı 1,33 kg/MWh olarak belirlenmiştir. M1 çalışma modu için 190 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında kuyu pompası çıkış basıncının 15 bar olduğu durumda birim CO₂ emisyon miktarı 2,24 kg/MWh iken 45 bar basınçta birim CO₂ emisyon miktarı 2,25 kg/MWh olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.35: Çalışma modlarına göre birim CO₂ emisyon miktarının ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi.

Çalışma modlarına göre birim CO₂ emisyon miktarının ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi Şekil 4.35'te verilmiştir. Şekil 4.35'te ORC türbin giriş basıncı arttığında M1, M2 ve M3 çalışma modlarında birim CO₂ emisyon miktarının arttığı M4 çalışma modunda ise azaldığı görülmektedir. M4 çalışma modunda ORC türbin giriş basıncının 1000 kPa ve 2000 kPa olduğu durumda birim CO₂ emisyon miktarı sırasıyla 302 kg/MWh ve 280,8 kg/MWh iken aynı ORC türbin giriş basıncı değerlerinde M1 çalışma modunda birim CO₂ emisyon miktarı sırasıyla 1,27 kg/MWh ve 1,38 kg/MWh olarak belirlenmiştir. M2 ve M3 çalışma modlarında 1000 kPa ORC türbin giriş basıncında birim CO₂ emisyon miktarı sırasıyla 2,12 kg/MWh ve 2,11

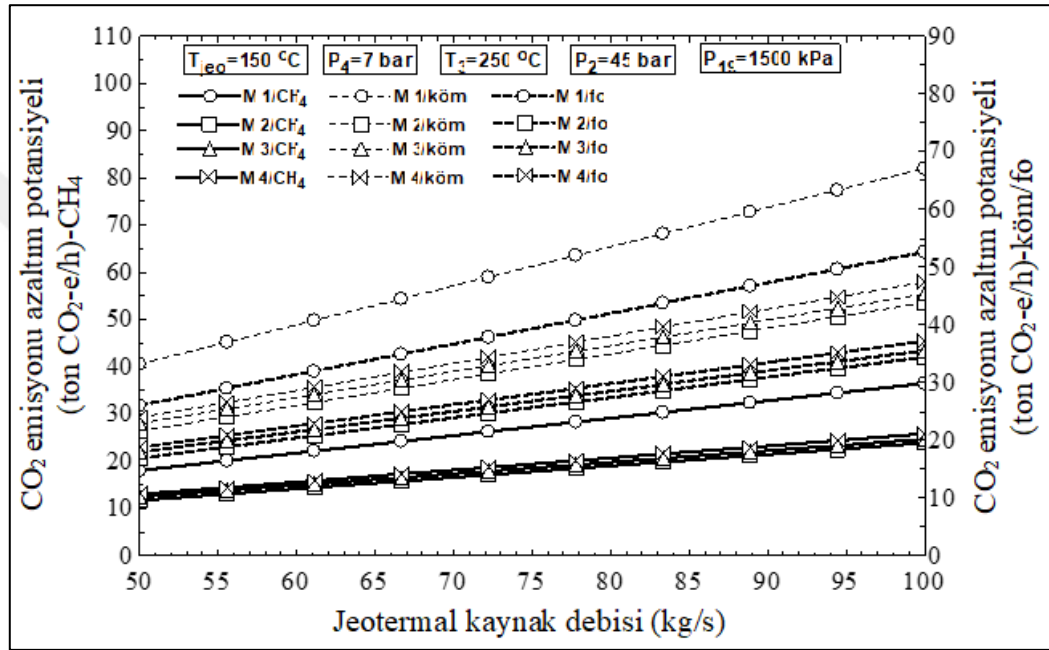
kg/MWh iken ORC türbin giriş basıncının 2000 kPa olduğu durumda sırasıyla 2,23 kg/MWh ve 2,22 kg/MWh olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.36: Çalışma modlarına ve yakıt türüne göre jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli.

Şekil 4.36’da çalışma modlarına ve yakıt türlerine göre CO₂ emisyonu azaltım potansiyelinin jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi verilmiştir. Jeotermal kaynak sıcaklığı arttığında tüm çalışma modlarına ve yakıt türlerine göre CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli M1 çalışma modunda azalırken diğer çalışma modlarında önemli bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Her bir yakıt türü için en yüksek ve en düşük CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli M1 ve M2 çalışma modlarında elde edilmiştir. Bu parametrik analizde, M1 çalışma modunda jeotermal kaynak sıcaklığı arttığında CO₂ emisyonu azaltım potansiyelinin düşmesi, IDS’ye sağlanan ısı miktarının azalmasından kaynaklanmaktadır. CH₄ yakıt türüne göre jeotermal kaynak sıcaklığının 100 °C olduğu durumda M1 çalışma modunda CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli 41,46 ton CO₂-e/h iken 150 °C sıcaklıkta 36,53 ton CO₂-e/h olarak belirlenmiştir. M2 çalışma modu için CH₄ yakıt türüne göre jeotermal kaynak sıcaklığının 100 °C ve 150 °C olduğu durumda CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli sırasıyla 23,84 ton CO₂-e/h ve 23,91 ton CO₂-e/h olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte, yakıt türü olarak sıvı yakıt seçildiğinde, jeotermal kaynak sıcaklığının 100 °C ve 150 °C olduğu durumda M1 çalışma modu için CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli

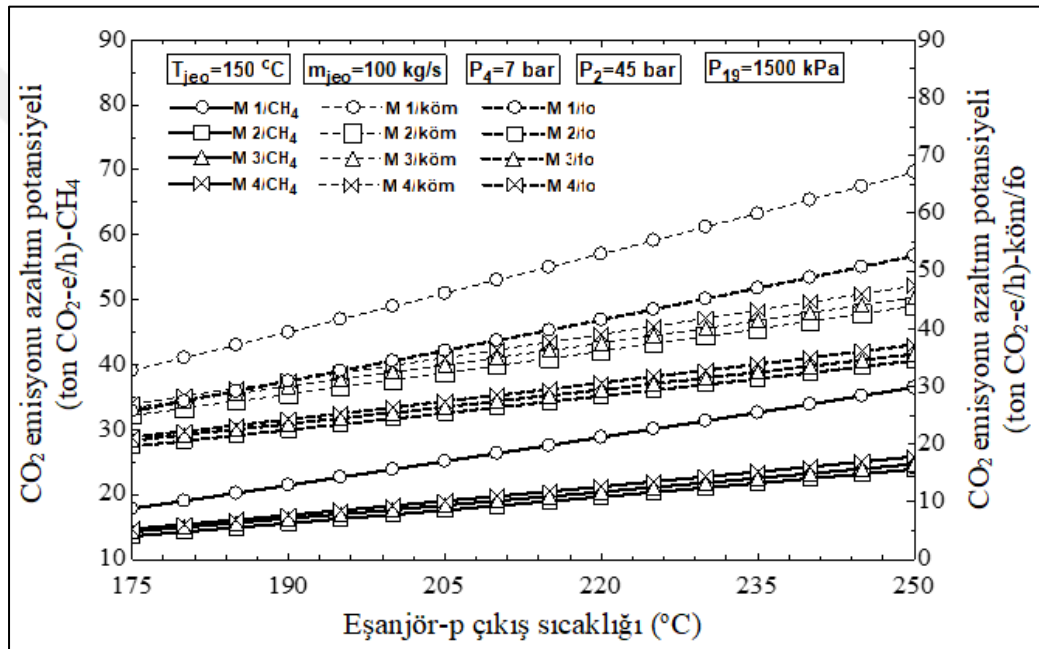
sırasıyla 59,72 ton CO₂-e/h ve 52,62 ton CO₂-e/h iken aynı sıcaklıklarda M2 çalışma modu için CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli sırasıyla 34,34 ton CO₂-e/h ve 34,44 ton CO₂-e/h olarak elde edilmiştir. M3 çalışma modunda jeotermal kaynak sıcaklığının 100 °C olduğu durumda CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli yakıt türlerine göre sırasıyla 24,72 ton CO₂-e/h, 45,41 ton CO₂-e/h ve 35,61 ton CO₂-e/h iken 150 °C jeotermal kaynak sıcaklığında sırasıyla 24,71 ton CO₂-e/h, 45,39 ton CO₂-e/h ve 35,6 ton CO₂-e/h olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.37: Çalışma modlarına ve yakıt türüne göre jeotermal kaynak debisine bağlı CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli.

Çalışma modlarına ve yakıt türlerine göre CO₂ emisyonu azaltım potansiyelinin jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi Şekil 4.37’de verilmiştir. Jeotermal kaynak debisinin artmasıyla tüm çalışma modlarında ve yakıt türlerinde CO₂ emisyonu azaltım potansiyelinin arttığı görülmektedir. Her bir yakıt türü için en yüksek ve en düşük CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli M1 ve M2 çalışma modlarında elde edilmiştir. Yakıt türü olarak kömür seçildiğinde M1 çalışma modunda jeotermal kaynak debisinin 50 kg/s olduğu durumda CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli 33,23 ton CO₂-e/h iken 100 kg/s jeotermal kaynak debisinde bu değer 67,9 ton CO₂-e/h olarak belirlenmiştir. M2 çalışma modu için aynı yakıt türüne göre jeotermal kaynak debisinin 50 kg/s ve 100 kg/s olduğu durumda CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli sırasıyla 21,6 ton CO₂-e/h ve 43,91 ton CO₂-e/h olarak elde edilmiştir. Bu parametrik

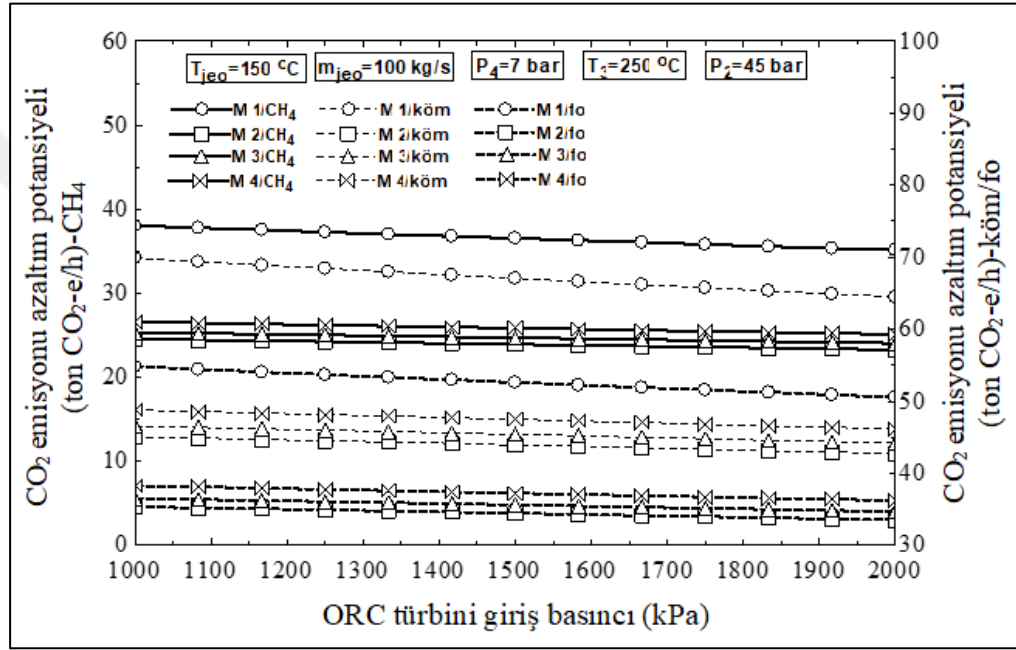
analizde, M3 çalışma modu için 50 kg/s jeotermal kaynak debisinde CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli CH₄, kömür ve sıvı yakıt türlerine göre sırasıyla 12,05 ton CO₂-e/h, 22,96 ton CO₂-e/h ve 18,01 ton CO₂-e/h iken 100 kg/s jeotermal kaynak debisinde sırasıyla 24,71 ton CO₂-e/h, 45,39 ton CO₂-e/h ve 35,6 ton CO₂-e/h olarak belirlenmiştir. Diğer taraftan, M4 çalışma modunda 50 kg/s jeotermal kaynak debisinde CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli yakıt türlerine göre sırasıyla 13,07 ton CO₂-e/h, 24 ton CO₂-e/h ve 18,82 ton CO₂-e/h iken 100 kg/s jeotermal kaynak debisinde sırasıyla 25,84 ton CO₂-e/h, 47,46 ton CO₂-e/h ve 37,22 ton CO₂-e/h olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.38: Çalışma modlarına ve yakıt türüne göre eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli.

Şekil 4.38’de çalışma modlarına ve yakıt türlerine göre CO₂ emisyonu azaltım potansiyelinin eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı değişimi verilmiştir. Şekil 4.38’de gösterildiği gibi eşanjör-p çıkış sıcaklığı arttığında tüm çalışma modlarına ve yakıt türlerine göre CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli artmaktadır. CO₂ emisyonu azaltım potansiyelinin eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı olarak artması, HÇÜS’ten elde edilen faydalı çıktılarının artmasından kaynaklanmaktadır. Yakıt türlerine göre en yüksek ve en düşük CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli sırasıyla M1 ve M2 çalışma modlarında elde edilmiştir. CH₄ yakıt türüne göre, M1 çalışma modunda eşanjör-p çıkış sıcaklığının 175 °C olduğu durumda CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli 17,85 ton CO₂-

e/h iken 250 °C sıcaklıkta 36,53 ton CO₂-e/h olarak belirlenmiştir. Öte yandan, CH₄ yakıt türüne göre M2 çalışma modu için eşanjör-p çıkış sıcaklığının 175 °C ve 250 °C olduğu durumda CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli sırasıyla 13,6 ton CO₂-e/h ve 23,91 ton CO₂-e/h olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte, yakıt türü olarak kömür seçildiğinde, M1 çalışma modu için eşanjör-p çıkış sıcaklığının 175 °C ve 250 °C olduğu durumda CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli sırasıyla 32,78 ton CO₂-e/h ve 67,09 ton CO₂-e/h iken M2 çalışma modu için aynı sıcaklıklarda bu değerler sırasıyla 24,97 ton CO₂-e/h ve 43,91 ton CO₂-e/h olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.39: Çalışma modlarına ve yakıt türüne göre ORC türbin giriş basıncına bağlı CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli.

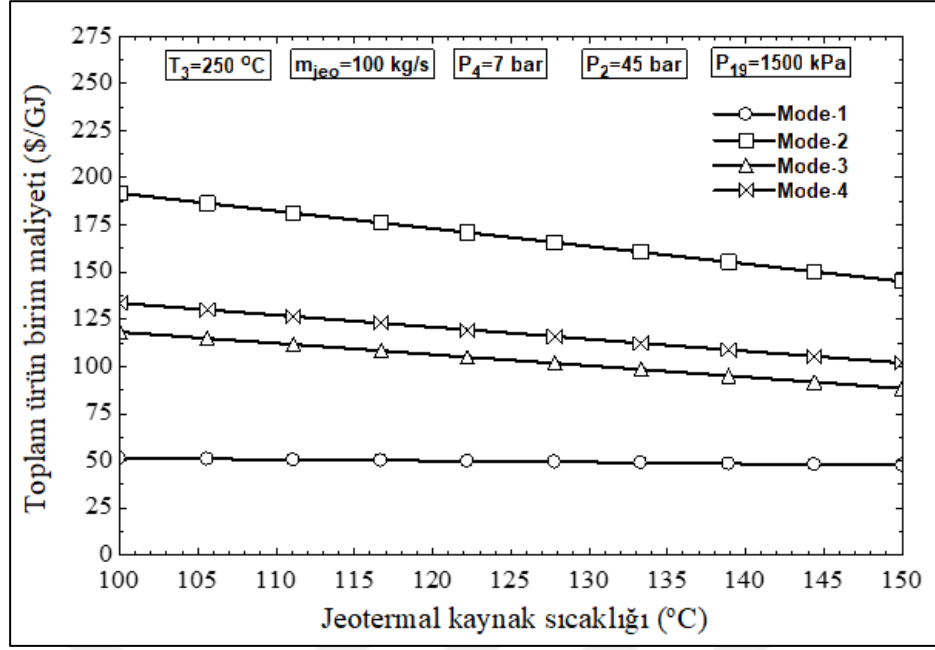
ORC türbin giriş basıncının artmasıyla tüm çalışma modlarına ve yakıt türlerine göre CO₂ emisyonu azaltım potansiyelinin azaldığı Şekil 4.39'da gösterilmektedir. Örneğin, M1 çalışma modu için 1000 kPa ORC türbin giriş basıncında CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli CH₄, kömür ve sıvı yakıt türlerine göre sırasıyla 38,05 ton CO₂-e/h, 69,87 ton CO₂-e/h ve 54,81 ton CO₂-e/h iken 2000 kPa ORC türbin giriş basıncında CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli sırasıyla 35,12 ton CO₂-e/h, 64,5 ton CO₂-e/h ve 50,59 ton CO₂-e/h olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte, yakıt türlerine göre en yüksek ve en düşük CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli M1 ve M2 çalışma modlarında elde edilmiştir. M2 çalışma modu için 1000 kPa ORC türbin giriş basıncında CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli CH₄, kömür ve sıvı yakıt türlerine göre

sırasıyla 24,54 ton CO₂-e/h, 45,07 ton CO₂-e/h ve 35,35 ton CO₂-e/h iken 2000 kPa ORC türbin giriş basıncında sırasıyla 23,27 ton CO₂-e/h, 42,73 ton CO₂-e/h ve 33,51 ton CO₂-e/h olarak belirlenmiştir. M4 çalışma modunda 1000 kPa ORC türbin giriş basıncında CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli yakıt türlerine göre sırasıyla 26,56 ton CO₂-e/h, 48,78 ton CO₂-e/h ve 38,26 ton CO₂-e/h iken 2000 kPa ORC türbin giriş basıncında bu değerler sırasıyla 25,12 ton CO₂-e/h, 46,13 ton CO₂-e/h ve 36,18 ton CO₂-e/h olarak elde edilmiştir.

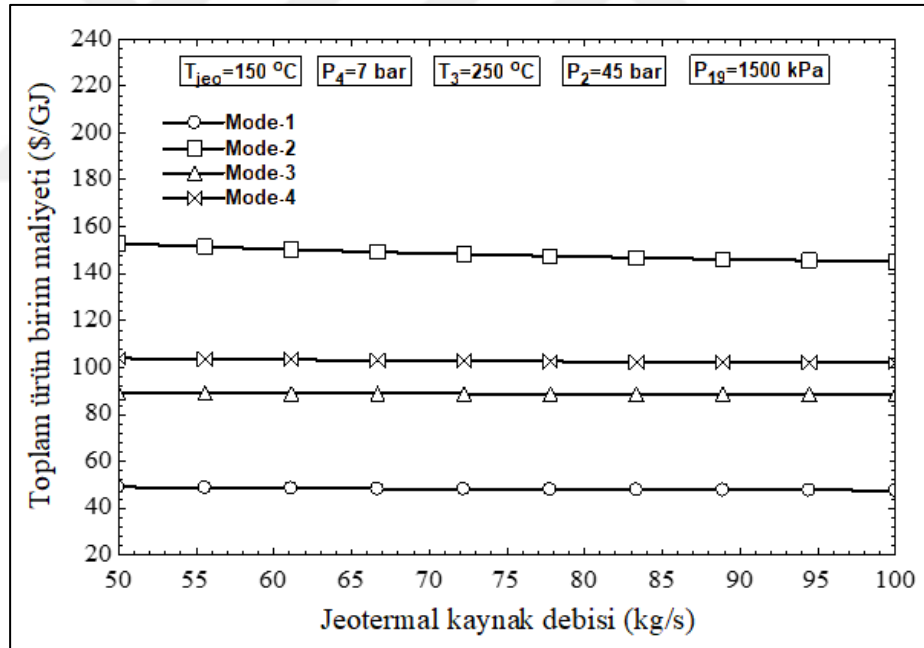
4.3.3. Ekonomik Gösterge Sonuçları

Bu başlık altında sistem temel işletim parametrelerine göre HÇÜS'ün eksergoekonomik analiz çalışmalarından elde edilen sonuçlar tüm çalışma modları için aşağıdaki grafiklerde ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Bu tez çalışmasında, eksergoekonomik gösterge olarak sistemden elde edilen ürünlerin toplam birim maliyeti dikkate alınmıştır.

Çalışma modlarına göre jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak toplam ürün birim maliyetinin değişimi Şekil 4.40'da verilmiştir. Jeotermal kaynak sıcaklığı arttığında tüm çalışma modlarında toplam ürün birim maliyetinin azaldığı görülmektedir. Söz konusu bu azalma eğilimi, HÇÜS'ün geliştirilmesinde eşanjör-p çıkış sıcaklığının sabit olması ve jeotermal kaynak sıcaklığının artmasıyla gerekli PGKS, BYS ve IDS kapasitelerinin azalması ve dolayısıyla yatırım maliyetlerinin düşmesinden kaynaklanmaktadır. Çalışma modları arasında en yüksek toplam ürün birim maliyeti M2 çalışma modunda iken en düşük toplam ürün birim maliyeti M1 çalışma modunda açığa çıkmıştır. Jeotermal kaynak sıcaklığının 100 °C olduğu durumda M1 çalışma modunda toplam ürün birim maliyeti 51,36 \$/GJ iken 150 °C sıcaklıkta 47,63 \$/GJ olarak belirlenmiştir. M2 çalışma modunda aynı jeotermal kaynak sıcaklıklarında toplam ürün birim maliyeti sırasıyla 191,9 \$/GJ ve 145,2 \$/GJ olarak elde edilmiştir. M3 ve M4 çalışma modları için en yüksek toplam ürün birim maliyeti 100 °C jeotermal kaynak sıcaklığında sırasıyla 118,3 \$/GJ ve 133,7 \$/GJ iken en düşük toplam ürün birim maliyeti 150 °C jeotermal kaynak sıcaklığında sırasıyla 88,49 \$/GJ ve 102 \$/GJ olarak belirlenmiştir.



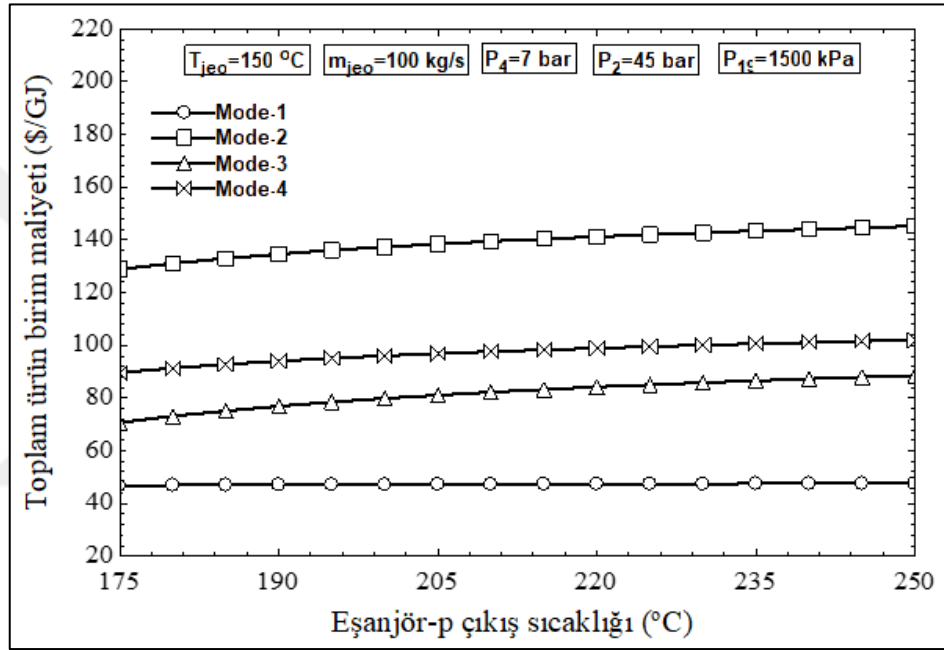
Şekil 4.40: Çalışma modlarına göre toplam ürün birim maliyetinin jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi.



Şekil 4.41: Çalışma modlarına göre toplam ürün birim maliyetinin jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi.

Çalışma modlarına göre jeotermal kaynak debisine bağlı olarak toplam ürün birim maliyetinin değişimi Şekil 4.41’de verilmiştir. Şekil 4.41’de jeotermal kaynak debisinin artmasıyla tüm çalışma modlarında toplam ürün birim maliyeti çok az miktarda azaldığı görülmektedir. Çalışma modlarına göre en yüksek ve en düşük toplam ürün birim maliyeti M2 ve M1 çalışma modlarında elde edilmiştir. Jeotermal

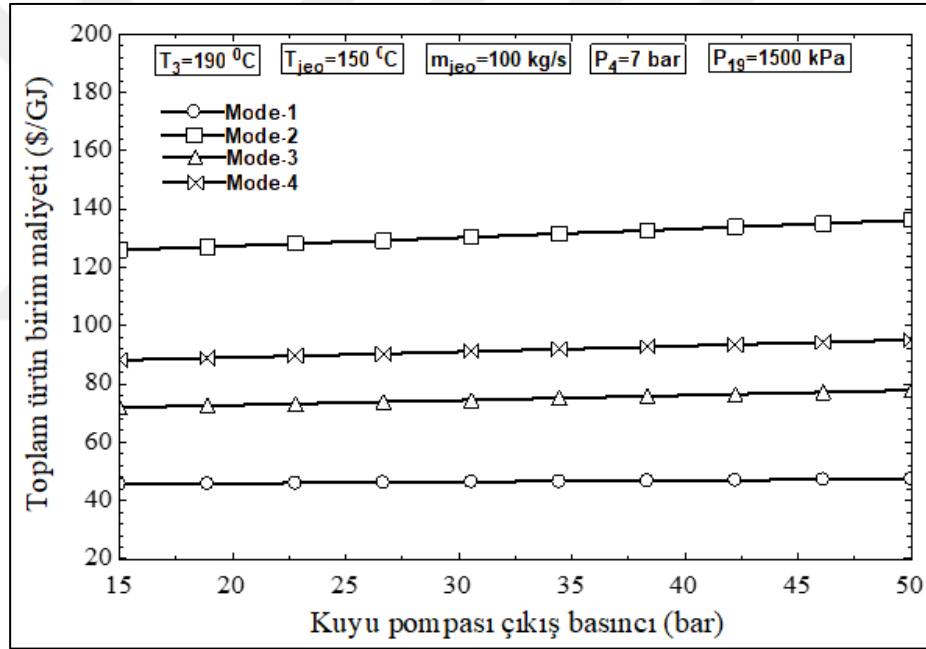
kaynak debisinin 50 kg/s olduğu durumda M2 çalışma modunda toplam ürün birim maliyeti 153 \$/GJ iken 100 kg/s jeotermal kaynak debisinde 145,2 \$/GJ olarak belirlenmiştir. M3 çalışma modu için jeotermal kaynak debisinin 50 kg/s ve 100 kg/s olduğu durumda toplam ürün birim maliyeti sırasıyla 89,07 \$/GJ ve 88,49 \$/GJ olarak hesaplanmıştır. M1 ve M4 çalışma modlarında en yüksek toplam ürün birim maliyeti 50 kg/s jeotermal kaynak debisinde sırasıyla 49,08 \$/GJ ve 103,9 \$/GJ iken en düşük toplam ürün birim maliyeti 100 kg/s jeotermal kaynak debisinde sırasıyla 47,63 \$/GJ ve 102 \$/GJ olarak bulunmuştur.



Şekil 4.42: Çalışma modlarına göre toplam ürün birim maliyetinin eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı değişimi.

Şekil 4.42'de çalışma modlarına göre toplam ürün birim maliyetinin eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.42'de eşanjör-p çıkış sıcaklığı arttığında tüm çalışma modları için toplam ürün birim maliyetinin arttığı görülmektedir. Eşanjör-p sıcaklığının artmasıyla HÇÜS'ten elde edilen net faydalı çıktılarının artması HÇÜS'ü oluşturan alt sistemlerin kapasitelerinin artmasına ve dolayısıyla yatırım maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Söz konusu yatırım maliyetinin artması, HÇÜS'ün tüm çalışma modlarında toplam ürün birim maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte, M2 ve M4 çalışma modlarında toplam ürün birim maliyetinin diğer çalışma modlarına göre yüksek çıkmasının sebebi yıllık çalışma saatinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Eşanjör-p çıkış sıcaklığına

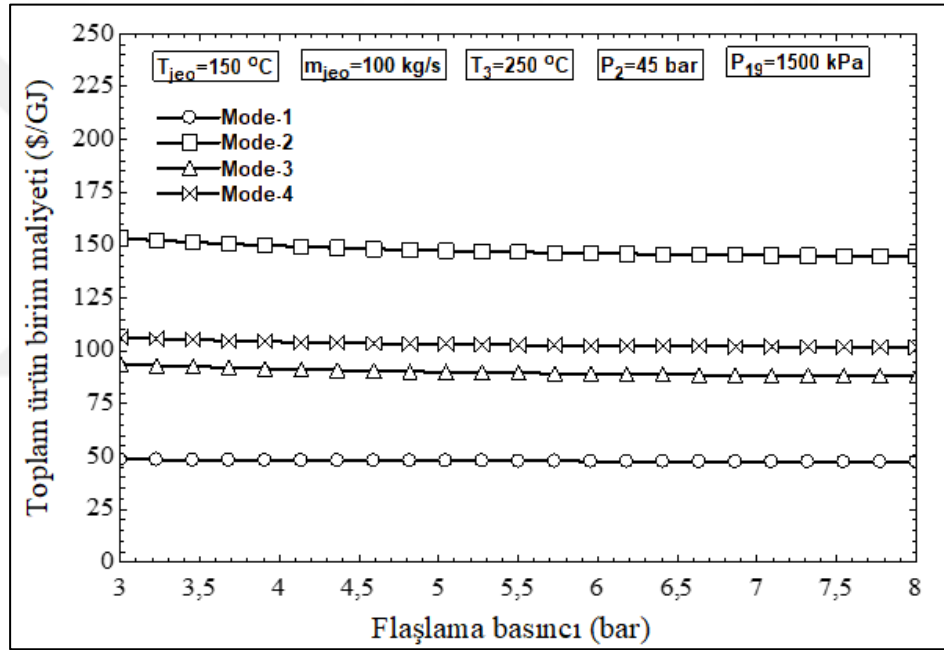
bağlı olarak en yüksek toplam ürün birim maliyeti M2 çalışma modunda iken bu çalışma modunu sırasıyla M4, M3 ve M1 çalışma modları takip etmektedir. Örneğin; M2 çalışma modunda 175 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında toplam ürün birim maliyeti 128,8 \$/GJ iken 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında bu değer 145,2 \$/GJ'e kadar artmaktadır. Çalışma modları arasında en düşük toplam ürün birim maliyetine sahip olan M1 çalışma modunda 175 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında toplam ürün birim maliyeti 46,75 \$/GJ iken 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında 47,63 \$/GJ olarak elde edilmiştir. Bu parametrik çalışmada, M3 ve M4 çalışma modları için toplam ürün birim maliyeti 175 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında sırasıyla 70,76 \$/GJ ve 89,61 \$/GJ iken 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında sırasıyla 88,49 \$/GJ ve 102 \$/GJ olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.43: Çalışma modlarına göre toplam ürün birim maliyetinin kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi.

Şekil 4.43'te çalışma modlarına göre toplam ürün birim maliyetinin kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi gösterilmektedir. Tüm çalışma modları için kuyu pompası çıkış basıncı arttığında toplam ürün birim maliyetinin arttığı görülmektedir. Bu parametrik analiz çalışması, eşanjör-p çıkış sıcaklığının 190 °C, jeotermal kaynak sıcaklığının 150 °C, jeotermal kaynak debisinin 100 kg/s, flaşlama basıncının 7 bar ve ORC türbin giriş basıncının 1500 kPa olduğu çalışma şartlarında gerçekleştirilmiştir. Kuyu pompası çıkış basıncına bağlı olarak en yüksek toplam ürün

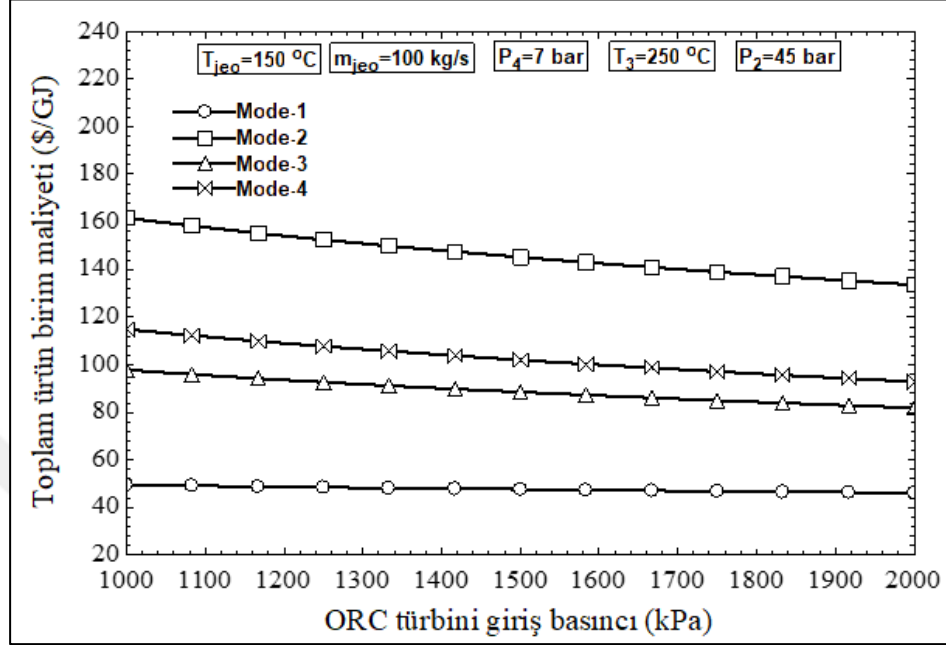
birim maliyeti M2 çalışma modunda iken bu çalışma modunu sırasıyla M4, M3 ve M1 çalışma modları takip etmektedir. M1 çalışma modunda 15 bar kuyu pompası çıkış basıncında toplam ürün birim maliyeti 45,59 \$/GJ iken 50 bar kuyu pompası çıkış basıncında bu değer 47,37 \$/GJ'e yükselmektedir. M2 çalışma modunda kuyu pompası çıkış basıncının 15 bar olduğu durumda toplam ürün birim maliyeti 125,9 \$/GJ iken 50 bar kuyu pompası çıkış basıncında 136,2 \$/GJ olarak belirlenmiştir. M3 ve M4 çalışma modları için en yüksek toplam ürün birim maliyeti 50 bar kuyu pompası çıkış basıncında sırasıyla 77,83 \$/GJ ve 95,1 \$/GJ iken en düşük toplam ürün birim maliyeti 15 bar kuyu pompası çıkış basıncında sırasıyla 71,92 \$/GJ ve 88,12 \$/GJ olarak bulunmuştur.



Şekil 4.44: Çalışma modlarına göre toplam ürün birim maliyetinin flaşlama basıncına bağlı değişimi.

Çalışma modlarına göre flaşlama basıncına bağlı olarak toplam ürün birim maliyetinin değişimi Şekil 4.44'te verilmiştir. Şekil 4.44'te gösterildiği gibi flaşlama basıncı arttığında tüm çalışma modlarında toplam ürün birim maliyeti azalmaktadır. Örneğin, M3 çalışma modunda 3 bar flaşlama basıncında toplam ürün birim maliyeti 93,82 \$/GJ iken 8 bar flaşlama basıncında toplam ürün birim maliyeti 88,07 \$/GJ olarak belirlenmiştir. M1 çalışma modunda en yüksek ve en düşük toplam ürün birim maliyeti sırasıyla 3 bar ve 8 bar flaşlama basıncı değerlerinde 48,68 \$/GJ ve 47,5 \$/GJ olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte, M2 ve M4 çalışma modlarında en yüksek

toplam ürün birim maliyeti 3 bar flaşlama basıncında sırasıyla 153,3 \$/GJ ve 106,3 \$/GJ iken en düşük toplam ürün birim maliyeti 8 bar flaşlama basıncında 144,6 \$/GJ ve 101,7 \$/GJ olarak bulunmuştur.



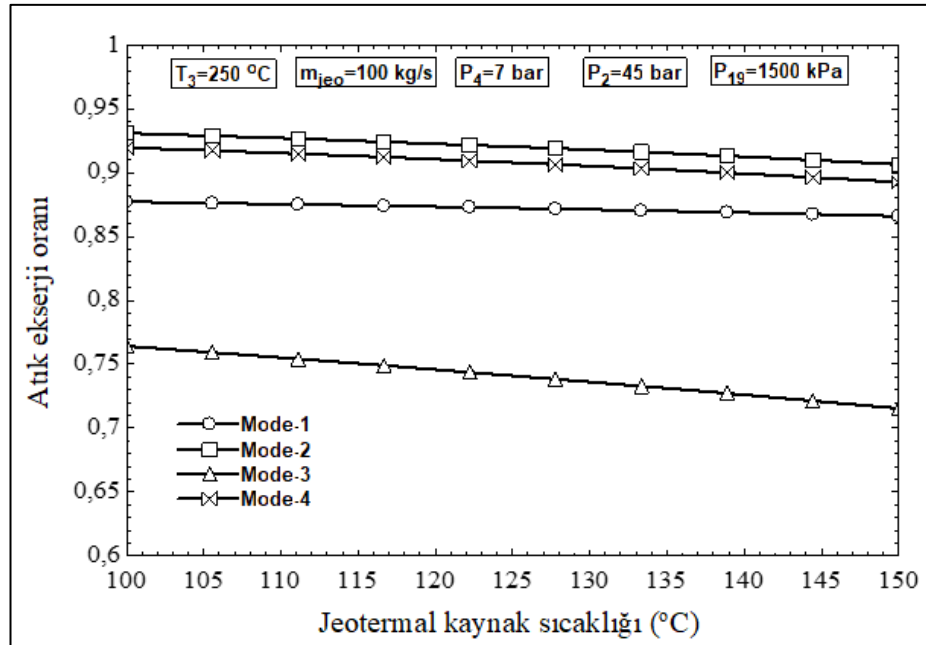
Şekil 4.45: Çalışma modlarına göre toplam ürün birim maliyetinin ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi.

Şekil 4.45'te ORC türbin giriş basıncı arttığında tüm çalışma modlarında toplam ürün birim maliyetinin azaldığı görülmektedir. Diğer toplam ürün birim maliyeti analiz çalışmalarına benzer biçimde, çalışma modları içinde ORC türbin giriş basıncına bağlı olarak en yüksek toplam ürün birim maliyeti M2 çalışma modunda iken bu çalışma modunu sırasıyla M4, M3 ve M1 çalışma modları takip etmektedir. Bu parametrik analizde, M2 çalışma modunda ORC türbin giriş basıncının 1000 kPa ve 2000 kPa olduğu durumlarda toplam ürün birim maliyeti sırasıyla 161,6 \$/GJ ve 133,6 \$/GJ iken M1 çalışma modunda sırasıyla 49,41 \$/GJ ve 46,12 \$/GJ olarak belirlenmiştir. M3 ve M4 çalışma modlarında 1000 kPa ORC türbin giriş basıncında toplam ürün birim maliyeti sırasıyla 97,8 \$/GJ ve 114,8 \$/GJ iken 2000 kPa ORC türbin giriş basıncında 81,9 \$/GJ ve 92,87 \$/GJ olarak elde edilmiştir.

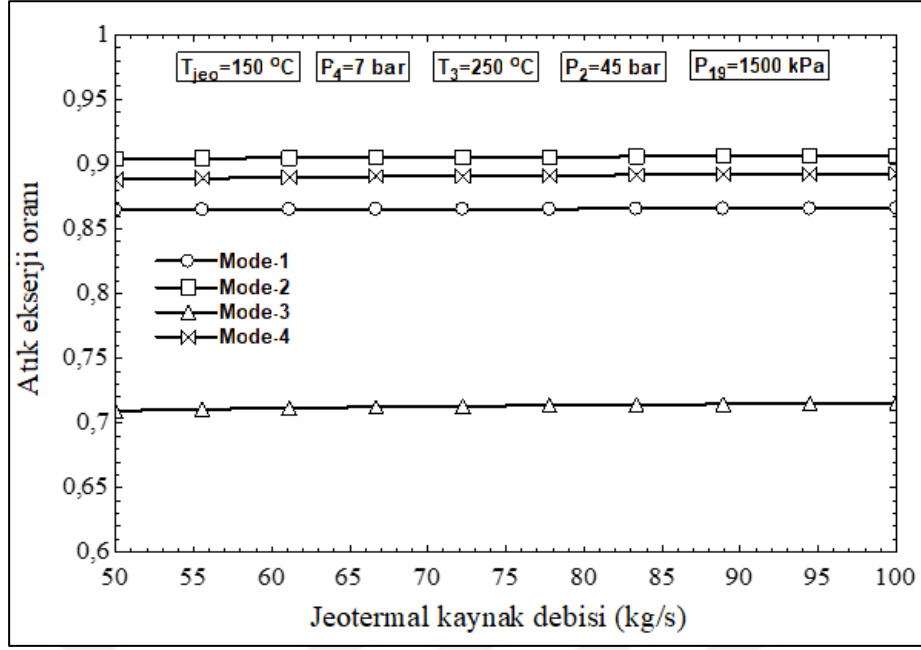
4.3.4. Ekserjetik Sürdürülebilirlik Gösterge Sonuçları

HÇÜS'ün ekserjetik sürdürülebilirlik analizleri kapsamında sistem temel işletim parametrelerine bağlı olarak atık ekserji oranı, ekserji geri kazanılabilirlik oranı, ekserji yıkım oranı, çevresel etki faktörü ve ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi değerleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki grafiklerde verilmiştir.

Çalışma modlarına göre jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak atık ekserji oranının değişimi Şekil 4.46'da verilmiştir. Şekil 4.46'da jeotermal kaynak sıcaklığı arttığında tüm çalışma modlarında atık ekserji oranının azaldığı görülmektedir. Çalışma modları arasında en yüksek atık ekserji oranı M2 çalışma modunda iken en düşük atık ekserji oranı M3 çalışma modunda açığa çıkmıştır. Jeotermal kaynak sıcaklığının 100 °C olduğu durumda M2 çalışma modunda atık ekserji oranı 0,931 iken 150 °C sıcaklıkta atık ekserji oranı 0,906 olarak belirlenmiştir. M3 çalışma modunda aynı jeotermal kaynak sıcaklığı değerlerinde atık ekserji oranı sırasıyla yaklaşık 0,764 ve 0,715 olarak elde edilmiştir. M1 ve M4 çalışma modlarında 100 °C jeotermal kaynak sıcaklığında atık ekserji oranı sırasıyla 0,877 ve 0,919 iken 150 °C sıcaklıkta 0,865 ve 0,892 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.46: Çalışma modlarına göre atık ekserji oranının jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi.

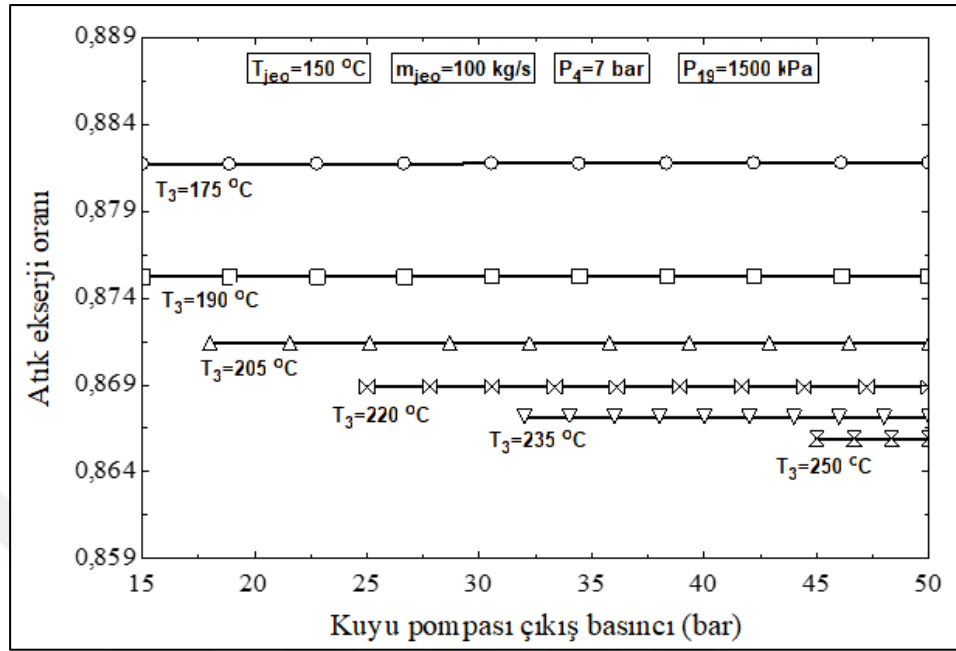


Şekil 4.47: Çalışma modlarına göre atık ekserji oranının jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi.

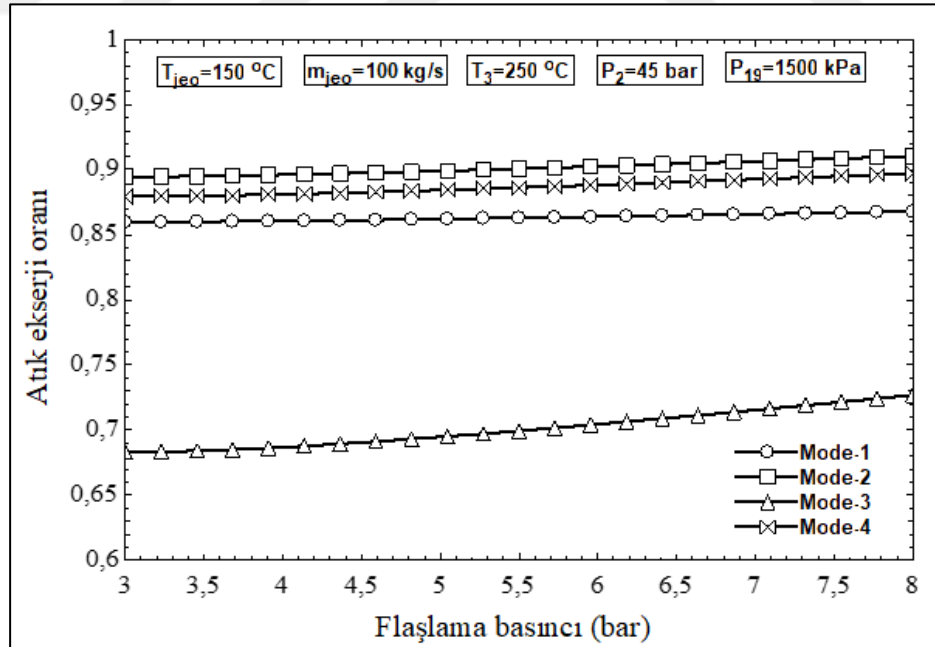
Şekil 4.47’de çalışma modlarına göre atık ekserji oranının jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi gösterilmektedir. Jeotermal kaynak debisi arttığında tüm çalışma modlarında atık ekserji oranının neredeyse sabit olduğu görülmektedir. Örneğin, M3 çalışma modunda jeotermal kaynak debisinin 50 kg/s ve 100 kg/s olduğu durumda atık ekserji oranı yaklaşık 0,71 olarak belirlenmiştir. Çalışma modları arasında en yüksek atık ekserji oranına sahip olan M2 çalışma modunda bu değerler aynı çalışma şartlarında yaklaşık 0,9 olarak hesaplanmıştır. Benzer bir şekilde, aynı çalışma şartlarında M1 ve M4 çalışma modlarında atık ekserji oranı sırasıyla yaklaşık 0,86 ve 0,89 olarak elde edilmiştir.

Şekil 4.48’de M1 çalışma modunda atık ekserji oranının eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi verilmiştir. Şekil 4.48’de eşanjör-p çıkış sıcaklığı arttığında atık ekserji oranı azalırken kuyu pompası çıkış basıncı arttığında atık ekserji oranının çok fazla değişmediği görülmektedir. Bu çalışmada en yüksek atık ekserji oranı 175 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında iken en düşük atık ekserji oranı 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında olduğu belirlenmiştir. Kuyu pompası çıkış basıncının 50 bar ve eşanjör-p çıkış sıcaklığının 175 °C olduğu durumda atık ekserji oranı 0,88 iken aynı kuyu pompası çıkış basıncında eşanjör-p çıkış sıcaklığının 250 °C olduğu durumda atık ekserji oranı yaklaşık 0,86 olarak bulunmuştur. M1 çalışma modu için 205 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında kuyu pompası

çıkış basıncının 18 bar ve 50 bar olduğu durumda atık ekserji oranı yaklaşık 0,87 olarak elde edilmiştir.



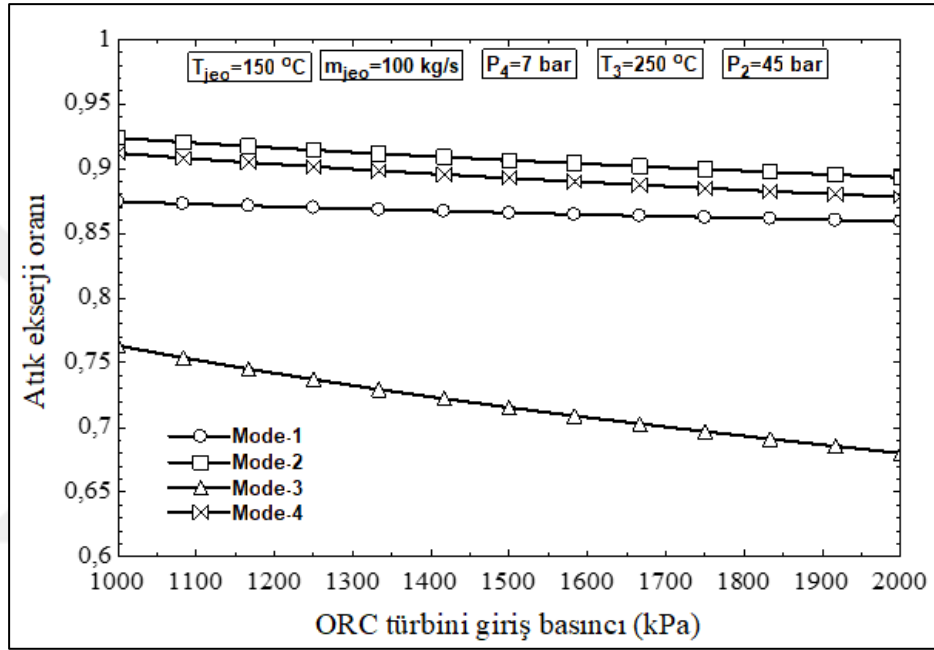
Şekil 4.48: M1 çalışma modunda atık ekserji oranının eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi.



Şekil 4.49: Çalışma modlarına göre atık ekserji oranının flaşlama basıncına bağlı değişimi.

Çalışma modlarına göre flaşlama basıncının değişimine bağlı olarak atık ekserji oranının değişimi Şekil 4.49'da verilmiştir. Şekil 4.49'da gösterildiği gibi flaşlama

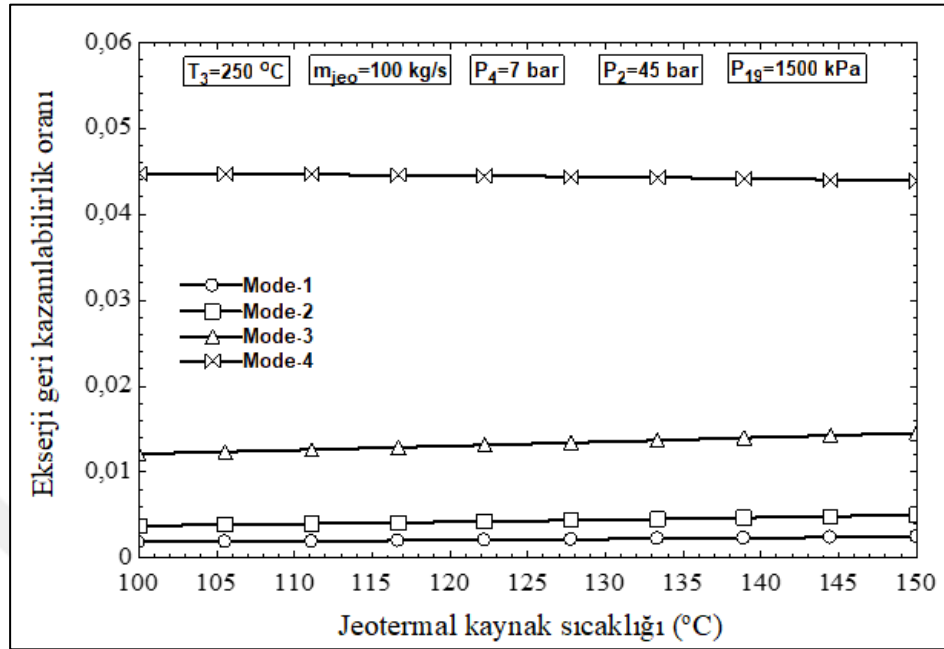
basıncı arttığında tüm çalışma modlarında atık ekserji oranının arttığı görülmektedir. Flaşlama basıncına bağlı olarak en yüksek ve en düşük atık ekserji oranı sırasıyla M2 ve M3 çalışma modlarında açığa çıkmıştır. M2 ve M3 çalışma modlarında 3 bar flaşlama basıncında atık ekserji oranı sırasıyla 0,894 ve 0,683 iken 8 bar flaşlama basıncında sırasıyla 0,910 ve 0,727 olarak elde edilmiştir. M1 ve M4 çalışma modlarında en yüksek atık ekserji oranı 8 bar flaşlama basıncında sırasıyla 0,867 ve 0,897 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.50: Çalışma modlarına göre atık ekserji oranının ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi.

Çalışma modlarına göre ORC türbin giriş basıncına bağlı olarak atık ekserji oranının değişimi Şekil 4.50'de verilmiştir. ORC türbin giriş basıncı arttığında tüm çalışma modlarında atık ekserji oranının azaldığı görülmektedir. Diğer atık ekserji oranı analiz çalışmalarına benzer biçimde, çalışma modları arasında ORC türbin giriş basıncına bağlı olarak en yüksek atık ekserji oranı M2 çalışma modunda iken bu çalışma modunu sırasıyla M4, M1 ve M3 çalışma modları takip etmektedir. Bu parametrik analizde, M3 çalışma modunda ORC türbin giriş basıncının 1000 kPa ve 2000 kPa olduğu durumlarda atık ekserji oranı sırasıyla 0,76 ve 0,68 iken aynı ORC türbin giriş basıncı değerlerinde M1 çalışma modunda atık ekserji oranı sırasıyla yaklaşık 0,87 ve 0,85 olarak belirlenmiştir. M2 ve M4 çalışma modlarında 1000 kPa ORC türbin giriş basıncında atık ekserji oranı sırasıyla 0,92 ve 0,91 iken ORC türbin

giriş basıncının 2000 kPa olduğu durumda bu değerler sırasıyla yaklaşık 0,89 ve 0,87 olarak hesaplanmıştır.

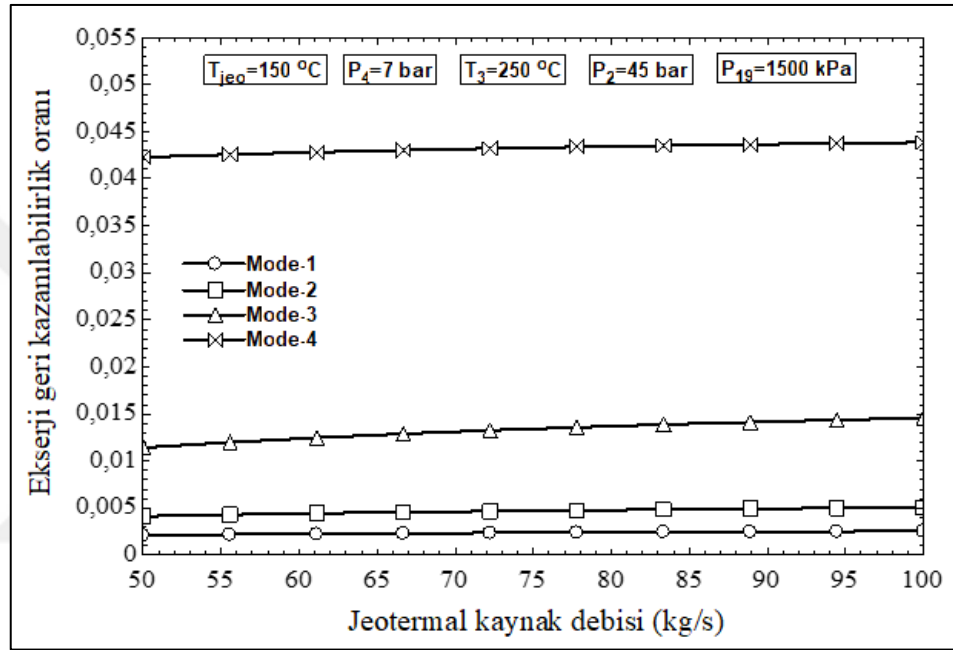


Şekil 4.51: Çalışma modlarına göre ekserji geri kazanılabilirlik oranının jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi.

Şekil 4.51’de çalışma modlarına göre ekserji geri kazanılabilirlik oranının jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak değişimi gösterilmektedir. Jeotermal kaynak sıcaklığı arttığında M1, M2 ve M3 çalışma modlarında ekserji geri kazanılabilirlik oranı artarken M4 çalışma modunda çok az miktarda azalmaktadır. Jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak en yüksek ve en düşük ekserji geri kazanılabilirlik oranı M4 ve M1 çalışma modlarında elde edilmiştir. 100 °C jeotermal kaynak sıcaklığında M1, M2, M3 ve M4 çalışma modlarında ekserji geri kazanılabilirlik oranları sırasıyla 0,001, 0,004, 0,012 ve 0,044 iken 150 °C jeotermal kaynak sıcaklığında ekserji geri kazanılabilirlik oranları sırasıyla 0,002, 0,005, 0,014 ve 0,043 olarak elde edilmiştir. Bu analiz çalışmasında, HÇÜS’ün tüm çalışma modlarında jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak elde edilen ekserji geri kazanılabilirlik oranlarının değişiminin çok az miktarda olduğu belirlenmiştir.

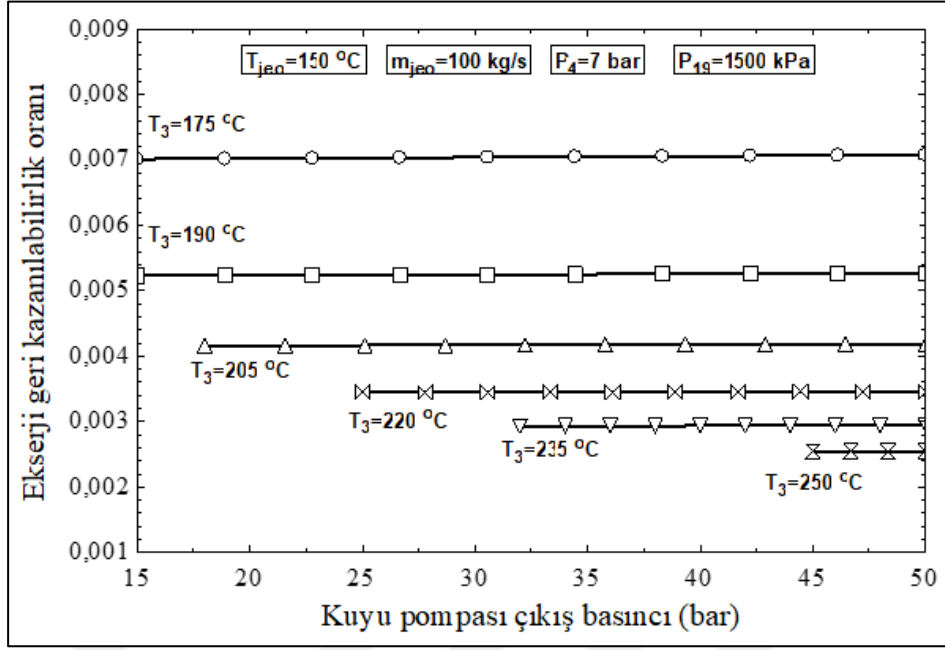
Şekil 4.52’de çalışma modlarına göre ekserji geri kazanılabilirlik oranının jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi gösterilmektedir. Jeotermal kaynak debisi arttığında tüm çalışma modlarında ekserji geri kazanılabilirlik oranı artmaktadır. Sistem çalışma modları arasında jeotermal kaynak debisine bağlı olarak en yüksek ve

en düşük ekserji geri kazanılabilirlik oranı sırasıyla M4 ve M1 çalışma modlarında elde edilmiştir. M1 çalışma modunda jeotermal kaynak debisi 50 kg/s ve 100 kg/s olduğu durumda ekserji geri kazanılabilirlik oranı yaklaşık 0,002 olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, M2, M3 ve M4 çalışma modlarında 50 kg/s jeotermal kaynak debisinde ekserji geri kazanılabilirlik oranı sırasıyla yaklaşık 0,004, 0,011 ve 0,042 iken 100 kg/s jeotermal kaynak debisinde bu değerler sırasıyla 0,005, 0,014 ve 0,043 olarak belirlenmiştir.

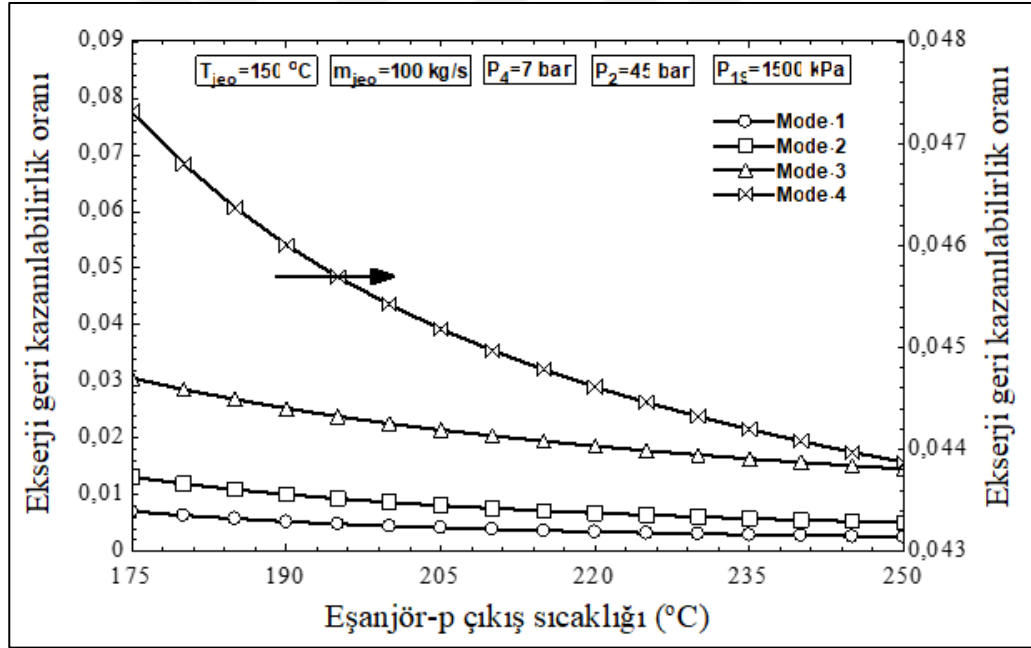


Şekil 4.52: Çalışma modlarına göre ekserji geri kazanılabilirlik oranının jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi.

M1 çalışma modu için ekserji geri kazanılabilirlik oranının eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi Şekil 4.53'te verilmiştir. Eşanjör-p çıkış sıcaklığı arttığında ekserji geri kazanılabilirlik oranı azalırken kuyu pompası çıkış basıncı arttığında ekserji geri kazanılabilirlik oranının çok fazla değişmediği görülmektedir. Bu çalışmada, en yüksek ekserji geri kazanılabilirlik oranı 175 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında iken en düşük ekserji geri kazanılabilirlik oranı 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında olduğu belirlenmiştir. Kuyu pompası çıkış basıncının 50 bar olduğu durumda 175 °C, 190 °C, 205 °C, 220 °C, 235 °C ve 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığı değerlerinde ekserji geri kazanılabilirlik oranları sırasıyla yaklaşık 0,007, 0,005, 0,004, 0,0034, 0,003 ve 0,002 olarak elde edilmiştir.



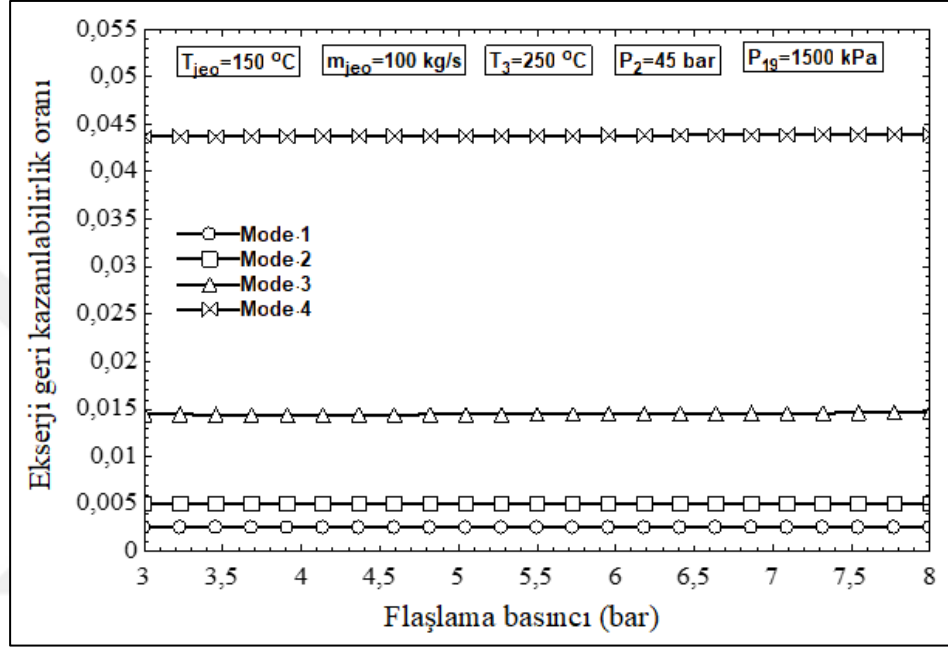
Şekil 4.53: M1 çalışma modunda ekserji geri kazanılabilirlik oranının eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi.



Şekil 4.54: Çalışma modlarına göre ekserji geri kazanılabilirlik oranının eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı değişimi.

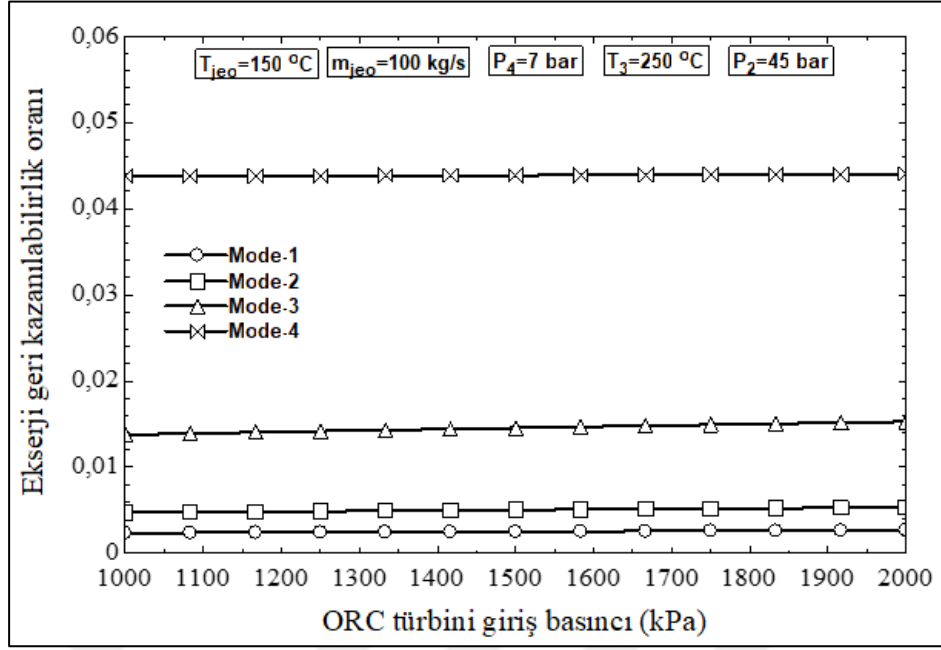
Şekil 4.54'te çalışma modlarına göre ekserji geri kazanılabilirlik oranının eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.54'te gösterildiği gibi eşanjör-p çıkış sıcaklığı arttığında tüm çalışma modlarında ekserji geri kazanılabilirlik oranı azalmaktadır. Sistem çalışma modları arasında eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı olarak en yüksek ve en düşük ekserji geri kazanılabilirlik oranı

sırasıyla M4 ve M1 çalışma modlarında elde edilmiştir. Bu çalışmada, tüm çalışma modları için ekserji geri kazanılabilirlik oranının en yüksek ve en düşük olduğu eşanjör-p sıcaklığı değerleri 175 °C ve 250 °C olarak belirlenmiştir. 175 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında M1, M2, M3 ve M4 çalışma modlarında ekserji geri kazanılabilirlik oranı değerleri sırasıyla 0,007, 0,013, 0,03 ve 0,047 iken 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında yaklaşık 0,002, 0,005, 0,014 ve 0,043 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.55: Çalışma modlarına göre ekserji geri kazanılabilirlik oranının flaşlama basıncına bağlı değişimi.

Şekil 4.55'te çalışma modlarına göre ekserji geri kazanılabilirlik oranının flaşlama basıncına bağlı değişimi gösterilmektedir. Flaşlama basıncı arttığında tüm çalışma modlarında ekserji geri kazanılabilirlik oranının değişmediği görülmektedir. Çalışma modları arasında flaşlama basıncına bağlı olarak en yüksek ve en düşük ekserji geri kazanılabilirlik oranı sırasıyla M4 ve M1 çalışma modlarında elde edilmiştir. M1 çalışma modunda flaşlama basıncının 8 bar olduğu durumda ekserji geri kazanılabilirlik oranı 0,002 iken bu değer M3 çalışma modunda 0,014 olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, flaşlama basıncının 3 bar olduğu durumda M2 ve M4 çalışma modları için ekserji geri kazanılabilirlik oranı sırasıyla 0,005 ve 0,043 olarak elde edilmiştir.

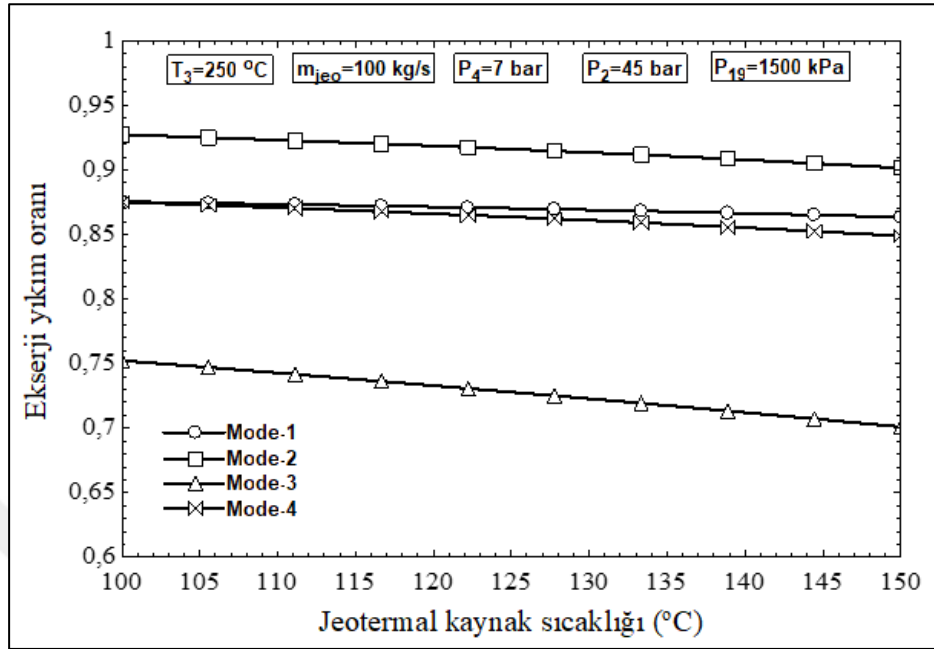


Şekil 4.56: Çalışma modlarına göre ekserji geri kazanılabilirlik oranının ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi.

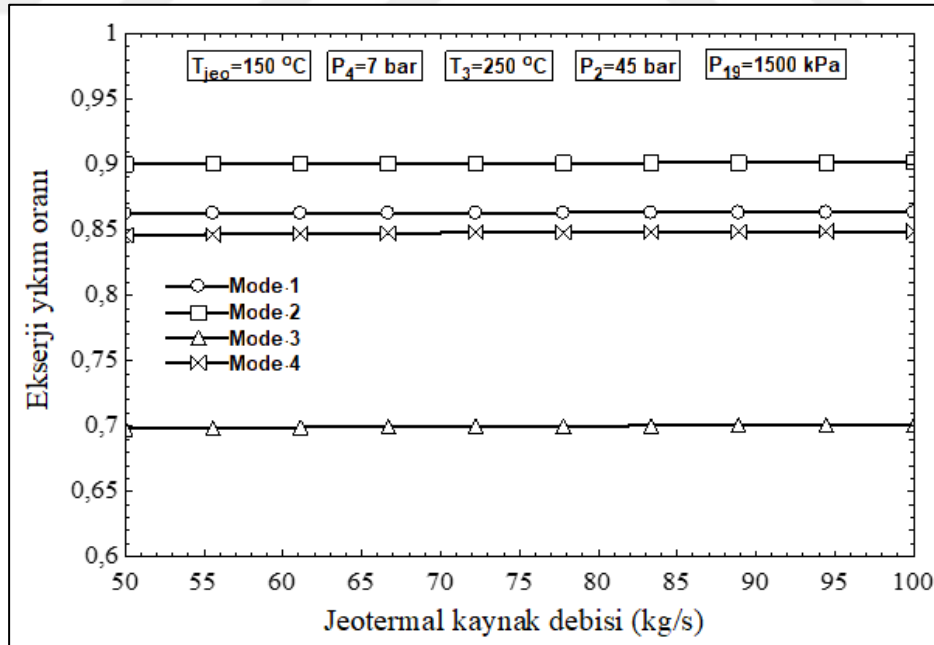
Şekil 4.56’da çalışma modlarına göre ekserji geri kazanılabilirlik oranının ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi gösterilmektedir. ORC türbin giriş basıncı arttığında tüm çalışma modlarında ekserji geri kazanılabilirlik oranı çok az miktarda artmaktadır. Çalışma modları arasında ORC türbin basıncına bağlı olarak en yüksek ve en düşük ekserji geri kazanılabilirlik oranı M4 ve M1 çalışma modlarında elde edilmiştir. M4 çalışma modunda ORC türbin giriş basıncının 1000 kPa ve 2000 kPa olduğu durumda ekserji geri kazanılabilirlik oranı yaklaşık 0,043 iken M1 çalışma modunda aynı çalışma şartlarında yaklaşık 0,0025 olarak belirlenmiştir. Diğer taraftan, M2 ve M3 çalışma modlarında aynı ORC türbin giriş basıncı değerlerinde ekserji geri kazanılabilirlik oranları sırasıyla yaklaşık 0,005 ve 0,014 olarak hesaplanmıştır.

Çalışma modlarına göre jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak ekserji yıkım oranının değişimi Şekil 4.57’de verilmiştir. Şekil 4.57’de jeotermal kaynak sıcaklığı arttığında tüm çalışma modlarında ekserji yıkım oranlarının azaldığı görülmektedir. Çalışma modları arasında en yüksek ekserji yıkım oranı M2 çalışma modunda iken en düşük ekserji yıkım oranı M3 çalışma modunda açığa çıkmıştır. Jeotermal kaynak sıcaklığının 100 °C olduğu durumda M2 çalışma modunda ekserji yıkım oranı 0,93 iken bu değer 150 °C sıcaklıkta 0,9 olarak belirlenmiştir. M3 çalışma modunda aynı jeotermal kaynak sıcaklığı değerlerinde ekserji yıkım oranı sırasıyla yaklaşık 0,75 ve 0,7 olarak bulunmuştur. Bu parametrik analizde, 100 °C ve 150 °C jeotermal kaynak

sıcaklıklarında ekserji yıkım oranı değerleri M1 çalışma modu için sırasıyla 0,87 ve 0,86 iken M4 çalışma modunda sırasıyla 0,87 ve 0,85 olarak hesaplanmıştır.



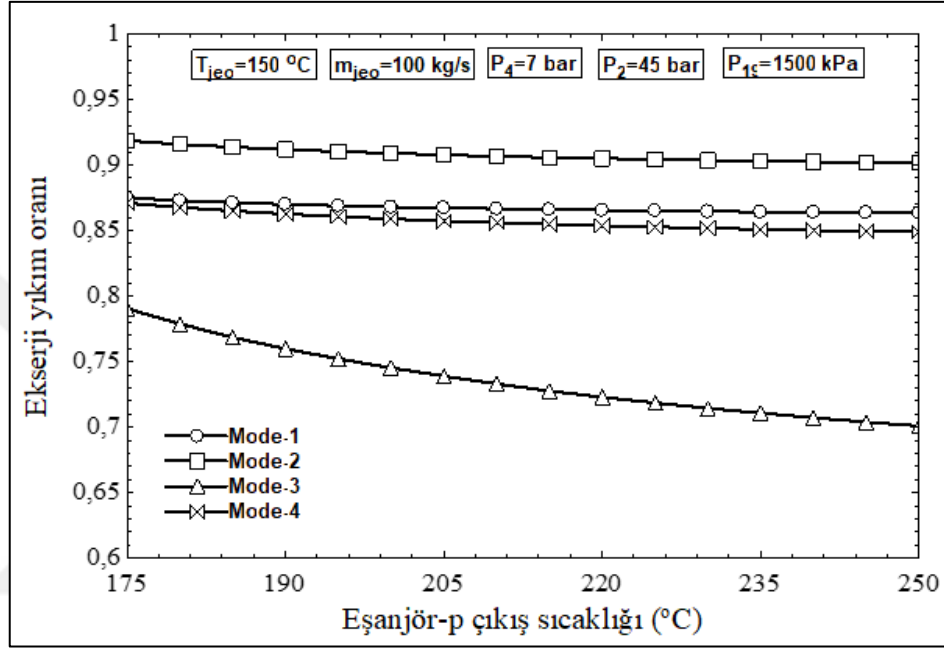
Şekil 4.57: Çalışma modlarına göre ekserji yıkım oranının jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi.



Şekil 4.58: Çalışma modlarına göre ekserji yıkım oranının jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi.

Şekil 4.58’de çalışma modlarına göre ekserji yıkım oranının jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi gösterilmektedir. Jeotermal kaynak debisi arttığında tüm

çalışma modlarında ekserji yıkım oranının neredeyse sabit olduğu görülmektedir. Örneğin, M2 çalışma modunda jeotermal kaynak debisinin 50 kg/s ve 100 kg/s olduğu durumlarda ekserji yıkım oranı yaklaşık olarak 0,9 iken M3 çalışma modunda bu değer yaklaşık 0,7 olarak belirlenmiştir. Bu parametrik analizde, aynı jeotermal kaynak debi değerlerinde M1, M2 ve M4 çalışma modlarında ekserji yıkım oranı sırasıyla yaklaşık 0,86, 0,9 ve 0,85 olarak hesaplanmıştır.

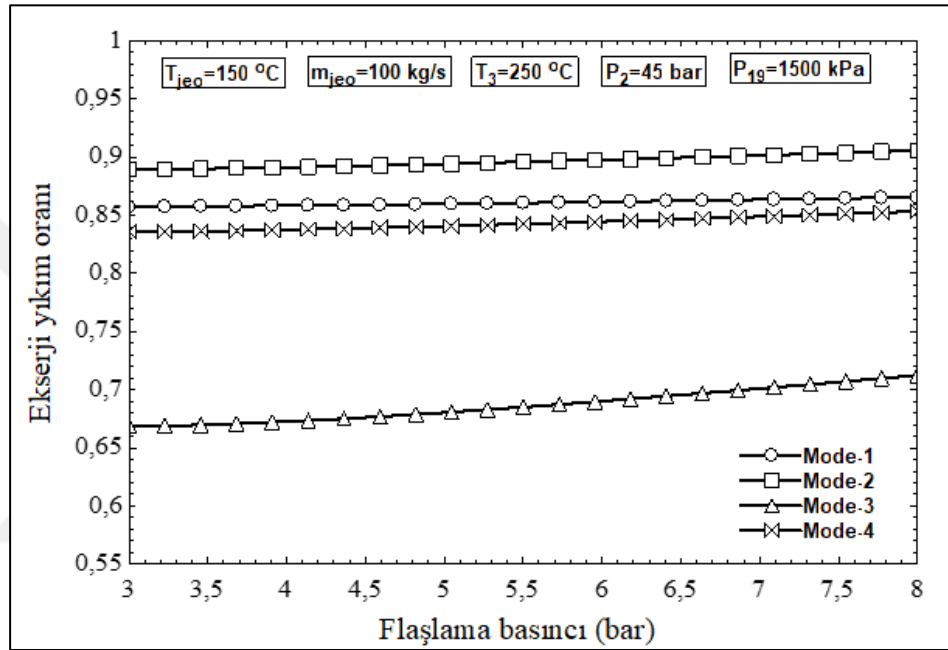


Şekil 4.59: Çalışma modlarına göre ekserji yıkım oranının eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı değişimi.

Şekil 4.59'da çalışma modlarına göre ekserji yıkım oranının eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.59'da gösterildiği gibi eşanjör-p çıkış sıcaklığı arttığında tüm çalışma modlarında ekserji yıkım oranı azalmaktadır. Sistem çalışma modları arasında eşanjör-p çıkış sıcaklığına bağlı olarak en yüksek ve en düşük ekserji yıkım oranı sırasıyla M2 ve M3 çalışma modlarında elde edilmiştir. Tüm çalışma modları için ekserji yıkım oranının en yüksek ve en düşük olduğu eşanjör-p sıcaklık değerleri 175 °C ve 250 °C olarak belirlenmiştir. 175 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında M1, M2, M3 ve M4 çalışma modlarında ekserji yıkım oranı sırasıyla 0,87, 0,92, 0,79 ve 0,87 iken 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında bu değerler yaklaşık 0,86, 0,9, 0,7 ve 0,85 olarak hesaplanmıştır.

Tüm çalışma modlarına göre flaşlama basıncına bağlı olarak ekserji yıkım oranının değişimi Şekil 4.60'da gösterilmiştir. Flaşlama basıncı arttığında tüm çalışma

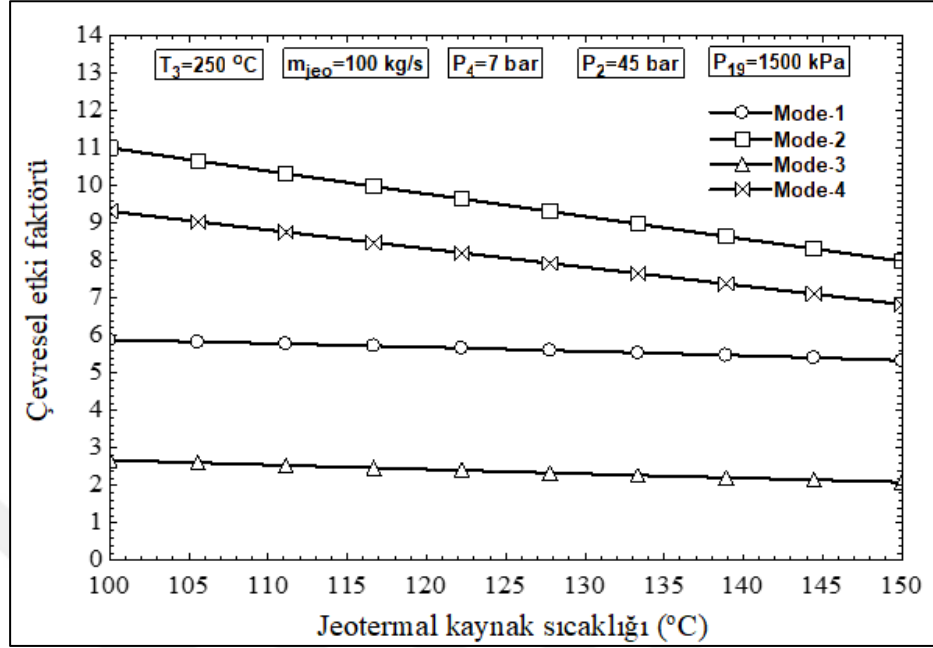
modlarında ekserji yıkım oranının arttığı görülmektedir. Çalışma modları arasında en yüksek ekserji yıkım oranı değerine sahip olan M2 çalışma modunda 3 bar ve 8 bar flaşlama basınçlarında bu değerler yaklaşık olarak 0,889 ve 0,905 iken en düşük ekserji yıkım oranına sahip M3 çalışma modunda ise sırasıyla 0,668 ve 0,712 olarak belirlenmiştir. Diğer taraftan, M1 ve M4 çalışma modlarında 3 bar flaşlama basıncında ekserji yıkım oranı sırasıyla 0,857 ve 0,835 iken 8 bar basınçta bu değerler yaklaşık 0,865 ve 0,853 olarak hesaplanmıştır.



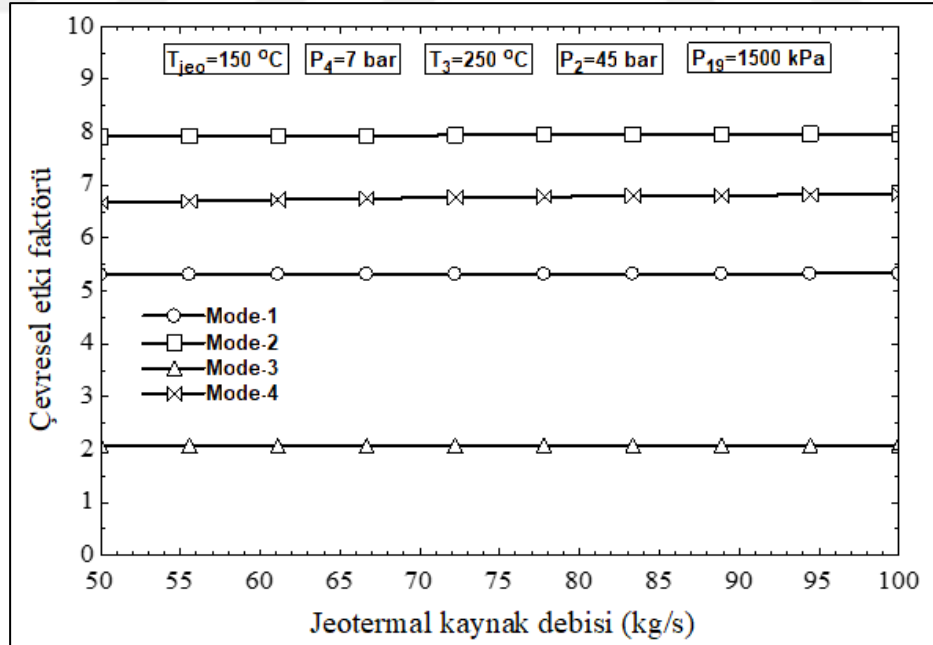
Şekil 4.60: Çalışma modlarına göre ekserji yıkım oranının flaşlama basıncına bağlı değişimi.

Çalışma modlarına göre jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak çevresel etki faktörünün değişimi Şekil 4.61’de verilmiştir. Jeotermal kaynak sıcaklığı arttığında tüm çalışma modlarında çevresel etki faktörünün azaldığı görülmektedir. Çalışma modları arasında en yüksek çevresel etki faktörü M2 çalışma modunda iken en düşük çevresel etki faktörü M3 çalışma modunda açığa çıkmıştır. Jeotermal kaynak sıcaklığının 100 °C olduğu durumda M3 çalışma modunda çevresel etki faktörü 2,67 iken 150 °C sıcaklıkta çevresel etki faktörü 2,1 olarak belirlenmiştir. M2 çalışma modunda aynı jeotermal kaynak sıcaklığı değerlerinde çevresel etki faktörü sırasıyla 11 ve 7,97 olarak elde edilmiştir. M1 ve M4 çalışma modları için en yüksek çevresel etki faktörü 100 °C jeotermal kaynak sıcaklığında sırasıyla 5,88 ve 9,31 iken en düşük

çevresel etki faktörü 150 °C jeotermal kaynak sıcaklığında sırasıyla 5,33 ve 6,83 olarak hesaplanmıştır.



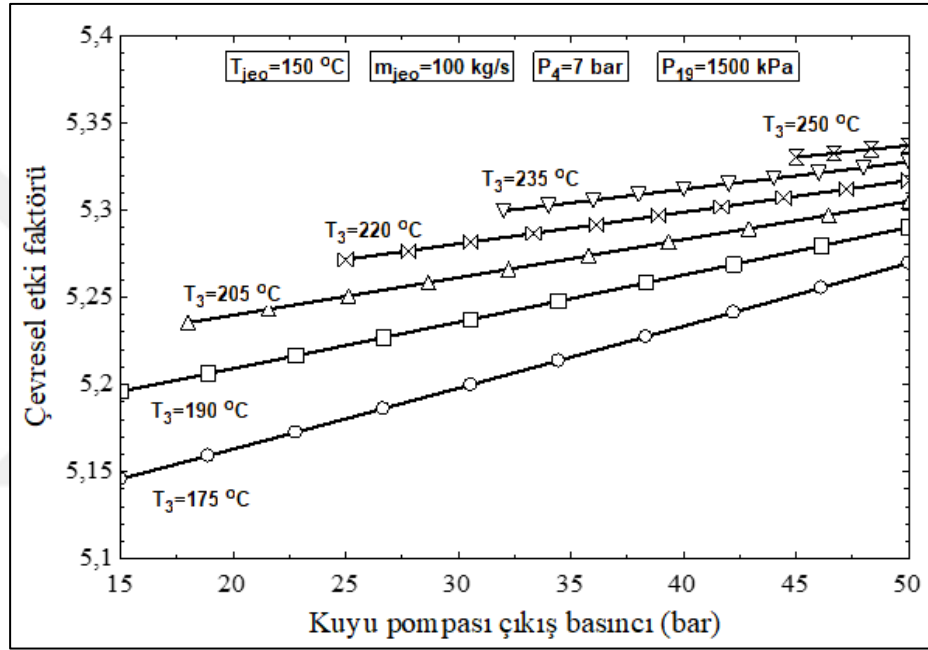
Şekil 4.61: Çalışma modlarına göre çevresel etki faktörünün jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi.



Şekil 4.62: Çalışma modlarına göre çevresel etki faktörünün jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi.

Şekil 4.62’de çalışma modlarına göre çevresel etki faktörünün jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi gösterilmektedir. Jeotermal kaynak debisi arttığında tüm

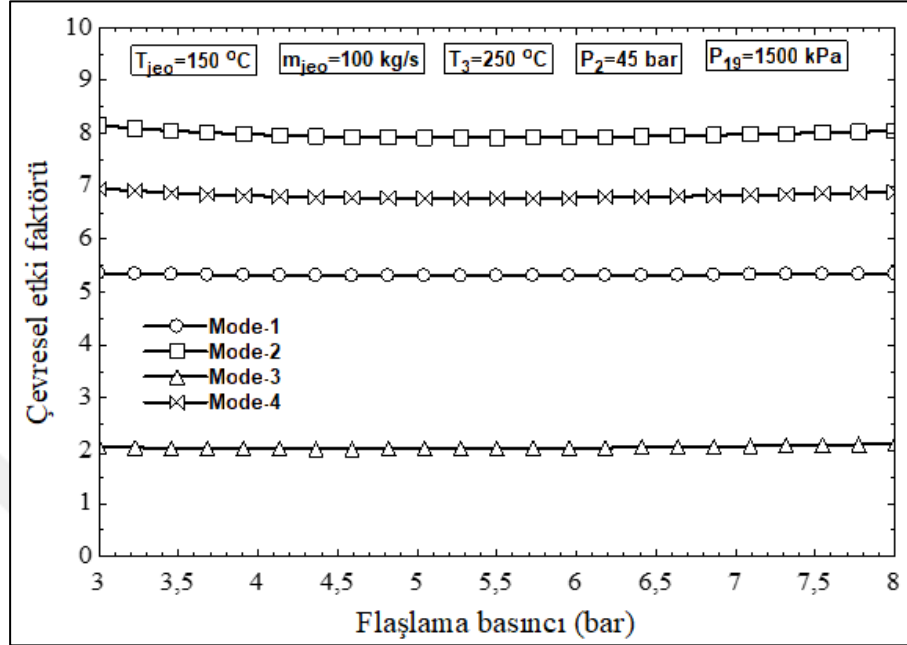
çalışma modlarında çevresel etki faktörünün nispeten değişmediği görülmektedir. Sistem çalışma modları arasında jeotermal kaynak debisine bağlı olarak en yüksek ve en düşük çevresel etki faktörü sırasıyla M2 ve M3 çalışma modlarında elde edilmiştir. M2 çalışma modunda jeotermal kaynak debisi 50 kg/s ve 100 kg/s olduğunda çevresel etki faktörü yaklaşık 7,94 olarak bulunmuştur. M3 çalışma modunda aynı jeotermal kaynak debi değerlerinde çevresel etki faktörü yaklaşık 2,08 olarak belirlenmiştir. Bu parametrik analizde, aynı çalışma şartlarında çevresel etki faktörü M1 çalışma modunda yaklaşık 5,33 iken M4 çalışma modunda 6,76 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.63: M1 çalışma modunda çevresel etki faktörünün eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi.

Şekil 4.63'te M1 çalışma modunda çevresel etki faktörünün eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi verilmiştir. Şekil 4.63'te eşanjör-p çıkış sıcaklığı ve kuyu pompası çıkış basıncı arttığında çevresel etki faktörünün arttığı görülmektedir. Bu çalışmada, en yüksek çevresel etki faktörü 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında iken en düşük çevresel etki faktörü 175 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında olduğu belirlenmiştir. Eşanjör-p çıkış sıcaklığının 175 °C, kuyu pompası çıkış basıncının 15 bar ve 50 bar olduğu durumda, çevresel etki faktörü sırasıyla 5,14 ve 5,27 iken aynı kuyu pompası çıkış basıncında eşanjör-p çıkış sıcaklığının 190 °C olduğu durumda çevresel etki faktörü yaklaşık 5,19 ve 5,29 olarak elde edilmiştir. M1 çalışma modu için 235 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında, kuyu

pompası çıkış basıncının 32 bar ve 50 bar olduğu durumda çevresel etki faktörü sırasıyla 5,29 ve 5,32 iken 205 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında kuyu pompası çıkış basıncının 18 bar ve 50 bar olduğu durumda yaklaşık 5,23 ve 5,3 olarak bulunmuştur.

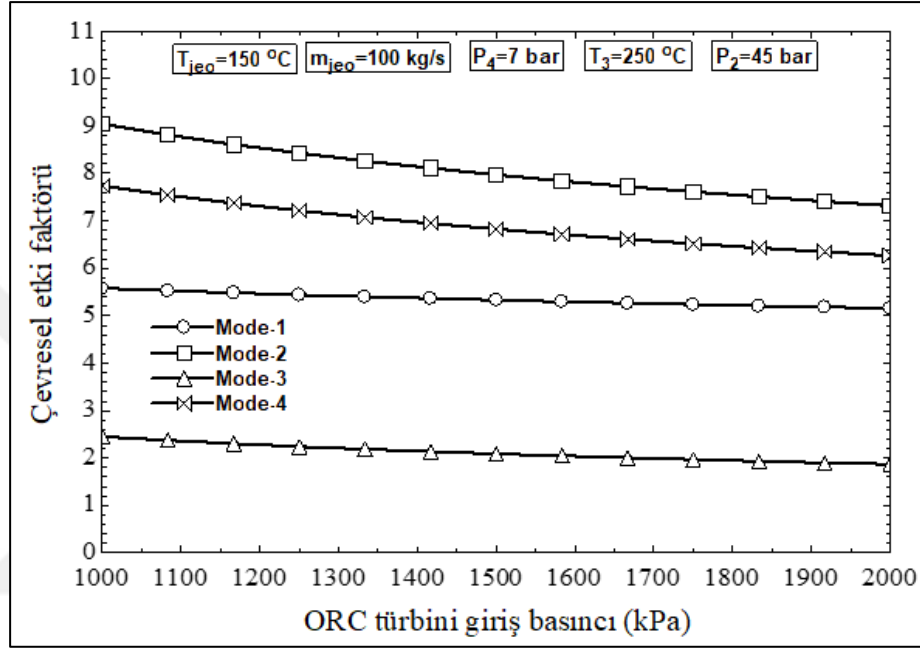


Şekil 4.64: Çalışma modlarına göre çevresel etki faktörünün flaşlama basıncına bağlı değişimi.

Çalışma modlarına göre flaşlama basıncına bağlı olarak çevresel etki faktörünün değişimi Şekil 4.64'te verilmiştir. Tüm çalışma modlarında flaşlama basıncı arttığında çevresel etki faktörü belirli bir noktaya kadar azalmakta daha sonra çok az artış göstermektedir. Sistem çalışma modları arasında flaşlama basıncına bağlı olarak en yüksek ve en düşük çevresel etki faktörü sırasıyla M2 ve M3 çalışma modlarında elde edilmiştir. M2 çalışma modunda flaşlama basıncının 3 bar olduğu durumda çevresel etki faktörü 8,151 iken 8 bar flaşlama basıncında bu değer yaklaşık olarak 8,047 kadar azalmaktadır. Diğer taraftan, 3 bar flaşlama basıncında M1, M3 ve M4 çalışma modları için çevresel etki faktörü sırasıyla 5,361, 2,077 ve 6,959 iken 8 bar basınçta 5,351, 2,129 ve 6,894 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.65'te çalışma modlarına göre çevresel etki faktörünün ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi gösterilmektedir. ORC türbin giriş basıncı arttığında tüm çalışma modlarında çevresel etki faktörü azalmaktadır. Sistem çalışma modları arasında ORC türbin basıncına bağlı olarak en yüksek ve en düşük çevresel etki faktörü M2 ve M3 çalışma modlarında elde edilmiştir. Örneğin, M2 çalışma modunda ORC

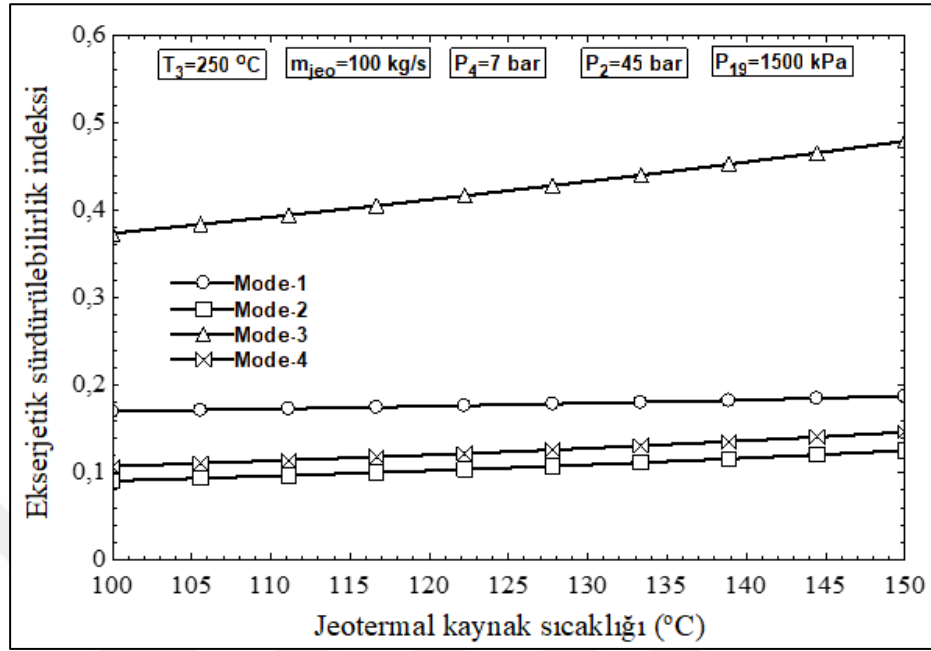
türbin giriş basıncı 1000 kPa ve 2000 kPa olduğunda, çevresel etki faktörü sırasıyla 9,04 ve 7,32 olarak bulunmuştur. Bu parametrik çalışmada, M3 çalışma modunda aynı ORC türbin giriş basınç değerlerinde çevresel etki faktörü sırasıyla 2,44 ve 1,86 olarak elde edilmiştir. ORC türbin giriş basıncının 1000 kPa ve 2000 kPa olduğu çalışma şartlarında çevresel etki faktörü değerleri M1 çalışma modu için sırasıyla 5,58 ve 5,15 iken M4 çalışma modunda sırasıyla 7,74 ve 6,26 olarak belirlenmiştir.



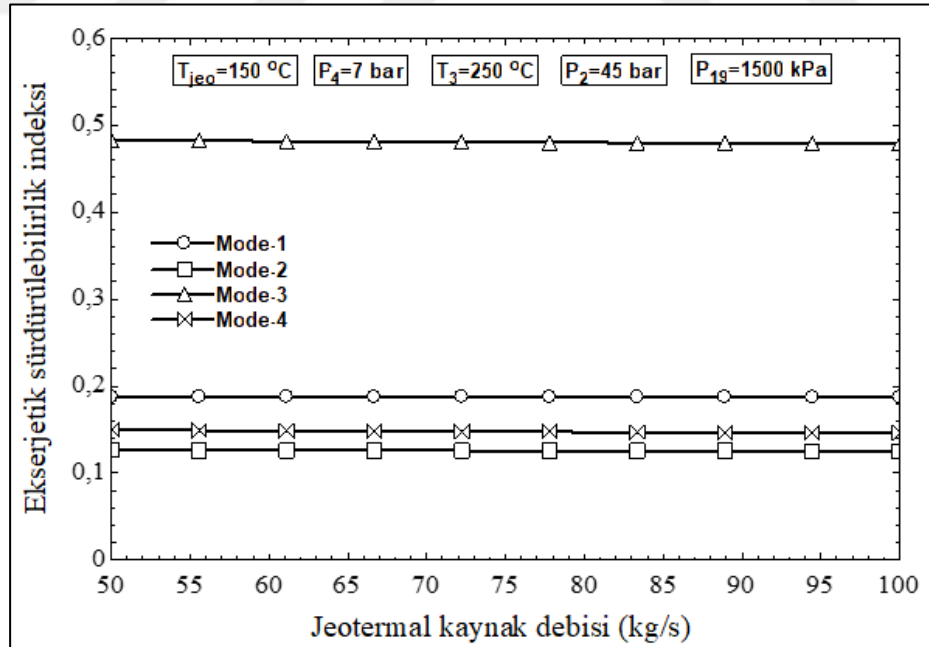
Şekil 4.65: Çalışma modlarına göre çevresel etki faktörünün ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi.

Şekil 4.66'da çalışma modlarına göre ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi verilmiştir. Şekil 4.66'da gösterildiği gibi jeotermal kaynak sıcaklığı arttığında tüm çalışma modlarında ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin arttığı görülmektedir. Örneğin; M4 çalışma modu için 100 °C jeotermal kaynak sıcaklığında ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 0,11 iken 150 °C sıcaklıkta yaklaşık 0,14 olarak belirlenmiştir. Bu parametrik analiz çalışmasında, çalışma modları arasında en yüksek ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi M3 çalışma modunda 150 °C jeotermal kaynak sıcaklığında 0,48 olarak hesaplanmıştır. Çalışma modları arasında jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak en düşük ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin M2 çalışma modunda 0,09 olarak 100 °C jeotermal kaynak sıcaklığında olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, 100 °C ve 150 °C jeotermal

kaynak sıcaklıklarında ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi değerleri M1 çalışma modu için sırasıyla yaklaşık 0,17 ve 0,19 olarak hesaplanmıştır.



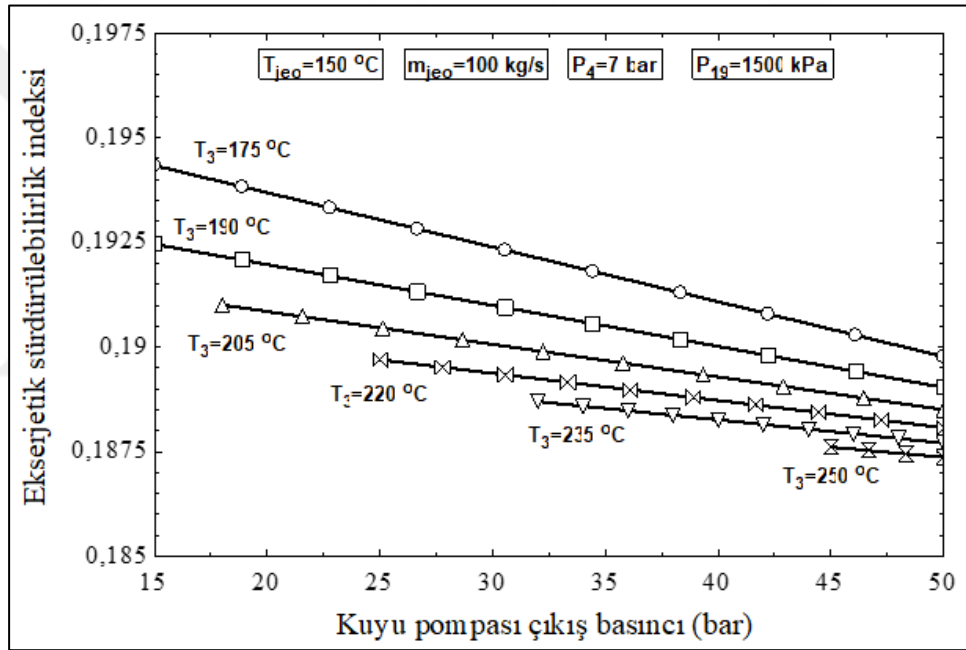
Şekil 4.66: Çalışma modlarına göre ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı değişimi.



Şekil 4.67: Çalışma modlarına göre ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi.

Şekil 4.67’de çalışma modlarına göre ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin jeotermal kaynak debisine bağlı değişimi gösterilmektedir. Jeotermal kaynak debisi

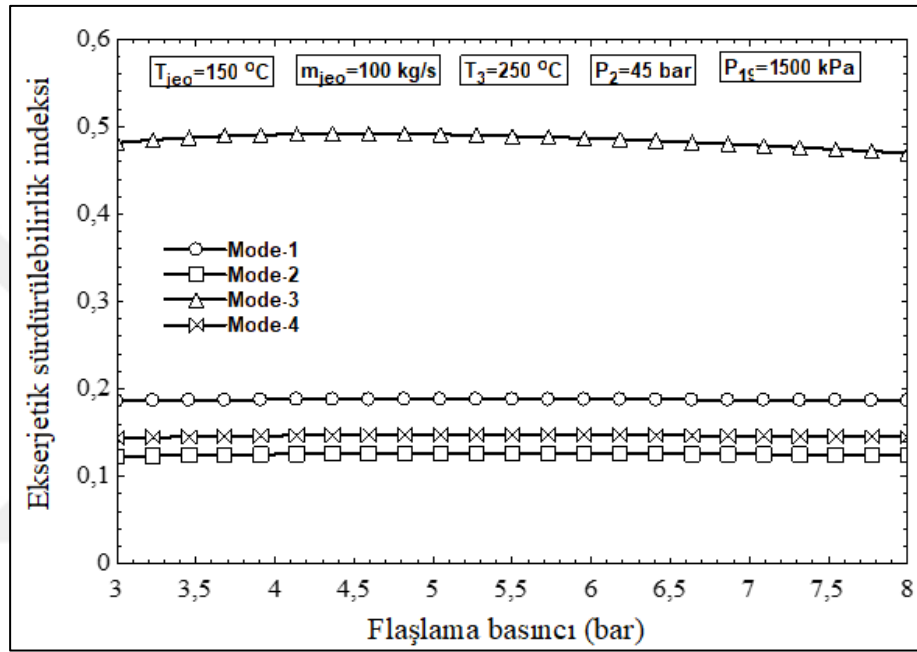
arttığında tüm çalışma modlarında ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin nispeten değişmediği görülmektedir. Çalışma modları arasında jeotermal kaynak debisine bağlı olarak en yüksek ve en düşük ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi sırasıyla M3 ve M2 çalışma modlarında elde edilmiştir. M3 çalışma modunda jeotermal kaynak debisinin 50 kg/s ve 100 kg/s olduğu durumlarda ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi yaklaşık 0,48 olarak bulunmuştur. M2 çalışma modunda ise aynı jeotermal kaynak debi değerlerinde ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi yaklaşık 0,12 olarak belirlenmiştir. Diğer taraftan, 50 kg/s ve 100 kg/s jeotermal kaynak debilerinde ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi M1 çalışma modunda 0,19 iken M4 çalışma modunda 0,15 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.68: M1 çalışma modunda ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi.

M1 çalışma modunda ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin eşanjör-p çıkış sıcaklığına ve kuyu pompası çıkış basıncına bağlı değişimi Şekil 4.68'de gösterilmektedir. Şekil 4.68'de eşanjör-p çıkış sıcaklığı ve kuyu pompası çıkış basıncı arttığında ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin nispeten azaldığı görülmektedir. Örneğin, kuyu pompası çıkış basıncının 50 bar ve eşanjör-p çıkış sıcaklığı 175 °C olduğu durumda ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 0,189 iken aynı kuyu pompası çıkış basıncında eşanjör-p çıkış sıcaklığının 250 °C olduğu durumda ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 0,187 olarak belirlenmiştir. M1 çalışma modu için 220 °C

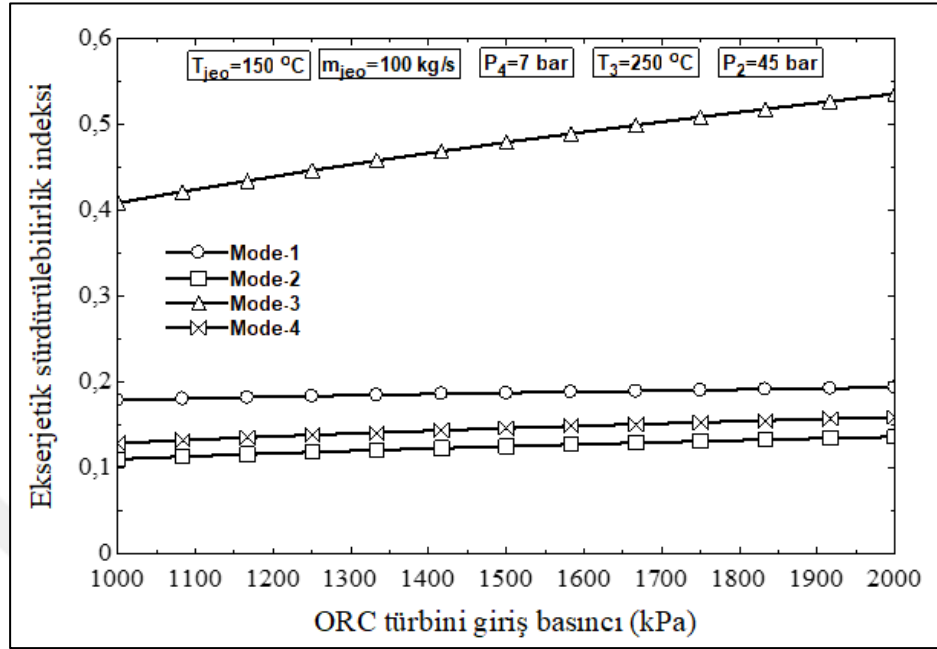
eşanjör-p çıkış sıcaklığında kuyu pompası çıkış basıncının 25 bar olduğu durumda ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 0,189 iken 50 bar kuyu pompası çıkış basıncında ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 0,188 olarak elde edilmiştir. M1 modu için en yüksek ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 175 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında ve 15 bar kuyu pompası çıkış basıncında 0,194 iken en düşük ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığında ve 50 bar kuyu pompası çıkış basıncında 0,187 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.69: Çalışma modlarına göre ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin flaşlama basıncına bağlı değişimi.

Çalışma modlarına göre flaşlama basıncına bağlı olarak ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin değişimi Şekil 4.69'da verilmiştir. Tüm çalışma modlarında flaşlama basıncı arttığında ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi M3 çalışma modunda belirli bir noktaya kadar artmakta ve daha sonra azalış gösterirken diğer çalışma modlarında nispeten değişmediği görülmektedir. Çalışma modları arasında flaşlama basıncına bağlı olarak en yüksek ve en düşük ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi sırasıyla M3 ve M2 çalışma modlarında elde edilmiştir. Örneğin; M3 çalışma modunda flaşlama basıncının 3 bar olduğu durumda ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 0,481 iken bu değer 8 bar basınçta 0,469 olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, M1, M2 ve M4 çalışma modları için 3 bar flaşlama basıncında ekserjetik

sürdürülebilirlik indeksi sırasıyla 0,186, 0,122 ve 0,143 iken 8 bar basınçta bu değerler yaklaşık 0,186, 0,124 ve 0,145 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.70: Çalışma modlarına göre ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi.

Şekil 4.70'de çalışma modlarına göre ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin ORC türbin giriş basıncına bağlı değişimi gösterilmektedir. ORC türbin giriş basıncı arttığında tüm çalışma modlarında ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi artmaktadır. Çalışma modları arasında ORC türbin basıncına bağlı olarak en yüksek ve en düşük ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi M3 ve M2 çalışma modlarında elde edilmiştir. M3 çalışma modunda ORC türbin giriş basıncının 1000 kPa ve 2000 kPa olduğu durumlarda ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi sırasıyla 0,408 ve 0,535 olarak bulunmuştur. Bu parametrik çalışmada, M2 çalışma modunda aynı ORC türbin giriş basınç değerlerinde ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi sırasıyla 0,110 ve 0,136 olarak elde edilmiştir. Aynı basınç değerlerinde, ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi değerleri M1 çalışma modu için sırasıyla 0,179 ve 0,193 iken M4 çalışma modunda yaklaşık 0,129 ve 0,159 olarak belirlenmiştir.

HÇÜS'ün jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak tüm çalışma modları için sürdürülebilirlik göstergelerinin sonuçları Tablo 4.8'de verilmiştir. Söz konusu bu çalışma, kuyu pompası çıkış basıncının 45 bar, eşanjör-p çıkış sıcaklığının 250 °C, flaşlama basıncının 7 bar ve ORC türbin giriş basıncının 1500 kPa olduğu çalışma

şartlarında gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, bu çalışmaya ek olarak diğer temel işletim parametreleri için de HÇÜS'ün tüm çalışma modlarına göre sürdürülebilirlik göstergelerine ait sonuçlar elde edilebilir.

Tablo 4.8: Jeotermal kaynak sıcaklığına göre sistem sürdürülebilirlik göstergelerinin sonuçları.

Sürdürülebilirlik göstergeleri	Mode-1		Mode-2		Mode-3		Mode-4	
	T _{jeo} (°C)		T _{jeo} (°C)		T _{jeo} (°C)		T _{jeo} (°C)	
	100	150	100	150	100	150	100	150
Performans göstergeleri								
$\dot{W}_{sis,net}$ (kW)	11615	11920	11960	12096	13653	13653	13213	13325
$\eta_{el,HÇÜS}$ (%)	4	5	7,8	8,8	11,2	12	8,2	9,4
$\eta_{HÇÜS}$ (%)	56,8	61	57,6	64,7	72,8	77,6	60,4	66,7
$\psi_{HÇÜS}$ (%)	14,9	16,2	8,4	11,3	28,5	34,2	9,8	13
$\sum \dot{E}x_{kay,HÇÜS}$ (kW)	326595	235951	169924	124135	42550	32998	142869	104655
Çevresel göstergeler								
$emi_{CO_2,HÇÜS}$ (kg/MWh)	1,154	1,332	2,184	2,181	2,169	2,17	396,8	290,5
$AZA_{CO_2,fy}$ (ton CO ₂ -e/h)	dg	41,46	36,53	23,84	23,91	24,72	24,71	26,31
	köm	76,14	67,09	43,78	43,91	45,41	45,39	48,31
	fo	59,72	52,62	34,34	34,44	35,61	35,6	37,89
Ekonomik gösterge								
$c_{übm}$ (\$/GJ)	51,36	47,63	191,9	145,2	118,3	88,49	133,7	102
Ekserjetik sürdürülebilirlik göstergeleri								
a_{aeo} (-)	0,877	0,865	0,931	0,906	0,764	0,715	0,919	0,892
g_{gko} (-)	0,001	0,002	0,004	0,005	0,012	0,014	0,044	0,043
y_{eyo} (-)	0,87	0,86	0,93	0,9	0,75	0,7	0,87	0,85
$\zeta_{çef}$ (-)	5,88	5,33	11	7,97	2,67	2,1	9,31	6,83
s_{esi} (-)	0,17	0,19	0,09	0,12	0,37	0,48	0,11	0,14

4.4. Durum Çalışması

Bu bölümde, tez çalışmasının temel amacı olan orta sıcaklıklı jeotermal enerji kaynaklarının biyokütle ve güneş enerjisi teknolojileri ile birlikte kullanıldığı yeni bir HÇÜS'ün performans, çevresel, ekonomik ve ekserji temelli göstergelerini içeren sürdürülebilirlik analizi örnek bir bölge için gerçekleştirilmiştir.

Türkiye sahip olduğu jeotermal kaynakları açısından dünyanın sayılı ülkeleri arasında yerini almakta olup bölgelere göre farklı sıcaklıklarda ve debilerde olan jeotermal enerji kaynakları doğrudan elektrik üretiminde, bölge ısıtmada, sera ısıtılmasında ve termal turizm vb. sektörlerde kullanılmaktadır. Söz konusu bu jeotermal kaynakların %77,9'u ülkemizin Batı Anadolu bölgesinde yer almaktadır. Bu bölgede jeotermal kaynaklar özellikle Denizli, Aydın, Afyon, Kütahya, Yalova, Çanakkale, Bursa, Balıkesir, Manisa, İzmir illerinde yoğunluk kazanmıştır. Bu

kaynakların çıkarılması ve kullanımına yönelik çalışmalar MTA Genel Müdürlüğü tarafından 1962 yılında başlatılmış ve 287,5 °C sıcaklığa kadar ulaşan yüksek sıcaklıklı jeotermal kaynaklar bulunmuştur [153]. Ayrıca gerçekleştirilen jeotermal kaynak araştırmalarında birçok bölgede ise orta ve düşük sıcaklıklı jeotermal kaynaklar da keşfedilmiştir. Bu bağlamda, bu tez çalışmasının amaçları doğrultusunda geliştirilen ve sürdürülebilirlik analizi gerçekleştirilen HÇÜS'ün uygulama alanları olarak düşünülen orta sıcaklıklı jeotermal enerji kaynaklarının dağılımı Şekil 4.71'de verilmiştir [152], [153]. Bu tez çalışması kapsamında durum çalışması gerçekleştirilen bölgenin giriş parametreleri Tablo 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.71: Türkiye'deki orta sıcaklıklı jeotermal enerji kaynaklarının dağılımı.

Tablo 4.9: Durum çalışmasının giriş parametreleri.

İl	Afyonkarahisar			
Bölge	Ömer/Gecek			
Ay	Haziran			
Parametreler	Sembol	Değer	Birim	Referans
Ortalama çevre sıcaklığı	T_o	19,9	°C	[156]
Güneş ışınım miktarı	$I_{gün}$	621,82	W/m ²	[157]
Jeotermal kaynak şartları				
Jeotermal kaynak sıcaklığı	T_1	102,24	°C	[158]
Jeotermal kaynak basıncı	P_1	200	kPa	[158]
Jeotermal kaynak debisi	m_1	63,4	kg/s	[158]

Örnek seçilen bölge için gerçekleştirilen durum çalışmasında, kuyu pompası çıkış basıncının 45 bar, eşanjör-p çıkış sıcaklığının 250 °C, flaşlama basıncının 7 bar ve ORC türbini giriş basıncının 2000 kPa olduğu çalışma şartları dikkate alınmıştır. Bu çalışma parametrelerine göre HÇÜS'ün M1, M2, M3 ve M4 çalışma modları için

net elektrik gücü sırasıyla 7260 kW, 7419 kW, 8961 kW ve 8690 kW olarak belirlenmiştir. HÇÜS'ün enerji ve ekserji verimleri M1, M2, M3 ve M4 çalışma modlarında, sırasıyla, %57,02, %57,8, %72,69, %60,68 ve %15,68, %9,71, %31,72, %11,45 olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte, söz konusu bölge için gerçekleştirilen durum çalışmasında, M1, M2, M3 ve M4 çalışma modlarına göre çevresel etki faktörü sırasıyla 9,41, 2,25, 7,85 ve 7,85 iken ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 0,18, 0,1, 0,44 ve 0,12 olarak hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen durum çalışmasında elde edilen diğer sürdürülebilirlik göstergelerinin sonuçları Tablo 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4.10: Durum çalışmasının sonuçları.

Faydalı çıktılar	Mode-1	Mode-2	Mode-3	Mode-4
Net elektrik gücü (kW)	7260	7419	8961	8690
Isıtma (kW)	3984	3984	3984	3984
Soğutma (kW)	1023	1023	1023	1023
Sıcak su üretimi (kW)	39363	39363	39363	44185
Kurutma havası (kW)	1327	1327	1327	1327
Isı depolama (MWh)	351,2	-	-	-
Buhar üretimi (kW)	461,52	461,52	461,52	461,52
Biyogaz üretimi (kg/h)	135,72	135,72	135,72	135,72
Hidrojen üretim (kg/h)	33,09	33,09	-	-
Performans göstergeleri				
Sistem net elektrik verimi (%)	4,07	7,87	11,84	8,85
Sistem enerji verimi (%)	57,02	57,9	72,69	60,68
Sistem ekserji verimi (%)	15,68	9,71	31,72	11,45
Sistem toplam ekserji kaybı (kW)	194482	100955	24884	84291
Çevresel göstergeler				
Birim CO ₂ emisyon miktarı (kg/MWh)	1,89	3,52	3,49	385
CO ₂ emisyonu azaltım potansiyeli (ton CO ₂ -e/h)	Doğalgaz	11,65	11,7	12,26
	Kömür	23,95	24,09	25,36
	Sıvı yakıt	18,01	18,11	19,11
Ekonomik gösterge				
Toplam ürün birim maliyeti (\$/GJ)	62,15	209,7	123,4	137,9
Ekserjetik sürdürülebilirlik göstergeleri				
Atık ekserji oranı (-)	0,86	0,91	0,71	0,89
Ekserji geri kazanılabilirlik oranı (-)	0,002	0,004	0,013	0,045
Ekserji yıkım oranı (-)	0,86	0,9	0,7	0,85
Çevresel etki faktörü (-)	5,53	9,41	2,25	7,85
Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi (-)	0,18	0,1	0,44	0,12

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışması tezin amaç ve kapsamı doğrultusunda beş ana başlık altında gerçekleştirilmiştir.

Birinci bölümde tez çalışmasının kapsamı ile ilgili literatürde yapılan çalışmalara atıflar yapılarak tezin önemi vurgulanmış ve kısa bir literatür bilgisi verilmiştir. Daha sonra tezin amacı ve önemi hakkında bilgiler ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.

İkinci bölümde tezin kapsamı, amacı ve önemi doğrultusunda literatürde gerçekleştirilen ulusal ve uluslararası çalışmalar ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Bu bölümde, literatür araştırması i) yenilenebilir enerji destekli çoklu üretim sistemleri, ii) sürdürülebilirlik analizleri üzerine yapılan çalışmalar olmak üzere iki ana alt başlıklar altında detaylı bir şekilde gerçekleştirilmiş ve tezin diğer çalışmalardan farkı, orijinalitesi ve önemi hakkında bilgiler aktarılmıştır.

Üçüncü bölümde HÇÜS'ün sürdürülebilirlik analizini gerçekleştirmek için gerekli olan çalışmalar yürütülmüştür. İlk olarak sistemi oluşturan tüm alt sistemlerin kapsamlı bir şekilde termodinamik modellemeleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra HÇÜS'ün performans, çevresel, ekonomik ve ekserjetik sürdürülebilirlik göstergelerine ait denklemler M1, M2, M3, M4 çalışma modlarına göre ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.

Dördüncü bölümde ilk olarak termodinamik modellemeler bölümünde PGK, BYS, KGS, ASS, KOYP ve PEME için kurulan matematiksel ve termodinamik modellerinin literatürde mevcut benzer deneysel ve parametrik çalışmalarla doğrulaması yapılmıştır. Daha sonra HÇÜS için geliştirilen sürdürülebilirlik göstergeleri sistem temel işletim parametrelerine göre parametrik olarak detaylı bir şekilde hesaplanmış ve sonuçlar ayrıntılı bir şekilde tartışılmıştır. Bununla birlikte, bu tez çalışmasının temel amacına yönelik olarak seçilen örnek bir bölge için sürdürülebilirlik analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.

Beşinci bölümde tezin amacı ve kapsamı doğrultusunda elde edilen önemli sonuçlar ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Ayrıca tez çalışması boyunca elde edilen bilgi birikimi ve tecrübeler doğrultusunda ileride yapılabilecek çalışmalar önerilmiştir.

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında orta sıcaklıklı jeotermal enerji kaynakları ile birlikte biyokütle ve güneş enerji kaynaklarının hibrit olarak kullanıldığı yeni bir çoklu üretim sisteminin sürdürülebilirlik analizi ayrıntılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu başlık altında, HÇÜS'ün temel işletim parametreleri olarak dikkate alınan jeotermal kaynak sıcaklığına, jeotermal kaynak debisine, kuyu pompası çıkış basıncına, eşanjör-p çıkış sıcaklığına, flaşlama basıncına ve ORC türbini giriş basıncına bağlı olarak sürdürülebilirlik göstergeleri için elde edilen önemli sonuçları ayrıntılı bir şekilde incelenmiş ve tartışılmıştır. Bu tez çalışmasında elde edilen önemli sonuçlar şu şekilde açıklanabilir:

- Tüm çalışma modlarında en yüksek net elektrik gücü 45 bar kuyu pompası çıkış basıncı, 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığı, 150 °C jeotermal kaynak sıcaklığı, 100 kg/s jeotermal kaynak debisi, 8 bar flaşlama basıncı ve 2000 kPa ORC türbin giriş basıncı çalışma şartlarında elde edilmiştir. Bu çalışma şartlarında, M1, M2, M3 ve M4 çalışma modları için sistem net elektrik gücü sırasıyla 12233 kW, 12389 kW, 13926 kW ve 13618 kW olarak hesaplanmıştır.
- HÇÜS için geliştirilen tüm çalışma modları göz önüne alınarak, sistem enerji veriminin en yüksek olduğu çalışma şartları 15 bar kuyu pompası çıkış basıncı, 175 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığı, 150 °C jeotermal kaynak sıcaklığı, 100 kg/s jeotermal kaynak debisi, 3 bar flaşlama basıncı ve 2000 kPa ORC türbin giriş basıncı olarak belirlenmiştir. Bu çalışma şartlarında, M1, M2, M3 ve M4 çalışma modları için sistem enerji verimi sırasıyla %76, %82, %89 ve %83 olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, tüm çalışma modları için en yüksek sistem ekserji verimleri benzer çalışma şartlarında elde edilmiştir. Bu çalışma şartlarında, M1, M2, M3 ve M4 çalışma modlarında sistem ekserji verimi %22, %23, %47 ve %25 olarak bulunmuştur.
- HÇÜS'ün tüm çalışma modları incelendiğinde, sistem toplam ekserji kaybının en düşük olduğu çalışma şartları 15 bar kuyu pompası çıkış basıncı, 175 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığı, 150 °C jeotermal kaynak sıcaklığı, 50 kg/s jeotermal kaynak debisi, 3 bar flaşlama basıncı ve 2000 kPa ORC türbin giriş basıncı olarak belirlenmiştir. Bu çalışma şartlarında, M1, M2, M3 ve M4 çalışma modlarında sistem toplam

ekserji kaybı sırasıyla 22571 kW, 14720 kW, 5048 kW ve 12389 kW olarak elde edilmiştir.

- HÇÜS çevresel açıdan değerlendirildiğinde, en düşük birim CO₂ emisyonu M1, M2 ve M3 çalışma modları için 45 bar kuyu pompası çıkış basıncı, 250 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığı, 100 °C jeotermal kaynak sıcaklığı, 100 kg/s jeotermal kaynak debisi, 3 bar flaşlama basıncı ve 1000 kPa ORC türbin giriş basıncı çalışma şartlarında sırasıyla 1,89 kg/MWh, 2,08 kg/MWh ve 2,06 kg/MWh olarak bulunmuştur. Bununla birlikte, HÇÜS'ün tasarlanan tüm çalışma modları ve dikkate alınan üç fosil yakıt türü için sistemin en yüksek CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli aynı çalışma şartlarında elde edilmiştir. Bu çalışma şartlarında, fosil yakıt olarak kömür seçildiğinde M1, M2, M3 ve M4 çalışma modları için CO₂ emisyonu azaltım potansiyeli sırasıyla 77,36 ton CO₂-e/h, 44 ton CO₂-e/h, 45,64 ton CO₂-e/h ve 48,64 ton CO₂-e/h olarak hesaplanmıştır.

- HÇÜS'ün en önemli sürdürülebilirlik göstergelerinden biri olan ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi sistem temel işletim parametrelerine bağlı olarak incelendiğinde, tüm çalışma modları için en yüksek ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin 15 bar kuyu pompası çıkış basıncı, 175 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığı, 150 °C jeotermal kaynak sıcaklığı, 100 kg/s jeotermal kaynak debisi, 3 bar flaşlama basıncı ve 2000 kPa ORC türbin giriş basıncı çalışma şartlarında M1, M2, M3 ve M4 çalışma modları için sırasıyla 0,27, 0,29, 0,85 ve 0,34 olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, aynı çalışma şartlarında HÇÜS tüm çalışma modlarında en düşük çevresel etki faktörüne sahiptir ve M1, M2, M3 ve M4 çalışma modları için çevresel etki faktörü sırasıyla 3,7, 3,45, 1,17 ve 2,94 olarak elde edilmiştir.

- HÇÜS eksergoekonomik açıdan değerlendirildiğinde, tüm çalışma modlarında en düşük toplam ürün birim maliyetinin 15 bar kuyu pompası çıkış basıncı, 175 °C eşanjör-p çıkış sıcaklığı, 150 °C jeotermal kaynak sıcaklığı, 100 kg/s jeotermal kaynak debisi, 3 bar flaşlama basıncı ve 2000 kPa ORC türbin giriş basıncı çalışma şartlarında olduğu bulunmuştur. Bu çalışma şartlarında, M1, M2, M3 ve M4 çalışma modları için toplam ürün birim maliyeti sırasıyla 15,64 \$/GJ, 73,67 \$/GJ, 39,92 \$/GJ ve 48,3 \$/GJ olarak elde edilmiştir.

5.2. Öneriler

Bu bölümde, tez çalışması boyunca gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen bilgi birikimi ve tecrübelerle ileride yapılabilecek çalışmalara yönelik öneriler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Bu tez çalışmasında geliştirilen HÇÜS için gerçekleştirilen parametrik analizler dikkate alınarak sistem temel işletim parametrelerine göre detaylı optimizasyon çalışmalarının yapılması önerilmektedir.
- Bu tez çalışmasında geliştirilen HÇÜS'ün değişken koşullarda sayısal, teorik ve gerçek çalışma şartlarında sürdürülebilirlik göstergelerinin araştırılması önerilmektedir.
- Bu tez çalışmasında geliştirilen HÇÜS için gerçekleştirilen daimî durum analizlerine ek olarak dinamik analizlerin gerçekleştirilmesi önerilmektedir.
- Bu tez çalışmasında HÇÜS için dikkate alınan temel işletim parametrelerine ek olarak farklı çalışma parametreleri ve farklı alt sistem kombinasyonları kullanılarak sürdürülebilirlik analizlerinin yapılması önerilmektedir.
- Bu tez çalışmasında geliştirilen HÇÜS'ün ve tüm alt sistemlerin detaylı tasarım çalışmaları yapılarak ekonomik analizlerinin gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Midilli A., Dincer I., Ay M., (2006), "Green energy strategies for sustainable development", *Energy Policy*, 34 (18), 3623-3633.
- [2] Midilli A., Dincer I., (2007), "Key strategies of hydrogen energy systems for sustainability" *International Journal of Hydrogen Energy*, 32 (5), 511-524.
- [3] Banos R., Manzano-Agugliaro F., Montoya F. G., Gil C., Alcayde A., Gómez J., (2011), "Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (4), 1753-1766.
- [4] Kveselis V., Dzenajavičienė E. F., Masaitis S., (2017), "Analysis of energy development sustainability: The example of the Lithuanian district heating sector", *Energy Policy*, 100, 227-236.
- [5] Dincer I., Zamfirescu C., (2012), "Renewable-energy-based multigeneration systems", *International Journal of Energy Research*, 36 (15), 1403-1415.
- [6] Al-Sulaiman F. A., Dincer I., Hamdullahpur F., (2010), "Exergy analysis of an integrated solid oxide fuel cell and organic Rankine cycle for cooling, heating and power production", *Journal of Power Sources*, 195 (8), 2346-2354.
- [7] Ahmadi P., Dincer I., Rosen M. A., (2013), "Thermodynamic modeling and multi-objective evolutionary-based optimization of a new multigeneration energy system", *Energy Conversion and Management*, 76, 282-300.
- [8] Afgan N. H., Carvalho M. G., (2004), "Sustainability assessment of hydrogen energy systems", *International Journal of Hydrogen Energy*, 29 (13), 1327-1342.
- [9] Onat N., Bayar H., (2010), "The sustainability indicators of power production systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (9), 3108-3115.
- [10] Al-Ali M., Dincer I., (2014), "Energetic and exergetic studies of a multigenerational solar-geothermal system", *Applied Thermal Engineering*, 71 (1), 16-23.
- [11] Islam S., Dincer I., (2017), "Development, analysis and performance assessment of a combined solar and geothermal energy-based integrated system for multigeneration", *Solar Energy*, 147, 328-343.
- [12] Calise F., d'Accadia M. D., Macaluso A., Piacentino A., Vanoli L., (2016), "Exergetic and exergoeconomic analysis of a novel hybrid solar-geothermal polygeneration system producing energy and water", *Energy Conversion and Management*, 115, 200-220.

- [13] Zhou C., Doroodchi E., Moghtaderi B., (2013), "An in-depth assessment of hybrid solar–geothermal power generation", *Energy Conversion and Management*, 74, 88-101.
- [14] Suleman F., Dincer I., Agelin-Chaab M., (2014), "Development of an integrated renewable energy system for multigeneration", *Energy*, 78, 196-204.
- [15] Karapekmez A., Dincer I., (2018), "Thermodynamic analysis of a novel solar and geothermal based combined energy system for hydrogen production", *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (9), 5608-5628.
- [16] Bicer Y., Dincer I., (2016), "Analysis and performance evaluation of a renewable energy based multigeneration system", *Energy*, 94, 623-632.
- [17] Malik M., Dincer I., Rosen M. A., (2015), "Development and analysis of a new renewable energy-based multi-generation system", *Energy*, 79, 90-99.
- [18] 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, 111953.
- [19] Karellas S., Braimakis K., (2016), "Energy–exergy analysis and economic investigation of a cogeneration and trigeneration ORC–VCC hybrid system utilizing biomass fuel and solar power", *Energy Conversion and Management*, 107, 103-113.
- [20] Sahoo U., Kumar R., Pant P. C., Chaudhury R., (2015), "Scope and sustainability of hybrid solar–biomass power plant with cooling, desalination in polygeneration process in India", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 304-316.
- [21] Khalid F., Dincer I., Rosen M. A., (2017), "Thermoeconomic analysis of a solar-biomass integrated multigeneration system for a community", *Applied Thermal Engineering*, 120, 645-653.
- [22] Ishaq H., Dincer I., (2019), "Design and performance evaluation of a new biomass and solar based combined system with thermochemical hydrogen production", *Energy Conversion and Management*, 196, 395-409.
- [23] Soltani R., Dincer I., Rosen M. A., (2015), "Thermodynamic analysis of a novel multigeneration energy system based on heat recovery from a biomass CHP cycle", *Applied Thermal Engineering*, 89, 90-100.
- [24] Al-Sulaiman F. A., Dincer I., Hamdullahpur F., (2012), "Energy and exergy analyses of a biomass trigeneration system using an organic Rankine cycle", *Energy*, 45 (1), 975-985.

- [25] Ozturk M., Dincer I., (2013), "Thermodynamic analysis of a solar-based multi-generation system with hydrogen production", *Applied Thermal Engineering*, 51 (1-2), 1235-1244.
- [26] Ahmadi P., Dincer I., Rosen M. A., (2013), "Development and assessment of an integrated biomass-based multi-generation energy system", *Energy*, 56, 155-166.
- [27] Almahdi M., Dincer I., Rosen M. A., (2016), "A new solar based multigeneration system with hot and cold thermal storages and hydrogen production", *Renewable Energy*, 91, 302-314.
- [28] Ozlu S., Dincer I., (2015), "Development and analysis of a solar and wind energy based multigeneration system", *Solar Energy*, 122, 1279-1295.
- [29] Hajabdollahi H., (2015), "Evaluation of cooling and thermal energy storage tanks in optimization of multi-generation system", *Journal of Energy Storage*, 4, 1-13.
- [30] Seyitoglu S. S., Dincer I., Kilicarslan A., (2016), "Assessment of an IGCC based trigeneration system for power, hydrogen and synthesis fuel production", *International Journal of Hydrogen Energy*, 41 (19), 8168-8175.
- [31] Islam S., Dincer I., Yilbas B. S., (2015), "Energetic and exergetic performance analyses of a solar energy-based integrated system for multigeneration including thermoelectric generators", *Energy*, 93, 1246-1258.
- [32] Buonomano A., Calise F., Palombo A., Vicidomini M., (2015), "Energy and economic analysis of geothermal–solar trigeneration systems: A case study for a hotel building in Ischia", *Applied Energy*, 138, 224-241.
- [33] Luqman M., Bicer Y., Al-Ansari T., (2019), "Thermodynamic analysis of an oxy-hydrogen combustor supported solar and wind energy-based sustainable polygeneration system for remote locations", *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (5), 3470-3483.
- [34] Ahmadi P., Dincer I., Rosen M. A., (2014), "Multi-objective optimization of a novel solar-based multigeneration energy system", *Solar Energy*, 108, 576-591.
- [35] Chen Q., Han W., Zheng J. J., Sui J., Jin H. G., (2014), "The exergy and energy level analysis of a combined cooling, heating and power system driven by a small scale gas turbine at off design condition", *Applied Thermal Engineering*, 66 (1-2), 590-602.
- [36] Ghosh S., Dincer I., (2014), "Development and analysis of a new integrated solar-wind-geothermal energy system", *Solar Energy*, 107, 728-745.
- [37] Daianova L., Dotzauer E., Thorin E., Yan J., (2012), "Evaluation of a regional bioenergy system with local production of biofuel for transportation, integrated with a CHP plant", *Applied Energy*, 92, 739-749.

- [38] Ratlamwala T. A. H., Dincer I., Gadalla M. A., (2012), "Thermodynamic analysis of an integrated geothermal based quadruple effect absorption system for multigenerational purposes", *Thermochimica Acta*, 535, 27-35.
- [39] Lian Z. T., Chua K. J., Chou S. K., (2010), "A thermoeconomic analysis of biomass energy for trigeneration", *Applied Energy*, 87 (1), 84-95.
- [40] Wang J., Dai Y., Gao L., Ma S., (2009), "A new combined cooling, heating and power system driven by solar energy", *Renewable Energy*, 34 (12), 2780-2788.
- [41] Huangfu Y., Wu J. Y., Wang R. Z., Kong X. Q., Wei B. H., (2007), "Evaluation and analysis of novel micro-scale combined cooling, heating and power (MCCHP) system", *Energy Conversion and Management*, 48 (5), 1703-1709.
- [42] Khalid F., Dincer I., Rosen M. A., (2016), "Techno-economic assessment of a renewable energy based integrated multigeneration system for green buildings", *Applied Thermal Engineering*, 99, 1286-1294.
- [43] Zhang X., Li H., Liu L., Zeng R., Zhang G., (2016), "Analysis of a feasible trigeneration system taking solar energy and biomass as co-feeds", *Energy Conversion and Management*, 122, 74-84.
- [44] Khanmohammadi S., Atashkari K., Kouhikamali R., (2016), "Modeling and assessment of a biomass gasification integrated system for multigeneration purpose", *International Journal of Chemical Engineering*, Vol: 2016.
- [45] Taheri M. H., Mosaffa A. H., Farshi L. G., (2017), "Energy, exergy and economic assessments of a novel integrated biomass based multigeneration energy system with hydrogen production and LNG regasification cycle", *Energy*, 125, 162-177.
- [46] Mohammadi A., Mehrpooya M., (2017), "Energy and exergy analyses of a combined desalination and CCHP system driven by geothermal energy", *Applied Thermal Engineering*, 116, 685-694.
- [47] Baghernejad A., Yaghoubi M., Jafarpur K., (2016), "Exergoeconomic comparison of three novel trigeneration systems using SOFC, biomass and solar energies", *Applied Thermal Engineering*, 104, 534-555.
- [48] Calise F., Macaluso A., Piacentino A., Vanoli L., (2017), "A novel hybrid polygeneration system supplying energy and desalinated water by renewable sources in Pantelleria Island", *Energy*, 137, 1086-1106.
- [49] Ranjbar F., Chitsaz A., Mahmoudi S. M. S., Khalilarya S., Rosen M. A., (2014), "Energy and exergy assessments of a novel trigeneration system based on a solid oxide fuel cell", *Energy Conversion and Management*, 87, 318-327.
- [50] Sahoo U., Kumar R., Pant P. C., Chaudhary R., (2017), "Development of an innovative polygeneration process in hybrid solar-biomass system for combined power, cooling and desalination", *Applied Thermal Engineering*, 120, 560-567.

- [51] Calise F., Cipollina A., d'Accadia M. D., Piacentino A., (2014), "A novel renewable polygeneration system for a small Mediterranean volcanic island for the combined production of energy and water: dynamic simulation and economic assessment", *Applied energy*, 135, 675-693.
- [52] Waseem S., Ratlamwala T. A. H., Salman Y., Bham A. A., (2019), "Geothermal and solar based mutligenerational system: A comparative analysis", *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (9), 5636-5652.
- [53] Ghasemi A., Heidarnejad P., Noorpoor A., (2018), "A novel solar-biomass based multi-generation energy system including water desalination and liquefaction of natural gas system: Thermodynamic and thermoeconomic optimization", *Journal of Cleaner Production*, 196, 424-437.
- [54] Inac S., Unverdi S. O., Midilli A., (2019), "A parametric study on thermodynamic performance of a SOFC oriented hybrid energy system", *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (20), 10043-10058.
- [55] Keshtkar M. M., Khani A. G., (2018), "Exergoeconomic analysis and optimization of a hybrid system based on multi-objective generation system in Iran: a case study", *Renewable Energy Focus*, 27, 1-13.
- [56] Bellos E., Vellios L., Theodosiou I. C., Tzivanidis C., (2018), "Investigation of a solar-biomass polygeneration system", *Energy Conversion and Management*, 173, 283-295.
- [57] Hacatoglu K., Dincer I., Rosen M. A., (2015), "Sustainability assessment of a hybrid energy system with hydrogen-based storage", *International Journal of Hydrogen Energy*, 40 (3), 1559-1568.
- [58] Stamford L., Azapagic A., (2011), "Sustainability indicators for the assessment of nuclear power", *Energy*, 36 (10), 6037-6057.
- [59] Afgan N. H., Carvalho M. G., (2008), "Energy system assessment with sustainability indicators", *Energy Policy*, 28, 603-12.
- [60] García C. A., Manzini F., Islas J. M., (2017), "Sustainability assessment of ethanol production from two crops in Mexico", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 1199-1207.
- [61] Afgan N. H., Carvalho M. G., (2008), "Sustainability assessment of a hybrid energy system", *Energy Policy*, 36 (8), 2903-2910.
- [62] Chatzimouratidis A. I., Pilavachi P. A., (2009), "Technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the Analytic Hierarchy Process", *Energy policy*, 37 (3), 778-787.
- [63] Evans A., Strezov V., Evans T. J., (2009), "Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies", *Renewable and sustainable energy reviews*, 13 (5), 1082-1088.

- [64] Škobalj P. D., Kijevčanin M. L., Jovanović M. P., Afgan N. H., Erić M. D, (2017), "Energy indicators impact in multi-criteria sustainability analyse of thermal power plant unit", *Thermal Science*, 21 (2), 1143-1151.
- [65] Maxim A., (2014), "Sustainability assessment of electricity generation technologies using weighted multi-criteria decision analysis", *Energy Policy*, 65, 284-297.
- [66] Sahabmanesh A., Saboohi Y., (2017), "Model of sustainable development of energy system, case of Hamedan", *Energy Policy*, 104, 66-79.
- [67] La Rovere E. L., Soares J. B., Oliveira L. B., Lauria T., (2010), "Sustainable expansion of electricity sector: Sustainability indicators as an instrument to support decision making", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (1), 422-429.
- [68] Midilli A., Dincer I., (2009), "Development of some exergetic parameters for PEM fuel cells for measuring environmental impact and sustainability", *International Journal of Hydrogen Energy*, 34 (9), 3858-3872.
- [69] İnaç S., (2009), "Yüksek basınçlı hidrojen gazı üreten bir sistemin termodinamik modellenmesi ve ekserjetik sürdürülebilirlik analizi", Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi.
- [70] Ozsaban M., Midilli A., (2016), "A parametric study on exergetic sustainability aspects of high-pressure hydrogen gas compression", *International Journal of Hydrogen Energy*, 41 (11), 5321-5334.
- [71] Midilli A., Inac S., Ozsaban M., (2017), "Exergetic sustainability indicators for a high pressure hydrogen production and storage system", *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (33), 21379-21391.
- [72] Aydın H., (2013), "Exergetic sustainability analysis of LM6000 gas turbine power plant with steam cycle", *Energy*, 57, 766-774.
- [73] Turan O., Aydın H., (2016), "Exergy-based sustainability analysis of a low-bypass turbofan engine: A case study for JT8D", *Energy Procedia*, 95, 499-506.
- [74] Midilli A., Kucuk H., Dincer I., (2012), "Environmental and sustainability aspects of a recirculating aquaculture system", *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 31 (4), 604-611.
- [75] Açikkalp E., (2015), "Exergetic sustainability evaluation of irreversible Carnot refrigerator", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 436, 311-320.
- [76] Aydın H., Turan Ö., Karakoç T. H., Midilli A., (2013), "Exergo-sustainability indicators of a turboprop aircraft for the phases of a flight", *Energy*, 58, 550-560.

- [77] Aydın H., Turan O., Karakoc T. H., Midilli A., (2015), "Exergetic sustainability indicators as a tool in commercial aircraft: a case study for a turbofan engine", *International Journal of Green Energy*, 12 (1), 28-40.
- [78] Kaya N., Turan Ö., Karakoç T. H., Midilli A., (2016), "Parametric study of exergetic sustainability performances of a high altitude long endurance unmanned air vehicle using hydrogen fuel", *International Journal of Hydrogen Energy*, 41 (19), 8323-8336.
- [79] Ndukwu M. C., Abam F. I., Manuwa S. I., Briggs T. A., (2017), "Exergetic performance indicators of a direct evaporative cooling system with different evaporative cooling pads", *International Journal of Ambient Energy*, 38 (7), 701-709.
- [80] Kaçar O., (2009), "Akarsu tipi bir hidroelektrik santralden güç üretiminin termodinamik modellenmesi". Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi.
- [81] Klein S. A., (2020) "Engineering Equation Solver (EES)", Single User Commercial V10.833, Lisans numarası: 5833, F-Chart Software, İnternet Sitesi: www.fChart.com.
- [82] Khalid F., Dincer I., Rosen M. A., (2015). "Energy and exergy analyses of a solar-biomass integrated cycle for multigeneration", *Solar Energy*, 112, 290-299.
- [83] Szargut J., (2005), "Exergy method: technical and ecological applications" WIT Press.
- [84] Yari M., Mehr A. S., Mahmoudi S. M. S., Santarelli M., (2016), "A comparative study of two SOFC based cogeneration systems fed by municipal solid waste by means of either the gasifier or digester", *Energy*, 114, 586-602.
- [85] Cengel Y. A., Boles M. A., (2011), "Thermodynamics: An Engineering Approach", 7th Edition, McGraw-Hill.
- [86] Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M. J., (1995), "Thermal design and optimization", 1st Edition, New York: John Wiley & Sons.
- [87] Szargut J., Styrylska T., (1964), "Approximate evaluation of the exergy of fuels", *Brennstoff Waerme Kraft*, 16 (12), 589-596.
- [88] Chitsaz A., Mahmoudi S. M. S., Rosen M. A., (2015), "Greenhouse gas emission and exergy analyses of an integrated trigeneration system driven by a solid oxide fuel cell", *Applied Thermal Engineering*, 86, 81-90.
- [89] Hedman B. A., Hampson A. C., (2011), "Fuel and [CO₂] emissions savings calculation methodology for combined heat and power (CHP) systems", *ASHRAE Transactions*, 117 (1), 961-974.

- [90] Akçay M., Özer S., (2012), "Denizli' de bir binanın farklı yakıt türlerine göre yakıt maliyeti ve CO₂ emisyon miktarının belirlenmesi", Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 4 (2), 59-69.
- [91] Aldrich R., Llauro F. X., Puig J., Mutjé P., Pèlach M. À., (2011), "Allocation of GHG emissions in combined heat and power systems: a new proposal for considering inefficiencies of the system", Journal of Cleaner Production, 19 (9-10), 1072-1079.
- [92] Lazzaretto A., Tsatsaronis G., (2006), "SPECO: a systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems", Energy, 31 (8-9), 1257-1289.
- [93] Ghaebi H., Parikhani T., Rostamzadeh H., (2017), "Energy, exergy and thermoeconomic analysis of a novel combined cooling and power system using low-temperature heat source and LNG cold energy recovery", Energy Conversion and Management, 150, 678-692.
- [94] Lee Y. D., Ahn K. Y., Morosuk T., Tsatsaronis G., (2018), "Exergetic and exergoeconomic evaluation of an SOFC-Engine hybrid power generation system", Energy, 145, 810-822.
- [95] Chitsaz A., Mehr A. S., Mahmoudi S. M. S., (2015), "Exergoeconomic analysis of a trigeneration system driven by a solid oxide fuel cell", Energy Conversion and Management, 106, 921-931.
- [96] Khanmohammadi S., Heidarnajad P., Javani N., Ganjehsarabi H., (2017), "Exergoeconomic analysis and multi objective optimization of a solar based integrated energy system for hydrogen production," International Journal of Hydrogen Energy, 42 (33), 21443-21453.
- [97] Aali A., Pourmahmoud N., Zare V., (2017), "Exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of a novel combined flash-binary cycle for Sabalan geothermal power plant in Iran", Energy Conversion and Management, 143, 377-390.
- [98] Ashouri M., Ahmadi M. H., Pourkiaei S. M., Astaraei F. R., Ghasempour R., Ming T., Hemati J. H., (2018), "Exergy and exergo-economic analysis and optimization of a solar double pressure organic Rankine cycle", Thermal Science and Engineering Progress, 6, 72-86.
- [99] Zare V., Mahmoudi S. M. S., Yari M., (2015), "On the exergoeconomic assessment of employing Kalina cycle for GT-MHR waste heat utilization", Energy Conversion and Management, 90, 364-374.
- [100] Sadeghi M., Chitsaz A., Mahmoudi S. M. S., Rosen M. A., (2015), "Thermoeconomic optimization using an evolutionary algorithm of a trigeneration system driven by a solid oxide fuel cell", Energy, 89, 191-204.

- [101] Al-Sulaiman F. A., Hamdullahpur F., Dincer I., (2012), "Performance assessment of a novel system using parabolic trough solar collectors for combined cooling, heating, and power production", *Renewable Energy*, 48, 161-172.
- [102] Zhang H. L., Baeyens J., Degreè J., Cacères G., (2013), "Concentrated solar power plants: Review and design methodology", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 466-481.
- [103] Mwesigye A., Yilmaz İ. H., Meyer J. P., (2018), "Numerical analysis of the thermal and thermodynamic performance of a parabolic trough solar collector using SWCNTs-Therminol® VP-1 nanofluid", *Renewable Energy*, 119, 844-862.
- [104] Al-Sulaiman F. A., (2013), "Energy and sizing analyses of parabolic trough solar collector integrated with steam and binary vapor cycles", *Energy*, 58, 561-570.
- [105] Abid M., Ratlamwala T. A., Atikol U., (2017), "Solar assisted multi-generation system using nanofluids: A comparative analysis", *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(33), 21429-21442.
- [106] Duffie J. A., Beckman W. A., (2013), "Solar Engineering of Thermal Processes", John Wiley & Sons Inc.
- [107] Kalogirou S. A. (2009), "Solar energy engineering: processes and systems", London: Elsevier Inc.
- [108] Gadalla M., Al Hammadi A. (2014), "Thermodynamic Analysis of an Integrated Solar-Based Cooling System in UAE", *Power Conference*, 1-16, Baltimore, Maryland, USA, July 28-31.
- [109] Hacetoglu K., Dincer I., Rosen M. A., (2011), "Exergy analysis of a hybrid solar hydrogen system with activated carbon storage", *International Journal of Hydrogen Energy*, 36 (5), 3273-3282.
- [110] Gil A., Medrano M., Martorell I., Lázaro A., Dolado P., Zalba B., Cabeza, L. F., (2010), "State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (1), 31-55.
- [111] Menéndez R. P., Martínez J. Á., Prieto M. J., Barcia L. Á., Sánchez J. M. M., (2014), "A novel modeling of molten-salt heat storage systems in thermal solar power plants", *Energies*, 7 (10), 6721-6740.
- [112] Oró E., Gil A., De Gracia A., Boer D., Cabeza L. F., (2012), "Comparative life cycle assessment of thermal energy storage systems for solar power plants", *Renewable Energy*, 44, 166-173.

- [113] Kelly M. J., Hlava P. F., Brosseau D. A., (2004), "Testing thermocline filler materials and molten-salt heat transfer fluids for thermal energy storage systems used in parabolic trough solar power plants" Technical Report No: SAND2004-3207, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico.
- [114] Li X., Wang Z., Xu E., Ma L., Xu L., Zhao D., (2019), "Dynamically Coupled Operation of Two-Tank Indirect TES and Steam Generation System", *Energies*, 12 (9), 1720.
- [115] Fernandes D., Pitié F., Cáceres G., Baeyens J., (2012), "Thermal energy storage: How previous findings determine current research priorities", *Energy*, 39 (1), 246-257.
- [116] Al-Sulaiman F. A., Dincer I., Hamdullahpur F., (2011), "Exergy modeling of a new solar driven trigeneration system", *Solar Energy*, 85 (9), 2228-2243.
- [117] Alashkar A., Gadalla M., (2017), "Thermo-economic analysis of an integrated solar power generation system using nanofluids", *Applied Energy*, 191, 469-491.
- [118] Turchi C., Mehos M., Ho C. K., Kolb G. J., (2010), "Current and future costs for parabolic trough and power tower systems in the US market" Technical Report No: NREL/CP-5500-49303, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, USA.
- [119] Ghaebi H., Parikhani T., Rostamzadeh H., (2018), "A novel trigeneration system using geothermal heat source and liquefied natural gas cold energy recovery: Energy, exergy and exergoeconomic analysis", *Renewable Energy*, 119, 513-527.
- [120] Fettaka S., Thibault J., Gupta Y. (2013), "Design of shell-and-tube heat exchangers using multiobjective optimization", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 60, 343-354.
- [121] Basu P. (2006), "Combustion and gasification in fluidized beds", Taylor & Francis Group, LLC.
- [122] Soltani S., Mahmoudi S. M. S., Yari M., Morosuk T., Rosen M. A., Zare V., (2013), "A comparative exergoeconomic analysis of two biomass and co-firing combined power plants", *Energy Conversion and Management*, 76, 83-91.
- [123] Moharamian A., Soltani S., Rosen M. A., Mahmoudi S. M. S., Morosuk T. (2017), "A comparative thermoeconomic evaluation of three biomass and biomass-natural gas fired combined cycles using organic Rankine cycles", *Journal of Cleaner Production*, 161, 524-544.
- [124] Yari M., (2010), "Exergetic analysis of various types of geothermal power plants", *Renewable Energy*, 35 (1), 112-121.

- [125] Kanoglu M., Bolatturk A., (2008), "Performance and parametric investigation of a binary geothermal power plant by exergy", *Renewable Energy*, 33 (11), 2366-2374.
- [126] Walraven D., Laenen B., D'haeseleer W., (2013), "Comparison of thermodynamic cycles for power production from low-temperature geothermal heat sources", *Energy Conversion and Management*, 66, 220-233.
- [127] Greenhut A. D., (2009). "Modeling and analysis of hybrid geothermal-solar thermal energy conversion systems", Master's Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- [128] Wan P., Gong L., Bai Z., (2019), "Thermodynamic analysis of a geothermal-solar flash-binary hybrid power generation system", *Energy Procedia*, 158, 3-8.
- [129] Leveni M., Manfrida G., Cozzolino R., Mendecka B., (2019), "Energy and exergy analysis of cold and power production from the geothermal reservoir of Torre Alfina", *Energy*, 180, 807-818.
- [130] Coskun A., Bolatturk A., Kanoglu M. (2014), "Thermodynamic and economic analysis and optimization of power cycles for a medium temperature geothermal resource", *Energy Conversion and Management*, 78, 39-49.
- [131] Mosaffa A. H., Mokarram N. H., Farshi L. G., (2017), "Thermoeconomic analysis of a new combination of ammonia/water power generation cycle with GT-MHR cycle and LNG cryogenic exergy", *Applied Thermal Engineering*, 124, 1343-1353.
- [132] Panahi Z. F., Bozorgan N., (2011), "The energy and exergy analysis of single effect absorption chiller", *Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, 4 (4), 19-25.
- [133] Kılıc M., Kaynaklı O., (2007), "Second law-based thermodynamic analysis of water-lithium bromide absorption refrigeration system", *Energy*, 32 (8), 1505-1512.
- [134] Akrami E., Chitsaz A., Nami H., Mahmoudi S. M. S., (2017), "Energetic and exergoeconomic assessment of a multi-generation energy system based on indirect use of geothermal energy", *Energy*, 124, 625-639.
- [135] Nijaguna B. T., (2006), "Biogas technology", New Age International Publishers.
- [136] Elizalde-Blancas F., Celik I. B., Rangel-Hernandez V., Hernandez-Guerrero A., Riesco-Avila J. M., (2013), "Numerical modeling of SOFCs operating on biogas from biodigesters," *International Journal of Hydrogen Energy*, 38 (1), 377-384.
- [137] Sallustio L., (2013), "Energy recovery from biomass: Process simulation and second law analysis of an anaerobic digester coupled with an internal combustion engine", *International Journal of Thermodynamics*, 16 (3), 145-154.

- [138] Wellinger A., Murphy J. D., Baxter D., (2013), "The biogas handbook: science, production and applications", Woodhead Publishing Limited.
- [139] Mirmasoumi S., Saray R. K., Ebrahimi S., (2018), "Evaluation of thermal pretreatment and digestion temperature rise in a biogas fueled combined cooling, heat, and power system using exergo-economic analysis", *Energy Conversion and Management*, 163, 219-238.
- [140] Baghernejad A., Yaghoubi M., Jafarpur K., (2015), "Optimum power performance of a new integrated SOFC-trigeneration system by multi-objective exergoeconomic optimization", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 73, 899-912.
- [141] Colpan C. O., Dincer I., Hamdullahpur F., (2007), "Thermodynamic modeling of direct internal reforming solid oxide fuel cells operating with syngas", *International Journal of Hydrogen Energy*, 32 (7), 787-795.
- [142] Ghaffarpour Z., Mahmoudi M., Mosaffa A. H., Farshi L. G., (2018). "Thermoeconomic assessment of a novel integrated biomass based power generation system including gas turbine cycle, solid oxide fuel cell and Rankine cycle", *Energy Conversion and Management*, 161, 1-12.
- [143] Ozcan H., Dincer I., (2015), "Performance evaluation of an SOFC based trigeneration system using various gaseous fuels from biomass gasification", *International Journal of Hydrogen Energy*, 40 (24), 7798-7807.
- [144] Hosseinpour J., Chitsaz A., Eisavi B., Yari M., (2018), "Investigation on performance of an integrated SOFC-Goswami system using wood gasification", *Energy*, 148, 614-628.
- [145] Sucipta M., Kimijima S., Suzuki K., (2007), "Performance analysis of the SOFC–MGT hybrid system with gasified biomass fuel", *Journal of Power Sources*, 174 (1), 124-135.
- [146] Dokamaingam P., Assabumrungrat S., Soottitantawat A., Sramala I., Laosiripojana N., (2009), "Modeling of SOFC with indirect internal reforming operation: Comparison of conventional packed-bed and catalytic coated-wall internal reformer", *International Journal of Hydrogen Energy*, 34 (1), 410-421.
- [147] Chan S. H., Ho H. K., Tian Y., (2002), "Modelling of simple hybrid solid oxide fuel cell and gas turbine power plant", *Journal of Power Sources*, 109 (1), 111-120.
- [148] Khani L., Mahmoudi S. M. S., Chitsaz A., Rosen M. A., (2016), "Energy and exergoeconomic evaluation of a new power/cooling cogeneration system based on a solid oxide fuel cell", *Energy*, 94, 64-77.
- [149] Kim J. W., Virkar A. V., Fung K. Z., Mehta K., Singhal S. C., (1999), "Polarization effects in intermediate temperature, anode-supported solid oxide fuel cells", *Journal of the Electrochemical Society*, 146 (1), 69-78.

- [150] Clarke R. E., Giddey S., Ciacchi F. T., Badwal S. P. S., Paul B., Andrews J., (2009), "Direct coupling of an electrolyser to a solar PV system for generating hydrogen", International Journal of Hydrogen Energy, 34 (6), 2531-2542.
- [151] Akrami E., Nemati A., Nami H., Ranjbar F., (2018), "Exergy and exergoeconomic assessment of hydrogen and cooling production from concentrated PVT equipped with PEM electrolyzer and LiBr-H₂O absorption chiller", International Journal of Hydrogen Energy, 43 (2), 622-633.
- [152] Akkuş İ., Akıllı H., Ceyhan S., Dilemre A., Tekin Z., (2005), "Türkiye jeotermal kaynakları envanteri", Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.
- [153] Dağıstan H. (2013), "Türkiye Jeotermal Kaynak Aramaları, Kullanımı ve Sürdürülebilirliğinin Sağlanması", MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni (15), 1-10.
- [154] Zhao Y., Wang J., (2016), "Exergoeconomic analysis and optimization of a flash-binary geothermal power system", Applied Energy, 179, 159-170.
- [155] Laoun B., (2007), "Thermodynamics aspect of high pressure hydrogen production by water electrolysis", Revue Des Energies Renouvelables, 10 (3), 435-444.
- [156] Web 1, (2020), <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx>, (Erişim Tarihi: 01/04/2020).
- [157] Web 2 , (2020), <http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/pages/3.aspx>, (Erişim Tarihi: 01/04/2020).
- [158] Akan B., (2002), "Afyon Ömer-Gecek jeotermal sisteminin modellenmesi", Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 26 (2), 31-51.

ÖZGEÇMİŞ

Selçuk İNAÇ 1985 yılında Giresun’da doğdu. İlköğretim, ortaöğretim ve liseyi Giresun’da tamamladı. 2007 yılında Niğde Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü’nde lisans eğitimini bölüm birincisi olarak tamamladı. Aynı üniversitede 2009 yılında yüksek lisans eğitimini bitirdi. Özel sektörde çeşitli firmalarda görev yaptıktan sonra 2011-2015 yılları arasında Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi’nde Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği Bölümü’nde Öğretim Görevlisi olarak görev yaptı. 2015 yılında TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM), Enerji Enstitüsü’nde Araştırmacı olarak çalışmaya başladı ve aynı yıl içinde Gebze Teknik Üniversitesi (GTÜ), Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda doktora eğitimine başladı. Çalışma alanları yenilenebilir enerji sistemleri, ısıtma-soğutma sistemleri, enerji verimliliği, enerji, ekserji ve sürdürülebilirlik analizleri, hidrojen teknolojileri ve yakıt hücreleri olarak sıralanabilir.

EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Inac S., Unverdi S. O., Midilli A., (2019), “A parametric study on thermodynamic performance of a SOFC oriented hybrid energy system”, International Journal of Hydrogen Energy, 44, 10043-10058,

Inac S., Unverdi S. O., Midilli A., (2018), “Energetic and Exergetic Performances of a SOFC Assisted Hybrid Energy System at Several Operation Modes”, 9th International Conference on Hydrogen Production (ICH2P-9), Croatia, 16-19 July.

Inac S., Unverdi S. O., Midilli A., (2019), “Global warming aspect of a digester integrated SOFC system”, 8th Global Conference on Global Warming (GCGW-2019), Doha, Qatar, 22-25 April.

Inac S., Unverdi S. O., Midilli A., (2019), “Exergetic Sustainability Analysis of a Geothermal Energy and Biodigester Integrated SOFC System”, 10th International Conference on Hydrogen Production (ICH2P-10), Cluj-Napoca, România, 15-17 May.

Inac S., Unverdi S. O., Midilli A., (2019), “Parametric investigation of biogas production via geothermal based biodigester system”, 4th International Hydrogen Technologies Congress (IHTEC-4), Edirne, Turkey, 20-23 June.